



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS



VITOR GOMES SILVA

CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DE UMA ARGILA DO VALE DO RIO
DOCE - MG PARA FABRICAÇÃO DE CERÂMICA VERMELHA

OURO PRETO
2021

VITOR GOMES SILVA

CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DE UMA ARGILA DO VALE DO RIO
DOCE - MG PARA FABRICAÇÃO DE CERÂMICA VERMELHA

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Departamento de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito para obtenção do título de bacharel em Engenharia de Minas.

Área de concentração: Engenharias.

Orientadora: Prof. Dr^a Érica Linhares Reis
Coorientadora: Msc. Mariana Caroline
Andrade Silva

OURO PRETO
2021

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

S586c Silva, Vitor Gomes.
Caracterização tecnológica de uma argila do Vale do Rio Doce - MG
para fabricação de cerâmica vermelha . [manuscrito] / Vitor Gomes Silva.
- 2021.
60 f.: il.: color., gráf., tab., mapa.

Orientadora: Profa. Dra. Érica Linhares Reis.
Coorientadora: Ma. Mariana Caroline Andrade Silva.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola
de Minas. Graduação em Engenharia de Minas .

1. Caracterização tecnológica. 2. Argila. 3. Cerâmica vermelha. I. Reis,
Érica Linhares. II. Silva, Mariana Caroline Andrade. III. Universidade
Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 553.611

Bibliotecário(a) Responsável: Sione Galvão Rodrigues - CRB6 / 2526



ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Aos vinte e sete dias do mês de agosto de 2021, às 13h30min, foi instalada a sessão pública remota para a defesa de Trabalho de Conclusão de Curso do discente **Vitor Gomes Silva**, intitulado: "**CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DE UMA ARGILA DO VALE DO RIO DOCE - MG PARA FABRICAÇÃO DE CERÂMICA VERMELHA**", perante comissão avaliadora constituída pela orientadora do trabalho, Prof.^a Dr.^a Érica Linhares Reis, M.Sc. Mariana Caroline Andrade Silva, Co-orientadora e presidente da comissão avaliadora, Prof.^a M. Sc. Tiany Guedes Cota e Eng.^a de Minas Paôlla de Carvalho Barbosa. A sessão foi realizada com a participação de todos os membros por meio de videoconferência, com base no regulamento do curso e nas normas que regem as sessões de defesa de TCC. Inicialmente, a presidente da comissão examinadora concedeu ao discente 20 (vinte) minutos para apresentação do seu trabalho. Terminada a exposição, o presidente concedeu, a cada membro, um tempo máximo de 15 (quinze) minutos para perguntas e respostas ao candidato sobre o conteúdo do trabalho, na seguinte ordem: primeiro a Prof.^a M. Sc. Tiany Guedes Cota, segundo, a Eng.^a de Minas Paôlla de Carvalho Barbosa e em último, a M.Sc. Mariana Caroline Andrade Silva. Dando continuidade, ainda de acordo com as normas que regem a sessão, a presidente solicitou ao discente e aos espectadores que se retirassem da sessão de videoconferência para que a comissão avaliadora procedesse à análise e decisão. Após a reconexão do discente e demais espectadores, anunciou-se, publicamente, que o discente foi **APROVADO** por unanimidade, com a nota **10 (dez)**, sob a condição de que a versão definitiva do trabalho incorpore todas as exigências da comissão, devendo o exemplar final ser entregue no prazo máximo de 15 (quinze) dias. Para constar, foi lavrada a presente ata que, após aprovada, foi assinada pela presidente da comissão. O discente, por sua vez, encaminhará para o Repositório Institucional da UFOP uma versão final, contemplando todas as recomendações apresentadas pelos avaliadores. Ouro Preto, 27 de agosto de 2021.

Presidente: M.Sc. Mariana Caroline Andrade Silva

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Érica Linhares Reis

Membro: Prof.^a M. Sc. Tiany Guedes Cota

Membro: Eng.^a de Minas Paôlla de Carvalho Barbosa

Discente: Vitor Gomes Silva

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Elenir e Carlos, e à minha irmã, Bárbara, por todo amor, ensinamentos, incentivo e apoio ao longo de minha vida.

À Rafaella, pelo carinho, pelos artistas e filmes que me apresentou, pelas viagens e carnavais, e por sempre estar ao meu lado nos bons e nos maus momentos.

À minha avó, Bárbara (*in memoriam*), e à minha tia, Angelita, pelo incentivo, carinho, e por tudo que fizeram por mim.

Aos meus primos Erick, Gustavo, João e Marcus, e ao meu amigo Vitor Aparecido, que sempre estiveram ao meu lado, pela amizade incondicional, pelo apoio e incentivo demonstrado ao longo de toda a minha vida.

Aos meus amigos do curso, em especial ao Carlos Eduardo, Carolina Mendonça, Lucas Dimas, Marcelo Ferreira, Miriam Gomes e Valéria Lima, pela amizade e companheirismo, por terem compartilhado comigo tantos momentos e aprendizados no decorrer desta trajetória.

À professora Érica, por ter sido minha orientadora, por todas as oportunidades que me proporcionou ao longo da graduação, pelo apoio e aprendizados.

À Mariana, pelo incentivo e confiança, e por ter sido minha coorientadora, tendo desempenhado tal função com dedicação, paciência e amizade.

Às integrantes da banca examinadora, Eng^a de Minas Paólla de Carvalho Barbosa e Msc. Tiany Guedes Cota, pelo interesse e disponibilidade.

Ao CNPq e à CPRM, pelo fornecimento de dados e materiais que foram fundamentais para o desenvolvimento da pesquisa que possibilitou a realização deste trabalho.

À Universidade Federal de Ouro Preto e todos os seus profissionais, por terem proporcionado um ensino gratuito e de qualidade.

RESUMO

O termo argila refere-se aos materiais de ocorrência natural compostos por minerais finamente granulados, que adquirem propriedades plásticas quando misturados com uma certa quantidade de água e que se tornam rígidos após secagem ou queima. Em vista disto, elas são consideradas as mais importantes matérias-primas da indústria cerâmica, setor que contribui significativamente para a economia. Na mesorregião do Vale do Rio Doce, localizada no estado de Minas Gerais, se encontram depósitos de argila que provavelmente podem fomentar a indústria cerâmica da região. Nesse contexto, no laboratório de Materiais Cerâmicos do Departamento de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto foi realizada a preparação de uma amostra de uma argila proveniente da localidade de Serraria, um distrito do município de Periquito em Minas Gerais, seguida de ensaios de caracterização, como a determinação da umidade, dos limites de Atterberg, composição mineralógica, densidade e distribuição de tamanhos de partículas, além da análise termogravimétrica. Foram produzidos corpos de prova variando as pressões de compactação (28 e 35 MPa) e temperatura de queima (950 e 1100 °C). Por fim, foram realizados ensaios tecnológicos para avaliação macroscópica, determinação da retração linear de secagem e de queima, absorção de água e resistência à compressão uniaxial dos corpos cerâmicos confeccionados com a amostra em questão. Mineralogicamente, a amostra é constituída por caulinita (91,6%), quartzo (3,7%), heulandita (2,7%), gibbsita (1,8%) e muscovita (0,2%). Com base na mineralogia, estima-se que os principais elementos químicos presentes sejam SiO₂, Al₂O₃ e CaO. A densidade relativa de 2,42 g/cm³ se enquadra dentro da faixa de valores esperados, de acordo com a composição mineralógica. Cerca de 80% das partículas têm diâmetro inferior a 22,31 µm e 50% possuem diâmetro menor que 7,53 µm. As perdas de massa apontadas pela análise termogravimétrica estão em conformidade com a literatura. Os corpos cerâmicos confeccionados apresentaram superfícies regulares e coloração homogênea em tom alaranjado-avermelhado. Em algumas exceções, os corpos de prova apresentaram defeitos estruturais, fator que não implicou na perda de qualidade e não influenciou os resultados dos ensaios tecnológicos. Tais ensaios indicaram que os corpos de prova conformados a 25 e a 35 MPa e queimados a 1100 °C atendem aos critérios exigidos para fabricação de cerâmica vermelha, apresentando características adequadas para confecção de telhas, tijolos maciços, blocos de vedação e blocos estruturais.

Palavras-chave: Argila; Cerâmica vermelha; Caracterização.

ABSTRACT

The term clay refers to naturally occurring materials composed of fine-grained minerals, which acquire plastic properties when mixed with a certain amount of water and which become rigid after drying or firing. Hence, they are considered the most important raw materials for the ceramic industry, a sector that contributes significantly to the economy. In the mesoregion of the Vale do Rio Doce, located in the state of Minas Gerais, clays deposits are found that can probably stimulate the ceramic industry in the region. In this context, the preparation of a clay sample from the locality of Serraria, a district in the municipality of Periquito in Minas Gerais, was performed in the laboratory of Ceramic Materials of the Department of Mining Engineering of the Federal University of Ouro Preto, followed by characterization tests, such as the determination of moisture, Atterberg limits, mineralogical composition, density and particle size distribution, besides thermogravimetric analysis. Specimens were produced varying compaction pressures (28 and 35 MPa) and firing temperatures (950 and 1100 °C). Lastly, technological tests were conducted for macroscopic evaluation, determination of the linear drying and firing shrinkage, water absorption and uniaxial compressive strength of the ceramic bricks made with the given specimen. In terms of mineralogy, the sample is composed of kaolinite (91.6%), quartz (3.7%), heulandite (2.7%), gibbsite (1.8%) and muscovite (0.2%). Based on the mineralogy, the main chemical elements present are estimated to be SiO₂, Al₂O₃ and CaO. The relative density of 2.42 g/cm³ lies within the expected range of values, according to the mineralogical composition. About 80% of the particles have less than 22.31 μm in diameter and 50% have less than 7.53 μm. The mass losses indicated by the thermogravimetric analysis are in accordance with the literature. The ceramic bricks presented regular surface and homogeneous reddish-orange coloration. In some exceptional cases, the specimens presented structural defects, a factor that did not imply a loss in quality and had no influence on the results of the technological tests. Such tests have indicated that the specimens conformed at 25 and 35 MPa and fired at 1100 °C comply with the criteria required for the manufacture of red ceramic, with appropriate characteristics for the production of roof tiles, solid bricks, sealing blocks and structural blocks.

Key-words: Clay; Red ceramics; Characterization.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Localização da Mesorregião do Vale do Rio Doce no estado de Minas Gerais..	14
Figura 3.2 – Formação geológica do município de Periquito	16
Figura 3.3 – Distribuição dos principais municípios produtoras de cerâmicas vermelhas em Minas Gerais	18
Figura 3.4 – Esquema simplificado do arranjo cristalino típico dos argilominerais.....	20
Figura 3.5 – Estados e limites de consistência	25
Figura 3.6 – Distribuição de água durante a secagem em um corpo cerâmico	28
Figura 4.1 – Fluxograma das atividades propostas	31
Figura 4.2 – Pilhas de homogeneização	32
Figura 4.3 – Quarteador Jones.....	32
Figura 4.4 – Picnômetro de 25 mL.....	34
Figura 4.5 – Fluxograma relativo as etapas de confecção dos corpos cerâmicos	35
Figura 4.6 – Molde prismático	36
Figura 4.7 – Prensa SoloCap C1100 toneladas-força.....	37
Figura 4.8 – Forno Linn Elektro Therm CC405.....	38
Figura 5.1 – Análise granulométrica da amostra de argila.....	42
Figura 5.2 – Difratoograma da amostra de argila.....	43
Figura 5.3 – Curva termogravimétrica da amostra de argila.....	44
Figura 5.4 – Corpos de prova após as etapas de a) conformação, b) secagem e c) queima.....	47
Figura 5.5 – Todos os corpos de prova após a queima	47
Figura 5.6 – Defeitos detectados nos corpos de prova CP11 e CP12	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Composição granulométrica dos produtos de cerâmica vermelha de acordo com o Diagrama de Winkler	24
Tabela 3.2 – Classificação dos solos de acordo com o seu índice de plasticidade	25
Tabela 3.3 – Intervalo de valores recomendados de LL, LP e IP de argilas utilizadas para a fabricação de cerâmica vermelha	25
Tabela 3.4 – Transformações físicas e químicas ocorridas durante a queima de um corpo cerâmico	29
Tabela 3.5 – Parâmetros para blocos e tijolos de cerâmica vermelha	30
Tabela 4.1 – Condições de conformação dos corpos de prova (CP)	36
Tabela 5.1 – Limites de Atterberg	46
Tabela 5.2 – Detecção de defeitos nos corpos de prova após etapas de conformação, secagem e queima	48
Tabela 5.3 – Retração linear de secagem.	49
Tabela 5.4 – Retração linear de queima	49
Tabela 5.5 – Massa específica aparente	50
Tabela 5.6 – Absorção de água	51
Tabela 5.7 – Resistência à compressão uniaxial	52
Tabela A.1 – Umidade dos corpos de prova	60

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 4.1 – Densidade aparente.....	34
Equação 4.2 – Retração linear de secagem	39
Equação 4.3 – Retração linear de queima	39
Equação 4.4 – Massa específica aparente	39
Equação 4.5 – Absorção de água	40
Equação 4.6 – Resistência à compressão uniaxial	41

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AA	Absorção de água
ABCERAM	Associação Brasileira de Cerâmica
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CIEMG	Centro Industrial e Empresarial de Minas Gerais
CP	Corpo de prova
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
DEMIN	Departamento de Engenharia de Minas
DEREM	Departamento de Recursos Minerais
IDH-M	Índice de Desenvolvimento Humano Municipal
IP	Índice de plasticidade
IPT	Instituto de Pesquisas Técnicas
LL	Limite de liquidez
LP	Limite de plasticidade
MEA	Massa específica aparente
NBR	Norma Brasileira
PIB	Produto Interno Bruto
RCU	Resistência à compressão uniaxial
RLQ	Retração linear de queima
RLS	Retração linear de secagem
RMVA	Região Metropolitana do Vale do Aço
UFOP	Universidade Federal de Ouro Preto
USGS	<i>United States Geological Survey</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	OBJETIVOS	13
2.1	OBJETIVO GERAL	13
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
3.1	ASPECTOS ECONÔMICOS DA MESORREGIÃO DO VALE DO RIO DOCE. 14	
3.2	GEOLOGIA DO MUNICÍPIO DE PERIQUITO (MG).....	15
3.3	MATERIAIS CERÂMICOS	16
3.4	CERÂMICA VERMELHA.....	17
3.4.1	Produção de cerâmica vermelha no estado de Minas Gerais	17
3.4.2	Matérias-primas	18
3.4.2.1	Argila.....	19
3.4.2.1.1	<i>Argilas comuns (Common clays)</i>	20
3.4.2.1.2	<i>Argilas plásticas (Ball clays)</i>	21
3.4.2.1.3	<i>Caulim (China clays)</i>	21
3.4.2.2	Sílica, feldspato e outros elementos.....	22
3.5	PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE CERÂMICA VERMELHA.....	23
3.5.1	Preparação das matérias-primas	23
3.5.2	Preparação da massa e conformação das peças cerâmicas	26
3.3.5.3	Secagem.....	27
3.3.5.4	Queima.....	28
3.3.5.5	Normas e limitações técnicas.....	29
4	MATERIAIS E MÉTODOS	31
4.1	CARACTERIZAÇÃO DA ARGILA.....	31
4.1.1	Análise granulométrica	32
4.1.2	Análise mineralógica	33

4.1.3	Análise termogravimétrica	33
4.1.4	Determinação da densidade	33
4.1.5	Limites de Atterberg	34
4.2	CONFECÇÃO DOS CORPOS DE PROVA	35
4.2.1	Preparação da massa cerâmica e conformação dos corpos cerâmicos	36
4.2.2	Secagem	37
4.2.3	Queima	37
4.3	ENSAIOS TECNOLÓGICOS PARA CERÂMICA.....	38
4.3.1	Avaliação macroscópica	38
4.3.2	Retração linear de secagem (RLS) e de queima (RLQ)	39
4.3.3	Massa específica aparente (MEA)	39
4.3.4	Absorção de água (AA)	40
4.3.5	Resistência à compressão uniaxial (RCU)	40
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	42
5.1	CARACTERIZAÇÃO DA ARGILA.....	42
5.1.1	Análise granulométrica	42
5.1.2	Análise mineralógica	43
5.1.3	Análise termogravimétrica	44
5.1.4	Determinação da densidade	45
5.1.5	Limites de Atterberg	45
5.2	CONFECÇÃO DOS CORPOS DE PROVA CERÂMICOS	46
5.3	ENSAIOS TECNOLÓGICOS PARA CERÂMICA.....	47
5.3.1	Avaliação macroscópica	47
5.3.2	Retração linear de secagem (RLS)	48
5.3.3	Retração linear de queima (RLQ)	49
5.3.4	Massa específica aparente (MEA)	50
5.3.5	Absorção de água (AA)	50

5.3.6	Resistência à compressão uniaxial (RCU)	51
6	CONCLUSÕES	53
7	SUGESTÕES	55
	REFERÊNCIAS	56
	APÊNDICE	60

1 INTRODUÇÃO

A mesorregião do Vale do Rio Doce possui economia centrada nas atividades de metalurgia do aço e produção de celulose. Entretanto, cerca de 90% dos municípios que formam a região tem como base econômica os setores primário e terciário. Esse baixo dinamismo econômico se deve à concentração das atividades econômicas em apenas duas cadeias produtivas mais relevantes em termos nacionais, mas que são pouco adensadas na região (NOGUEIRA, 2019).

Na região do Vale do Rio Doce se encontram depósitos de argila que provavelmente podem fomentar a implantação da indústria cerâmica. Este setor, que contribui significativamente para a economia, gera milhares de empregos diretos e indiretos, além de fornecer insumos para a indústria de construção civil, tendo as argilas como sua principal matéria-prima.

Lima e Moreno (2009) apontam que grande parte dos fabricantes industriais de produtos de cerâmica vermelha (ou estrutural) trabalham de forma rudimentar, empregando métodos empíricos para dosagem e homogeneização das massas cerâmicas, resultando em produtos sem constância nas suas características por falta de controle, principalmente, das matérias-primas.

A demanda por produtos com qualidade controlada e a necessidade de reduzir os custos operacionais de fabricação vêm estimulando a realização de pesquisas para caracterizar argilas e seus depósitos, com o objetivo de contribuir para o melhor aproveitamento econômico dessas matérias-primas na indústria cerâmica.

Neste contexto, este trabalho se propõe a realizar ensaios para caracterizar uma argila proveniente da localidade de Serraria, um distrito do município de Periquito, localizado na mesorregião do Vale do Rio Doce, Minas Gerais, e avaliar a viabilidade de sua utilização na fabricação de cerâmica vermelha.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Caracterizar uma argila proveniente de Serraria, distrito do município de Periquito – MG, e confeccionar corpos de prova cerâmicos com a finalidade de avaliar sua possível aplicação na produção de cerâmica vermelha.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

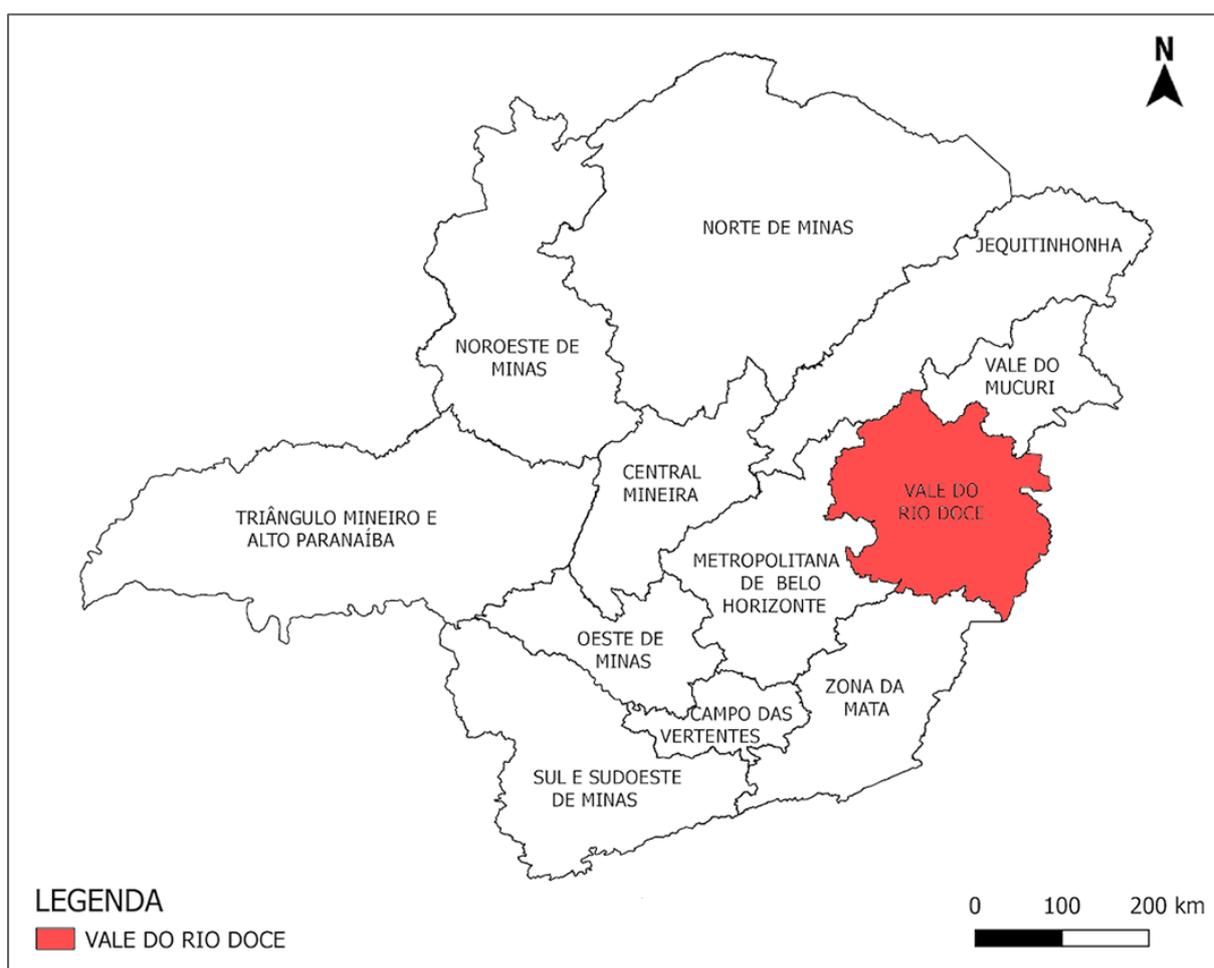
- a) Caracterizar a amostra de argila através de ensaios de análise granulométrica, mineralógica e termogravimétrica;
- b) Determinar os limites de liquidez e de plasticidade, o índice de plasticidade, a massa específica e o índice de umidade da amostra de argila;
- c) Confeccionar corpos de prova variando a pressão de compactação (28 MPa e 35 MPa) e a temperatura de queima (950 °C e 1100 °C);
- d) Avaliar macroscopicamente os corpos de prova e realizar os ensaios tecnológicos de retração linear de secagem e queima, compressão uniaxial, absorção de água e massa específica aparente;
- e) Investigar a influência exercida pelas variáveis pressão de compactação e temperatura de queima sobre os parâmetros analisados: avaliação macroscópica, retração linear, absorção de água, massa específica aparente e resistência à compressão uniaxial;
- f) Avaliar possível aplicação da argila estudada para fabricação de cerâmica vermelha.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 ASPECTOS ECONÔMICOS DA MESORREGIÃO DO VALE DO RIO DOCE

A mesorregião do Vale do Rio Doce é uma das doze mesorregiões do estado de Minas Gerais (Figura 3.1.). É formada por 102 municípios que ocupam uma área de 41.809 km², cerca de 7,12% do território mineiro. No ano 2010 possuía um Índice de Desenvolvimento Humano Municipal (IDH-M) abaixo da média do estado, sendo apenas o nono maior (IBGE, 2010).

Figura 3.1 – Localização da Mesorregião do Vale do Rio Doce no estado de Minas Gerais



De acordo com dados do Banco Central do Brasil, no ano de 2010 a mesorregião teve 6% de participação no Produto Interno Bruto (PIB) do estado. Esse percentual é inferior ao de sua representatividade demográfica (8%), resultando em uma renda per capita média inferior à média de Minas Gerais, que, por sua vez, é inferior à média brasileira.

Nogueira (2019) aponta que cerca de 66,66% do PIB total da mesorregião do Vale do Rio Doce é gerado nos municípios de Belo Oriente, Governador Valadares e nos quatro municípios pertencentes à Região Metropolitana do Vale do Aço (RMVA): Ipatinga, Coronel Fabriciano, Timóteo e Santana do Paraíso. Esses seis municípios se destacam como importantes entrepostos comerciais da região, tendo suas economias centradas nas atividades de metalurgia do aço, com unidades siderúrgicas da Usiminas (em Ipatinga) e da Aperam *South America* (em Timóteo), e produção de celulose, com uma fábrica da Cenibra (em Belo Oriente).

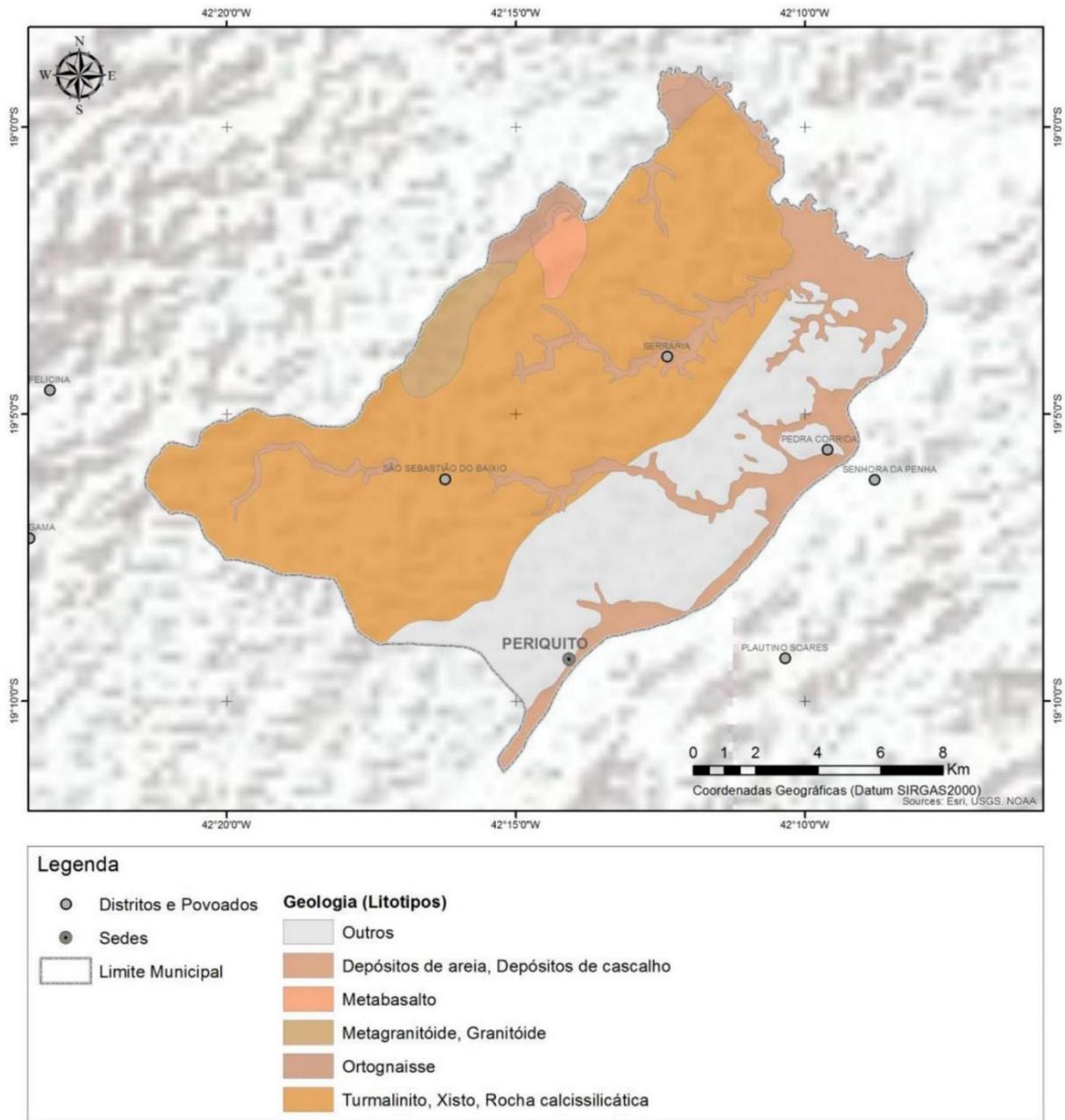
Apesar dos relevantes parques industriais presente nessas cidades, mais de 90 municípios dos 102 que formam a região tem como base econômica os setores primário e terciário. O setor de serviços é o que mais contribui para o PIB da região, com 40%, seguido pela indústria, com 27,7%, e agropecuária, que, apesar de ser a principal atividade econômica da maior parte dos municípios, contribui com apenas 4,1% do PIB (NOGUEIRA, 2019).

3.2 GEOLOGIA DO MUNICÍPIO DE PERIQUITO (MG)

Compreendido pelo Complexo Mantiqueira, a geologia do município de Periquito (Figura 3.2) é formada por hornblenda-biotita gnaiss de composição tonalítica a granítica, além de metaquartzo-monzonito, epidoto-biotita granodiorito, com granada ocasional e tectonicamente bandado. Também são encontradas intercalações de anfibolito, rocha calcissilicática, quartzito, turmalinitos, metabasaltos e xistos (CPRM, 2000).

Além disso, também são encontrados na região depósitos sedimentares (terraços aluviais) constituídos por areias de granulometria variando de fina a grossa com lentes de seixos arredondados, camadas delgadas de argila e silte estratificados, inconsolidados a pouco consolidados. Eles ocupam as margens dos cursos d'água em cordões de formas diversas e aplainados na superfície (CPRM, 2015 *apud* PREFEITURA MUNICIPAL DE PERIQUITO).

Figura 3.2 – Formação geológica do município de Periquito



Fonte: PREFEITURA MUNICIPAL DE PERIQUITO (2016)

3.3 MATERIAIS CERÂMICOS

Os materiais cerâmicos são constituídos por elementos não metálicos, inorgânicos, ligados quimicamente entre si por ligações essencialmente iônicas e/ou covalentes. Apresentam composições químicas muito variadas, podendo ser cristalinos, não cristalinos ou, ainda, apresentar ambas as fases na sua constituição (BOGAS, 2013).

De acordo com Bogas (2013), esses materiais são caracterizados por apresentarem elevada dureza, comportamento frágil, reduzida tenacidade e ductilidade, características isolantes, resistência ao desgaste, resistência química e grande resistência mecânica à altas temperaturas.

A forma de preparação de um material cerâmico, desde a preparação da matéria-prima até o seu processamento térmico define sua microestrutura, que pode conter defeitos estruturais, incluindo impurezas e deslocamentos. Por exemplo, cerâmicos prensados a quente tendem a apresentar menor porosidade (CARTER e NORTON, 2007).

Os materiais cerâmicos podem ser classificados em diferentes grupos, de acordo com a sua finalidade. Segundo Callister Jr. (2002), essa classificação inclui os seguintes grupos: vidros, produtos estruturais à base de argila (cerâmica vermelha), louças brancas, refratários, abrasivos, cimentos e cerâmicas avançadas.

3.4 CERÂMICA VERMELHA

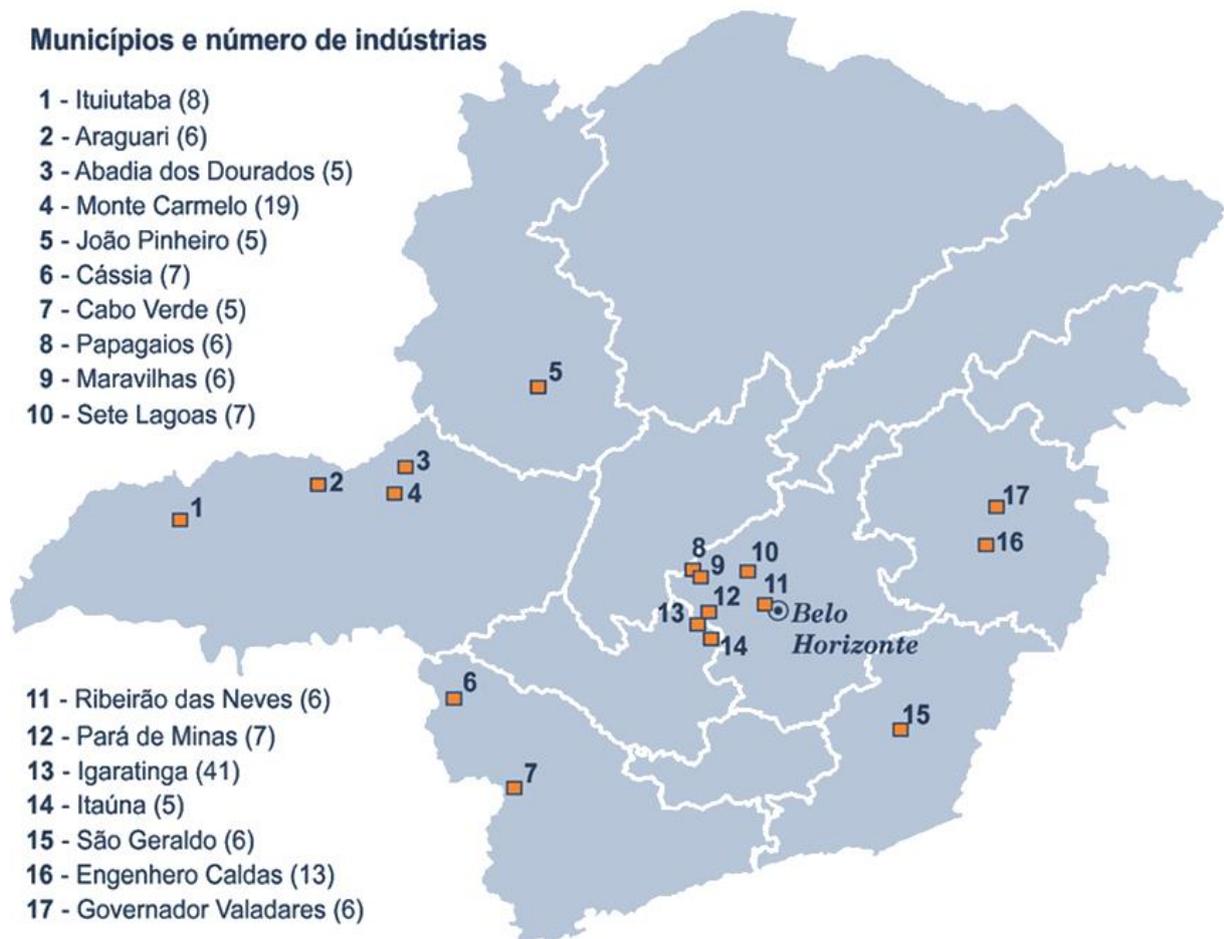
A cerâmica vermelha integra o grupo dos cerâmicos tradicionais, sendo que o termo cerâmica vermelha define os materiais de coloração avermelhada empregados na indústria de construção civil, como tijolos, telhas e blocos estruturais. A cor vermelha está associada à presença abundante de óxido de ferro em sua constituição, geralmente superior a 4% (CABRAL JUNIOR *et al.*, 2008). Em geral, esses produtos são processados a baixas temperaturas se comparadas às temperaturas de demais materiais cerâmicos, entre 850 e 1050 °C (BOGAS, 2013).

3.4.1 Produção de cerâmica vermelha no estado de Minas Gerais

O estado de Minas Gerais é um importante produtor de cerâmica vermelha, contando com 339 unidades produtoras de artefatos de cerâmica e barro cozido para uso na construção civil, sendo a maior parte delas de pequeno e médio porte. Devido à abundância de jazidas de argilas comuns e a importância dessas cerâmicas no mercado, as olarias e fábricas oficiais estão distribuídas entre 139 municípios do estado, sendo 17 delas caracterizadas pela alta produção, com presença de 5 ou mais indústrias em seus domínios (CIEMG, 2018 *apud* VICTORIA, 2018).

Entretanto, dados da CIEMG (2018 *apud* VICTORIA, 2018) apontam uma maior concentração dessas unidades em algumas regiões específicas (Figura 3.3): Região Metropolitana de Belo Horizonte (61 fábricas), Oeste de Minas (59), Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba (51), Vale do Rio Doce (38), Norte de Minas (37), Sul/Sudeste de Minas (32) e Zona da Mata (17).

Figura 3.3 – Distribuição dos principais municípios produtoras de cerâmicas vermelhas em Minas Gerais



Fonte: VICTORIA (2018)

3.4.2 Matérias-primas

Grande parte das matérias-primas utilizadas na indústria cerâmica são de ocorrência natural, sendo obtidas por meio de depósitos espalhados na crosta terrestre (ABCERAM, 2020). Três componentes básicos constituem os materiais cerâmicos: argila, sílica e feldspato (BOGAS, 2013), sendo a argila a principal matéria-prima.

3.4.2.1 Argila

Santos (1989) define argila como um material de textura terrosa e de baixa granulação, constituído majoritariamente por argilominerais, podendo, ainda, estar associada a outros tipos de minerais, como o quartzo, as micas, feldspatos, minerais opacos, além de matéria orgânica e outras impurezas.

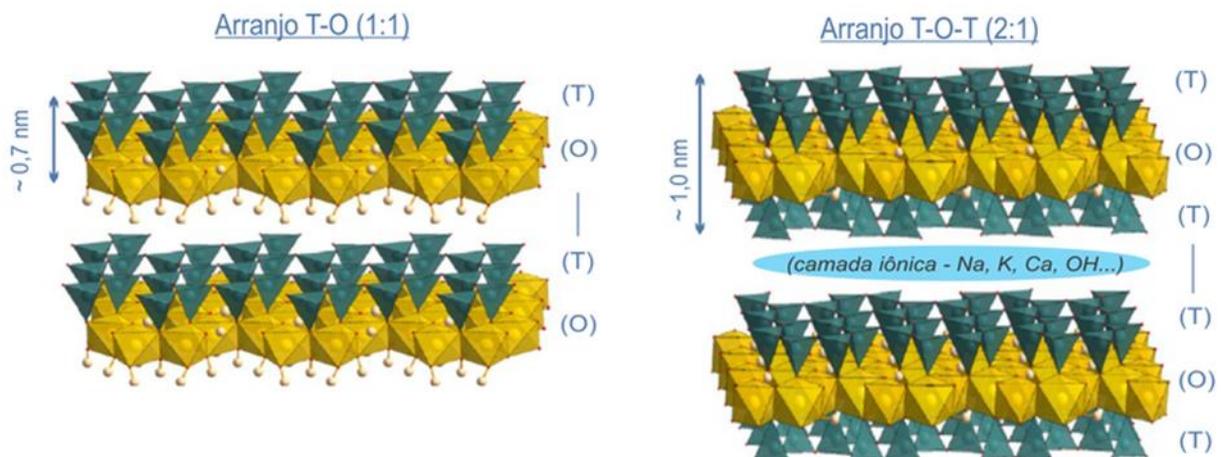
Ao serem pulverizadas e misturadas a uma adequada quantidade de água, as argilas formam uma pasta que possui certo grau de plasticidade, se tornam rígidas após a secagem e adquirem certa dureza após a queima em temperaturas superiores a 1000 °C (SANTOS, 1989).

Por ser um produto de baixo valor unitário, a argila empregada na fabricação de cerâmica vermelha é extraída e preparada em regiões geograficamente próximas ao seu mercado consumidor (CABRAL JUNIOR *et al.*, 2008).

Quanto à natureza composicional, as argilas puras, ou monominerálicas, são raras. A maior parte das argilas é composta de argilominerais, um agrupamento de minerais fundamentais que predominam em relação às impurezas (VICTORIA, 2018). Argilominerais são silicatos de alumínio hidratados, podendo conter outros elementos, como, por exemplo, magnésio, ferro e cálcio (SANTOS, 1989).

Tipicamente, os argilominerais apresentam uma estrutura cristalina similar à dos filossilicatos. Desta forma, são minerais formados pelo empilhamento regular de camadas (ou folhas) de tetraedros de sílica (SiO_2 - camada “T”) sobre camadas octaédricas de alumínio ($\text{Al}_2(\text{OH})_6$ - camada “O”). A Figura 3.4 apresenta os dois tipos de arranjos que podem ocorrer nos argilominerais: bilamelar (1:1 ou sequências do tipo “T-O”) ou trilamelar (2:1 ou sequências “T-O-T”). Neste último caso, a estrutura contempla um espaço para a instalação de sucessivas camadas iônicas, onde podem se alojar diversos tipos de elementos (Na, K, Ca, Li etc.) ou moléculas de água (VICTORIA, 2018).

Figura 3.4 – Esquema simplificado do arranjo cristalino típico dos argilominerais



Fonte: TOURNASSAT *et al.* (2015 *apud* VICTORIA, 2018)

Várias espécies de argilominerais podem ser encontradas nas argilas. Isso se deve à ampla gama de arranjos cristalinos (espaçamento entre as camadas tetraédricas e octaédricas) e composições (tipos de íons que preenchem os espaços interlamelares) possíveis. Desta forma, as propriedades físico-químicas e aplicações industriais das argilas são consideravelmente influenciadas pelos argilominerais (HARVEY e LAGALY, 2013; TOURNASSAT *et al.* 2015; VICTORIA, 2018).

Devido à grande diversidade composicional, bem como as diferentes formas de ocorrência e aplicações, as argilas podem ser classificadas de acordo com vários critérios. Entretanto, o mais usual deles se baseia nas propriedades e aplicações, definindo a existência de seis tipos de argilas (LIMA e NEVES, 2016; USGS, 2018; VICTORIA, 2018): comuns (*common clays, structural clays, brick clays*), plásticas (*ball clays*), refratárias (*fire clays*), bentonita (*bentonite*), caulim (*China clays*) e terras *fuller* (*Fuller's Earth*).

Victoria (2018) aponta que os principais componentes que estruturam as massas de cerâmicas vermelhas, brancas ou de revestimento nas indústrias de cerâmicas tradicionais são as argilas comuns, plásticas e o caulim, abordados a seguir.

3.4.2.1.1 Argilas comuns (*Common clays*)

As argilas comuns são compostas predominantemente por ilitas, além de caulinitas e esmectitas. Impurezas como quartzo, feldspato, micas detríticas (principalmente muscovita), matéria

orgânica, óxidos e hidróxidos de ferro também são comuns em sua composição. Seus depósitos ocorrem na forma de sedimentos inconsolidados ou como principal componente em rochas argilosas. Em geral, tais depósitos apresentam coloração amarronzada-avermelhada (VICTORIA, 2018).

Após a queima, as argilas comuns apresentam coloração avermelhada. Ainda, têm a plasticidade, a força coesiva, dilatação e a vitrificação como importantes propriedades físico-químicas (KEITH e MURRAY, 2006). Segundo Victoria (2018), as argilas comuns são empregadas principalmente na fabricação de cerâmicas vermelhas. Além disso, são utilizadas em obras de construção civil e na produção de cimento e argilas expandidas.

3.4.2.1.2 Argilas plásticas (Ball clays)

As argilas plásticas são constituídas predominantemente por caulinita e proporções variadas de ilitas, quartzo, matéria orgânica e esmectitas. Têm como impurezas os óxidos de ferro, óxidos de titânio e minerais carbonáticos. Seus depósitos se apresentam na forma de sedimentos inconsolidados recentes associados a rios que carrearam e depositaram quantidades suficientes de caulinita, quartzo, matéria orgânica e outras substâncias em suas margens (VICTORIA, 2018).

Este tipo de argila se caracteriza pela elevada concentração de matéria orgânica e pelas cores claras, quando submetidas à queima industrial. Por proporcionarem maior resistência e plasticidade nas massas, são utilizadas na fabricação de vários tipos de materiais cerâmicos tradicionais. Na indústria de cerâmica vermelha, as argilas plásticas são normalmente utilizadas quando se deseja corrigir possíveis especificações físicas ou químicas ausentes nas argilas comuns. Ainda, possuem aplicações nas indústrias de tintas, vernizes e corantes, borracha, materiais adesivos e selantes e na indústria vidreira (VICTORIA, 2018).

3.4.2.1.3 Caulim (China clays)

O termo caulim se refere àquelas argilas majoritariamente constituídas por argilominerais do grupo da caulinita. Possuem baixos teores de ferro, coloração branca e podem conter outros componentes, como outros argilominerais, minerais não plásticos e matéria orgânica, o que

pode resultar em diferentes cores, tamanhos e forma dos grãos. O caulim ocorre em depósitos residuais (primários) ou sedimentares (secundários), especialmente em regiões de clima tropical, onde a atividade intempérica sobre rochas aflorantes em superfície é mais intensa (VICTORIA, 2018).

No país, grande parte do caulim bruto é empregado na fabricação de cimento, cerâmicas brancas e de revestimento, enquanto o caulim beneficiado se destina em sua maioria à produção de papel. Dentre outros setores industriais nos quais o caulim é empregado, desatacam-se: indústrias de tintas, borrachas, plásticos, materiais refratários, defensivos agrícolas, medicamentos e cosméticos, produtos alimentícios e rações animais, fertilizantes, materiais abrasivos, inseticidas, materiais absorventes, catalizadores, gesso, detergentes etc (VICTORIA, 2018).

3.4.2.2 Sílica, feldspato e outros elementos

A sílica se comporta como o elemento estrutural em um material cerâmico, facilita a secagem e acarreta menores valores de retração (BOGAS, 2013). É um material refratário, capaz de resistir a elevadas temperaturas de queima sem sofrer deformação estrutural e que, apesar disso, é capaz de reagir com os demais minerais fundentes. Isso possibilita a formação da fase vítrea, o que implica na redução da porosidade, aumento da massa específica aparente e da resistência mecânica (ABAJO, 2000).

Segundo Bogas (2013), os feldspatos atuam como fundentes devido à reação com outros componentes, dando origem a uma fase com menor ponto de fusão.

Usualmente, as principais matérias-primas dos materiais cerâmicos estão associadas a outros tipos de minerais (SANTOS, 1989). As composições química e mineralógica das matérias-primas, bem como o processo de fabricação dos produtos cerâmicos, estão intimamente correlacionados à estrutura cristalina e granulometria das partículas (COTA, 2017).

A presença de outros elementos, a depender da quantidade, pode influenciar positivamente ou negativamente no produto. Os óxidos de ferro, por exemplo, promovem a coloração avermelhada, baixam o ponto de fusão e reduzem a refratariedade; entretanto, quando presentes

em elevados teores podem implicar em defeitos estruturais (BOGAS, 2013; SANTOS, 1975). A alumina livre reduz a plasticidade e a resistência mecânica, enquanto os álcalis facilitam a secagem e funcionam como fundentes durante o cozimento, reduzindo o ponto de fusão da mistura (BOGAS, 2013).

3.5 PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE CERÂMICA VERMELHA

A fabricação de cerâmica vermelha envolve a coleta e a preparação das matérias-primas, seguidas pela preparação da massa cerâmica e, por fim, do processamento térmico, que engloba secagem e queima. Todas essas etapas possuem variáveis que implicam diretamente nas características do produto final (BACCELLI JR., 2010; SANTOS, 1975).

3.5.1 Preparação das matérias-primas

A preparação das matérias-primas envolve a desagregação, classificação granulométrica e, em alguns casos, purificação. O processo de fabricação, propriamente dito, tem início somente após essas operações. Em geral, as matérias-primas sintéticas são fornecidas prontas para uso, necessitando apenas, em alguns casos, de um ajuste de granulometria (ABCERAM, 2020).

Pracidelli e Melchiades (1997) apontam que as massas cerâmicas não devem ser compostas apenas por argilas plásticas. O ideal é que uma massa se constitua de uma quantidade adequada grãos finos, médios e grossos, o que, segundo a ABCERAM (2020), é possível através da utilização de dois ou mais tipos de argilas com características diferentes.

Nesse sentido, o Diagrama de Winkler aponta a composição granulométrica ótima para se obter as melhores propriedades do produto final. Com base neste diagrama, a Tabela 3.1 indica as dosagens de partículas finas, médias e grossas ideais para diferentes tipos de produtos.

Tabela 3.1 – Composição granulométrica dos produtos de cerâmica vermelha de acordo com o Diagrama de Winkler

Materiais cerâmicos	Composição granulométrica (%)		
	2 µm	2 a 20 µm	> 20 µm
<i>Materiais de qualidade com dificuldade de produção</i>	40 a 50	20 a 40	20 a 30
<i>Telhas, capas</i>	30 a 40	20 a 50	20 a 40
<i>Tijolos furados</i>	20 a 30	20 a 55	20 a 50
<i>Tijolos maciços</i>	15 a 20	20 a 55	25 a 55

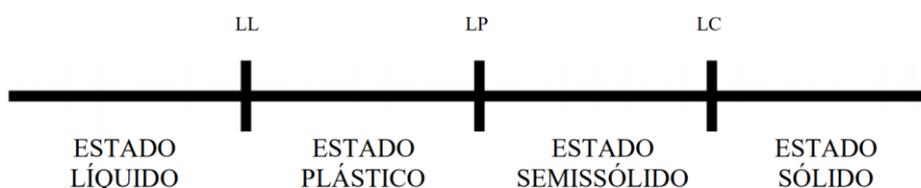
Fonte: PRACIDELLI e MELCHIADES (1997)

Ainda durante a etapa de preparação das matérias-primas, outro parâmetro que deve ser estudado é a plasticidade, uma propriedade dos solos que indica a capacidade de eles serem moldados, sob certas condições de umidade, sem alteração de volume (CAPUTO *et al.*, 2015). Santos (1975) aponta que a plasticidade decorre da ação lubrificante da água entre as partículas e das forças de atração entre as partículas de argilominerais.

Assim, a variação da umidade de um material implica na variação de sua plasticidade ou, ainda, de sua consistência. Quando um material apresenta elevada umidade, ele se comporta como um fluido denso. A medida em que a umidade é reduzida, o material se endurece e, a partir de um determinado limite de liquidez (LL) a sua capacidade de fluir se reduz, adquirindo a capacidade de ser moldado e conservar sua forma. Desta maneira, o material se encontra no estado plástico (CAPUTO *et al.*, 2015).

Ao perder mais umidade o estado plástico desaparece. Ao atingir um limite de plasticidade (LP) o solo se desmantela ao ser trabalhado. Assim, o material se encontra no estado semissólido. Prosseguindo à secagem, gradualmente o material transita para o estado sólido. A divisa entre o estado semissólido e o estado sólido é denominada limite de contração (LC) ou teor de umidade (CAPUTO *et al.*, 2015). É ilustrado na Figura 3.5 um esquema dos estados e limites de consistência.

Figura 3.5 – Estados e limites de consistência



Fonte: Adaptado de CAPUTO *et al.* (2015)

O índice de plasticidade define a região na qual o solo se encontra no estado plástico, sendo quantificado a partir da diferença entre os limites de liquidez e de plasticidade. Este índice é um importante critério para definir as características de um solo: quanto maior o índice de plasticidade, maior a plasticidade do solo. Caputo *et al.* (2015) categoriza os solos conforme o seu índice de plasticidade (Tabela 3.2).

Tabela 3.2 – Classificação dos solos de acordo com o seu índice de plasticidade

Classificação do solo	Índice de plasticidade (%)
<i>Fracamente plástico</i>	$1 < IP < 7$
<i>Medianamente plástico</i>	$7 < IP < 15$
<i>Altamente plástico</i>	$IP > 15$

Fonte: CAPUTO *et al.* (2015)

Macedo *et al.* (2008) indica o intervalo de valores recomendados dos limites de liquidez e de plasticidade, além do índice de plasticidade para argilas empregadas na produção de cerâmica vermelha (Tabela 3.3).

Tabela 3.3 – Intervalo de valores recomendados de LL, LP e IP de argilas utilizadas para a fabricação de cerâmica vermelha

Parâmetro	Intervalo de valores recomendados (%)
<i>Limite de liquidez (LL)</i>	$30 < LL < 60$
<i>Limite de plasticidade (LP)</i>	$15 < LP < 30$
<i>Índice de plasticidade (IP)</i>	$10 < IP < 30$

Fonte: MACEDO *et al.* (2008)

3.5.2 Preparação da massa e conformação das peças cerâmicas

Para a formação de uma massa cerâmica ocorre a mistura e homogeneização das matérias-primas. Para possibilitar a trabalhabilidade necessária à conformação dessa massa, Paschoal (2003) indica que é fundamental que ocorra uma adequação da umidade do material para valores entre 5 e 15%. Isto evita a ocorrência de trincas, empenamentos e falhas de preenchimento.

Os diferentes tipos de massas são preparados de acordo com a técnica a ser empregada para conformação das peças. A ABCERAM (2020) classifica as massas em:

- a) Suspensão (ou barbotina), para obtenção de peças em moldes de gesso ou resinas porosas.
- b) Massas secas ou semissecas, na forma granulada, para obtenção de peças por prensagem.
- c) Massas plásticas, para obtenção de peças por extrusão, seguida ou não de torneamento ou prensagem.

Existem diversos modos de executar a conformação de peças cerâmicas. A seleção de um deles depende fundamentalmente de fatores econômicos, da geometria e das características do produto. De acordo com a ABCERAM (2020), os métodos mais utilizados compreendem colagem, prensagem e extrusão:

- a) Colagem: a barbotina, uma suspensão de argila, é disposta em um molde de gesso no qual permanece durante um certo tempo até que a água contida na suspensão seja absorvida pelo gesso. As partículas sólidas se acomodam na superfície do molde, formando face exterior da peça. O produto gerado apresentará uma configuração externa que reproduz a forma interna do molde de gesso.
- b) Prensagem: neste método a massa cerâmica é inserida em um molde de borracha ou outro material polimérico. Esse molde é fechado hermeticamente e introduzido em uma câmara contendo um fluido. Este é comprimido por uma prensa mecânica, hidráulica ou

isostática, que exerce uma forte pressão sobre o molde. Neste método são utilizadas, preferivelmente, massas granuladas e com baixo teor de umidade.

- c) Extrusão: a massa plástica é colocada em uma extrusora, na qual é compactada e forçada por um pistão ou eixo helicoidal, através de bocal com determinado formato, produzindo uma coluna extrudada, que possui seção transversal com o formato e dimensões desejados. Em seguida, essa coluna é cortada por lâminas, resultando nas peças cerâmicas. Em alguns casos, após a extrusão pode ser realizado o torneamento, que tem como objetivo propiciar um melhor acabamento à peça.

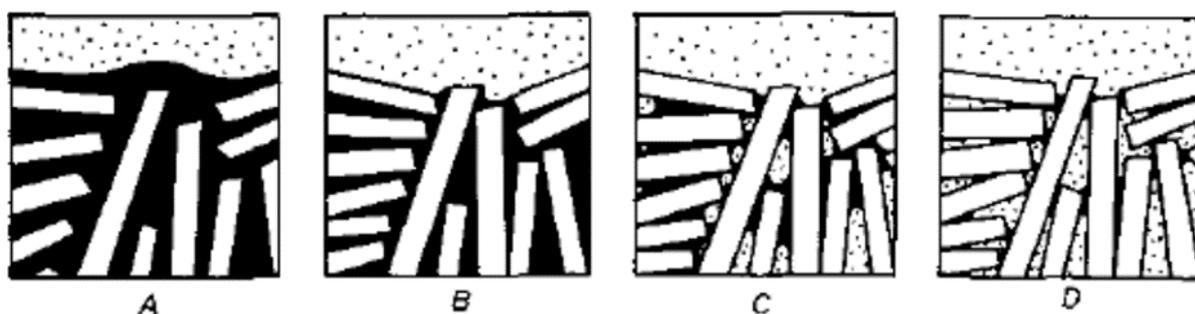
3.5.3 Secagem

A secagem é uma complexa etapa do processo de fabricação de cerâmica vermelha. Seu propósito é eliminar, por meio da evaporação, a água que foi empregada na etapa de conformação, necessária para a obtenção de uma massa plástica. A água de conformação pode ser classificada em dois tipos: água intersticial e água livre (ou água de plasticidade) (VIEIRA *et al.*, 2003).

A água intersticial é aquela que preenche os poros das partículas, enquanto a água livre situa-se entre as partículas argilosas, separando-as e facilitando a trabalhabilidade no processo de conformação. A água livre, a composição da massa, a umidade e a compacidade da mistura são os principais fatores influenciam na retração das peças cerâmicas. Por conta disto, a retração é um parâmetro de grande relevância tecnológica (VIEIRA *et al.*, 2003).

Hlavac (1983) dividiu o processo de secagem em quatro etapas (Figura 3.6). Em (A), a água forma uma camada contínua que separa as partículas umas das outras. Aos poucos, as partículas se aproximam e, gradualmente, há uma contração da massa como um todo. Em (B), a camada de água retrai a ponto de as partículas se tocarem, com a água apenas preenchendo os poros entre elas. Em (C), uma fina película de água adere à superfície das partículas devido às forças de adsorção, sendo eliminada na etapa final de secagem. A pequena quantidade restante de água está fortemente ligada aos pontos de contato entre as partículas e os demais poros (D).

Figura 3.6 – Distribuição de água durante a secagem em um corpo cerâmico



Fonte: HLAVAC (1983)

Durante a secagem são geradas tensões que podem levar ao aparecimento de defeitos que comprometem a qualidade das peças. Sendo assim, compreender os mecanismos envolvidos neste processo possibilita evitá-los. O controle da temperatura, da taxa de aquecimento e do tempo ideal para a secagem completa são outros fatores que contribuem para reduzir as chances de ocorrência de defeitos (BOGAS, 2013; HLAVAC, 1983; VAN VLACK, 1973; VIEIRA *et al.*, 2003).

3.5.4 Queima

Hlavac (1983) descreve a queima (ou sinterização) como o processo de fortalecimento espontâneo de corpos porosos através do efeito da elevação da temperatura. Neste processo, reações químicas podem ocorrer e levar à formação de novas fases cristalinas, possivelmente com formação de fase líquida. A queima possibilita que os produtos cerâmicos adquiram relevantes propriedades, como, por exemplo, menor capacidade de absorção de água e elevada resistência mecânica. Bogas (2013) destaca algumas das principais transformações físicas e químicas esperadas durante a queima de corpos cerâmicos (Tabela 3.4).

Tabela 3.4 – Transformações físicas e químicas ocorridas durante a queima de um corpo cerâmico

Temperatura (°C)	Fenômenos ocorridos
20 a 150	Eliminação de água livre não eliminada na secagem ou, entretanto, absorvida do meio ambiente.
< 200	Eliminação de água coloidal intercalada entre lamelas de argilominerais.
350 a 650	Combustão de matéria orgânica e dissociação de compostos sulfurosos.
450 a 650	Transformações irreversíveis de decomposição dos minerais argilosos com perda de água de constituição. Neste fenômeno endotérmico a caulinita é transformada em metacaulinita tornando-se instável.
570	Transformação de quartzo- α (trigonal) em quartzo- β (hexagonal) acompanhada de expansão violenta no aquecimento e contração violenta no resfriamento.
800 a 950	Decomposição dos carbonatos e libertação de CO ₂ .
> 700	Início da sinterização com reações químicas da sílica, alumina e elementos fundentes originando sílico-aluminatos complexos
> 1000	Início da gressificação. Amolecimento dos sílico-aluminatos e assimilação de pequenas partículas menos fundentes, conferindo maior compacidade e dureza ao corpo cerâmico. Ocorre contração resultante da densificação.
1000 a 1100	Transformação de fase da caulinita, formando mulita.

Fonte: BOGAS (2013)

Durante a sinterização as partículas de um material se ligam entre si por difusão no estado sólido. Devido a isso, em temperaturas elevadas e abaixo do ponto de fusão, as partículas coalescem, o que torna o corpo cerâmico mais denso, reduzindo sua porosidade e fazendo com que sua resistência mecânica aumente (BOGAS, 2013).

3.5.5 Normas e limitações técnicas

Para serem comercializados e utilizados com segurança em construções, os materiais cerâmicos devem atender às exigências das normas reguladoras, bem como a alguns parâmetros recomendados pela literatura. A Tabela 3.5 contém uma compilação de parâmetros para telhas,

blocos e tijolos maciços de cerâmica exigidos pelas normas da ABNT e recomendados pelo Instituto de Pesquisas Técnicas (IPT).

Tabela 3.5 – Parâmetros para blocos e tijolos de cerâmica vermelha

Parâmetro	Materiais cerâmicos			
	Tijolos maciços	Blocos de vedação	Blocos estruturais	Telhas
<i>RL (%)</i> (máximo)	12,0 (a)	12,0 (a)	12,0 (a)	12,0 (a)
<i>MEA (g/cm³)</i> (mínimo)	1,7 (a)	1,7 (a)	1,7 (a)	1,7 (a)
<i>RCU (MPa)</i>	1,5 a 4,0 (b)	1,5 (c)	3,0 (d)	-
<i>AA (%)</i>	- (b)	8,0 a 22,0 (c)	8,0 a 22,0 (d)	20,0 (e) (máximo)

Fontes: (a) INSTITUTO DE PESQUISAS TÉCNICAS – IPT (1985 *apud* AMORIM, 2007);
 (b) NBR 7170 – ABNT (1983); (c) NBR 15270-1 – ABNT (2005); (d) NBR 15270-2 – ABNT (2005); (e) NBR 15310 – ABNT (2009)

4 MATERIAIS E MÉTODOS

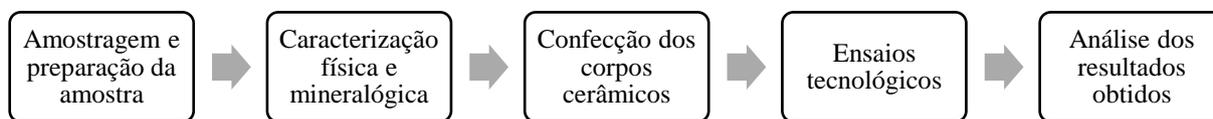
A metodologia deste trabalho foi estabelecida com o intuito de avaliar a viabilidade de utilização de uma argila proveniente da mesorregião do Vale do Rio Doce, região leste de Minas Gerais, para fabricação de cerâmica vermelha.

As amostras de argila foram coletadas em 2014 pelo Departamento de Recursos Minerais (DEREM) da Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM) nas proximidades de Serraria, distrito do município de Periquito, Minas Gerais. O material foi coletado através de um único furo de sondagem e armazenado em cinco sacos plásticos de acordo com intervalos de profundidade, que, por sua vez, variou de 0,2 a 2,5 m. A região da coleta é geomorfologicamente descrita como um vale soterrado envolto por colinas suaves, em depósito sedimentar inconsolidado. O material apresentava coloração que variava de amarelada-alaranjada a acinzentada, com presença de sericita e matéria orgânica.

Os procedimentos experimentais ocorreram nos Laboratórios do Departamento de Engenharia de Minas (DEMIN) da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP) a partir de uma amostra de 8,34 kg de material.

Foram realizados a amostragem e os ensaios de caracterização física e mineralógica. Por fim, foram confeccionados corpos de prova cerâmicos que passaram por ensaios de retração linear, absorção de água, massa específica aparente e resistência à compressão uniaxial. A Figura 4.1 apresenta o fluxograma com as atividades propostas.

Figura 4.1 – Fluxograma das atividades propostas

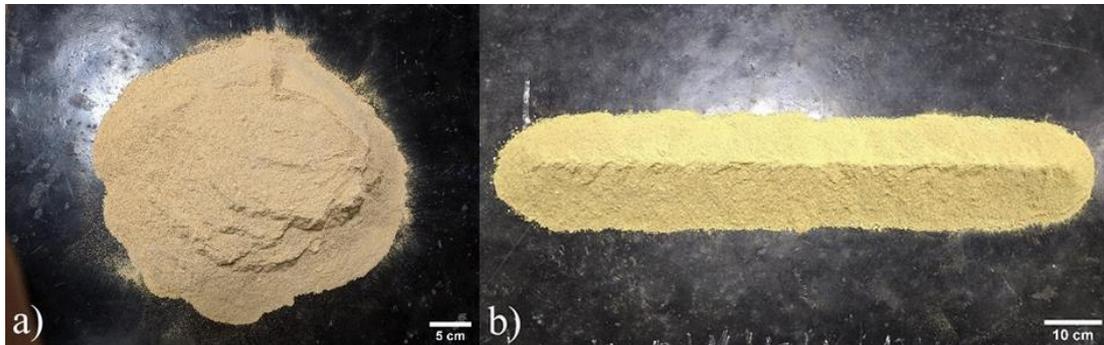


4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ARGILA

No Laboratório de Tratamento de Minérios (DEMIN/UFOP) a amostra de 8,34 kg foi seca por 24h em estufa a 100 °C, sendo, em seguida, desagregada. A Figura 4.2 mostra as pilhas cônica

e alongada confeccionadas para a homogeneização e o quartejamento da amostra em a) e b), respectivamente.

Figura 4.2 – Pilhas de homogeneização



Visando a obtenção de amostras representativas para a realização dos ensaios de caracterização, foi utilizado um quarteador Jones (Figura 4.3).

Figura 4.3 – Quarteador Jones



4.1.1 Análise granulométrica

A primeira etapa da análise granulométrica foi o peneiramento a úmido, realizado no Laboratório de Tratamento de Minérios (DEMIN/UFOP), utilizando peneiras de 300 a 38 μm . A segunda etapa consistiu na análise da fração passante em 38 μm através do granulômetro a

laser Cilas 1064 do Laboratório de Propriedades Interfaciais (DEMIN/UFOP), utilizando uma solução dispersante 0,1 % (p/v) de metassilicato de sódio.

4.1.2 Análise mineralógica

Para determinar a composição mineralógica foi empregada a técnica de difração de raios X (DRX). O difratômetro de raios X utilizado foi o PANalyticalX'Pert³ Powder do Laboratório de Microscopia Ótica e Difração de Raios X (DEMIN/UFOP). Para obtenção do difratograma foi utilizado o método do pó total, empregando a radiação $\lambda K\alpha$ do cobre (1,5419 Å) e ângulo de varredura variando de 5° a 90°.

4.1.3 Análise termogravimétrica

A análise termogravimétrica foi executada com o equipamento TA Q50 da marca TA *Instruments* do Laboratório de Espectroscopia Infravermelha e Análise Termogravimétrica (DEMIN/UFOP). A análise foi executada em 95 minutos, com temperaturas inicial e final de 50 °C e 1000 °C, respectivamente, com uma rampa de aquecimento de 10 °C/min.

4.1.4 Determinação da densidade

A densidade relativa foi determinada através do método do picnômetro, em ensaio realizado em triplicata no Laboratório de Tratamento de Minérios (DEMIN/UFOP). Foi utilizado um picnômetro (Figura 4.4), que consiste em um balão volumétrico de vidro, de fundo chato, equipado com uma rolha também de vidro, através da qual passa um canal capilar (SAMPAIO *et al.*, 2007).

Figura 4.4 – Picnômetro de 25 mL



Fonte: SAMPAIO *et al.* (2007).

Com o auxílio de uma balança de precisão foram aferidas as massas do picnômetro vazio, com amostra de argila, com amostra de argila e água e por fim, apenas com água. A densidade relativa é calculada de acordo com a Equação 4.1, descrita por Sampaio *et al.* (2007):

$$\rho = \frac{P_2 - P_1}{P_4 - P_3 + P_2 - P_1} \quad (4.1)$$

Onde:

ρ – densidade relativa;

P_1 – massa do picnômetro vazio;

P_2 – massa do picnômetro parcialmente preenchido com argila;

P_3 – massa do picnômetro preenchido com argila e água;

P_4 – massa do picnômetro preenchido de água.

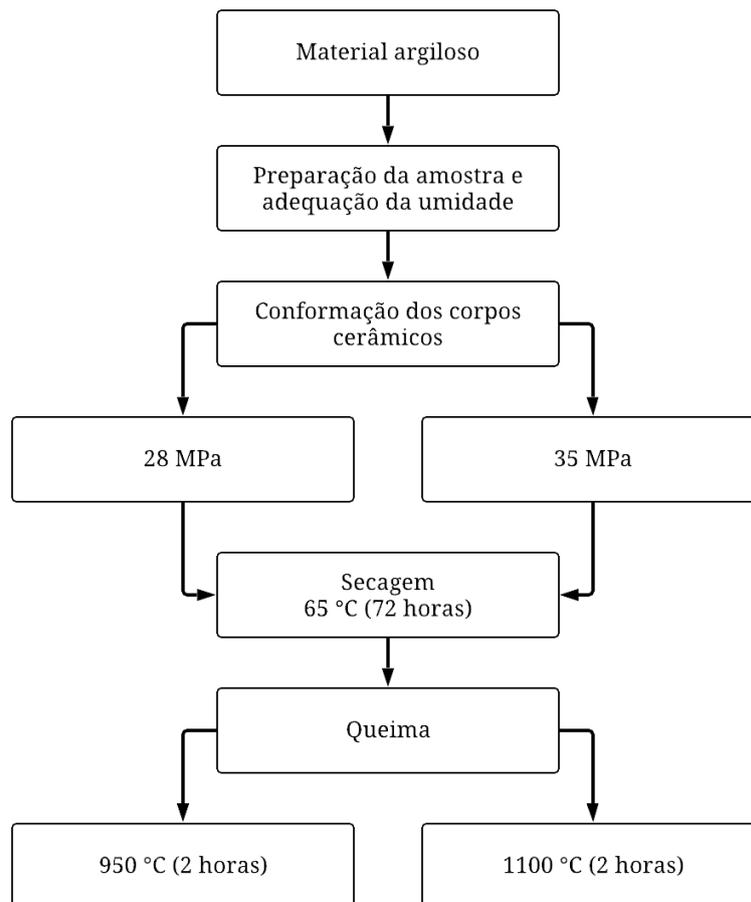
4.1.5 Limites de Atterberg

A determinação dos limites de Atterberg permite obter informações relativas à consistência da argila de acordo com o seu grau de umidade. No Laboratório de Resíduos de Mineração (DEMIN/UFOP) foram realizados ensaios para determinação dos limites de liquidez e de plasticidade, além do índice de plasticidade, de acordo com a metodologia considerada pelas normas NBR 6459:2016 e NBR 7180:2016.

4.2 CONFECÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

A Figura 4.5 apresenta o fluxograma relativo às etapas de confecção dos corpos cerâmicos. Foram avaliadas as condições de conformação, com pressões de compactação de 28 e 35 MPa, além das condições de queima, com temperaturas de 950 e 1100 °C, conforme trabalho realizado por Silva (2020).

Figura 4.5 – Fluxograma relativo as etapas de confecção dos corpos cerâmicos



Objetivando a realização dos ensaios tecnológicos para cerâmica, descrito no item 4.3, foram confeccionados 24 corpos de prova, sendo 6 para cada condição. A Tabela 4.1 apresenta as condições de conformação dos corpos de prova.

Tabela 4.1 – Condições de conformação dos corpos de prova (CP)

CP	Pressão de compactação (MPa)	Temperatura de queima (°C)
01 a 06	28	1100
07 a 12	28	950
13 a 18	35	950
19 a 24	35	1100

4.2.1 Preparação da massa cerâmica e conformação dos corpos cerâmicos

A preparação da massa cerâmica ocorreu no Laboratório de Materiais Cerâmicos (DEMIN/UFOP). A balança analítica Marte ID200 foi utilizada para ajuste da umidade do material para valores entre 5 e 15%, conforme o Apêndice A. A massa cerâmica foi homogeneizada e disposta em um molde prismático de dimensões 70 x 10 x 20 mm (Figura 4.6).

Figura 4.6 – Molde prismático



Os corpos de prova cerâmicos foram conformados em uma prensa hidráulica SoloCap C1100 toneladas-força (Figura 4.7), localizada no Laboratório de Reologia (DEMIN/UFOP). Foram aplicadas pressões compactação de 28 e 35 MPa, conforme trabalho realizado por Silva (2020).

Figura 4.7 – Prensa SoloCap C1100 toneladas-força.



4.2.2 Secagem

A secagem foi realizada em uma estufa da marca Sterilifer do Laboratório de Análises Químicas (DEMIN/UFOP) por um período de 72 horas a 65 °C, de acordo com Silva (2020).

4.2.3 Queima

A queima dos corpos cerâmicos ocorreu em um forno Linn Elektro Therm CC405 (Figura 4.8) do Laboratório de Reologia (DEMIN/UFOP) a 950 °C e a 1100 °C por um período de 2 horas, a uma taxa de aquecimento de 5 °C/min, conforme Silva (2020).

Figura 4.8 – Forno Linn Elektro Therm CC405



4.3 ENSAIOS TECNOLÓGICOS PARA CERÂMICA

Foram realizados os ensaios tecnológicos de avaliação macroscópica, retração linear, massa específica aparente, absorção de água e resistência à compressão uniaxial, descritos nos itens 4.3.1 a 4.3.5. Tais ensaios tiveram como finalidade observar o comportamento dos corpos cerâmicos quanto às normas que regulamentam os parâmetros de interesse para a indústria da cerâmica.

4.3.1 Avaliação macroscópica

A avaliação macroscópica consiste em observar visualmente aspectos superficiais dos corpos cerâmicos, como a coloração e a presença de defeitos como fissuras e trincas. A NBR 7170:1983 considera que os corpos de prova não devem apresentar defeitos sistemáticos como trincas, superfícies irregulares, deformações e coloração heterogênea.

4.3.2 Retração linear de secagem (RLS) e de queima (RLQ)

O termo retração linear se refere ao coeficiente que representa a variação dimensional apresentada por um corpo cerâmico após as etapas de secagem e queima.

A retração linear é calculada a partir do quociente entre o comprimento do corpo de prova antes e após ser submetido à etapa em questão. As relações utilizadas para calcular a retração linear de secagem (RLS) e a retração linear de queima (RLQ) são apresentadas pelas Equações 4.2 e 4.3, respectivamente.

$$RLS = \frac{L_i - L_s}{L_s} \times 100 \quad (4.2)$$

$$RLQ = \frac{L_s - L_q}{L_q} \times 100 \quad (4.3)$$

Onde:

RLS – retração linear de secagem;

RLQ – retração linear de queima;

L_i – comprimento do corpo de prova antes da secagem (cm);

L_s – comprimento do corpo de prova após a secagem (cm);

L_q – comprimento do corpo de prova após a queima (cm).

4.3.3 Massa específica aparente (MEA)

A massa específica aparente é calculada através da razão entre a massa do corpo após a queima e seu volume total, como exposto na Equação 4.4.

$$MEA = \frac{m_s}{V_{ap}} \quad (4.4)$$

Onde:

MEA – massa específica aparente (g/cm^3);

m_s – massa do corpo de prova seco (g);

V_{ap} – volume aparente do corpo de prova (cm^3).

4.3.4 Absorção de água (AA)

O índice de absorção de água é um parâmetro que analisa a quantidade de água que o corpo cerâmico é capaz de absorver após a etapa de queima. O ensaio consiste em pesar os corpos de prova, que, em seguida, são dispostos em um vasilhame com água em ebulição por um período de 2 horas. O fundo do vasilhame é revestido com esferas de vidro maciço, visando evitar o contato direto dos corpos de prova com a fonte de calor. Após essa etapa o conjunto permanece em repouso por 30 minutos e, posteriormente, o excesso de água presente nos corpos cerâmicos é removido com papel toalha. Por fim, os corpos de prova são pesados. Depois de realizados tais procedimentos, a absorção de água pode ser calculada por meio da Equação 4.5.

$$AA = \frac{m_u - m_s}{m_s} \times 100 \quad (4.5)$$

Onde:

AA – índice de absorção de água (%);

m_u – massa do corpo de prova úmido (g);

m_s – massa do corpo de prova seco (g).

4.3.5 Resistência à compressão uniaxial (RCU)

Para determinar este parâmetro foram realizados ensaios em que cada corpo de prova foi submetido a forças compressivas uniaxiais. Foi utilizada uma prensa hidráulica SoloCap CI100 toneladas-força (Figura 4.7) sobre a qual o corpo de prova foi posicionado ao centro. Ao ser ligada, a prensa abaixou até entrar em contato com o corpo de prova, promovendo a compressão do mesmo até a sua ruptura. A carga referente ao instante de ruptura ficou registrada no equipamento e foi anotada.

Após realizados esses procedimentos e, conhecendo-se a área da superfície do corpo de prova, a resistência à compressão uniaxial é determinada através da Equação 4.6.

$$RCU = \frac{F}{A} \times 10 \quad (4.6)$$

Onde:

RCU – resistência a compressão (MPa);

F – carga no instante em que o corpo de prova se rompe (KN);

A – área da superfície do corpo de prova (cm²).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

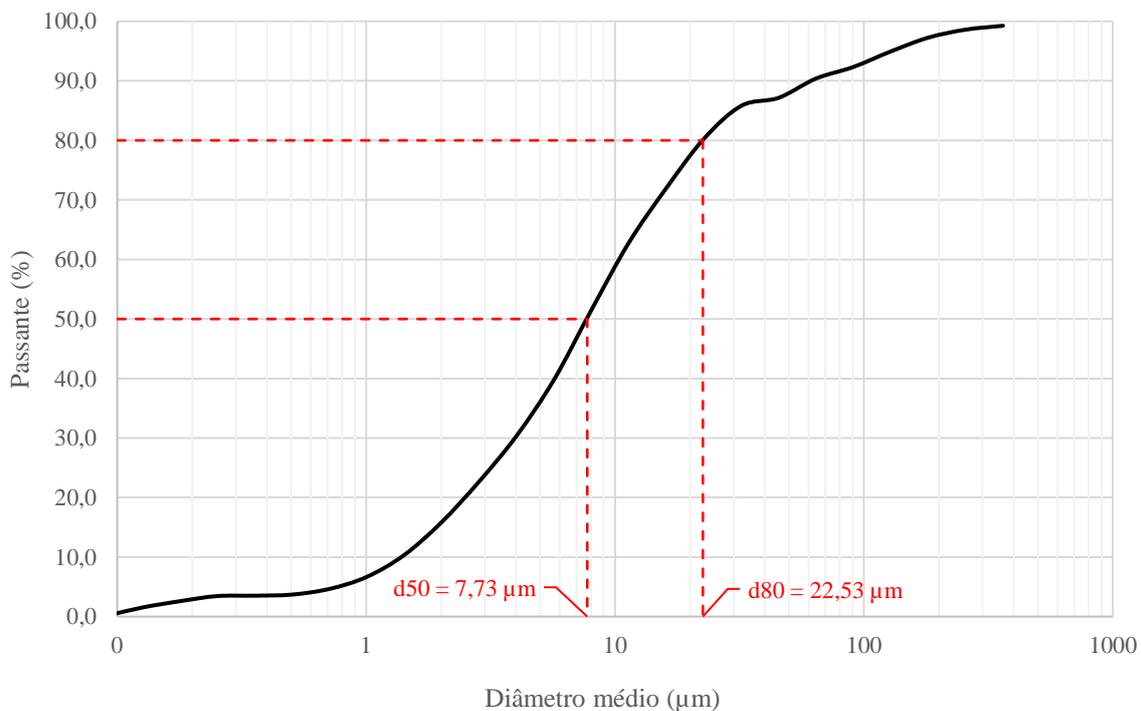
5.1 CARACTERIZAÇÃO DA ARGILA

Inicialmente, a massa da amostra era de 8,34 kg. Após o processo de secagem foi observada uma massa de 5,74 kg, o que indica que o teor de umidade natural do material era de 45,30%. Após a secagem, a amostra foi desagregada e, com a consequente eliminação dos torrões, o material se encontrava adequado à realização dos ensaios de caracterização.

5.1.1 Análise granulométrica

Com base na Figura 5.1, constata-se que o d_{80} é igual a 22,53 μm e o d_{50} é igual a 7,73 μm . Cerca de 15% das partículas têm diâmetro inferior a 2 μm e 22% possuem diâmetro maior que 20 μm . Considerando o Diagrama de Winkler, que orienta o estudo da distribuição granulométrica das massas utilizadas para cerâmicas vermelhas, pode se inferir que a distribuição se aproxima ao adequado para a produção de tijolos furados e tijolos maciços, conforme Pracidelli e Melchiales (1997).

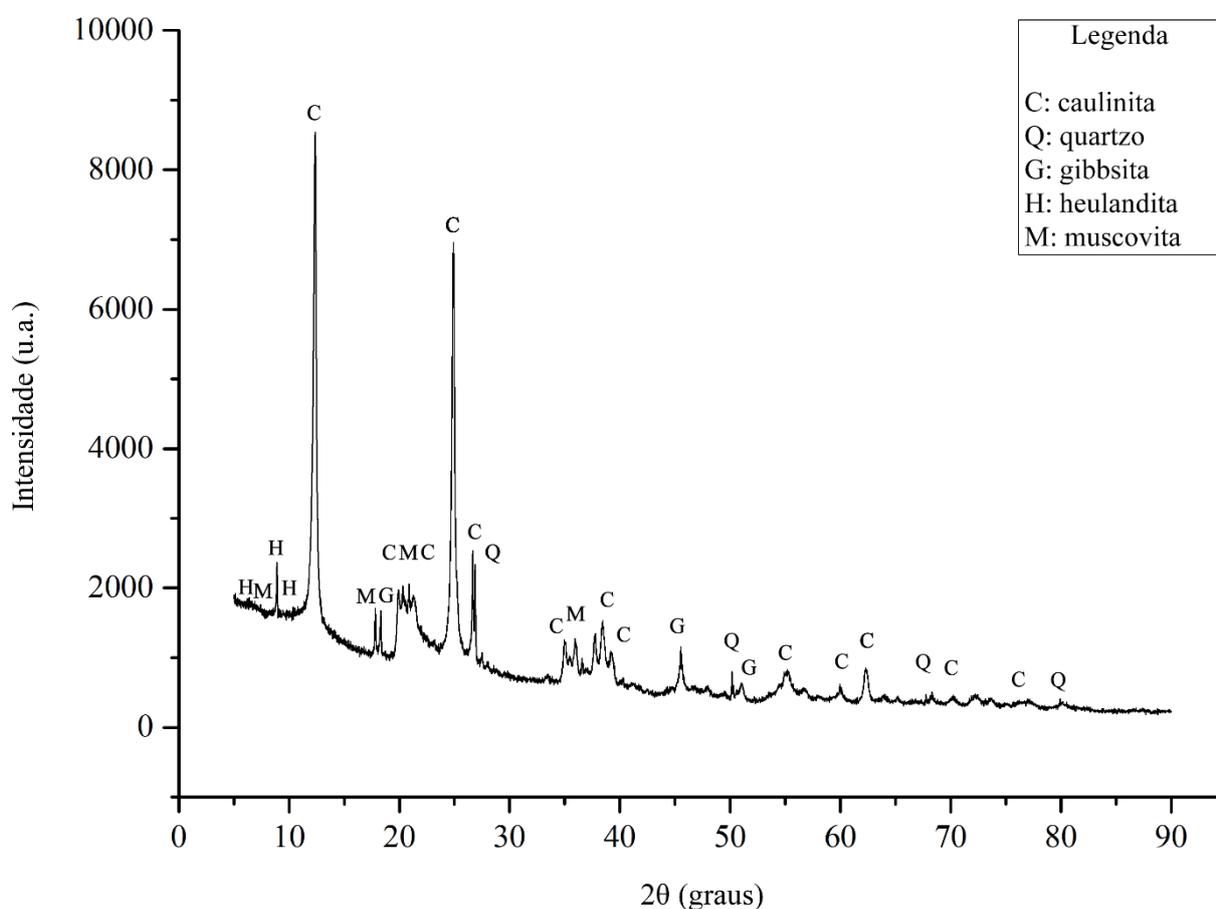
Figura 5.1 – Análise granulométrica da amostra de argila



5.1.2 Análise mineralógica

Através da técnica da difratometria de raios X (DRX) associada à semi-quantificação obtida através do *software HighScore Plus* foi gerado o difratograma (Figura 5.2) para a amostra de argila analisada. Constatou-se que a composição mineralógica da amostra era constituída por 91,6% de caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$), 3,7% de quartzo (SiO_2), 2,7% de heulandita ($(\text{Na,Ca})_{2-3}\text{Al}_3(\text{Al,Si})_2\text{Si}_{13}\text{O}_{36}\cdot 12(\text{H}_2\text{O})$), 1,8% de gibbsita ($\text{Al}(\text{OH})_3$) e 0,2% de muscovita ($\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$).

Figura 5.2 – Difratograma da amostra de argila



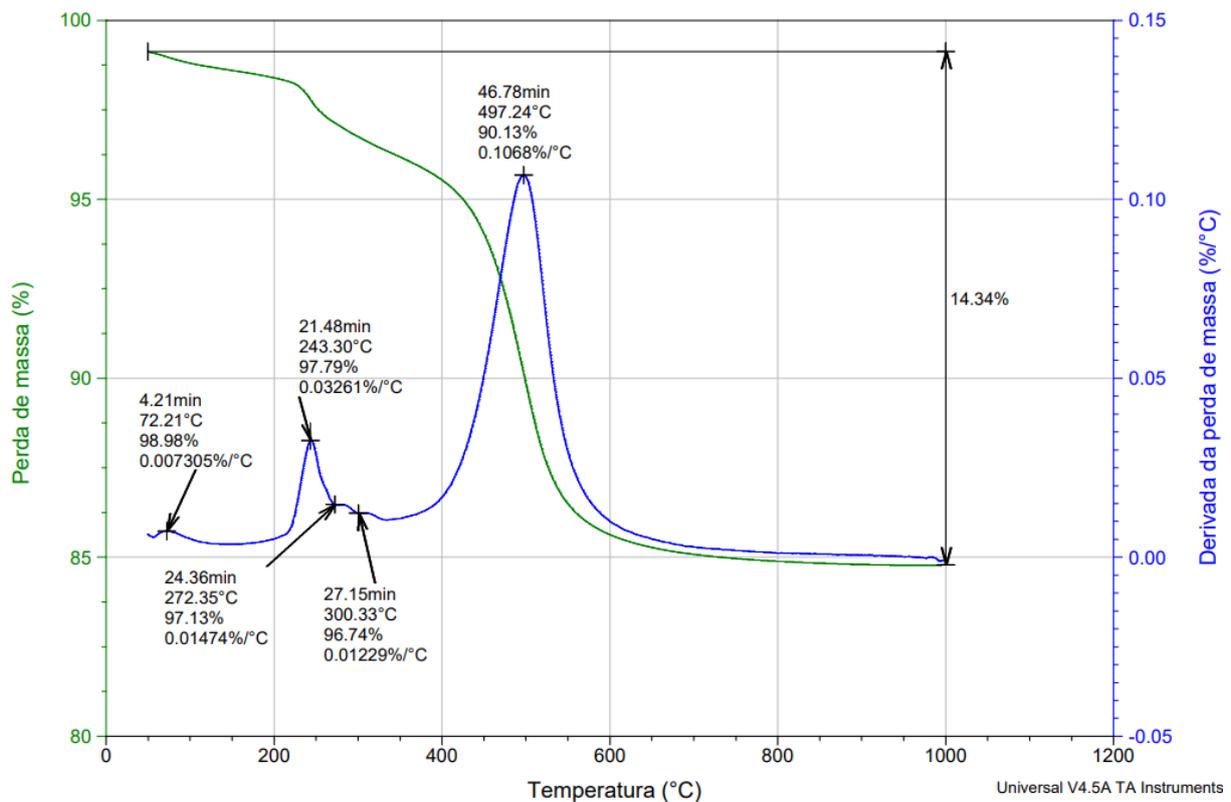
A amostra é predominantemente constituída pela caulinita, que se caracteriza por uma elevada refratariedade e elevada retração, o que pode dificultar a secagem. Além disso, a caulinita se torna plástica quando úmida (BOGAS, 2013). Daitx e Ferreira (2000) apontam que o quartzo pode promover a redução da plasticidade, da deformação e do circuito de secagem. A heulandita se caracteriza pela abundante presença de sílica em sua composição, enquanto a gibbsita é composta majoritariamente por alumina. De acordo com Bogas (2013), a alumina é responsável

pela redução da plasticidade e da resistência mecânica, porém, contribui para a redução das deformações. A presença de muscovita é interessante, pois há evidências de que este filossilicato se recristaliza em fases mais estáveis que promovem maiores resistências mecânicas aos materiais cerâmicos (FÖLDVARI, 2011).

5.1.3 Análise termogravimétrica

A Figura 5.3 apresenta a curva termogravimétrica referente à argila utilizada para a confecção dos corpos cerâmicos, na qual observou-se uma perda de massa total de 14,34%. Próximo à temperatura de 250 °C observa-se um pico provavelmente correspondente ao desprendimento de água coordenada aos cátions (GONÇALVES *et al.*, 2014). Por volta de 450 a 550 °C houve perda de massa provavelmente relacionada a desidroxilação da caulinita, seguida do desprendimento da água estrutural e modificação dos grupos de hidroxila, formando a metacaulinita. Devido à transformação da caulinita nesta fase amorfa, o material argiloso sofre perda de plasticidade após a queima (BROWN e GALLAGHER, 2003).

Figura 5.3 – Curva termogravimétrica da amostra de argila



A seguir, são apresentadas outras possíveis transformações físicas e químicas que o material analisado pode ter experimentado. É importante observar que tais possíveis transformações e suas hipotéticas justificativas só podem ser fundamentadas através da literatura, e não por meio da curva termogravimétrica.

Entre 65 e 250 °C pode ocorrer perda de massa relacionada a água livre, que é aquela naturalmente distribuída em minerais argilosos (BROWN e GALLAGHER, 2003). No intervalo entre 100 e 240 °C pode ocorrer perda da água adsorvida na superfície externa dos minerais argilosos (SANTOS, 1975).

Földvari (2011) indica que próximo aos 573 °C é esperada a transição estrutural do quartzo- α , trigonal, em quartzo- β , hexagonal. No entanto, Lřnvik e Smykatz-Kloss (1984) apontam que alterações de mais de 50 °C dessa temperatura são atribuídas à gênese, forma e temperatura de formação dos cristais. A transformação estrutural do quartzo, por se tratar de um processo reversível, pode promover pequenas contrações no interior dos corpos cerâmicos, conforme Carty e Senapati (1998).

Földvári (2011) aponta que a muscovita sofre desidroxilação quando a temperatura se encontra na faixa de 820 a 920 °C, podendo formar ortoclásio, ou leucita e coríndon, ou espniélio junto da liberação de água. Além disso, o autor aponta que a caulinita sofre transformação de fase cristalina, formando mulita primária ou pseudomulita.

5.1.4 Determinação da densidade

Através dos ensaios de picnometria foi determinado que a densidade relativa é igual 2,42 g/cm³, que está entre os valores das densidades teóricas dos minerais presentes na amostra: muscovita (2,77 g/cm³), quartzo (2,6 g/cm³), caulinita (2,6 g/cm³), gibbsita (2,3 g/cm³) e heulandita (2,2 g/cm³).

5.1.5 Limites de Atterberg

Os limites de Atterberg foram obtidos através dos ensaios de determinação dos limites de liquidez e plasticidade. A Tabela 5.1 apresenta os valores obtidos para limite de liquidez (LL),

limite de plasticidade (LP) e índice de plasticidade (IP) que são, respectivamente, 72,23%, 51,35%, e 20,87 %. Os resultados obtidos para o limite de liquidez e limite de plasticidade se encontram fora da faixa de valores aceitáveis para matérias-primas de cerâmica vermelha, que variam de 30 a 60% e de 15 a 30%, respectivamente, segundo Macedo *et al.* (2008).

Entretanto, de acordo com o mesmo autor, o índice de plasticidade determinado se encontra dentro da faixa de valores adequados para matérias-primas de cerâmica vermelha, que varia de 10 a 30%. Ainda, segundo a classificação proposta por Caputo *et al.* (2015), este material se configura como altamente plástico, visto que seu índice de plasticidade apresenta valor superior a 15%.

Para tornar os valores do LL, LP e IP adequados à fabricação de cerâmica vermelha é necessário reduzir a plasticidade da matéria-prima. Para tanto, pode-se fazer um *blend* com argilas magras, que são mais arenosas e possuem uma menor quantidade de grãos finos. Além disso, podem ser realizados estudos para avaliar a incorporação de outros materiais, como resíduos provenientes da mineração, conforme trabalhos realizados por Silva (2020), Cota (2017), Barbosa (2017) e Filho (2019).

Tabela 5.1 – Limites de Atterberg

Limites de Atterberg	Valor (%)
<i>Limite de liquidez (LL)</i>	72,23
<i>Limite de plasticidade (LP)</i>	51,35
<i>Índice de plasticidade (IP)</i>	20,87

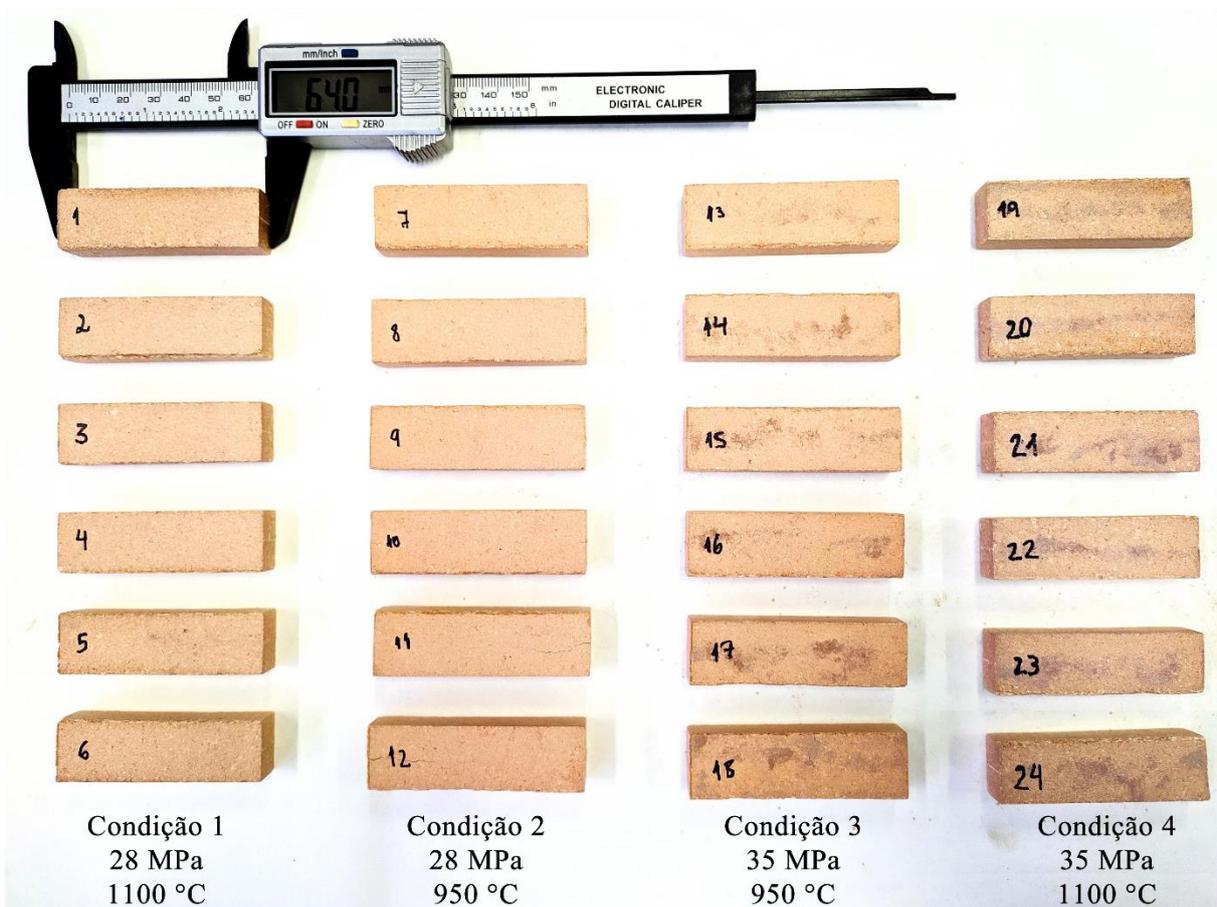
5.2 CONFECÇÃO DOS CORPOS DE PROVA CERÂMICOS

Para confeccionar os corpos de prova cerâmicos foram realizadas as etapas de conformação, secagem e queima. A Figura 5.4 apresenta o resultado obtido após a término de cada uma dessas etapas, enquanto a Figura 5.5 exhibe todos os corpos de prova após a etapa de queima de acordo com a sua condição.

Figura 5.4 – Corpos de prova após as etapas de a) conformação, b) secagem e c) queima



Figura 5.5 – Todos os corpos de prova após a queima



5.3 ENSAIOS TECNOLÓGICOS PARA CERÂMICA

5.3.1 Avaliação macroscópica

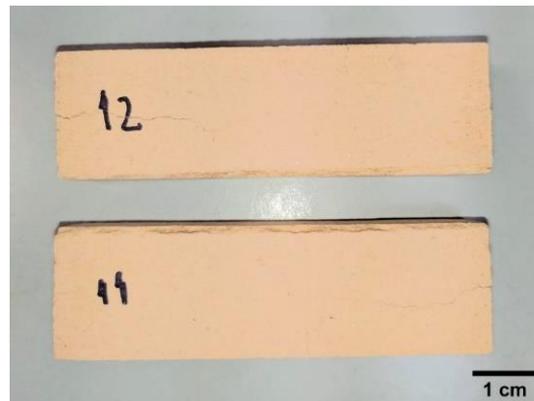
Todos os corpos de prova confeccionados apresentaram superfícies regulares e coloração homogênea, em tom alaranjado-avermelhado. Os únicos a apresentar defeitos estruturais foram os corpos de prova CP11 e CP12 (Figura 5.6). O CP11 apresentou uma pequena trinca após a

etapa de secagem, que se manteve estável após a etapa de queima. O CP12 apresentou uma trinca ao ser retirado do molde utilizado para conformação, mas se manteve estável após as etapas subsequentes. A Tabela 5.2 apresenta os corpos de prova nos quais se detectou algum defeito após a realização de cada etapa.

Tabela 5.2 – Detecção de defeitos nos corpos de prova após etapas de conformação, secagem e queima.

CP	Pressão de compactação (MPa)	Temperatura de queima (°C)	Defeitos		
			Após conformação	Após secagem	Após queima
11	28	950	-	Pequena trinca	Trinca estável
12	28	950	Trinca	Trinca estável	Trinca estável

Figura 5.6 – Defeitos detectados nos corpos de prova CP11 e CP12



5.3.2 Retração linear de secagem (RLS)

A Tabela 5.3 apresenta os valores de retração linear de secagem e seus respectivos desvios-padrões de acordo com a pressão de compactação empregada durante a conformação dos corpos de prova.

Nota-se que para as duas pressões de compactação os valores de retração linear de secagem observados são próximos e muito baixos. De acordo com Melchiades *et al.* (2001), a retração linear de secagem é nula ou negativa quando a mistura cerâmica apresenta baixos teores de umidade. Quando a retração linear de secagem é inferior a 1% este parâmetro exerce pouca influência sobre as dimensões finais de um corpo de prova.

Tabela 5.3 – Retração linear de secagem.

Pressão de compactação (MPa)	Retração linear de secagem (%)	Desvio-padrão
28	0,18	0,07
35	0,21	0,06

5.3.3 Retração linear de queima (RLQ)

A Tabela 5.4 apresenta os valores de retração linear de queima e seus respectivos desvios-padrões de acordo com a temperatura de queima e com a pressão de compactação empregada durante a conformação dos corpos de prova.

Tabela 5.4 – Retração linear de queima

Condição	Temperatura de queima (°C)	Pressão de compactação (MPa)	RLQ (%)	Desvio padrão
1	950	28	4,59	0,20
2	950	35	4,46	0,06
3	1100	28	9,63	0,03
4	1100	35	9,77	0,32

Observou-se que o aumento da temperatura de queima resultou em maior retração linear. Durante o processo de queima, devido à fusão parcial dos componentes menos refratários, uma fase líquida é formada dentro do produto. Melchiades *et al.* (2001) aponta que essas fases líquidas provocam a aproximação das partículas sólidas, resultando na diminuição do volume de poros e, conseqüentemente, na retração do corpo cerâmico. Ainda, observou-se que a variação da pressão de compactação pouco influenciou nos valores de retração linear de queima.

Em todas as quatro condições a retração linear atendeu aos critérios dispostos pelo Instituto de Pesquisa Técnicas – IPT (1985 *apud* AMORIM, 2007), mostrados na Tabela 3.5, não excedendo o valor de 12%.

5.3.4 Massa específica aparente (MEA)

São mostrados na Tabela 5.5 os valores de massa específica aparente e seus respectivos desvios-padrão de acordo com a pressão de compactação empregada durante a conformação dos corpos de prova e com a temperatura de queima.

Tabela 5.5 – Massa específica aparente

Condição	Temperatura de queima (°C)	Pressão de compactação (MPa)	MEA (g/cm ³)	Desvio padrão
1	950	28	1,61	0,02
2	950	35	1,67	0,02
3	1100	28	1,91	0,03
4	1100	35	1,95	0,04

As condições 3 e 4, nas quais a temperatura de queima foi 1100 °C, apresentaram valores de MEA acima de 1,7 g/cm³, atendendo aos critérios dispostos pelo Instituto de Pesquisas Técnicas – IPT (1985 *apud* AMORIM, 2007) para fabricação de telhas e tijolos maciços e furados, como mostrado na Tabela 5.5. Entretanto, as condições 1 e 2, de temperatura de queima de 950 °C, estão em desacordo com os referidos critérios. Provavelmente, não houve nessa temperatura a formação de fase líquida suficiente para provocar uma maior aproximação das partículas sólidas. Consequentemente, houve uma menor densificação do corpo cerâmico.

Foi constatado que o aumento da temperatura e da pressão de compactação são diretamente proporcionais ao aumento da massa específica aparente. Entretanto, o parâmetro temperatura de queima influencia muito mais no aumento da massa específica aparente do que o parâmetro pressão de compactação.

5.3.5 Absorção de água (AA)

Os índices de absorção de água (AA) são mostrados na Tabela 5.6 de acordo com variação da temperatura de queima e da pressão de compactação. O menor valor de AA (15,23%) ocorreu nas amostras queimadas na temperatura de 1100 °C e pressão de compactação de 35 MPa. Já o maior valor de AA (25,92%) foi observado nas condições de temperatura de queima de 950 °C e pressão de compactação de 28 MPa.

É provável que, a 950°C, a formação da fase líquida não tenha sido suficiente para ocasionar um maior preenchimento dos poros, o que poderia levar a uma maior proximidade entre as partículas, reduzindo assim a porosidade e aumentando a densificação do corpo de prova cerâmico. Foi possível notar que a temperatura de queima foi a variável que mais afetou os resultados do índice de absorção de água, enquanto a pressão de compactação quase não influenciou nesse sentido.

As normas NBR 15270-1:2005 e NBR 15270-2:2005 estabelecem os requisitos dimensionais, físicos e mecânicos para blocos cerâmicos estruturais e de vedação a serem utilizados em obras de alvenaria e estabelecem para o índice de absorção de água valores entre 8% e 22%. A norma ABNT NBR 7170:1983, que fixa as condições exigíveis para tijolos maciços cerâmicos destinados a obras de alvenaria, não limita um valor para esse índice. Por fim, a norma NBR 15310:2009 fixa os requisitos dimensionais, físicos e mecânicos exigíveis para as telhas cerâmicas e estabelece um valor máximo de 20% para esse índice.

Sendo assim, as condições 3 e 4 se adequam aos critérios exigidos pelas normas anteriormente citadas, enquanto as condições 1 e 2 atendem apenas aos critérios estabelecidos pela NBR 7170.

Tabela 5.6 – Absorção de água

Condição	Temperatura de queima (°C)	Pressão de compactação (MPa)	AA (%)	Desvio padrão
1	950	28	25,92	0,44
2	950	35	24,04	0,26
3	1100	28	16,33	0,68
4	1100	35	15,23	0,10

5.3.6 Resistência à compressão uniaxial (RCU)

A resistência à compressão uniaxial dos corpos de prova é exibida na Tabela 5.7 de acordo com a temperatura de queima e pressão de compactação. O maior valor de RCU (182,54 MPa) foi obtido para temperatura de 1100 °C e pressão de compactação de 35 MPa, enquanto o menor valor de RCU (75,78 MPa) foi obtido para temperatura de 950 °C e pressão de compactação de

28 MPa. Foi possível observar que a variação da RCU é diretamente proporcional à variação da pressão de compactação e à temperatura de queima.

As normas NBR 15270-1:2005 e 15270-2:2005 recomendam uma resistência à compressão uniaxial de, pelo menos, 1,5 e 3,0 MPa para blocos de vedação e estruturais, respectivamente. Para os tijolos maciços, a NBR 7170:1983 estabelece os valores de RCU com base em três categorias: A, B e C, devendo apresentar, respectivamente, 1,5 MPa, 2,5 MPa e 4,0 MPa como valores mínimos para cada uma dessas categorias. No caso das telhas, a norma NBR 15310:2009 não estabelece valores mínimos para este índice. Para todas as condições testadas os valores de resistência à compressão foram superiores aos estabelecidos por estas normas.

Tabela 5.7 – Resistência à compressão uniaxial

Condição	Temperatura de queima (°C)	Pressão de compactação (MPa)	RCU (MPa)	Desvio padrão
1	950	28	75,78	3,41
2	950	35	85,76	4,21
3	1100	28	139,76	6,93
4	1100	35	182,54	4,83

6 CONCLUSÕES

A caracterização da argila mostra que o material tem densidade de 2,42 g/cm³ e umidade natural de 45,30%. Cerca de 15% das partículas têm diâmetro inferior a 2 µm e 22% possuem diâmetro maior que 20 µm, o que permite inferir que a distribuição granulométrica se aproxima ao adequado para a produção de tijolos furados e tijolos maciços. Constatou-se que a amostra é constituída por caulinita (91,6%), quartzo (3,7%), heulandita (2,7%), gibbsita (1,8%) e muscovita (0,2%). A análise termogravimétrica mostra que houve perda de massa de 14,34% até 1000 °C, em consonância com dados literários. Os valores obtidos para limite de liquidez (LL), limite de plasticidade (LP) e índice de plasticidade (IP) são, respectivamente, 72,23%, 51,35%, e 20,87 %. O índice de plasticidade do material se encontra dentro da faixa de valores aceitáveis para matérias-primas de cerâmica vermelha, enquanto os limites de liquidez e de plasticidade determinados se encontram fora dos padrões recomendados.

A caracterização tecnológica da argila indica que os resultados obtidos para composição granulométrica e os limites de liquidez e de plasticidade são próximos ao adequado para matérias-primas utilizadas na produção de cerâmica vermelha. Portanto, seria interessante avaliar a incorporação de outras matérias-primas a essa argila visando ajustar essas características e propriedades à produção desses materiais. Um *blend* com argilas magras, que são mais arenosas e possuem uma menor quantidade de grãos finos, pode propiciar esse ajuste.

Todos os corpos de prova cerâmicos confeccionados apresentaram superfícies regulares e coloração homogênea em tom alaranjado-avermelhado. Em algumas exceções, os corpos de prova apresentaram defeitos estruturais. Entretanto, este fator não implicou na perda de qualidade e nem influenciou os resultados dos demais ensaios tecnológicos.

A respeito dos ensaios realizados a partir dos corpos cerâmicos, observou-se que, em geral, a retração linear de secagem foi inferior a 1%, o que permite inferir que este parâmetro exerce pouca influência sobre as dimensões finais de um corpo de prova. O maior valor de retração linear de queima foi de 9,77%, observado na condição 4 (temperatura de queima de 1100 °C e pressão de compactação de 35 MPa).

As condições 3 e 4 (nas quais a temperatura de queima foi 1100 °C), apresentaram os maiores valores de massa específica aparente, de 1,91 e 1,95 g/cm³, respectivamente; enquanto as condições 1 e 2 apresentaram resultados abaixo de 1,7 g/cm³, não atendendo aos critérios recomendados para fabricação de cerâmica vermelha.

O menor valor de absorção de água (15,23%) ocorreu na condição 4 (temperatura de queima de 1100 °C e pressão de compactação de 35 MPa). Já o maior valor (25,92%) foi observado na condição 1 (temperatura de queima de 950 °C e pressão de compactação de 28 MPa). Para todas as condições testadas os valores de resistência à compressão foram consideravelmente superiores aos valores mínimos estabelecidos pelas normas vigentes.

De modo geral, verificou-se que os valores de temperatura de queima e de pressão de compactação são diretamente proporcionais aos valores de retração linear de queima, de massa específica aparente e de resistência à compressão uniaxial, ao passo que são inversamente proporcionais aos valores de índice de absorção de água. Entretanto, nota-se que a variável temperatura de queima exerce maior influência nos resultados dos parâmetros resposta avaliados.

Os resultados obtidos através dos ensaios tecnológicos para cerâmica mostraram que a argila estudada pode ser empregada para a confecção de tijolos maciços, telhas, blocos de vedação e estruturais de cerâmica vermelha, uma vez que os resultados dos parâmetros analisados para as condições 3 e 4, de temperatura de queima de 1100 °C e pressões de compactação de 28 e 35 MPa, respectivamente, se mostraram dentro dos limites recomendados pelas normas NBR 7170:1983, NBR 15270-1:2005, NBR 15270-2:2005 e NBR 15310:2009.

A caracterização da argila e os ensaios realizados com os corpos cerâmicos produzidos forneceram importantes informações que podem possibilitar um melhor aproveitamento econômico da matéria-prima. Além disso, podem possibilitar o aprimoramento das técnicas de produção já existentes e o surgimento de novas indústrias cerâmicas na região, o que poderia proporcionar a geração de empregos e desenvolvimento econômico.

7 SUGESTÕES

Este trabalho possibilitou a obtenção de importantes informações acerca da argila estudada, sendo possível afirmar que se trata de um material promissor. Entretanto, devido ao contexto da pandemia, não foi possível a realização de alguns ensaios que poderiam contribuir para a determinação de outras importantes características dessa argila. Sob esta ótica, portanto, seria interessante a realização de ensaios para determinação da composição química e de determinação da densidade por picnômetro a gás, além de outros estudos que poderiam complementar com mais informações. Além disso, seria valorosa avaliação da incorporação de outros materiais a esta argila para produção de cerâmica vermelha.

REFERÊNCIAS

ABAJO, M. F. **Manual sobre Fabricación de Baldosas, Tejas y Ladrillos**. Beralmar S.A., Terrassa, 2000. 360 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CERÂMICA (ABCERAM). **Informações técnicas – Processos de fabricação**. 2020. Disponível em: <https://abceram.org.br/processo-de-fabricacao/>. Acesso em: 02 mar. 2020.

AMORIM, F. R. **Co-processamento de dregs em argila para produção de cerâmica vermelha**. 2007. Dissertação (Mestrado em Saneamento) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15270-1: Componentes Cerâmicos – Parte 1: Blocos cerâmicos para alvenaria de vedação – Terminologia e requisitos**. Rio de Janeiro, 2005. 11p.

_____. **NBR 15270-2: Componentes cerâmicos – Parte 2: Blocos cerâmicos para alvenaria estrutural – Terminologia e requisitos**. Rio de Janeiro, 2005. 11p.

_____. **NBR 15270-3: Componentes cerâmicos – Parte 3: Blocos cerâmicos para alvenaria estrutural e de vedação – Métodos de ensaios**. Rio de Janeiro, 2005. 27p.

_____. **NBR 15310: Componentes cerâmicos – Telhas – Terminologia, requisitos e métodos de ensaio**. Rio de Janeiro, 2009. 47p.

_____. **NBR 6459: Solo – Determinação do limite de liquidez**. Rio de Janeiro, 2016. 5 p.

_____. **NBR 7170: Tijolo maciço cerâmico para alvenaria**. Rio de Janeiro, 1983. 4p.

_____. **NBR 7180: Solo – Determinação do limite de plasticidade**, 2016. 3p.

BACCELI JR., G. **Avaliação do Processo Industrial da Cerâmica Vermelha na Região do Seridó – RN**. Tese (Doutorado em Tecnologia dos Materiais). 199 p. UFRN, 2010.

BANCO CENTRAL DO BRASIL. **Economia Mineira: estrutura produtiva e desempenho recente** In: Boletim Regional do Banco Central do Brasil Janeiro 2013. Disponível em: <http://www.bcb.gov.br/pec/boletimregional/port/2013/01/br201301b3p.pdf> . Acesso em: 15 ago. 2021.

BARBOSA, P. C. **Aproveitamento de rejeito da concentração de minério de ferro na produção de cerâmica vermelha**. Monografia (Graduação em Engenharia de Minas) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2017.

BOGAS, J. A. **Materiais cerâmicos**, Técnico Lisboa, 2013.

BROWN, M. E.; GALLAGHER, P. K. (Ed.). **Handbook of Thermal Analysis and Calorimetry: Applications to inorganic and miscellaneous materials**. Elsevier, 2003.

CABRAL JUNIOR, M.; MOTTA, J. F. M.; ALMEIDA, A. S.; TANNO, L. C. **Argila para Cerâmica Vermelha**. In: LUZ, A. B.; LINS, F. A. F. Rochas e Minerais Industriais: usos e especificações. 2. Ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2008. Cap. 33, p. 747 – 770.

CALLISTER JR, W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais: uma Introdução**, 5^a ed., Rio de Janeiro, RJ, LTC, 2002.

CAPUTO, H. P.; CAPUTO, A. N.; RODRIGUES, J. M. A. **Mecânica dos Solos e suas Aplicações: Fundamentos**. 7. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora, 2015. 249 p.

CARTER, C. B.; NORTON, M. G. **Ceramic materials science and engineering**. 2007.

CARTY, W. M.; SENAPATI, U. **Porcelain – raw materials, processing, phase evolution and mechanical behavior**. Journal of the American Ceramic Society, v. 81, n. 1, p. 3-20, 1998.

COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS (CPRM). **Folha SE.23-Z-D-III Dom Cavati**. Belo Horizonte: 2000. Escala: 1:100.000. Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil. Disponível em: https://rigeo.cprm.gov.br/jspui/bitstream/doc/8650/36/Mapa_Dom%20Cavati.pdf. Acesso em: 01 set. 2021.

COTA, T. G. **Incorporação de resíduos da fabricação de ferro-ligas de manganês e de finos de esteatito na produção de cerâmica vermelha**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2017.

DAITX, E. C., FERREIRA, G. C. **Características e especificações da areia industrial**. Geociências, 19(2), 235-242, 2000.

FILHO, M. R. M. **Aproveitamento de resíduos graníticos finos na fabricação de cerâmica vermelha**. Monografia (Graduação em Engenharia de Minas) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2019.

FÖLDOVÁRI, M. **Handbook of Thermogravimetric System of Minerals and its Use in Geological Practice**. Occasional Papers of the Geological Institute of Hungary, v. 213. 180p. Hungria, 2011.

GONÇALVES, W. P., SILVA, V. J., GOMES, J., MENEZES, R. R., NEVES, G. A., FERREIRA, H. C., SANTANA, L. N. L. **Avaliação da influência de diferentes tratamentos térmicos sobre as transformações de fases esmectitas**. Cerâmica, v. 60, n. 355, p. 316-322, 2014.

HARVEY, C. C.; LAGALY, G. **Industrial Applications**. In: BERGAYA, F. LAGALY, G. Handbook of Clay Science. Developments In Clay Science, [S.L.], p. 451-490, 2013. Elsevier. <http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-08-098259-5.00018-4>.

HLAVAC, J. **The technology of glass and ceramics**. Prague: Department of Silicates, Institute of Chemical Technology, 1983.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Panorama do Estado de Minas Gerais**. 2010. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/mg/panorama/>. Acesso em: 31 ago. 2020.

INSTITUTO DE PESQUISAS TÉCNICAS (IPT). **Ensaio de argila visando a utilização em cerâmica vermelha**. São Paulo: IPT, 1985.

KEITH, K. S., MURRAY H. H. **Common clays and shales**. In: KOGEL J. E., TRIVEDI N. C., BARKER J. M., KRUKOWSKI S. T. (Ed.). *Industrial Minerals & Rocks, commodities, Markets and Uses*. Colorado, EUA: Society of Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc. 2006., p. 369-371. ISBN: 9780873352499

LIMA, R. H. C.; MORENO, M. M. T. **Uso da distribuição granulométrica como parâmetro de controle na elaboração da massa cerâmica de composição binária**. *Cerâmica Industrial*, v. 14, n. 5/6, p. 34-38, 2009.

LIMA, T. M.; NEVES C. A. R. **Sumário Mineral 2015**. Brasília, Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), v. 35, 135 p. 2016.

LŘNVIK, K., SMYKATZ-KLOSS, W. **Comparative studies of structural transformations of carbonate and silica minerals by means of thermosonimetry and differential thermal analysis**. — *Thermochemica Acta* 72 (1–2), pp. 159–163, 1984.

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

MELCHIADES, F. G. ROVERI, C. D., SOTÉRIO, J., SILVA, L. L, BOSCHI, A. O. **Controle Dimensional e do Formato de Revestimentos Cerâmicos. Parte I: Dimensões**. *Cerâmica Industrial*, v. 6. pp 27-33, 2001.

NOGUEIRA, A. H. **Os desafios da Mesorregião do Vale do Rio Doce**. 2019. Disponível em: <https://minasguide.com/blog/mesorregiao-vale-do-rio-doce/>. Acesso em: 09 fev. 2020.

PASCHOAL, J. A. A. **Estudos de parâmetros de qualidade para a cerâmica estrutural vermelha**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Construção Civil, Universidade Federal de São Carlos, UFSCar, 2003.

PRACIDELLI, S., MELCHIADES, F. G. **Importância da composição granulométrica de massas para a cerâmica vermelha**. *Cerâmica Industrial*, v. 2, n. ½, p. 31-35, 1997.

PREFEITURA MUNICIPAL DE PERIQUITO. (org.). **Plano Municipal de Saneamento Básico do Município de Periquito – MG**. Periquito: pud2016. 395 p. Disponível em: https://www.cbhsuacui.org.br/wp-content/uploads/2015/07/P3_R1_PERIQUITO.pdf. Acesso em: 01 set. 2021.

SANTOS, P. S. **Ciência e tecnologia de argilas**. v.1, 2.ed. rev. amp. São Paulo, 1989.

SANTOS, P. S. **Tecnologia de argilas, aplicada às argilas brasileiras**. v.2. São Paulo: Universidade de São Paulo, 1975.

SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A.; BRAGA, P. F. A. **Tratamento de Minérios: Práticas Laboratoriais**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2007. 570 p.

SILVA, M. C. A. **Incorporação de finos de quartzito na produção de cerâmica vermelha**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2020.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (USGS). **Mineral Commodity Summaries** 2018. United States Geological Survey, 2018. 200p. ISBN: 9781411341999, doi: 10.3133/70194932

VAN VLACK, L. H. **Propriedades dos materiais cerâmicos**. Tradução Cid Silveira e Shiroyuki Oniki. São Paulo, Ed. Da Universidade de São Paulo, 1973.

VICTORIA, A. M. **Recursos minerais para a indústria cerâmica e vidreira**. Recursos Minerais de Minas Gerais. 2018. Disponível em: <http://recursomineralmg.codemge.com.br/substancias-minerais/gemas-e-minerais-raros/>. Acesso em: 13 ago. 2021.

VIEIRA, C. M. F.; FEITOSA, H. S.; MONTEIRO, S. N. **Avaliação da Secagem de Cerâmica Vermelha Através da Curva de Bigot**. Cerâmica Industrial, v. 8. pp 42-46, 2003.

APÊNDICE

APÊNDICE A – UMIDADE DA MASSA CERÂMICA DE ACORDO COM O CORPO DE PROVA

Tabela A.1 – Umidade dos corpos de prova

CP	Umidade (%)
01	11,9
02	14,7
03	12,9
04	14,5
05	14,9
06	13,7
07	12,5
08	13,3
09	14,1
10	12,1
11	10,5
12	10,7
13	12,5
14	12,3
15	12,7
16	13,7
17	12,5
18	13,5
19	13,3
20	14,7
21	13,5
22	13,5
23	13,5
24	13,3