

UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS

SEBASTIÃO BATISTA RAMOS JÚNIOR

**AVALIAÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS E CONTROLE NA FORMULAÇÃO DE
MASSA PARA FABRICAÇÃO DE TIJOLO NUMA INDÚSTRIA DO POLO
CERÂMICO DE MANACAPURU – AM**

Manaus - AM

2023

SEBASTIÃO BATISTA RAMOS JÚNIOR

**AVALIAÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS E CONTROLE NA FORMULAÇÃO DE
MASSA PARA FABRICAÇÃO DE TIJOLO NUMA INDÚSTRIA DO POLO
CERÂMICO DE MANACAPURU – AM**

Dissertação de Mestrado apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em Geociências
da Universidade Federal do Amazonas, como
requisito para a obtenção do título de Mestre
em Geociências.

ORIENTADOR: Profº, Dr. RAIMUNDO HUMBERTO CAVALCANTE LIMA

Manaus – AM

2023

Ficha Catalográfica

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Ramos Junior, Sebastião Batista
R175a Avaliação das matérias-primas e controle na formulação de massa para fabricação de tijolo numa indústria do polo cerâmico de Manacapuru – AM / Sebastião Batista Ramos Junior . 2023
55 f.: il. color; 31 cm.

Orientador: Raimundo Humberto Cavalcante Lima
Dissertação (Mestrado em Geociências - Geologia Ambiental) - Universidade Federal do Amazonas.

1. Argila. 2. Cerâmica. 3. Controle. 4. Massa. 5. Temperatura. I. Lima, Raimundo Humberto Cavalcante. II. Universidade Federal do Amazonas III. Título

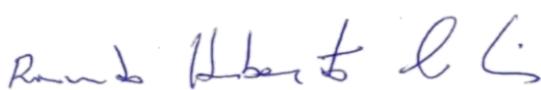
SEBASTIÃO BATISTA RAMOS JÚNIOR

AVALIAÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS E CONTROLE NA FORMULAÇÃO DE
MASSA PARA FABRICAÇÃO DE TIJOLO NUMA INDÚSTRIA DO POLO
CERÂMICO DE MANACAPURU – AM

Dissertação apresentada ao Programa
de Pós-Graduação Geociências, da
Universidade Federal do Amazonas
como requisito para obtenção do título
de Mestre em Geociências.

Linha de pesquisa: Geologia ambiental.

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Raimundo Humberto Cavalcante Lima, Presidente.
Universidade Federal do Amazonas, PPGGEO



Prof. Dr. Jean Carlos Silva Andrade, Membro.
Universidade Federal do Amazonas, PPGCEM



Prof. Dr. João de Almeida Melo Filho, Membro.
Universidade Federal do Amazonas, DEC/FT

DEDICATÓRIA

Dedico esse trabalho aos meus pais pela luta em minha criação, minha filha, esposa e demais familiares, professores e amigos que de forma direta ou indireta me ajudaram no decorrer dessa caminhada.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por ser sempre a luz que me guia em todos os caminhos da minha vida. Aos meus pais Sra. Edivalda e Sr. Sebastião pela minha criação e por todos os princípios de honra e honestidade dados a mim, a partir do meu nascimento. A minha amada filha Danielly Ramos e amada esposa Sara Marinho, por sempre acreditarem em mim e na minha capacidade. Aos professores Dr Raimundo Humberto, Dr José Calado pela paciência e ensinamentos no decorrer de todo o curso de mestrado. Aos companheiros de mestrado e amigos que de alguma forma fizeram parte desta trajetória. A indústria cerâmica Bombons Irmãos pela parceria e disponibilidade de matérias-primas para realização da pesquisa, A FAPEAM pelo auxílio financeiro quando fui bolsista, ao Programa de Pós-graduação em Geociências da UFAM, ao Laboratório de Materiais da Amazônia e Compósitos – LAMAC da Faculdade de Tecnologia – UFAM, ao Laboratório de Análises Minerais (LAMIN), instalado no Serviço Geológico do Brasil (CPRM/Manaus) de aos professores e demais funcionários do programa, em especial ao coordenador Marcos por seu eficiente trabalho nos esforços para sempre buscar resolver as dificuldades administrativas inerentes ao programa.

UMA FRASE

O SENHOR é o meu pastor, nada me faltará.

Salmos 23

RESUMO

A preparação de massa é importante para um bom desempenho da fabricação de tijolos na indústria de cerâmica vermelha. Nessa temática, o presente estudo objetiva avaliar as matérias-primas compostas de duas argilas coletadas numa indústria cerâmica de Manacapuru. Neste estudo, as matérias-primas foram caracterizadas por meio das técnicas de fluorescência de raios X (FRX) e difração de raios X (DRX) para identificação dos elementos químicos e mineralógicos, granulometria a *laser* e limites de Atterberg para avaliar a distribuição granulométrica e índice de plasticidades das matérias-primas. Nos resultados químicos, foram identificados teores elevados de dióxido de silício (SiO_2) e óxido de alumínio (Al_2O_3); já na mineralogia, podem ser observados percentuais predominantes de caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) e quartzo (SiO_2); enquanto os ensaios físicos mostraram granulometria fina, bem como uma argila altamente plástica e a outra menos plástica. Em laboratório, foram feitas cinco formulações diferentes, denominadas M1, M2, M3, M4, M5, e confeccionados 75 corpos de prova, queimados em três temperaturas planejadas, 700 °C, 800 °C e 900 °C. Nos ensaios tecnológicos de retração linear, absorção de água, porosidade aparente e tensão de ruptura à flexão, é avaliado o comportamento das peças em relação à mistura e às temperaturas. Ao final da pesquisa, observou-se que as formulações M4 e M5 apresentaram melhor desempenho tecnológico das peças queimadas em todas as temperaturas planejadas para essa pesquisa. Isso mostra que o controle na formulação da massa e a temperatura serviram como base para propor adaptações dos ensaios de laboratório que avaliaram a retração linear (RL), absorção de água (AA), porosidade aparente (PA) e tensão de ruptura a flexão (TRF), visando melhorar a qualidade do produto final na indústria.

Palavras-chave: Argila, Cerâmica, Controle, Massa, Temperatura.

ABSTRACT

The mass preparation is important for a good performance of brick manufacturing in the red ceramic industry. In this theme, the present study aims to evaluate the raw materials composed of two clays collected in a ceramic industry in Manacapuru. In this study, the raw materials were characterized using X-ray fluorescence (XRF) and X-ray diffraction (XRD) techniques to identify chemical and mineralogical elements, laser granulometry and Atterberg limits to evaluate the particle size distribution and plasticity index of the raw materials. In the chemical results, high contents of silicon dioxide (SiO_2) and aluminum oxide (Al_2O_3) were identified; already in the mineralogy, predominant percentages of kaolinite ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) and quartz (SiO_2) can be observed; while the physical tests showed fine granulometry, as well as one highly plastic clay and the other less plastic. In the laboratory, five different formulations were made, named M1, M2, M3, M4, M5, and 75 specimens were made and fired at three planned temperatures, 700 °C, 800 °C, and 900 °C. In the technological tests of linear shrinkage, water absorption, apparent porosity and tensile strength to bending, the behavior of the pieces is evaluated in relation to the mixture and the temperatures. At the end of the research, it was observed that formulations M4 and M5 presented the best technological performance of the fired pieces at all temperatures planned for this research. This shows that the control in the formulation of the mixture and the temperature served as a basis for proposing adaptations of the laboratory tests that evaluated the linear shrinkage (RL), water absorption (AA), apparent porosity (AP) and tensile strength to bending (TRF), aiming to improve the quality of the final product in the industry.

Keywords: Clay, Ceramics, Control, Mass, Temperature.

LISTA DE FIGURA

Figura 1 – Linha de máquina para fabricação de tijolos e blocos em indústria de cerâmica vermelha. Fonte: https://br.pinterest.com/pin/811492426578562181/ , acesso 2022.	18
Figura 2 – Fluxograma para um processo de produção na indústria cerâmica. Fonte, PSQ-BC (ANICER, 2022).	19
Figura 3 – Demonstração estrutural da Curva de queima. Fonte: adaptada de Guimaraes (2017).	29
Figura 4 – Fluxograma com etapas metodológicas realizadas cronologicamente. Fonte: Própria 2022.	30
Figura 5 – Imagem da unidade geológica da área de estudo. (Fonte: Própria 2021), obtido por meio do link, https://earth.google.com/web/@-3.21546218,60.51841406,14.77064886a,64463.6071521d,35y,57.16177607h,60.48118094t,0r 2022.	31
Figura 6 – Localização da indústria onde foram coletadas as amostras de argila (Fonte própria 2021)	31
Figura 7 – Coleta das matérias-primas no estoque de argila numa indústria de Manacapuru-AM. Fonte própria 2022.	32
Figura 8 – Granulômetro a laser Mastersizer. Fonte: CPRM 2022.	34
Figura 9 – (a) Prensa hidráulica. (b) Prensagem dos corpos de prova. (c) Extrator do corpo de prova prensado. Fonte: Própria 2022.	37
Figura 10 – Forno mufla da marca JUNG, (a) Organização das peças no interior do forno para realização de queima. (b): Ver-se o forno iniciando o processo de queima com gerenciamento e controle por meio de termopar. Fonte: própria 2022.	37
Figura 11 – Curva planejada para queima dos corpos de prova (Fonte própria 2022)	38
Figura 12 – (a) Flexímetro, (b) Corpo de prova posicionado para romper, (c) Rompimento e leituras da tensão exercida na ruptura a flexão, Fonte: Própria 2021.	40
Figura 13 – Difratograma da análise de mineralogia das argilas: (a) Argila A: Q – Quartzo (ICSD 079634) / K – Caulinita (ICSD 068697); (b) Argila B: Q – Quartzo (ICSD 089278) / K – Caulinita (ICSD 068697) / H – Hematita (ICSD 082136), (Fonte própria 2022)	42
Figura 14 – Comportamento da distribuição granulométrica da argila A e B, (Fonte própria 2022)....	43
Figura 15 – Retração linear dos corpos de prova queimados (Fonte: Própria 2022)	45
Figura 16 – Absorção de água e corpos de prova queimados (Fonte: Elaboração Própria 2022)....	46
Figura 17 – Porosidade aparente dos corpos de prova queimados (Fonte: Elaboração Própria 2022)....	47
Figura 18 – Tensão de ruptura à flexão nos corpos de prova queimados (Fonte: Elaboração Própria 2022)	48

LISTA DE TABELA

Tabela 1 – As principais vantagens e desvantagens dos sistemas de secagem.	27
Tabela 2 – Comportamento térmico do material argiloso durante a queima das peças.....	28
Tabela 3 – Indica as descrições da matéria prima conforme os índices de plasticidade	35
Tabela 4 – Formulação de massa cerâmica para conformação dos corpos de prova	36
Tabela 5 – Composição química média das amostras.	41
Tabela 6 – Valores de Limite de Liquidez (LL), Limite de Plasticidade (LP) e Índice de Plasticidade (IP).....	44

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	14
1.2 OBJETIVOS	16
2. CONTEXTOS GEOLÓGICOS	17
3. FUNDAMENTAÇÃO TEORICA	18
3.1 Processos fabris cerâmicos	18
3.1.1 Extração e estocagem de argila	19
3.1.2 Desintegrador.....	20
3.2 Caracterização das matérias primas.....	20
3.2.1 Fluorescência de raios X.....	21
3.2.2 Difração de raios X.....	21
3.2.3 Granulometria.....	22
3.2.4 Plasticidade.....	22
3.3 Controles na preparação da massa.....	23
3.3.1 Misturador	24
3.3.2 Laminação	24
3.4 Controles na conformação	25
3.4.1 Corte	25
3.5 Tratamento térmico.....	26
3.5.1 Controle da secagem.....	26
3.5.2 Controle da queima.....	27
3.6 Controles de qualidade do produto cerâmico	29
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	30
4.1. Área de estudo	30
4.2 Materiais e coleta.....	32
4.3 Preparação e caracterização das matérias primas	32
4.3.1 Espectroscopia de fluorescência de raios X (FRX)	33
4.3.2 Difratometria de raios X. (DRX)	33
4.3.3 Analise granulométrica.....	34
4.3.4 Análise de plasticidade	34
4.4 Formulações da massa cerâmica.....	35
4.5 Conformação dos corpos de prova	36
4.6 Secagem e queima dos corpos de prova	37

4.7 Ensaios tecnológicos.....	39
4.7.1 Retração Linear de queima (RLq)	39
4.7.2 Absorção de Água AA.....	39
4.7.3 Porosidade aparente (PA)	40
4.7.4 Tensão de ruptura a flexão (TRF).....	40
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	41
5.1 Analise química	41
5.2 Analise mineralógica	42
5.3 Analise granulométrica.....	43
5.4 Índice de plasticidade	44
5.5 Ensaios Tecnológicos	45
5.5.1 Retração linear após queima (RLq)	45
5.5.2 Absorção de água AA.....	46
5.5.3 Porosidade aparente (PA)	47
5.5.4 Tensão de ruptura a flexão (TRF).....	47
CONCLUSÕES	48
REFERENCIAS	51
ANEXO artigo submetido e aceito na revista GEOCIÊNCIAS, UNESP, ISSN: 1980-900X (online), classificação B2, pela Quallis Capes (2017 a 2020)	1

1. INTRODUÇÃO

A Cerâmica vermelha, também conhecida como cerâmica estrutural, é denominação atribuída à categoria de produtos, utilizados na construção civil, como tijolos, blocos e telhas (AMARAL, 2016). São produtos derivados da argila, material natural terroso de granulação fina extraídas de rochas sedimentares, constituída essencialmente de minerais, matéria orgânica e outras impurezas (REIS et al., 2019). Uma das principais propriedades desses materiais é desenvolver plasticidade com quantidade apropriada de água, e endurecer após secagem e queima, (SAVAZZINI, 2016)

No Brasil a indústria cerâmica tem participação a cerca de 1% no PIB nacional, sendo aproximadamente 40% representado por olarias de cerâmica vermelha (ANICER, 2021a). Nesse seguimento em escala regional, o polo oleiro no estado do Amazonas concentra-se, majoritariamente, nos municípios de Iranduba e Manacapuru, região metropolitana de Manaus, atualmente com 29 olarias ativas (NASCIMENTO, 2019).

As jazidas favoráveis à exploração das argilas dessa região estão situadas, principalmente, nas regiões de planícies de inundação do Rio Solimões e Rio Negro formando os depósitos aluvionares, secundariamente, em depósitos sedimentares formados pelo intemperismo de rochas que constitui os depósitos chamados Formação Álter do Chão. Esses materiais têm potencial para compor a massa na fabricação de tijolos com alta qualidade (RODRIGUES et al., 2015).

Porém, para Campelo, (2010), os produtos fabricados nessa região apresentou deficiência na qualidade, quando em seus estudos verificou que as empresas desse polo trabalham de forma empírica, utilizando a experiência visual e tato, obtendo pouco ou nenhum controle quanto aos processos, principalmente na formulação de massa e queimam das peças cerâmicas, fato ainda comum atualmente.

Rodrigues et al., (2015), também destaca a constatação, via ensaios tecnológicos, que mais de 50% dos tijolos estudados provenientes deste polo apresentaram inconformidade em relação aos padrões exigidos pela norma brasileira da ABNT.

A falta de gerenciamento técnico na preparação da massa acarreta problemas quanto ao aproveitamento eficiente dessas matérias-primas, além de influenciar negativamente na qualidade final, colabora para o entrave na elaboração de estudos e projetos no desenvolvimento de novos produtos (LIMA, 2010).

Neste contexto, com um mercado cada vez mais competitivo, obriga as empresas a atenderem diversas exigências aplicando melhorias no processo de fabricação visando a

padronização para garantir excelência do produto desejada pelo consumidor, (GONÇALVES, 2021).

Diante essa temática, a Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, possui em seu acervo, métodos de ensaios e especificações próprias para os blocos cerâmicos, (SENA, 2014). São parâmetros e técnicas de controle, atributos qualitativos geralmente observados a olho nu, em combinação com as variáveis verificadas através dos ensaios em laboratório, (KILLER, 2019).

Sendo assim, entende-se que a falta de estudos prévios sobre a melhor mistura a ser empregada pode ser um dos fatores que levam ao alto índice de perdas, ocasionadas por retracções excessivas, geralmente acompanhadas por trincas que levam ao enfraquecimento dos produtos (AZEREDO, 2015). Esse fator contribuindo para elevado número de blocos quebrados na movimentação e armazenamento (SCHACKOW; CORREIA; EFFTNG, 2020). Segundo Laursen, (2019), as deformações e baixa resistência das peças fabricadas consistem na deficiência de controle tecnológico, escolha e dosagem de matérias-primas e mecanismos no processo.

Para alcançar bons resultados se faz necessário à caracterização por meio de ensaio químico, mineralógico, físico e mecânico, permitindo o fortalecimento dos requisitos para tomada de decisão na definição de controle na preparação da massa e gerenciamento de queima, (QUEIROZ, 2021). Lima, (2010) afirma que o atendimento a esses requisitos está relacionado com a forma que as atividades são desenvolvidas no controle de formulação.

Seguindo esse raciocínio, a presente pesquisa direciona-se para avaliar as matérias-primas argilosas quanto a seu emprego na fabricação de tijolos furados, visando sugerir técnica de controle na obtenção de uma massa cerâmica mais adequada para o processo produtivo em uma indústria cerâmica localizada no polo cerâmico de Manacapuru.

O objetivo é avaliar em laboratório as matérias-primas compostas por duas argilas e elaborar novas formulações de massa mais adequadas para garantir bom desempenho de queima dos corpos de prova visando melhorar a qualidade do produto final.

Para o estudo foi adotado como base para tomada de decisão no planejamento da pesquisa, estudos preliminares dos percentuais utilizados pela indústria que apresentavam inconsistência no processo de fabricação. A finalidade da pesquisa é gerar dados técnicos científicos para propor adaptações na indústria.

1.2 OBJETIVOS

Geral

Esta pesquisa tem por objetivo avaliar em laboratório as matérias-primas composta por duas argilas e propor controle para uma indústria na formulação de massa e queima de tijolos cerâmicos, visando melhorar a qualidade do produto final.

Específicos

- Caracterizar as matérias-primas argilosas, por meio de ensaio laboratorial físico, químico e mineralógico.
- Testar cinco formulações controlando os percentuais de mistura visando massa mais homogênea com melhor desempenho tecnológico.
- Avaliar o comportamento de queima dos materiais cerâmicos em diferentes temperaturas controladas para definir patamar mais adequado para queima dos corpos de prova.
- Realizar ensaios através dos corpos de prova para avaliar a característica estética e tecnológica face à norma técnica ABNT, vigente para fabricação de tijolos furados e bloco de vedação.

2. CONTEXTOS GEOLÓGICOS

Em decorrência da constituição do substrato geológico brasileiro, que dispõe de extensas coberturas sedimentares, bacias fanerozoicas e depósitos cenozoico, aliado à evolução geomorfológica, que propiciou a geração de expressivas coberturas residuais intemperadas, os depósitos de argilas para fins cerâmicos possuem ampla distribuição geográfica em todo território nacional. (MOTTA, 2008). Segundo Sabino (2016), no contexto geológico, são distinguidos em dois tipos principais de depósitos, as argilas aluvionares e as argilas de bacias sedimentares formacionais, são geralmente exploradas para suprimento de matéria-prima na indústria de cerâmica vermelha.

Nesse contexto destacando, geologicamente, o município de Manacapuru que está situado em uma planície de dissecação, visualizado claramente em imagem de satélite. Conforme estudos geológicos realizados pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais – CPRM- (BRASIL, 2011). Essa região dispõe de extensas áreas de depósitos aluvionares e de depósitos formacionais de alteração Áter do Chão, constituindo as principais fontes de matéria-prima para mistura de massa para produção de tijolos.

Os depósitos aluvionares correspondem a terrenos geologicamente de formação mais recente representados por sedimentos depositados pelos rios atuais ao longo do período quaternário. As argilas aluvionar, geralmente apresenta maior plasticidade, são formadas por depósitos lenticulares, com porte métrico e distribuição em áreas que podem ser de poucos hectares até quilômetros quadrados, variando consoante a extensão da planície de inundação (EMMERICH; STEUDEL, 2016).

A região também apresenta sedimentos mais antigos, tratando-se de argilas das bacias sedimentares, também denominadas de formacionais, são unidades geológicas antigas das eras Paleozoica e Mesozoica 570 a 65 milhões de anos, secundariamente, a Terciária 65 a 1,8 milhões de anos. Nesses ambientes, as argilas mais puras constituem bolsões e lentes, e estão associadas a argilas arenosas, menos plásticas, que podem ser misturadas com as plásticas para a manufatura de diversos produtos, (CPRM, 2007) e (RODRIGUES, 2018).

Na literatura as argilas são definidas por diferentes tamanhos de partículas, com elevado teor de argilominerais de granulometria inferior a $2\mu\text{m}$. Essa característica tem potencial para formar uma massa plástica em meio aquoso e quando submetido uma temperatura superior a 700°C adquirir elevada dureza, (RACANELLI et al., 2020). Apresentam íons que podem ser orgânicos e inorgânicos fixados na superfície, entre as camadas e dentro dos canais da estrutura cristalina. Esses íons podem ser trocados por outros íons via reação química em solução aquosa sem que isso modifique sua estrutura cristalina, (RETHWISCH, 2013).

Geralmente os argilominerais subdividem-se em função de suas propriedades estruturais que fornecem o desempenho dessas matérias-primas para as mais diversas aplicações na indústria ceramista, (QUEIROZ, 2021).

3. FUNDAMENTAÇÃO TEORICA

A principal matéria-prima para indústria de cerâmica vermelha é formada pela alteração de rochas e deposição sedimentar que pode ser encontrada próxima de rios, muitas vezes formando barrancos nas margens. Apresenta-se em diversas cores e constitui uma família de minerais filossilicatos hidratados aluminosos de baixa cristalinidade como a caulinita, esmectita, montmorillonita, illitas. Geralmente, apresenta-se estável nas condições termodinâmicas e geoquímicas da superfície terrestre ou de crosta rasa. (CORREA, 2020).

3.1 Processos fabris cerâmicos

Os processos de fabricação cerâmicos assemelham-se parcial ou totalmente (MAIA, 2012). Na imagem abaixo, apresenta um panorama de modo geral, composição das etapas, extração da matéria-prima, preparação da massa, conformação das peças antecedendo o tratamento térmico até a expedição, (SILVA; MAIA, 2016), Figura 1.

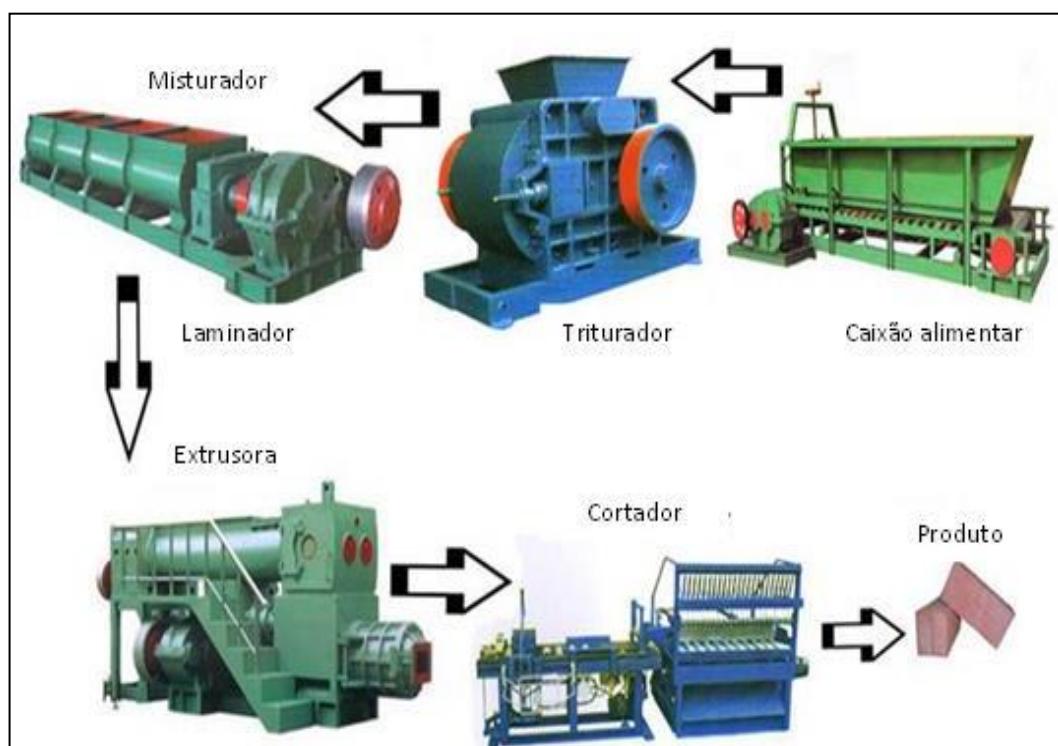


Figura 1 – Linha de máquina para fabricação de tijolos e blocos em indústria de cerâmica vermelha. Fonte: <https://br.pinterest.com/pin/811492426578562181/>, acesso 2022.

Nos processos com maior similaridade destaca-se a fabricação de blocos, tijolos e telhas com complexidade que precisa de análise e controle de forma global nos processos, (RACANELLI et al., 2020).

As etapas de fabricação estão constituídas um sistema em sequência planejado as etapas que se inicia na extração de matérias-primas até tratamento térmico com temperatura elevada, para promover as reações físicas e químicas para adquirir as propriedades tecnológicas desejadas. No fluxograma da Figura 2, pode ser observado o detalhamento das etapas de fabricação bem como os pontos em potencial que precisam de gerenciamento e controles específicos, PSQ-BC (ANICER, 2022).

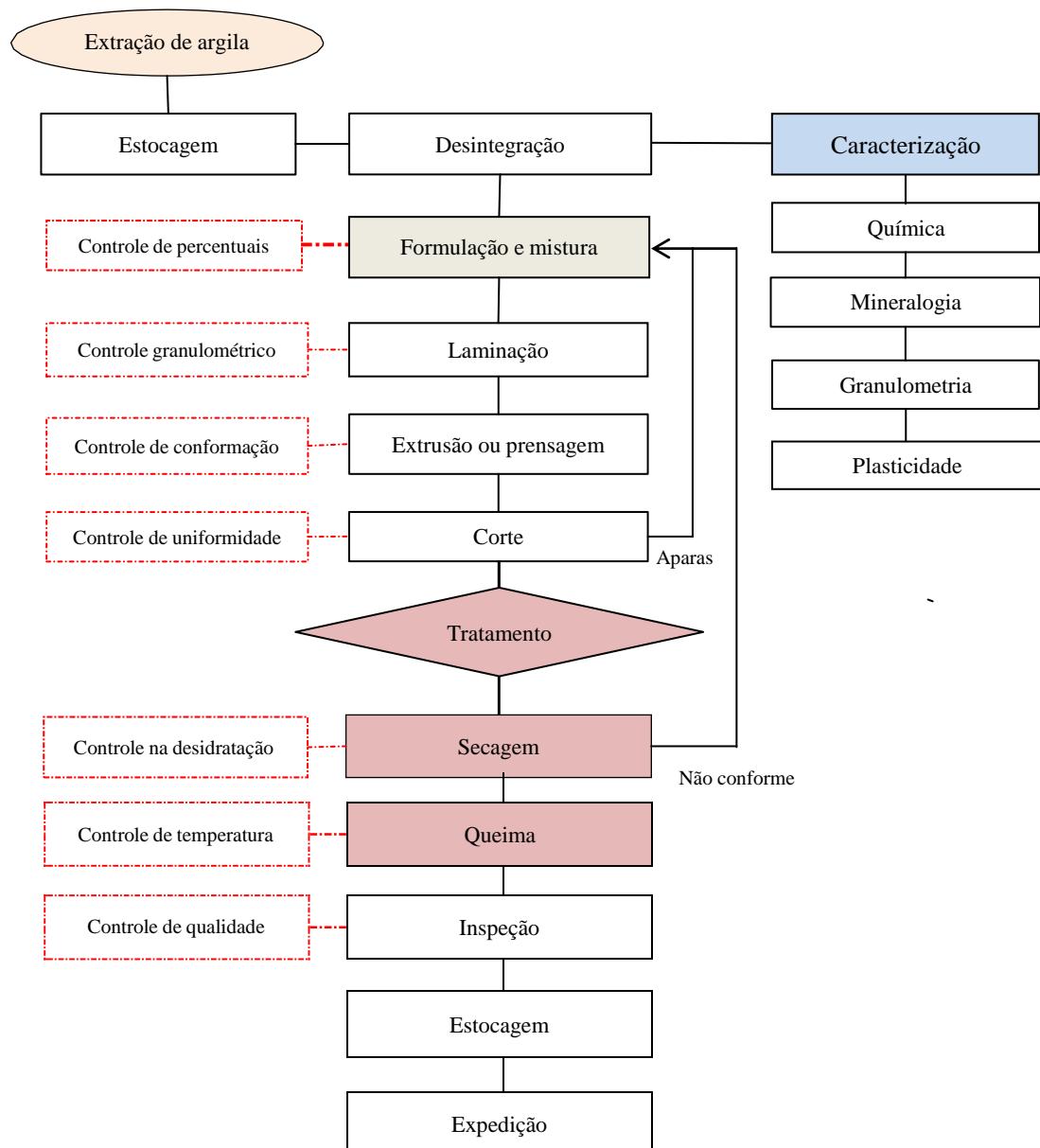


Figura 2 – Fluxograma para um processo de produção na indústria cerâmica. Fonte, PSQ-BC (ANICER, 2022).

3.1.1 Extração e estocagem de argila

Para uma boa gestão no controle de extração, deve ter como base a oferta e demanda do fluxo de vendas dos produtos fabricado, sendo este um fator determinante para um plano de produção devidamente ajustado a real necessidade da aplicação sustentável dos insumos,

(SALES, 2015). O planejamento inicial influencia na longevidade da vida útil da jazida e exploração racional dos depósitos minerais. (ALMEIDA, 2020).

A extração deve ser feita preferencialmente nos meses de menor precipitação por meio de sistema mecanizado como escavadeiras, pás carregadeiras, trator de esteira com lâminas, entre outros equipamentos auxiliares (ANICER, 2021b). De acordo Gomes (2015), a argila extraída deve ser estocada por alguns meses ao ar livre, prática chamada de sazonamento, onde o material adquire propriedades mais adequadas ao processamento. Uma dessas propriedades é o desempenho plástico em função da distribuição granulométrica e homogeneidade da água nas partículas, (CTGEO, 2018).

Com base nas informações do programa setorial de qualidade PSQ, recomenda que a estocagem adequação de um local devidamente identificado e controlado, evitando as corriqueiras contaminações por erros operacionais somente descobertas pelas perdas no processo (ANICER, 2022). Para isso o responsável técnico deve fazer análise amostral para verificar possíveis alterações no material coletado. Isso permite a ações preventivas de inconvenientes em campo, evitando prejuízo no processo produtivo, seja por perdas na conformação ou após a secagem e queima, (MORENO et al., 2016).

3.1.2 Desintegrador

O processo de desintegração de argilas é onde ocorre o fracionamento de torrões provenientes da extração ou de compactação no processo de estocagem e sazonamento (SALES, 2012).

O controle nesta etapa é extremamente importante para continuidade do processo, tendo em vista que ao fracionar esses torrões de argila tende a melhor o desempenho durante a mistura (RETHWISCH, 2013). Nessa etapa também é possível a retiradas de rejeitos como galhos, folhas e pedras incompatíveis com as matérias-primas, (KILLER, 2019). Esse processo é importante também para facilitar a manipulação nos ensaios de caracterização e homogeneidade na mistura da massa para chegar à extrusão com uma composição elementar uniforme em todos os pontos, garantido assim uma boa qualidade do produto na conformação (PIMENTA, 2021a).

3.2 Caracterização das matérias primas

Em todo sistema produtivo cerâmico o entendimento das características físicas, químicas e mecânicas dos materiais argilosos é considerado uma das etapas mais importantes do processamento, fundamental para obter ao final produto de boa qualidade, (RAMOS et al., 2010). Portanto, torna-se indispensável os estudos das características das argilas usadas na fabricação de tijolo, que devem possuir plasticidade adequada para moldagem, resistência

mecânica para permitir o manuseio durante a fabricação e após a secagem, além desses fatores torna-se necessário o estudo da composição química e mineralógica, granulometria que se inter-relacionam e influenciam na qualidade final do tijolo cerâmico, (SAVAZZINI, 2016).

3.2.1 Fluorescência de raios X

A análise química consiste em determinar a composição de uma matéria-prima, através das concentrações percentuais dos óxidos presentes.

A fluorescência de raios X é frequentemente utilizada para determinar a composição química em materiais cerâmicos por ser um método rápido, preciso e não destrutivo, (KHOURY et al., 2019). Essa técnica tem ação de uma fonte de radiação de elevada energia chamada de radiação gama ou radiação X, isso provoca a excitação dos átomos da substância extraíndo a informação qualitativa e quantitativa elementar da amostra (PRADO, 2011). A quantificação dos principais óxidos que compõem uma argila é um dos parâmetros fundamentais para conhecer suas propriedades, cada composto tem uma correlação com a mineralogia e influenciam diretamente na formulação da massa cerâmica (PICHORIM, 2018).

3.2.2 Difração de raios X

Através da difração de raios X é possível identificar os minerais presentes no material analisado, bem como o estudo das características cristalográficas destes minerais.

O equipamento para essa técnica é basicamente um tubo emissor de raios, uma câmara circular chamado de goniômetro onde coloca a amostra para ser detectado pelo os raios difratados, (MORENO et al., 2016).

A técnica de ensaio consiste em incidir um feixe de raios X de comprimento de onda conhecido, sobre uma camada fina de pó, que gira no centro do goniômetro. Como consequência, o feixe se difrata e reflete com ângulos que são característicos do retículo cristalino, obtendo-se o correspondente difratograma, (ZAREMBA SAAD et al., 2019). Uma determinada substância cristalina sempre produz um espectro de difração característico, tanto no estado puro como combinado.

Toda via a análise qualitativa consiste em identificar o espectro dos compostos por comparação com padrões.

A vantagem da difração é o composto ser identificado de maneira como é amostrado e não através da quantificação dos elementos componentes. Da mesma forma, o tamanho da partícula e as substituições atômicas podem mudar a intensidade relativa dos picos (RODRIGUES et al., 2015).

Dependendo da composição da amostra, uma substância contida nela pode ser detectável a níveis menores que 1%, enquanto outra pode ser omitida mesmo estando presente em concentrações maiores. Assim, a difração de raios X pode não permitir a identificação de todos os constituintes de uma mistura, principalmente aqueles de baixa cristalinidade.

Um dos tratamentos normalmente aplicados às amostras tem por objetivo permitir a separação de determinadas faixas de tamanho das partículas constituintes visando concentrar minerais em determinadas frações da amostra total, (QUEIROZ, 2021).

3.2.3 Granulometria

Os estudos granulométricos são uma técnica de fundamental importância na caracterização de matérias-primas para formulação de massa cerâmica para fabricação de tijolos (REIS et al., 2019). A distribuição do tamanho de partícula influencia sobre plasticidade conforme a quantidade de cada faixa granulométrica, ou seja, como as partículas são empacotadas, (LIMA; MORENO, 2009). O empacotamento ocorre quando partículas finas preenchem o espaço vazio entre os grãos maiores, seja no processo de conformação ou tratamento térmico, (CROZETTA et al., 2016).

Conhecendo a distribuição granulométrica da matéria-prima, facilita o ajuste e controle no processo de laminação, permitindo a uniformidade das partículas em forma de filetes para conformação por extrusão, (AZEREDO, 2015).

Para caracterização de percentuais granulométrica os métodos tradicionais utilizados são os ensaios laboratoriais por peneiramento e por sedimentação, preconizados por normas técnicas da ABNT. Porém, tais ensaios apresentam algumas limitações, fragilizando, assim, a confiabilidade dos resultados dos ensaios por sedimentação. Todavia, para obter resultados mais consistentes utiliza-se, também, o granulômetro, um equipamento a laser para a determinação da granulometria do solo, (FALCÃO, 2015).

Os dados gerados nesse ensaio são analisados para se calcular a distribuição do tamanho das partículas obtidas a partir do padrão de espalhamento gerado (BATALHA et. al., 2019).

A comparação de diferentes métodos de preparação de amostras de sedimento para granulometria a laser mostra que os resultados por esse processo são superiores aos métodos tradicionais, em termos de confiabilidade, precisão, reproduzibilidade e rapidez de análise, (CHRISTOFOLLETTI; MORENO, 2017).

3.2.4 Plasticidade

A plasticidade nas argilas ocorre pelo resultado da força atrativa entre as partículas de argilominerais lubrificadas hidráulicamente (PÉREZ et al., 2010). Para plasticidade se

desenvolver é necessário que a água forme uma película sobre a superfície dos argilominerais com percentual determinado pelo índice de Atteberg, (CROZETTA et al., 2016). A plasticidade em percentual adequado nas argilas é uma propriedade importante para a indústria cerâmica, uma vez que permite a conformação de peças sem romper quando aplicado uma tensão, sendo que a estrutura formada permanece quando essa tensão é retirada, (REIS et al., 2019).

Consoante às características de formação dos depósitos e os minerais presentes nas argilas podem ser classificadas em muito plástica e pouco plástica, precisando de ajuste dessa propriedade para aplicação na indústria, (LAURSEN, 2019). Para esse controle é necessário análise dos limites de liquidez, limite de plasticidade e índice de plasticidade.

O limite de liquidez (LL) é o teor em água acima do qual o solo adquire o comportamento de um líquido corresponde à máxima quantidade de água que a argila ou massa cerâmica absorve para serem moldáveis (NBR 6459, 2016).

Já o Limite de plasticidade LP é o teor de umidade abaixo do qual o solo passa do estado plástico para o estado semissólido, nessa transição a argila perde a capacidade de ser moldada e passa a ficar quebradiça (NBR 7180, 2016). Essa mudança de estado ocorre de forma gradual, em função da variação de umidade, portanto a determinação do limite de plasticidade precisa ser controlada de acordo com critério estabelecido em norma da ABNT, NBR 7180.

Por fim, o índice de plasticidade (IP) representa a diferença entre o limite de liquidez e limite de plasticidade. A massa hidroplástica deve dar um limite de escoamento suficiente para permitir que uma peça conformada mantenha a sua forma durante o manuseio e a secagem (SANTOS et al., 2014).

3.3 Controles na preparação da massa

Para atingir o ponto de conformação ideal na preparação da massa cerâmica, é preciso desenvolver ajustes durante a mistura dos componentes argilosos de granulometria fina de maior plasticidade com outro de granulometria mais grossa menos plástico, (LIMA, 2010).

O controle na preparação de massa no processo cerâmico é fundamental para a qualidade do produto a ser fabricado. Nesse sentido, uma das etapas fundamentais do processo de fabricação de produtos cerâmicos é exatamente a dosagem das matérias-primas e dos aditivos, que deve seguir com rigor as formulações previamente estabelecidas, (ABCERAM, 2019).

A boa gestão na formulação reflete na eliminação de problemas corriqueiros como, ocorrência de trincas, deformação e retração em desconformidade que reflete no aumento da produtividade e qualidade do produto final (PIMENTA, 2021b).

De acordo com Pedroti (2011), é fundamental para uma boa preparação de massa o controle na homogeneização estabelecendo tempo médio de setenta e duas horas, de modo a estabilizar as tensões sofridas pelo processo de mistura, bem como calibração preventiva dos equipamentos.

Algumas empresas justificam a falta de controle na preparação de massa, devido ao baixo poder econômico que limita os investimentos para a implantação de um sistema eficiente de preparação (MILHOMEM, 2015). No entanto, de acordo com Racanelli et al. (2020), a melhoria contínua nesse processo tende a compensar os gastos com inovações, aumentando a competitividade da indústria.

3.3.1 Misturador

A função deste equipamento é misturar as argilas em uma composição de massa para boa homogeneização dos componentes minerais e índice de umidade uniformemente.

A mistura e amassamento são úteis tanto para a argila repousada e antecipadamente umedecida, como para as argilas que recebem umidade na própria máquina, (AZEREDO, 2015). Nessa etapa, a matéria-prima é homogeneizada, desenvolve as propriedades ideais de plasticidade para ter bom desempenho no processo de moldagem das peças sem ocorrência de perdas por inconformidade.

As matérias-primas devem ser adicionadas em proporções controladas, bem misturadas e homogeneizadas, de modo a conseguir a uniformidade física e química da massa, (SILVA; MAIA, 2016).

3.3.2 Laminação

A massa processada no equipamento misturador é enviada na sequência, por meio das esteiras com velocidade ajustadas, ao equipamento de laminação, com abertura entre os rolos de 0,70mm a 1,00cm, dependendo da consistência da massa de argila que será laminada. Nessa fase, a massa passa por um refinamento ideal com eliminação de elementos nocivos ao produto como os carbonatos e sulfatos, (GOMES, 2015).

Nessa máquina existem dois cilindros que retiram o ar contido no barro deixando-o mais compactado. Assim, o laminador é o equipamento responsável por esta etapa, que consiste no direcionamento de partículas das argilas, sendo fundamental sua regulagem

periódica. É recomendado um distanciamento de 2 a 3 mm para o último laminador (SABINO, 2016).

Vale ressalta que quanto mais fechado estiver o laminador melhor será o direcionamento das partículas. A qualidade da lamação determina a qualidade do acabamento dos produtos, evita perdas e pode levar a uma redução no consumo de energia na queima, visto que a granulometria do material diminui, (RUSCITTI et al., 2020).

3.4 Controles na conformação

A conformação é de fundamental importância para o processo cerâmico, uma vez que o material adquire a forma e característica estrutural pretendida. Dependendo do tipo de produto que se desejar fabricar, utiliza-se o método de extrusão ou prensagem. (AREIAS, 2019).

A extrusão é mais comumente usada na indústria de cerâmica vermelhas na fabricação de tijolos, devido o bom desempenho com alta produtividade (QUEIROZ, 2021). Segundo Santos et al. (2014), afirma que para obtenção de um bom resultado de conformação por extrusão é preciso manter o controle em alguns parâmetros como, homogeneização de umidade, lamação e pressão de conformação. O controle ocorre prioritariamente na passagem por um misturador de rosca helicoidais para retirada de ar e aplicação de umidade para atingir o ponto plástico necessário entre 18 e 25%, (RODRIGUES et al., 2015).

Já a conformação por prensagem é a compressão por um pistão sobre pó cerâmico em uma cavidade onde ocorre inicialmente à redução do volume ocupado pelos poros intergranulares e da reordenação dos grânulos. (SILVA; MAIA, 2016). Com isso, ocorre a redução dos espaços pela deformação plástica com esmagamento de grânulos ocos. Dessa forma, o deslizamento e reordenação das partículas alcançam um empacotamento mais denso na formação das peças (QUEIROZ, 2021).

A conformação por meio de prensagem, para ser eficiente, recomenda-se umidade variando entre 5% e 15%, com compactação sob pressão, da ordem de 15 a 30 MPa. Geralmente limita-se à fabricação de peças com pouca complexidade geométrica, tais como telha, pisos, ladrilhos, refratários, e até mesmo pequenos isoladores elétricos, raramente usados em fabricação de tijolos, (RACANELLI et al., 2020).

3.4.1 Corte

Com finos cabos de aço, previamente colocado os tamanhos desejados, esse equipamento corta os bloco cerâmico conforme as dimensões dos produtos a ser fabricados. O corte pode ser feito com cortadores manuais ou automáticos, de forma que as peças cortadas também podem ser retiradas manual ou automaticamente.

Após o corte as peças são inspecionadas visualmente, quando apresenta conformidade

são encaminhadas para o setor de secagem. Já as peças defeituosas são reintroduzidas na etapa de preparação de massa, (SILVA; MAIA, 2016)

3.5 Tratamento térmico

Um dos principais pontos na definição da qualidade de tijolos cerâmicos é o processo da secagem e queima (SCHWOB et al., 2016). Durante esta etapa, o monitoramento da temperatura e a umidade devem ser constantes, pois ocorre uma grande remoção de umidade, assim, as dimensões dos sólidos podem mudar rapidamente se não forem monitorados, causa perda de resistência e trincas, (GUIMARÃES, 2017).

Para um bom desempenho na secagem e queima deve-se adotar controles rígidos baseando-se em procedimentos e equipamentos medidores de temperatura previamente definidos e padronizados, respeitando tempos, temperatura e níveis de umidade, mantendo-se assim conforme as especificações técnicas, (EMMERICH; STEUDEL, 2016).

3.5.1 Controle da secagem

A secagem é a remoção de líquido das peças por meio da evaporação onde o ambiente não saturado, tende a absorver a umidade das peças em baixa temperatura (CONCONI et al., 2019). É nesse processo que começam a aparecer possíveis problemas como trincas, deformação e retração indesejada em caso de erros, preparação da massa ou uso de uma matéria-prima não favorável a secagem rápida. Por essa razão precisa de controle rigoroso da umidade e temperatura utilizada para secagem inicial das peças (AREIAS, 2019). Existem dois tipos de secagem utilizados pelas cerâmicas, a secagem natural e a artificial.

A secagem natural ocorre pela exposição das peças em temperatura ambiente por meio da movimentação natural do ar. Nesse sistema dificulta o controle do tempo de secagem devido variação das condições climáticas. A secagem natural também apresenta como fatores limitantes a excessiva manipulação das peças e a ocupação de grandes áreas para colocação das peças. Mesmo assim, essa ainda é a técnica mais usual de secagem na indústria cerâmica nacional (SENAI, 2015).

Também neste contexto a secagem artificial pode envolver sistema estático em câmaras, também é utilizada nas indústrias de cerâmica vermelha, constituído em ambiente e fechado com capacidade variável, geralmente com temperatura controlada na faixa entre 60 °C a 90 °C, utilizando o ar aquecido por uma fonte própria de geração de calor obtido por uma fornalha ou calor oriundo do resfriamento dos fornos (SCHWOB et al., 2016).

Embora tenham características técnicas e operacionais diversas, apresentam bons valores de eficiência operacional e energética, térmica e elétrica, (SENAI, 2015).

O planejamento para a técnica de secagem a ser usada em determinado processo é condicionado as características de vantagens e desvantagens conforme mostra tabela 1

Tabela 1 – As principais vantagens e desvantagens dos sistemas de secagem.

<i>Tipo de Secagem</i>	<i>Vantagens</i>	<i>Desvantagem</i>
<i>Natural</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Menor custo com geração de calor; • Favorece os locais em que as condições climáticas são mais favoráveis. 	<ul style="list-style-type: none"> • Tempo elevado de secagem; • Baixa produção; • Dependência do fator climático; • Pode afetar a qualidade das peças (trincas, deformações, de homogeneidade de secagem) caso o processo não seja bem controlado.
<i>Artificial</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Menor tempo de secagem; • Maior produtividade; • Redução de perdas; • Melhoria da qualidade das peças. 	<ul style="list-style-type: none"> • Custo com geração de calor; • Requer mais conhecimento técnico do operador; • Exige equipamentos e controles, como termômetros e higrômetros.

Fonte: Senai, 2015.

3.5.2 Controle da queima

Após secagem inicia-se o processo de queima onde as peças adquirem suas propriedades finais, por uma série de transformações físico-química das peças como desenvolvimento de novas fases cristalinas, formação de fase vítreia e nos casos da temperatura acima de 900 °C ocorre à sinterização dos grãos (CONCONI et al., 2019).

Nessa etapa a velocidade de aquecimento pode variar dependendo da matriz energética utilizada e a maneira em que se processa a alimentação dos fornos.

O controle de queima deverá ser realizado por meio de termopar no gerenciamento da variação da taxa de aquecimento, principalmente nas temperaturas de riscos entre 375 °C e 575 °C, onde ocorrem algumas mudanças de fases e liberação de gases, conforme mostra tabela 2, (SENAI, 2015).

O monitoramento das propriedades tecnológicas é de fundamental importância para que se conheça o intervalo de queima em que as dimensões e a porosidade da peça cerâmica não variem excessivamente (NICOLAU, 2014).

Se por um lado a temperatura de queima fornece a energia para que as reações ocorrer, por outro, o tempo de queima irá permitir que essas reações atinjam o equilíbrio estabelecido pela termodinâmica.

Além disso, é a combinação dos fatores temperatura e tempo de queima (ciclo térmico) que estabelece o grau de transformações sofridas por um compacto durante a queima (CONCONI et al., 2019).

Tabela 2 – Comportamento térmico do material argiloso durante a queima das peças.

Temperatura °C	Mudanças de fase
100 -110°C	Ocorre a eliminação de água higroscópica
200°C	Dá-se a eliminação da água “coloidal” das partículas de argila.
350 – 450°C	Ocorre a combustão das substâncias orgânicas, com eliminação de gás carbônico, que podem estar contidos nas argilas e começa a dissociação dos sulfetos e sulfatos com a liberação do gás sulfuroso.
450 – 650°C	Ocorre à decomposição da substância argilosa, com liberação da água de constituição, em forma de vapor de água que está ligada quimicamente à sílica e à alumina, nessa fase a peça adquire uma determinada resistência mecânica.
800 – 950°C	Nesse intervalo verifica-se a decomposição dos carbonatos, com liberação de gás carbônico, à medida que aumenta a temperatura melhora a resistência.
A partir de 900°C	Porém a partir dessa temperatura já é possível verificar a reação química da sílica e alumina com elementos fusíveis, reação que dá lugar à formação de sílico aluminato complexos que proporcionam ao corpo cerâmico as características de dureza, estabilidade, resistência a agentes físicos e químicos e também a coloração pretendida.
1000°C	A temperatura máxima para a queima varia conforme a composição química e mineralógica da massa, proporcionando a dureza, a compactação e a impermeabilidade desejada.

Fonte: Senai, 2015.

Durante o patamar máximo de queima é necessário manter a temperatura estabilizada para garantir a eficiência energética uniformidade de queima do produto final, (CONCONI et al., 2019).

Deste modo é preciso identificar os limites de temperatura de queima e estabelecer uma relação com as propriedades adequadas e necessárias para um bom desempenho dos materiais (NICOLAU, 2014). Sendo assim, é necessário que se construa, previamente, a curva de queima teórica por meio de uma sequência de dados de tempo e temperatura, estabelecendo-se as faixas críticas em que o aquecimento ou o resfriamento deve ser controlado, acelerado, ou retardado.

A partir do conhecimento dos fatores como composição química e mineralógica, tamanho de partículas dos componentes da massa, temperatura de queima e distribuição do calor é possível estabelecer uma curva de queima ótima. A curva de queima ótima é alcançada quando a velocidade de queima não conduz a perda de qualidade do produto (GUIMARÃES, 2017). Conforme mostrado na Figura 3 apresenta uma curva típica de queima em fornos contínuos contendo três fases bem distintas, subida ao pré-aquecimento; patamar ou manutenção da temperatura e descida ou resfriamento.

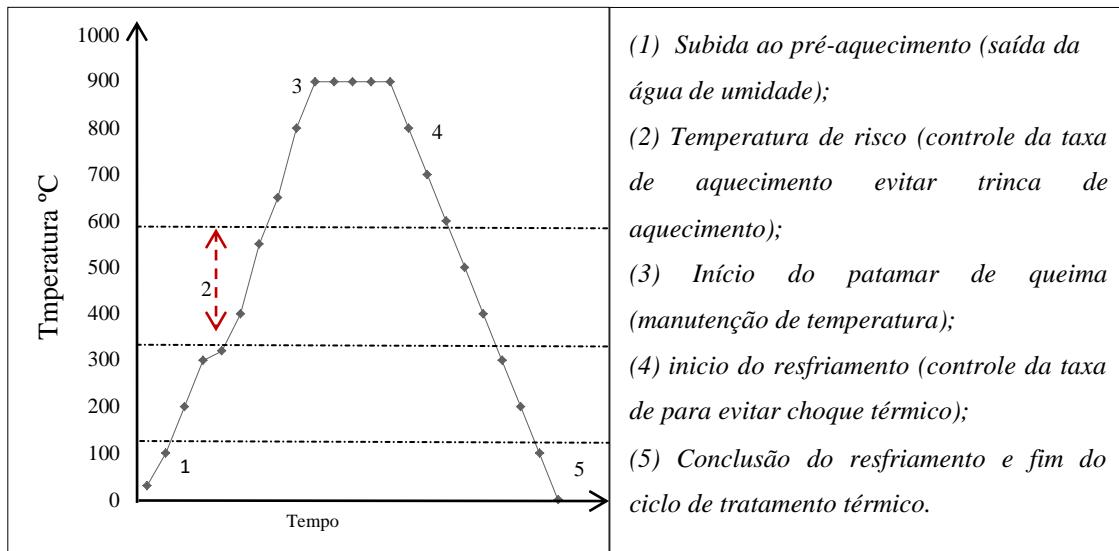


Figura 3 – Demonstração estrutural da Curva de queima. Fonte: adaptada de Guimaraes (2017).

3.6 Controles de qualidade do produto cerâmico

O material cerâmico produzido a partir de uma formulação de mistura ótima e controle no gerenciamento da curva de queima adquirem propriedades que atestam a qualidade do produto (ANICER, 2022).

A resistência mecânica, uniformidade geométrica e padronização de cores são aspectos importantes para a indústria cerâmica no controle de qualidade para comercialização. O mercado consumidor geralmente avalia o produto usando critério de qualidade com base nestas variáveis, (CORREA, 2020). Esses padrões são requisitos estabelecidos pela Associação Brasileira de Normas Técnicas ABNT, (NBR 15.270 - 1, 2017) e (NBR-15270-2, 2017).

Entre os blocos cerâmicos fabricados existem variações de formato e tamanho. Entretanto, blocos de um mesmo molde devem possuir uniformidade em suas características físicas e mecânicas em consonância com os critérios estabelecidos em padrões de qualidade.

O critério baseado nos requisitos da uniforme do peso e tonalidade mostra que a mistura de argila realizada na produção foi homogênea e as peças têm um índice de umidade correto. Para aumentar a competitividade da indústria e confiabilidade na qualidade dos seus produtos, é recomendada certificação pelo Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia INMETRO, assim como aderir ao Programa Setorial da Qualidade dos Blocos Cerâmicos (PSQ) /Programa Brasileiro da Qualidade e Produtividade no Habitat (PBQP-H). Esses mecanismos colaboram como ferramentas efetivas e confiáveis que dão subsídios e suporte para atender as exigências do mercado em função das normas da ABNT vigentes ao processo cerâmico (ANICER, 2022).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Este tópico apresenta a metodologia e equipamentos utilizados para o desenvolvimento da massa cerâmica composta pela mistura de duas argilas, e caracterização química, mineralógico e físico, bem como os ensaios tecnológicos. Para tanto, organizou-se um planejamento metodológico composto por seis etapas sequenciadas cronologicamente com atividades e experimentos conforme organograma em resumo na Figura 4.

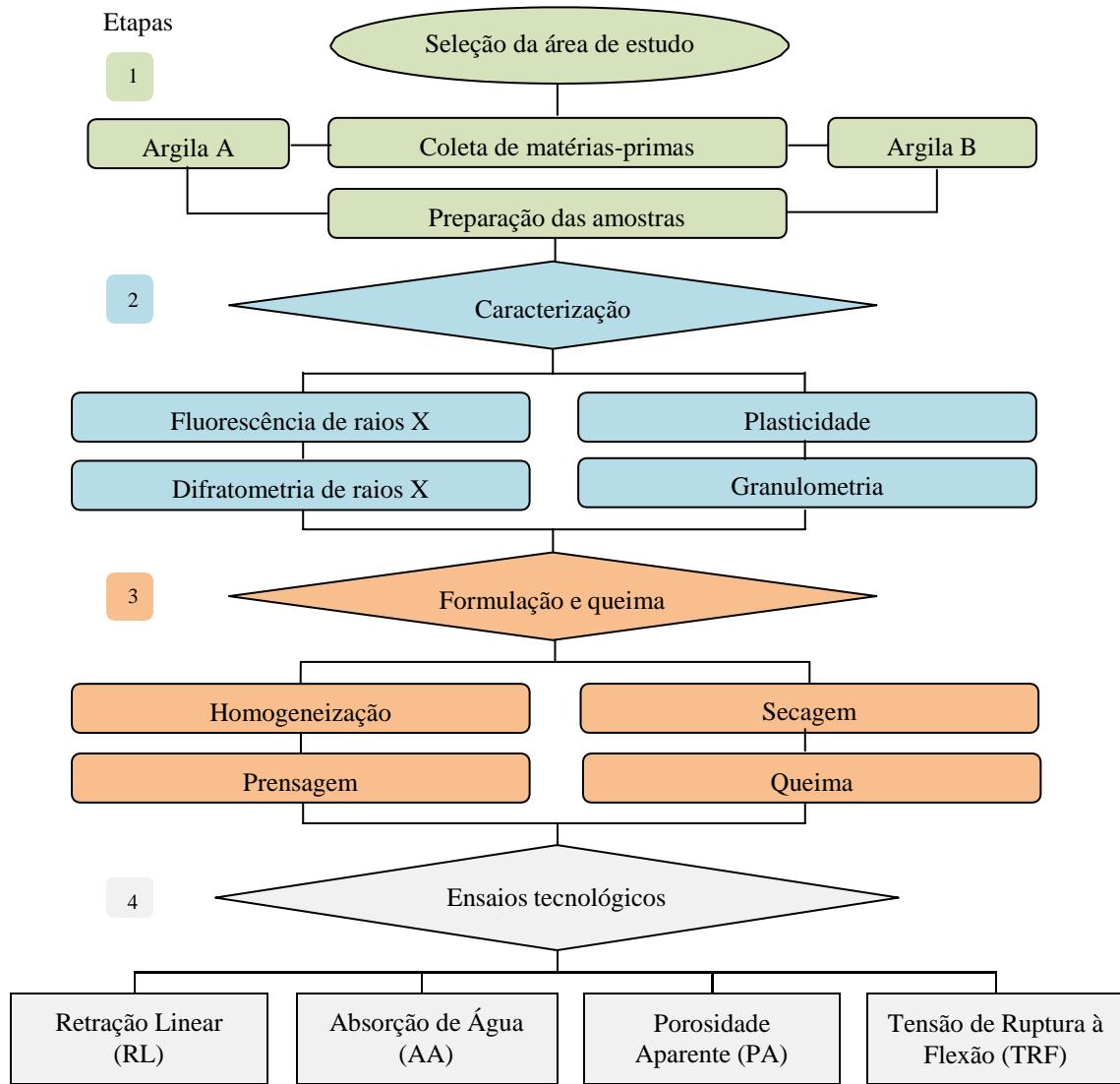


Figura 4 – Fluxograma com etapas metodológicas realizadas cronologicamente. Fonte: Própria 2022.

4.1. Área de estudo

Para esta dissertação de mestrado, os estudos foram realizados em materiais argilosos de depósitos aluvionares de planície de inundação com característica altamente plástica proveniente de barreiro situado próximo ao Rio Solimões a $3^{\circ} 17' 33"S$ e $60^{\circ} 26' 23"W$, local denominado de jazida A. Já a matéria-prima oriunda de unidade sedimentar de formação Álter do Chão de características menos plástica, foi extraída de jazida B, nas coordenadas

3° 14' 35"S 60° 28' 17"W nas proximidades da rodovia principal. Ambas minas de argilas estão localizadas em jurisdição do município de Manacapuru como mostra na Figura 5.



Figura 5 – Imagem da unidade geológica da área de estudo. (Fonte: Própria 2021), obtido por meio do link, <https://earth.google.com/web/@-3.2 1546218,60.51841406,14.77064886a,64463.6071521d,35y,57.16177607h,60.48118094t,0r 2022>.

Nesta área foi selecionada uma Indústria que utiliza essas matérias-primas para fabricante de tijolos furados e blocos cerâmicos com localização geográfica em 3° 15' 12"S e 60° 27'56"W conforme mostra a Figura 6.

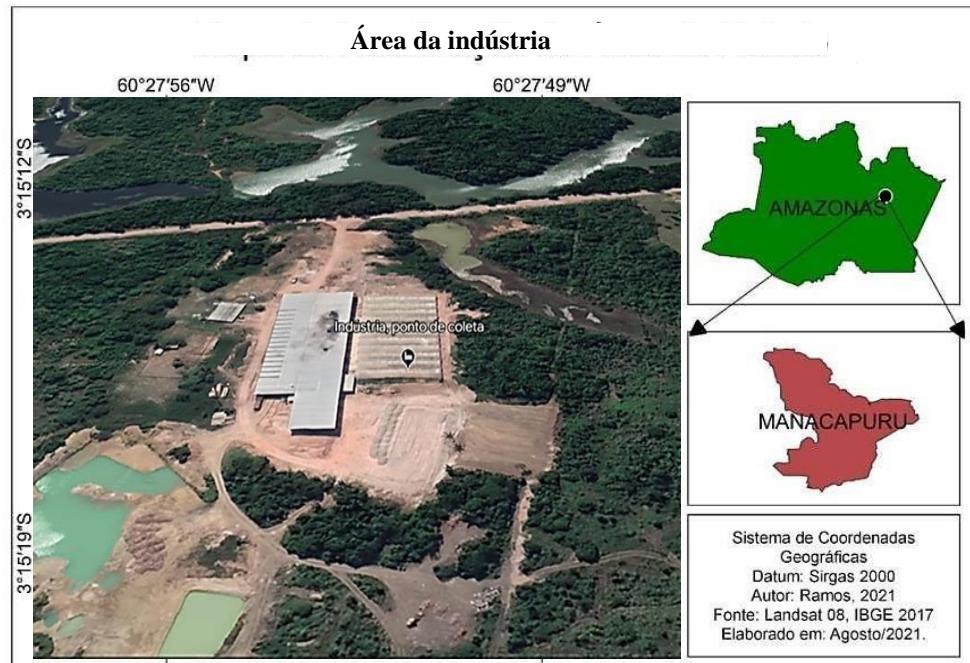


Figura 6 – Localização da indústria onde foram coletadas as amostras de argila (Fonte própria 2021).

Está situada no ramal da Bela Vista s/n, Lote Margem Direita da vicinal Zona Rural, com entrada na margem esquerda no km 89 da rodovia Manuel Urbano partindo de Manaus em direção Manacapuru, município do Amazonas que integra a região metropolitana a 70 km da capital em linha reta e 100 km em transporte rodoviário.

A logística industrial dessa região é feita por meio de caminhões pela rodovia Manoel Urbano que interligado a Manaus através da ponte Jornalista Philipe Daou. Essa via de acesso é extremamente importante para esse setor, pelo fato da capital amazonense ser o maior mercado consumidor dos tijolos cerâmicos fabricado nesse polo.

4.2 Materiais e coleta

No pátio da empresa foi coletado material proveniente de duas jazidas com diferentes características, as quais foram classificadas como argila A, com alta plasticidade de coloração bege proveniente de aluviões formação Rio Solimões. Também foi coletado a argila B aparentemente pouco plástica de cor mais avermelhada oriunda de jazida formação Ater do Chão. Foram coletados 50 kg de cada argila e levadas ao laboratório de laminação do departamento de Geociências da Universidade Federal do Amazonas UFAM para inícios dos ensaios laboratoriais, ver Figura 7.



Figura 7 – Coleta das matérias-primas no estoque de argila numa indústria de Manacapuru-AM. Fonte própria 2022.

Nessas amostras foram realizados ensaios simulando os procedimentos de mistura adotados pela indústria, quais os resultados serviram como base para definir a formulação em laboratório visando otimização da massa.

4.3 Preparação e caracterização das matérias primas

A preparação inicial das amostras consistiu em secagem das argilas, para retirar toda umidade em estufa com temperatura 110 °C. Após secagem foi separado material para

realização das análises de caracterização das matérias-primas. Para esta pesquisa foram realizados analise qualitativa e quantitativa dos elementos físico, químico e mineralógico por meio das técnicas de espectroscopia de fluorescência de raios-X (FRX), Difratometria de raios-X (DRX), análise granulométrica (AG) com base na NBR 7181, 2016, determinação do índice de plasticidade (IP), seguindo as diretrizes normativas das NBR 6459, 2016 e para limite de liquidez (LL) e NBR 7180, 2016, para analisar o limite de plasticidade (LP).

4.3.1 Espectroscopia de fluorescência de raios X (FRX)

Para a realização deste procedimento, as amostras foram transformadas em pó usando almofariz e pistilo de ágata, em seguida depositadas o volume de 10g em porta amostra para realização dos ensaios.

A determinação da composição química das amostras foram realizadas por Espectrometria de Fluorescência de Raios X, utilizando espetrômetro WDS sequencial, modelo Axios Minerals da marca PANalytical, com tubo de raios X cerâmico, anodo de ródio (Rh) e máximo nível de potência 3,0 KW. Preparação da amostra fundida: 0,5 g de amostra + 7,5 g de fundente As aquisições e tratamento dos dados foram realizados através do software SuperQ Manager da PANalytical.

4.3.2 Difratometria de raios X. (DRX)

Para as análises da estrutura e identificação da composição mineralógica da argila foi realizado pelo serviço geológico brasileiro – CPRM, no laboratório de análises minerais – LAMIN. Para essa análise foi utilizado um Difratômetro de raios X, modelo X'PERT PRO MPD (PW 3040/60), da marca PANalytical, com Goniômetro PW3050/60 (Theta/Theta) e com tubo de raios X cerâmico de anodo de Cu ($K\alpha_1$ 1,5406 Å), modelo PW3373/00, foco fino longo, 2200W, 60kv.

O detector utilizado é do tipo RTMS, Pixcel/1D. A aquisição de dados foi feita com o software X'Pert Data Collector, versão 2.1a, e o tratamento dos dados com o software X'Pert HighScore, versão 3.0d, ambos da PANalytical. Foram utilizadas as seguintes condições de análise: Voltage (kV): 40; Current (mA): 40; Scan range ($^{\circ} 2\theta$): 5-70 (MA) e 5-50 (RJ); Step size ($^{\circ} 2\theta$): 0,02; Scan mode: Continuous; Counting time (s): 50; Divergence slit: Slit Fixed 1/2 $^{\circ}$; Mask Fixed 10 mm; Anti-scatter slit Name: 5,7mm; A identificação dos minerais é feita pela comparação do difratograma obtido com padrões (fichas) do banco de dados do ICDD-PDF (International Center dor Diffraction Data –Powder Diffraction File). As fichas são específicas por mineral (por ex., quartzo, 00-046-1045), porém, para um mesmo mineral há diversas fichas similares no ICDD-PDF.

4.3.3 Analise granulométrica

A análise granulométrica compreende a determinação do tamanho das partículas, bem como da frequência com que ocorrem em uma determinada classe ou faixa de tamanho. A técnica é feita através da medição da intensidade da luz difundida com um feixe de laser que passa por uma amostra de partículas dispersas.

O aparelho é constituído pela bancada óptica, unidade de dispersão e juntamente com o software, sendo possível realizar três ou mais análises num intervalo de 5 segundos cada, retirando uma média destas análises para chegar a um resultado da análise granulométrica para cada amostra desejada, (NASCIMENTO, 2019).

Este tipo de análise é de importância primordial para uma caracterização eficaz das matérias-primas, considerando que em materiais argilosos a granulometria influencia diretamente na plasticidade do material em função do tamanho das partículas, bem como no processamento e nas propriedades finais dos produtos, (CROZETTA et al., 2016).

Para esse estudo foi realizado a leitura de granulometria a laser no Laboratório de Análises de Minerais LAMIN da CPRM em Manaus, por meio de granulômetro Mastersizer 2000, Figura 8.



Figura 8 – Granulômetro a laser Mastersizer. Fonte: CPRM 2022.

A análise gerou uma tabela com os percentuais de cada intervalo de diâmetro em proporção que serviram como base de dados para elaboração de um gráfico onde demonstra a curva granulométrica determinando os percentuais de cada amostra com a relação do diâmetro e volume, sendo assim, possível interpretar as frações de argila silte, areia fona e grossas.

4.3.4 Análise de plasticidade

Os ensaios referentes à determinação dos Limites de Liquidez (LL), Limite de Plasticidade (LP) e Índice de plasticidade (IP), foram realizados ensaios laboratoriais por meio do aparelho de Casagrande.

A determinação do limite de liquidez (LL) é onde o teor de umidade que separa o estado de consistência líquido do estado plástico, e no qual o solo apresenta pequena resistência ao cisalhamento. Para isso foram feitos cinco ensaios com diferentes níveis de umidade, onde a ranhura se fecha com diferentes números de golpes para obter uma reta sob o impacto 25 golpes no aparelho de Casagrande conforme, (NBR 6459, 2016).

Já o limite de plasticidade (LP) foi obtido como o teor de umidade em que o solo deixa de ser plástico, e começa se fraturar, sendo esta a umidade de transição entre os estados plástico e semissólido do solo. Em laboratório o LP foi analisado com diferentes percentuais de umidade no qual um cilindro de argila com diâmetro de 3 mm e 10 cm de comprimento não apresentou fissuras quando flexionado em uma superfície plana em lâmina de vidro conforme recomenda a norma da ABNT, (NBR 7180, 2016).

A partir dos resultados anteriores foi determinado o índice de plasticidade IP foi obtido por meio da subtração dos valores do limite de liquidez pelo limite plasticidade, sendo LL-LP.

O IP consiste na diferença entre o limite de liquidez e de limite de plasticidade, determinando o percentual plástico conforme mostra a Tabela 3.

Tabela 3 – Indica as descrições da matéria prima conforme os índices de plasticidade

IP (%)	Descrição
0	Sem plasticidade
1-5	Plasticidade leve
5-10	Plasticidade baixa
10-20	Plasticidade média
20-40	Plasticidade alta
>40	Plasticidade muito alta

Fonte: Leão, 2018.

4.4 Formulações da massa cerâmica

A massa cerâmica foi composta pela mistura das duas argilas após secagem em estufa a 110 °C.

O material seco foi moído e peneirado para padronização das partículas em 100 mesh. Em seguida foi realizada a mistura das argilas conforme percentuais planejados definidos em peso por meio de balança analítica, onde foram formuladas cinco composições diferentes identificadas como M1, M2, M3, M4 e M5.

Foram preparadas duas massas iniciais das argilas puras individualmente, uma contendo somente argila A e a outra composta somente de argila B correspondendo M1 e M2

respectivamente. Este experimento inicial foi usado como referência para comparação de resultados obtidos com as argilas misturadas. Para este tal foram formuladas outras três massas em composição diferentes, sendo (M3 com 85% de argila A e 15% de argila B), (M4 com 80% de argila A e 20% de argila B) e (M5 com 75% de argila A, e 25% de argila B) conforme ver na Tabela 4.

Tabela 4 – Formulação de massa cerâmica para conformação dos corpos de prova.

Formulação de massa	% em peso de matérias-primas		
	Argila A	Argila B	Total
M1	100	0	100
M2	0	100	100
M3	85	15	100
M4	80	20	100
M5	75	25	100

Fonte própria 2022.

A escolha dos percentuais de mistura para testar em laboratório, foram definidos com base em ensaios preliminares usando como base as misturas já utilizadas pela indústria que variavam entre 8% e 12% apresentando inconsistência no processo de fabricação, acarretando desconformidade na padronização das peças.

A umidade de formulação foi definida por meio de ensaio em balança analítica com calibração para fazer a leitura do percentual de umidade existente na massa. Com os dados dessa análise é possível identificar o percentual de água que será necessário adicionado para atingir umidade planejada para formulação estabelecida em 8%.

A umidade de prensagem é determinada ao final, através dos valores medidos da massa úmida (M_u) e massa seca (M_s), por meio da equação 1.

$$U (\%) = \frac{(M_u - M_s)}{M_s} \times 100 \quad (g) \quad (1)$$

Onde: (U = Umidade) (M_u = Massa úmida) (M_s = Massa seca)

4.5 Conformação dos corpos de prova.

Após o processo de moagem das misturas foram conformados 75 corpos de prova com 30g cada, utilizado um molde de aço com formato retangular com dimensões de 70x30x10 mm com compactação por meio de prensa hidráulica utilizando pressão de 25 MPa, aplicando força de 2,54kgf/mm² procedimento conforme mostrado na Figura 9 a, b, c.

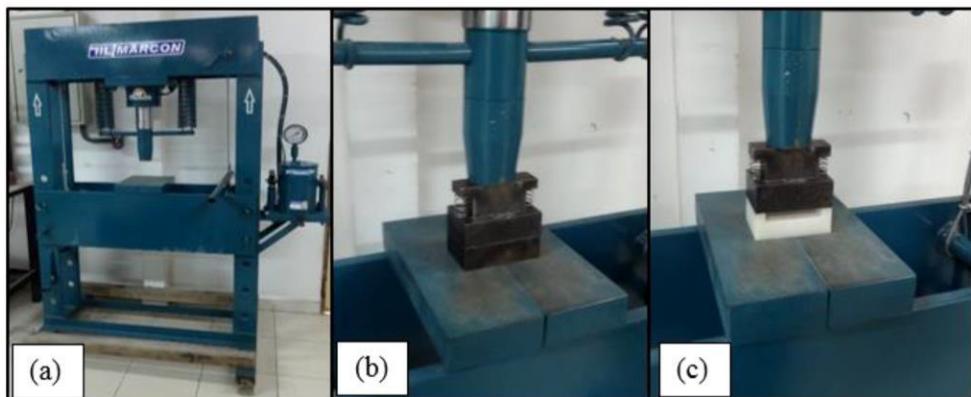


Figura 9 – (a) Prensa hidráulica. (b) Prensagem dos corpos de prova. (c) Extrator do corpo de prova prensado.
Fonte: Própria 2022.

Após a prensagem foi realizado as medidas de comprimento, largura e espessura para cada corpo de prova com uso de paquímetro. Em seguida foi feito a pesagem complementando as informações para determinada a densidade verde calculado por meio da equação 2. Este resultado teve como objetivo prever hipoteticamente os possíveis resultados que deverão ser alcançados nos ensaios tecnológicos.

$$d = \frac{m}{v} \quad (g/mm^3) \quad (2)$$

Onde: (d = Densidade), (m = Massa), (v = Volume)

4.6 Secagem e queima dos corpos de prova

No tratamento térmico os corpos de prova foram secos a 110°C durante 12h para eliminação de umidade, em estufa da marca modelo MA 033 da marca MARCON, série FOI 7170. A queima final foi em forno tipo mufla da marca JUNG, modelo/série FOI 7170, colocando as peças contra fiadas visando melhor desempenho com a circulação do calor uniforme durante a queima conforme ver na Figura 10a. O gerenciamento de queima foi controlado por termopar digital programando três patamares com diferentes nas temperaturas, de 700°C, 800 °C e 900 °C respectivamente ver Figura 10b.



Figura 10 – Forno mufla da marca JUNG, (a) Organização das peças no interior do forno para realização de queima. (b): Ver-se o forno iniciando o processo de queima com gerenciamento e controle por meio de termopar.
Fonte: própria 2022.

As temperaturas foram programadas, considerado o início da rampa de subida em ambiente de 30°C. O ciclo térmico foi realizado à taxa de aquecimento de 5 °C por minuto, com tempo no patamar de queima de 1h:20min.

Conforme a programação estabelecida, foram elaboradas três curvas para gerenciar o processo e controlar a temperatura conforme o planejamento predefinido. Na Figura 11 mostra o gráfico com as linhas das curvas de queima planejadas para as três temperaturas.

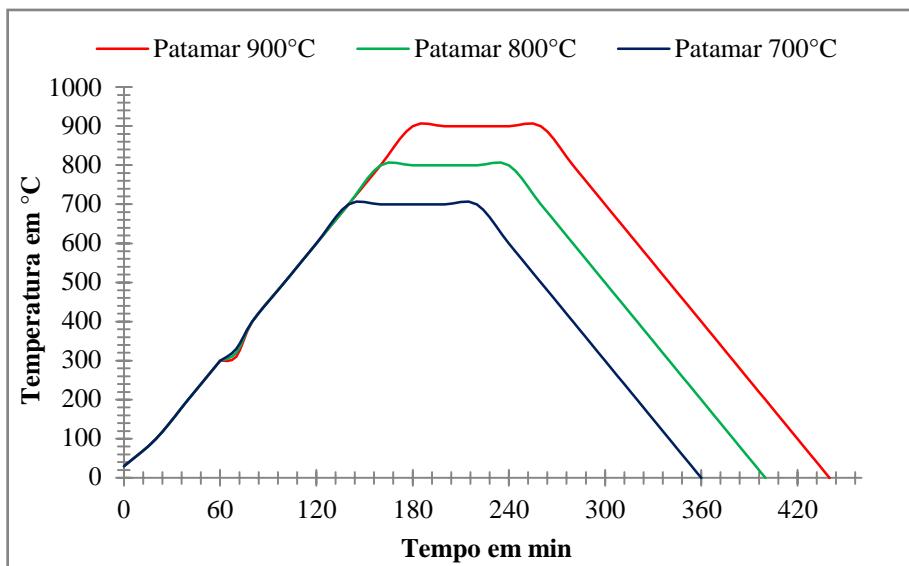


Figura 11 – Curva planejada para queima dos corpos de prova (Fonte própria 2022).

As curvas de queima foram planejadas com base em estudos anteriores (GONDIM, 2010), (SENAI, 2015) e (CONCONI et al., 2019). Durante o ciclo térmico de queima, as temperaturas foram controladas por termopar digital com acompanhamento em tempo real para os três patamares em diferentes temperaturas, sendo 700 °C, 800 °C e 900 °C respectivamente.

As curvas de queima para esta pesquisa, foram planejadas conforme descritos a seguir. As peças queimadas no patamar a uma temperatura de 700 °C, foi programado a taxa de aquecimento de 5 °C por min, resultando numa rampa de subida de 2h20min, patamar de queima em 1h20min completando ciclo de queima ao completar 3h40min, em seguida desligado o forno para resfriamento das peças.

Na segunda queima foi adotado o mesmo critério com taxa de aquecimento estabelecida a taxa de 5 °C por min, atingindo o início do patamar máximo em 2h40min, onde queimou a 800 °C durante o tempo de 1h20min, com tempo total de queima ao completar 4h, em seguida dando início ao processo de resfriamento.

A terceira e ultima queima realizada neste estudo a rampa de aquecimento foi programada com taxa de aquecimento de 5 °C por min, atingindo 900 °C transcorrido 3h sendo esta temperatura o patamar de queima onde permaneceu por 1h20min em seguida iniciado o resfriamento ao completar 4h20min. Vale ressaltar que foi estabelecido um patamar intermediário de 10min na temperatura de 300 °C, para todas as queimas no início da chamada temperatura de risco, (SENAI, 2015).

O resfriamento de modo geral para as três queimas ocorreu pelo método de desligamento do forno, finalizando ciclo térmico em 12h, quando foram retiradas as peças. O tempo de 12h foi estipulado por medida de segurança operacional e visando evitar choque térmico nas peças em contato brusco com ar frio.

4.7 Ensaios tecnológicos

Após a queima, os corpos de prova foram pesados em balança analítica e medidas por meio de paquímetro visando gerar dados para a realização dos ensaios descritos a baixo. Foram realizados nos corpos de prova os seguintes ensaios de Retração Linear após a queima (RL), Absorção de Água (AA), Porosidade Aparente (PA) e Tensão a Ruptura à Flexão (TRF). Os ensaios físicos e mecânicos são de extrema importância, para medir os níveis de qualidade do produto final. Esses ensaios descritos acima foram realizados conforme os parâmetros estabelecidos nas normas NBR 15.270-1 (2017) e (NBR-15270-2, 2017).

4.7.1 Retração Linear de queima (RLq)

Nessa etapa foram utilizados nos corpos de prova, as medidas de comprimento antes da secagem (L_0) e após a queima (L_1), procedimento para determinar a retração, por meio da equação 3.

$$RL (\%) = \frac{L_0 - L_1}{L_0} \times 100 \text{ (mm)} \quad (3)$$

Onde: (L_0 = Comprimento verde), (L_1 = Comprimento após queima)

4.7.2 Absorção de Água AA

Para determinar a absorção de água, as peças foram colocadas em recipiente com água em volume suficiente para mantê-los submerso. O recipiente foi gradativamente aquecido até a água no seu interior entrar em ebulação, mantendo os corpos de prova em água fervente por 2 horas, (NBR-15270-2, 2017). Transcorrido o tempo, foram resfriados via substituição lenta da água quente por água à temperatura ambiente. Em seguida foram colocados em bancada permitindo escoamento da saturação hídrica. A umidade remanescente foi removida com o auxílio de um pano limpo e úmido. Em seguida foi realizada a pesagem dos corpos de prova úmido considerando o tempo inferior a 8min, após retirados meio aquoso. Essa faixa de

tempos obedece ao limite de tolerância máxima para ser feito os procedimentos em todos os corpos de prova, conforme estabelece a norma técnica, sendo este limite não superior a 15min, ABNT, (NBR 15.270 - 1, 2017). As medidas de massa seca (P_s), e massa úmida (P_u) mostram a variação de absorção de água, também são parâmetros para calcular o percentual de porosidade aparente após queima. Os cálculos de absorção de água das amostras, foi determinado utilizado a equação 4.

$$AA (\%) = \frac{P_u - P_s}{P_s} \times 100 \text{ (g)} \quad (4)$$

Onde: P_u = massa do corpo úmido (g) e P_s = massa corpo seco (g)

4.7.3 Porosidade aparente (PA)

Já os cálculos para determinar a PA foram utilizados na fórmula presente na equação 5. usando os dado massa úmida, massa seca e massa imersa (P_i).

$$PA (\%) = \frac{P_u - P_s}{P_u - P_i} \times 100 \text{ (g)} \quad (5)$$

P_i = massa do corpo imerso em água (g)

4.7.4 Tensão de ruptura a flexão (TRF)

A tensão e ruptura à flexão foram determinadas por um flexímetro usado para ruptura das peças após queima. Neste equipamento os corpos de prova foram alinhados sobre os mancais fixados em uma plataforma base, com distância entre os pontos de apoio considerando 20% para as extremidades e 40% do ponto fixo para o centro das peças, local de aplicação da carga de flexão e ruptura. Os percentuais de distância entre os pontos foram distribuídos em relação ao comprimento da peça rompida conforme mostra Figura 12. a, b, c.

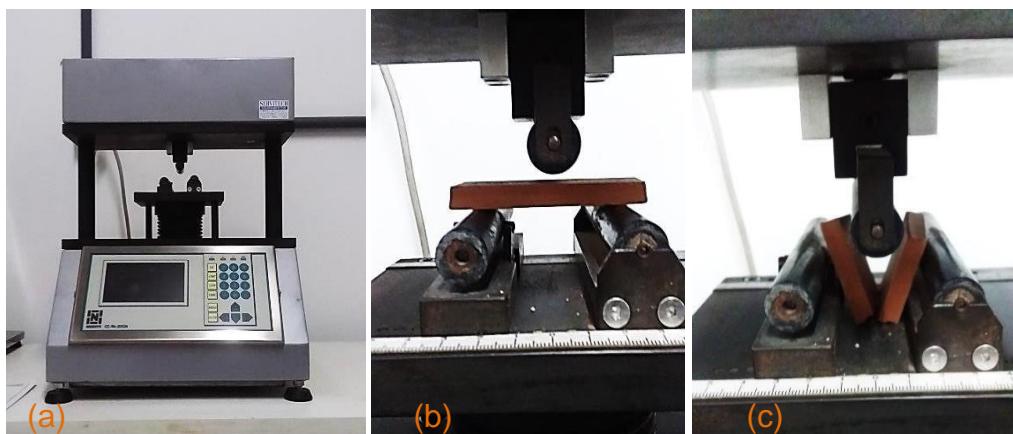


Figura 12 – (a) Flexímetro, (b) Corpo de prova posicionado para romper, (c) Rompimento e leituras da tensão exercida na ruptura a flexão, Fonte: Própria 2021.

Os resultados fornecidos pela leitura no visor do flexímetro foram impressos nas conversões de unidade, MPa e kgf/mm², sendo que para essa pesquisa foram considerados os, resultado em MPa.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo apresenta os resultados referentes às características das matérias-primas quanto à relação de influência dos elementos químicos e mineralógicos nos percentuais de distribuição granulométrica, bem como no desempenho plástico das argilas. Também apresenta os resultados do comportamento das peças após queima referente aos ensaios tecnológicos, que mostra o desempenho nas análises da ralação entre as formulações e as temperaturas de queima.

Em cumprimentos aos requisitos do Programa de Pós graduação em Geociências, dos dados extraídos desses estudos foi elaborado um artigo que foi submetido e aceito na revista GEOCIÊNCIAS, UNESP, ISSN: 1980-900X (online), publicação de artigos e periódicos, que tem classificação B2, pela Quallis Capes (2017 a 2020). O referido artigo consta em anexo dessa dissertação.

5.1 Analise química

Os resultados da composição química das argilas A e B, em forma de óxidos, são expostos na Tabela 5.

Tabela 5 – Composição química média das amostras.

Composição Química (%)	Amostras	
	Argila A	Argila B
SiO ₂	59,25	70,41
Al ₂ O ₃	27,29	20,33
Fe ₂ O ₃	3,09	4,18
TiO ₂	0,91	0,48
K ₂ O	3,15	0,62
Na ₂ O	3,29	2,02
MgO	1,60	< 0,1
CaO	0,93	1,46
P ₂ O ₅	0,49	0,20

Vê-se que a constituição da argila A é principalmente de SiO₂, seguida de Al₂O₃ e percentuais menores para Fe₂O₃ e K₂O, enquanto a argila B tem, em sua maioria, SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ e K₂O. Observa-se que o percentual de óxido de silício (SiO₂) variou entre 59,25% e 70,41%, e os teores de óxidos de alumínio (Al₂O₃) estiveram entre 27,29% e 20,33%, para argilas A e B respectivamente. Os níveis elevados de sílica e alumínio estão relacionados com a estrutura básica dos aluminossilicatos, no caso específico a caulinita, formados por poliedros tetraédricos (SiO₂) e octaédricos (Al₂O₃) conjuntamente.

De acordo com Azeredo (2015), a sílica é responsável por garantir boa resistência à mudança de dimensões durante a secagem e a queima de tijolos.

Já os teores de Fe_2O_3 variaram de 3,09% nas argilas A e 4,18% na argila B; na análise, TiO_2 mostrou 0,91 A e 0,48 B; para K_2O , teor foi de 3,15 A e 0,62 para a argila B. O teor de Fe_2O_3 e TiO_2 pode influenciar a tonalidade do produto queimado a partir de 4%, promovendo uma cor avermelhada (Correa et al., 2020). Nota-se, também, que as argilas apresentaram teores baixos de álcalis (K_2O , Na_2O , CaO e MgO).

Os compostos alcalinos (K_2O , Na_2O) e alcalinoterrosos (CaO e MgO) possuem efeito fundente, facilitando a formação de fase líquida necessária à consolidação das partículas e, consequentemente, aumenta a RL das peças no processo de queima, (RACANELLI et al., 2020). A porcentagem de óxidos de sódio (Na_2O) e potássio (K_2O), que geralmente se apresentam na forma de feldspatos, é fator preponderante para o processo de fabricação da resistência mecânica (NASCIMENTO, 2019).

O percentual representado pelo pentóxido de fósforo P_2O_5 corresponde à presença de matéria orgânica geralmente volatilizada durante o processo de queima das peças.

5.2 Analise mineralógica

Nos resultados das análises de difração de raios X (DRX), foram mostradas as fases minerais na argila, basicamente representadas por caulinita e quartzo, com pequenas frações de outros minerais, conforme exposto na Figura 13.

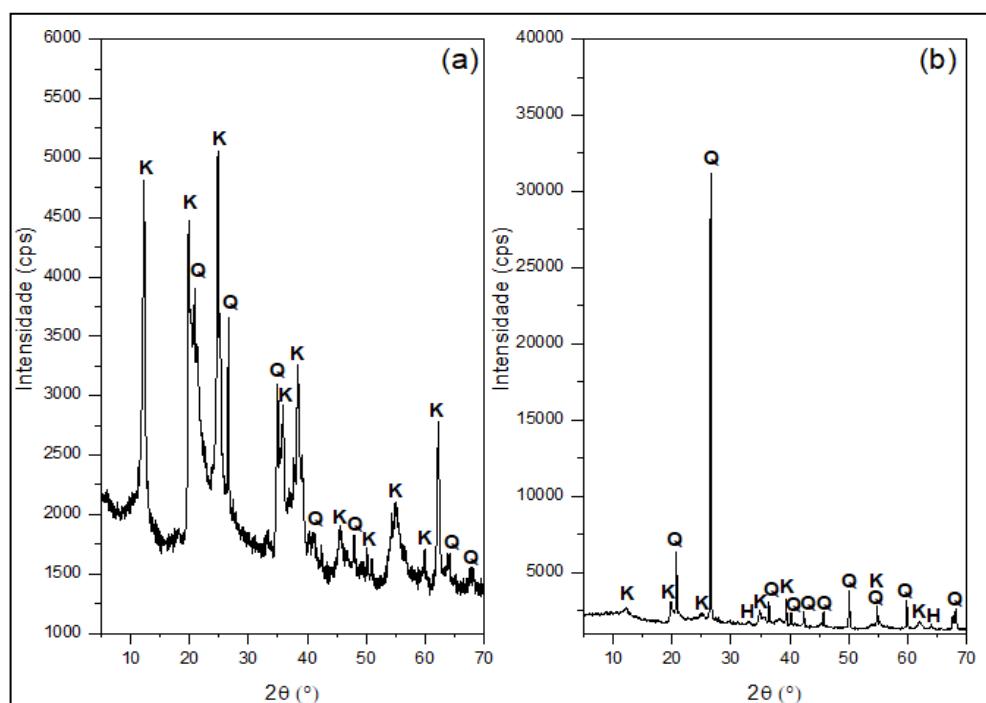


Figura 13 – Difratograma da análise de mineralogia das argilas: (a) Argila A: Q – Quartzo (ICSD 079634) / K – Caulinita (ICSD 068697); (b) Argila B: Q – Quartzo (ICSD 089278) / K – Caulinita (ICSD 068697) / H – Hematita (ICSD 082136), (Fonte própria 2022).

No difratograma, é possível identificar que a argila A é extraída de depósitos de aluviões, contém teor elevado de caulinita $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ e, nos picos com menor intensidade,

mostra pequenas frações de quartzo (SiO_2). Segundo Rodrigues et al. (2015), essas características correspondem a depósitos situados ao longo da AM-070 em leito e nas margens da drenagem, incluindo as planícies de inundação e as áreas delta com material mais fino extravasado dos canais nas cheias. Para Sabino (2016), a presença elevada de caulinita é atributo que confere a essa material boa plasticidade, tornando-o ideal para o controle de formulação quando misturado com argilas mais ricas em sílica na composição de massas ótimas para fabricação de tijolo na indústria de cerâmica vermelha.

O difratograma da argila B evidencia picos com maior intensidade para o quartzo, pequenas frações de caulinita e hematita. A presença elevada de quartzo justifica a baixa plasticidade do material oriundo da alteração da formação.

5.3 Analise granulométrica

Os resultados das análises granulométricas das argilas obtidos por difração a laser podem ser observados na Figura 14.

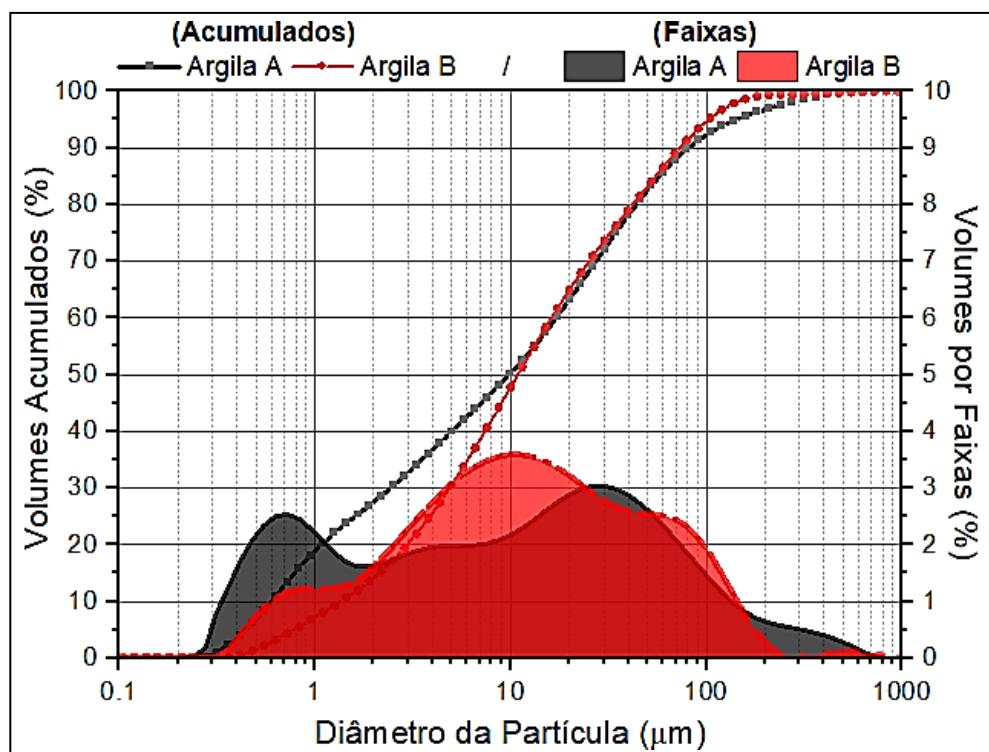


Figura 14 – Comportamento da distribuição granulométrica da argila A e B, (Fonte própria 2022).

Verifica-se que a argila A apresenta uma constituição granulométrica caracterizada por um maior grau de desuniformidade dos tamanhos de partículas em comparação à argila B, o que pode ser quantificado pelos valores obtidos por meio da relação $D_{90}/D_{10} = 135,72$ (argila A) e 53,99 (argila B). A maior amplitude do espectro granulométrico ocupado pelas partículas da argila A revela que essa matéria-prima deve contribuir para o processo de densificação dos produtos cerâmicos, em especial durante a etapa de conformação.

Na argila A também exibe um expressivo volume de partículas abaixo de 2 μm , com percentuais de volumes acumulados na ordem de 27,5%, enquanto, na argila B, foi detectado um volume de apenas 14,1% nessa faixa granulométrica.

A apreciável quantidade de partículas abaixo de 2 μm na argila A é mais um indicativo da forte presença de argilominerais do grupo da caulinita. Na argila B é particularmente siltosa, portanto, possui significativo volume de partículas na faixa de 2 μm a 60 μm (aproximadamente 72,45%). A elevada concentração de SiO_2 e a alta intensidade dos picos característicos de quartzo levam à conclusão de que a partícula situada nesse intervalo granulométrico é predominantemente do supracitado mineral. Na faixa arenosa (acima de 60 μm), há frações volumétricas próximas em ambos os materiais analisados, com um percentual volumétrico discretamente menor na argila B (13,2%) em comparação à argila A (14,1%).

Moreno et al. (2016) ressaltam as principais diferenças granulométricas pelo maior conteúdo de $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ em A, indicando tratar de um material menos alterado em relação à argila B, na qual as quantidades de SiO_2 devido ao intemperismo são mais acentuadas. Esses resultados norteiam a tomada de decisão no planejamento da formulação de massa adequada para obter melhor desempenho na qualidade do produto final (SABINO, 2016).

5.4 Índice de plasticidade

Os limites de Atterberg, identificados na Tabela 6, revelam que o Índice de Plasticidade (IP) mais elevado na amostra A é influenciado pela granulometria mais fina com predominância de caulinita.

Tabela 6 – Valores de Limite de Liquidez (LL), Limite de Plasticidade (LP) e Índice de Plasticidade (IP).

Argila	LL (%)	LP (%)	IP (%)
A	46,64	27,54	20,46
B	28,00	24,74	8,26

Fonte própria 2022.

O resultado indica que a argila A é um material altamente plástico, com ($\text{IP} \geq 15$). Isso configura como indicador para a demanda de água aplicada na composição da massa a ser moldada. O percentual hídrico influencia o controle do tratamento térmico, estabelecendo menor ou maior tempo de secagem e queima (GOMES, 2015). Entretanto, em função da plasticidade, as argilas tendem ter maior resistência mecânica após queima devido à boa coesão entre os argilominerais, (CROZETTA et al., 2016).

Já os valores de IP abaixo de 15% para a argila B mostraram que é um material pouco plástico relacionado à predominância de quartzo. Nesse caso, a argila B exige menor quantidade de água para a conformação. No entanto, para Dias, (2016), essa argila não

adquire boa resistência e, devido à interação mais lenta das partículas, ela precisa de temperatura mais elevada para ocorrer o cozimento ou a sinterização dos minerais dominantes.

5.5 Ensaios Tecnológicos

Este item mostra os valores referentes aos ensaios de RL, AA, PA e TRF após queima nas temperaturas de 700 °C, 800 °C e 900 °C, considerando as médias dos resultados de cinco amostras. De posse dos dados, foram elaborados gráficos para melhor interpretação dos resultados obtidos nos ensaios após tratamento térmico.

5.5.1 Retração linear após queima (RLq)

No gráfico da Figura 15, mostra as curvas de retração linear pós queima de todas as formulações nas temperaturas de 700 °C, 800 °C, e 900 °C. Os dados dispostos abaixo são as médias relativas a cinco amostras para cada formulação.

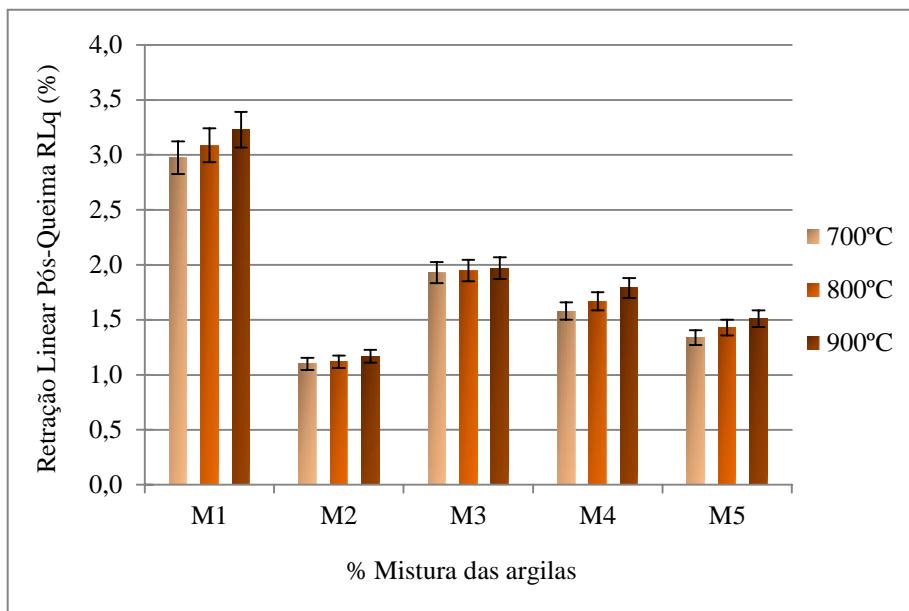


Figura 15 – Retração linear dos corpos de prova queimados (Fonte: Própria 2022).

Nas análises, é possível observar que, nos testes das argilas puras, a amostra M1, com maior percentual de partículas finas e maior plasticidade, teve retração acentuada quando comparada com a argila M2, que possui menor plasticidade.

Porém, quando as argilas A e B foram misturadas em proporções diferentes, ocorreu certa estabilidade nos valores de retração em relação aos percentuais de mistura da massa M3, M4 e M5. Nota-se que a formulação M5 apresentou o menor resultado de retração similar para todas as temperaturas, provavelmente influenciado pela mistura, reduzindo a plasticidade com incremento de material menos plástico com predominância de quartzo. Quando analisadas, as misturas M3 e M4 também permaneceram dentro da faixa tolerável dos

parâmetros e das normas da ABNT, que estabelece que a retração permitida seja abaixo de 2% após a queima. De acordo com Racanelli et al. (2020), também foi comprovado, em seus estudos, que, quanto mais plástico o material, maior tende a ser a retração obtida.

5.5.2 Absorção de água AA

Em relação aos resultados de absorção de água, considerando a mistura e a temperatura usada, entende-se que não ocorreram grandes variações mesmo com a mudança da temperatura de queima, com exceção da amostra M2, que teve o resultado influenciado provavelmente pelo teor de areia e quartzo presente nessa amostra, dificultando o empacotamento eficiente das partículas e aumentando o percentual de poros Figura 16.

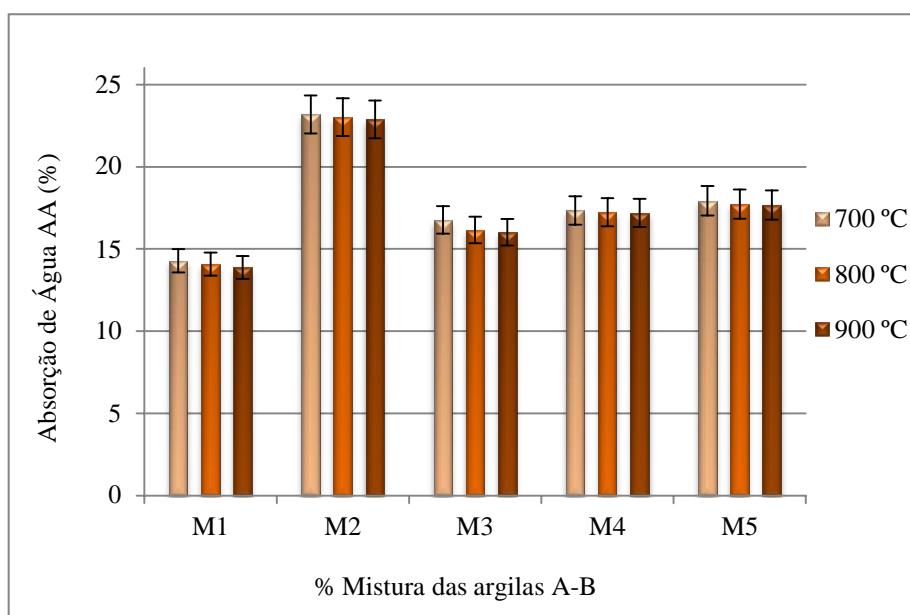


Figura 16 – Absorção de água e corpos de prova queimados (Fonte: Elaboração Própria 2022).

A diferença granulométrica entre as amostras plásticas (partículas mais finas) e as menos plásticas (partículas mais grossas) evidencia a influência que essa propriedade exerce sobre a queima das peças quando há aumento da temperatura no teste em M1 e M2. A interação de contato intergranular com a redução do tamanho dos poros ocorre mais rápida na argila plástica, enquanto, na menos plástica, acontece de forma lenta, influindo no índice de absorção (LIMA, 2010). À medida que se misturam, as duas argilas, aumentando o percentual de M2 na M1, tendem a equilibrar a variação de absorção, conferindo melhor estabilidade considerando desvio padrão.

De acordo com Reis (2019) o índice de absorção é um indicador da qualidade do produto, bastante significativo do processo de produção cerâmico, a partir do IP pode-se ter ideia de que as matérias-primas foram bem selecionadas e formuladas e que o processo de conformação foi bem realizado e a queima foi adequada, obedecendo às técnicas de

gerenciamento e controle. Nessa pesquisa vale ressaltar que apenas M2 apresentou inconformidade conforme os parâmetros das normas NBR 15270-1 e NBR 15270-2 (ABNT, 2017b, 2017a), que estabelecem os limites permitidos de absorção entre 8% a 25% para fabricação de tijolo furado.

5.5.3 Porosidade aparente (PA)

A porosidade mostrada tem relação com a capacidade dos materiais de absorver água, fato confirmado pela comparação entre as figuras 16 e 17, mostrando que, quanto maior a absorção, maior a porosidade. Assim, foi analisada uma discrepância entre as amostras M1 e M2, a qual foi estabilizada a medida que foi adicionando M2 na M1 com base nos percentuais de mistura planejado, apresentando resultados similares para M3, M4 e M5, considerando a curva e desvio padrão no gráfico de absorção Figura 17.

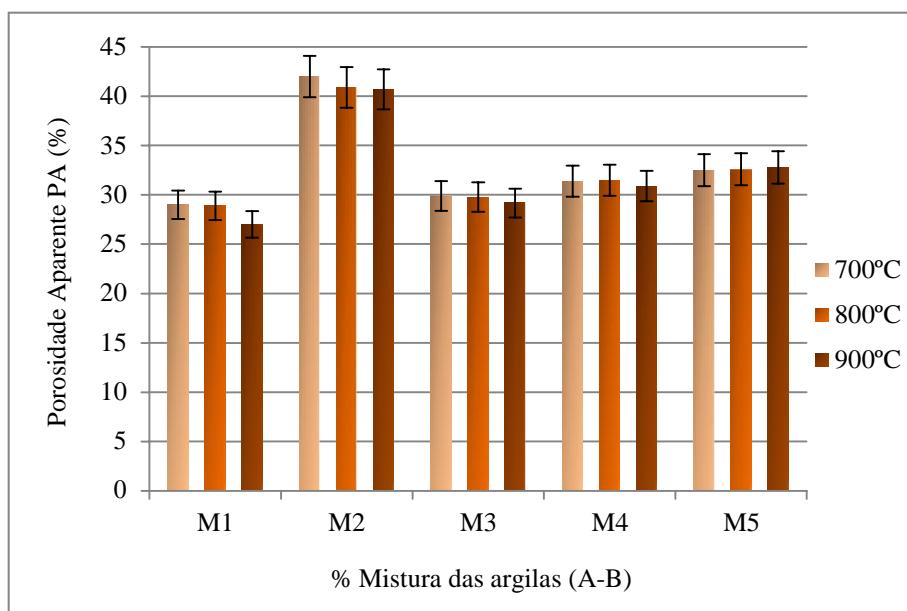


Figura 17 – Porosidade aparente dos corpos de prova queimados (Fonte: Elaboração Própria 2022).

A relação entre absorção e porosidade está associada às propriedades de granulometria e plasticidade. A porosidade, quando excessiva, é um dos fatores que prejudica o desempenho mecânico; no entanto, dentro dos parâmetros normativos, ela ajuda no processo de secagem e evita o aparecimento de defeitos por consequência dos gases produzidos na queima. É possível observar o comportamento poroso dos materiais, principalmente ao traçar uma linha imaginária entre M1 e M5, analisando as barras de desvio padrão.

5.5.4 Tensão de ruptura a flexão (TRF)

O resultado de resistência observa-se em relação ao de retração; à medida que a temperatura aumenta, também coincide com os resultados de menor absorção e porosidade.

Os dados de resistência estão representados no gráfico da Figura 18, onde é possível observar os erros estatístico padrão facilitando a interpretação dos dados.

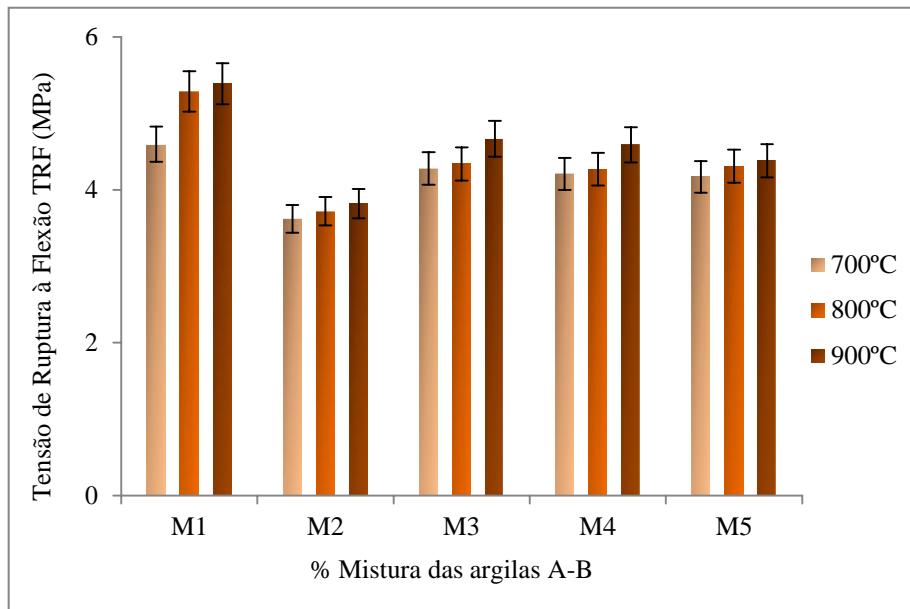


Figura 18 – Tensão de ruptura à flexão nos corpos de prova queimados (Fonte: Elaboração Própria 2022).

Na M1 (plástica), a porosidade aparente diminuiu, e os grãos se uniram por efeito de maior reatividade, adquirindo maior resistência. Esse efeito é reduzido na M2 (menos plástica).

Com o incremento na formulação de mistura da massa entre M1 e M2, verifica-se que as massas M3, M4 e M5 apresentaram estabilidade entre si, mostrando resistência após queima dentro da mesma faixa de desvio padrão e considerando a possibilidade de usar diferentes temperaturas de queima.

Todas as composições queimadas na temperatura entre 700 °C a 900 °C apresentaram valores acima dos padrões exigidos em normas da ABNT, chegando a alcançar uma resistência de até 5 MPa. Entretanto, vale observar que ainda nesta temperatura, a composição de M2 é a que apresenta menor resistência e essa redução se deve pelas partículas mais grosseiras, constituídas na Argila Fraca, atuando como ponto de concentração de tensão. Vale ressaltar que os resultados de resistência obtidos atendem aos parâmetros da NBR-15270-2, 2017, sendo acima de 1,5 Mpa, para fabricação de tijolos de vedação com furos horizontais e acima de 3 MPa para tijolos estruturais com furos verticais (ABNT, 2017a).

CONCLUSÕES

Este trabalho demonstra a importância do processo de caracterização e controle de matérias-primas na formulação de massa e na temperatura de queima para fabricação de artefatos de cerâmica vermelha testados em laboratório.

Para encontrar as melhores proporções no preparo das massas cerâmicas, é necessária a realização de testes que definem, de forma adequada, a variação nas propriedades. A compreensão elementar da argila coopera com o planejamento para o uso racional das matérias-primas em sua aplicação.

O conhecimento das características das argilas nos aspectos físico, químico e mineralógico serve como subsídio para estabelecer parâmetros de controle na preparação de massa cerâmica, o que permite compreender o comportamento das argilas durante o processo de queima das peças.

Com o estudo realizado nesta pesquisa, pode-se concluir que a caracterização química das amostras indicou teores de óxido de alumínio de (Al_2O_3) e dióxido de silício (SiO_2), bem como percentuais baixos de óxido de ferro (Fe_2O_3) e presença elevada de alumina e sílica para as argilas A e B, respectivamente. O teor químico apresenta, em sua composição, o principal constituinte que justifica a mineralogia, com predominância de caulinita na argila A e quartzo na argila B, também com picos pequenos de hematita, responsável pela cor laranja das peças após queima.

A caulinita é o mineral responsável pelo desenvolvimento de plasticidade, com maior retração em função de melhor arranjo das partículas finas. O quartzo atua como matéria-prima não plástica e inerte durante a queima, além de contribuir com a vitrificação após queima.

Os elementos químicos e a mineralogia também colaboraram com influência direta na granulometria, com predominância de argilominerais cauliníticos com maior percentual de partículas finas na argila A, contribuindo com plasticidade elevada, efeito característico da caulinita. Já com os grãos mais grossos na argila B refletem em menor percentual plástico influenciado pelo quartzo.

Com base nos estudos de caracterização, foi possível avaliar o comportamento dos componentes individuais e das misturas para elaborar formulações mais adequadas no balanço de mistura do material plástico com o menos plástico, objetivando melhorar a qualidade do produto final.

Para as cinco formulações experimentadas, conclui-se que a mistura M5, após queima nas temperaturas de 700 °C, 800 °C e 900 °C, obteve melhor desempenho nos resultados de retração linear, absorção de água, porosidade e resistência à compressão. Porém, quando analisado o desvio padrão, as formulações M3 e M4 também revelaram resultados semelhantes aos de M5, atendendo aos parâmetros estabelecidos em normas da ABNT NBR 15270-2, 2017.

Do ponto de vista técnico, essa similaridade nos resultados tecnológicos é importante à medida que aumenta a capacidade de propor adaptação dos testes em laboratório para aplicação na indústria. Com os controles laboratoriais aplicados nesta pesquisa para formulação de massa e temperatura de queima, pôde ser observada a estabilidade e a uniformidade das peças do corpo de prova em cada caso relacionado a temperatura de queima e formulações de massa.

Os resultados obtidos nesse processo permitiram concluir que, quando queimadas nas temperaturas entre 700 °C a 900 °C, as misturas M3, M4 e M5 apresentam característica semelhante nos resultados tecnológicos, apesar porem M3 apresentou risco com resultado próximo do limite máxima de retração linear.

Em razão desses resultados, esta pesquisa destaca as mistura de M4 e M5 como mais apropriada para aplicação na indústria com base nos resultados obtidos em laboratório.

Nesse sentido, a proposta desta pesquisa tem como finalidade sugerir o gerenciamento no controle na formulação de massa bem como o gerenciamento de queima em temperatura na faixa entre 700 °C e 900 °C, na fabricação de tijolo numa indústria de cerâmica vermelha do polo oleiro de Manacapuru. Esse controle visa melhorar continuamente os resultados positivos na fabricação de produtos uniformes e padronizados

REFERENCIAS

- ABCERAM. Associação Brasileira de Cerâmica, fluxogramas . Skripsi, p. 4–6, 2019.
- ABNT NBR 15270-1: Componentes cerâmicos. Parte 1: blocos cerâmicos para alvenaria de vedação - Terminologia e requisitos. Associação Brasileira de Normas Técnicas, p. 15, 2017.
- ABNT, NBR 6459 Solo — Determinação do limite de liquidez Soil — Liquidez. Associação Brasileira de Normas Técnicas, p. 8, 2016.
- ABNT, NBR 7180 Solo - Determinação do limite de plasticidade. Associação Brasileira de Normas Técnicas, p. 8, 2016.
- ALMEIDA. J. L. Impactos ambientais provocados pela extração de argila no Município de Ibiassucê-BA. Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento. Ano 05, Ed. 09, Vol. 03, pp. 35-46. Setembro de 2020. ISSN: 2448- 0959,
<https://www.nucleodoconhecimento.com.br/meio-ambiente/extração-de-argila>. acesso.
- ANICER. Associação Nacional da Indústria Cerâmica - Relatório Anual
<https://www.anicer.com.br>. 2021a.
- ANICER. Acabando a argila e agora revista da ANICER 7 de Maio de, 2021b.
- ANICER. Programa Setorial da Qualidade dos Blocos Cerâmicos PSQ-BC. V. 2021, n. 21, 2022. ABNT, NBR 15.270-2 Componentes cerâmicos — blocos e tijolos para alvenaria parte 2: métodos de ensaios. Associação Brasileira de Normas Técnicas, v. 2, p. 29, 2017.
- AREIAS. Avaliação ambiental e microestrutural de cerâmica vermelha incorporada com lodo de estação de tratamento de esgoto (ETE), Isabela Oliveira Rangel Areias - Campo dos Goytacazes RJ, 2019. Nuevos sistemas de comunicación e información, p. 2013–2015, 2019.
- AZEREDO, N. G. Avaliação das propriedades físicas e mecânicas em blocos cerâmicos estruturais através do método de ultrassom na região de Campos dos Goytacazes RJ. n. 129–139, p. 130, 2015.
- BATALHA et.al. Caracterização tecnológica de argila de horizonte superior vermelha do município de Iranduba - AM, para emprego em cerâmica industrial, 2019.
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral. Serviço Geológico do Brasil – CPRM Atlas de matérias-primas minerais cerâmicas do Nordeste Brasileiro. São Paulo, 2011.
- CAMPELO, N. S. Determinação da formulação de massas argilosas para emprego em cerâmica vermelha, oriundas do polo oleiro de Iranduba, chemical stabilization of Amazonian Tropical Soils View Project. <<https://www.researchgate.net/publication/322031358>> 2010.
- CHRISTOFOLLETTI S. R.; MORENO M. M. T. Granulometria por difração a laser e sua relação com a faciologia das rochas argilosas da Formação Corumbataí-SP. cerâmica, v. 63, n. 367, p. 303–310, 2017.

- CONCONI, M. S. et al. Comportamento térmico, TG-DTA-TMA, sinterização e propriedades de uma argila caulinítica da Província de Buenos Aires , Argentina). v. 65, p. 227–235, 2019.
- CORREA. L. C.; BIANCHINI S. S. B. Importância do gerenciamento colorimétrico na cerâmica vermelha. v. 25, n. 1, p. 14–33, 2020.
- CPRM. Série rochas e minerais e industriais, projeto materiais de construção na área Manacapuru – Iranduba – Manaus – Careiro, domínio baixo Solimões. Superintendência Regional de Manaus, 2007.
- CROZETTA, J. R. et al. Influência da granulometria na plasticidade e retração de secagem das argilas, cerâmica industrial, v. 21, n. 1, p. 21–29, 2016.
- CTGEO. Estudo estratégico da cadeia produtiva da indústria cerâmica no estado de São Paulo – fase 1 relatório final. v. 1, 2018.
- DIAS, D. K. D. R. Reutilização do resíduo cerâmico oriundo do polo oleiro de Iranduba e Manacapuru para emprego como elemento constituinte de base e sub-base de pavimento. p. 166, 2016.
- EMMERICH, K.; STEUDEL, A. Análise térmica de matérias-primas argilosas. cerâmica industrial, v. 21, n. 2, p. 14–19, 2016.
- FALCÃO. 59º Congresso brasileiro de cerâmica, 17 a 20 de maio de 2015, Barra dos Coqueiros, Aracaju, SE. p. 2323–2332, 2015.
- LEÃO M. F. Fundamentos da mecânica dos solos / Marcio Fernandes Leão. – Londrina: Editora e Distribuidora Educacional S.A., 2018. 216 p ISBN 978-85-522-0754-2,
- GOMES, L. K. S. Caracterização da matéria prima utilizada na fabricação de blocos cerâmicos em Serra Talhada-PE / Laiane Keylla Silva Gomes. – Serra Talhada: A autora, 2015. 46 f.: il. p. 32, 2015.
- GONÇALVES, R. S. GONÇALVES, R. S. Teste de precisão e análise estatística em lotes de blocos cerâmicos segundo a ABNT / NBR 15270-1 DE 2017, no Município de Santa Helena de Goiás Tecnologia Goiano – Campus Rio Verde. . 2021.
- GONDIM, I. L. M. Myxedema coma induced by ingestion of raw bok choy. The New England journal of medicine, v. 362, n. 20, p. 1945–6, 20 maio 2010.
- GUIMARÃES, C. A. D. O. Avaliação do ciclo de queima nas propriedades tecnológicas de cerâmica vermelha. p. 114, 2017.
- KHOURY, H. J. et al. Fluorescência de raios X por dispersão de energia aplicada à caracterização de tijolos de sítios históricos de Pernambuco, clio arqueológica, v. 34, n. 1, p. 163, 2019.
- KILLER. KILLER, R. A. A Evolução e as estratégias do setor cerâmico ou evolution and strategies of the ceramic sector in the brazilian context. ix congresso brasileiro de engenharia de produção, 2019. 2019.
- LAURSEN, et. al. Characterization of brazilian northeastern plastic clays. ceramica, v. 65, n. 376, p. 578–584, 2019.

- LIMA, R. H. C. Preparação e controle de massa para o APL de cerâmica vermelha de Russas - Ceará. Raimundo Humberto Cavalcante Lima. - Fortaleza: Banco do Nordeste Brasileiro, 2010. 138 p.: il. ISBN 978.85.7791.126.4, 2010.
- LIMA, R. H. C.; MORENO, M. M. T. Uso da distribuição granulométrica como parâmetro de controle na elaboração da massa cerâmica de composição binária. v. 14, n. July, p. 4–8, 2009.
- MAIA. F. S. Avaliação de massas cerâmicas, processamento e propriedades dos produtos de cerâmica vermelha do polo cerâmico de Campos dos Goytacazes. p. 94, 2012.
- MILHOMEM, D. A. et al. Aplicação do estudo de tempos e movimentos para fins de melhorias no processo produtivo de uma fábrica cerâmica vermelha. XXXV Encontro Nacional de Engenharia de Produção perspectivas, n. 33, p. 33, 2015.
- MORENO, M. M. T. et al. Caracterização de argilas e composição de massas cerâmicas preparadas com base na análise de curvas de consistência de misturas argila-água., v. 62, n. 361, p. 21–31, 2016.
- MOTTA, J. CABRAL JUNIOR, M.; MOTTA, JFM; ALMEIDA, AS; TANNO, LC. RMIs: argila para cerâmica vermelha. in: rochas e minerais industriais no Brasil: usos e especificações. 2. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2008. p. 747-770. 2008.
- NASCIMENTO, L. C. Otimização de massa cerâmica de caulim com a incorporação de resíduo de vidro e rochas para produção de material cerâmico, Lilia Cardoso Nascimento 2019.
- NICOLAU. A Importância da curva de queima em fornos cerâmicos.pdf, 2014.
- PEDROTI. Desenvolvimento de massa cerâmica com uso de resíduo de granito para obtenção de blocos cerâmicos prensados de encaixe de matriz argilosa/ Leonardo Gonsalve Pedroti - Campos de Goytazes, 2011. v. 16, n. 22, 2011.
- PÉREZ, C. A. S. et al. Caracterização de massas cerâmicas utilizadas na indústria de cerâmica vermelha em São Domingos do Sul - RS, Cerâmica Industrial, 2010.
- PICHORIM, A. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cerâmica vermelha a partir de lodo galvânico, lodo. V. 1, 2018.
- PIMENTA. Preparação de massa – revista da ANICER, 2021a. Disponível em: <<https://revista.anicer.com.br/preparacao-de-massa/>>
- PIMENTA. Controle de qualidade na indústria de malhas, 2021b. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=kfs9ygeacaaj>>
- PRADO, C. M. de O. Caracterização química e mineralógica das argilas utilizadas na produção de cerâmica vermelha no Estado de Sergipe. p. 82, 2011.
- QUEIROZ, A. Caracterização mineralógica e física de argila do Amazonas para a indústria cerâmica. n. equação 1, p. 1–6, 2021.
- RACANELLI, L. de A. et al. Caracterização e estudo das propriedades físicas, químicas e mecânicas das argilas caulíníticas da região Nordeste do Estado do Pará. Matéria (Rio de Janeiro), v. 25, n. 1, 2020.

- REIS, A. S. DOS et al. Caracterização de argila para utilização em cerâmica vermelha estrutural. n. february, p. 8301–8309, 2019.
- RETHWISCH. Ciência e engenharia de materiais: uma introdução ciência e engenharia de materiais, 2013.
- RODRIGUES. Caracterização de argilas e crostas lateríticas da porção nordeste do Estado do Amazonas, visando aplicabilidade como pigmentos. 2018.
- RODRIGUES, V. O. et al. Caracterização das matérias-primas empregadas na fabricação de produtos do polo cerâmico de Iranduba-AM. Cerâmica Industrial, v. 20, n. 1, p. 37–40, 2015.
- RUSCITTI et. al. A review on additive manufacturing of ceramic materials based on extrusion processes of clay pastes [Revisão sobre manufatura aditiva de materiais cerâmicos por extrusão de massas à base de argilas. Ceramica, v. 66, n. 380, p. 354–366, 2020.
- SABINO. Características físico-químicas das argilas utilizadas na indústria de cerâmica vermelha no município de Tabatinga - AM: um estudo de caso em indústrias do município / Artemizia Rodrigues Sabino. - 2016. Euphytica, v. 18, n. 2, p. 22280, 2016.
- SALES JUNIOR. J. C. C. Estudo de massa cerâmica triaxial visando à otimização do ciclo de queima da indústria de cerâmica estrutural. Materials science and engineering a, v. 27, n. 1, p. 1–14, 2012.
- SALES. J. C. A extração da argila para fabricar cerâmica vermelha no Ceará. 59º Congresso Brasileiro de Cerâmica, 17 a 20 de maio de 2015, Barra dos Coqueiros, Aracaju, SE a, v. 1, n. 2015.
- SANTOS, C. V. de P. et al. Índice de Plasticidade e Análise Racional de Argilas de Marabá (PA) para avaliação das zonas de extrusão. Cerâmica Industrial, v. 17, n. 2, p. 25–27, 2014.
- SAVAZZINI et. al. Caracterização e propriedades cerâmicas de argilas usadas em cerâmica vermelha no estado do Espírito Santo. Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais (22º CBECiMat), v. 3, n. 3, p. 822–832, 2016.
- SCHACKOW, A.; CORREIA, S. L.; EFFTING, C. Influence of microstructural and morphological properties of raw natural clays on the reactivity of clay brick wastes in a cementitious blend matrix. Cerâmica, v. 66, n. 378, p. 154–163, jun. 2020.
- SCHWOB .et. al. Manual de sistemas de secagem na indústria de cerâmica vermelha. schwob, m. r. v. et al. rio de janeiro: int/mctic, 2016. 42p. isbn 978-85-99465-13-4 1. cerâmica vermelha, 2. sistemas de secagem, 3. eficiência energé_ca., 2016.
- SENA, N. O. 21º CBECIMAT - Congresso brasileiro de engenharia e ciência dos materiais 09 a 13 de novembro de 2014, Cuiabá, MT, Brasil. investigation of the mechanical properties of magnesium metal matrix composites with a fine dispersion of ceo2 particles, v. 5738, n. 1, p. 2665–2672, 2014.
- SENAI. Guia técnico ambiental da indústria de cerâmica vermelha. n. de cember, p. 1–6, 2015.

SILVA, L. C. S.; MAIA, F. O. Processos de fabricação: uma análise da produção da cerâmica vermelha em uma empresa da cidade de Catalão/GO, manufacturing processes: an analysis of production of red ceramics in a company town Catalão/GO. viii simpósio de engenharia de produção de sergipe, n. 2016, p. 153–162, 2016.

ZAREMBA SAAD, E. A. Caracterização mineral e tecnológica de resíduo do beneficiamento de arenitos da formação furnas: estudo de caso areal costa, Campo Largo – PR. Geociências, v. 38, n. 1, p. 73–87, 2019.

ANEXO artigo submetido e aceito na revista GEOCIÊNCIAS, UNESP, ISSN: 1980-900X (online), classificação B2, pela Quallis Capes (2017 a 2020).

**AVALIAÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS E PROPOSTA DE CONTROLE NA
FORMULAÇÃO DA MASSA PARA FABRICAÇÃO DE TIJOLO NUMA
INDÚSTRIA DE MANACAPURU – AM**

**ASSESSMENT OF RAW MATERIALS AND CONTROL IN THE FORMULATION OF MASS IN
THE CERAMIC INDUSTRY OF MANACAPURU – AM**

**Sebastião Batista RAMOS Junior, José Carlos Calado SALES JÚNIOR, Raimundo
Humberto Cavalcante LIMA.**

Universidade Federal do Amazonas. Avenida General Rodrigo Octávio Jordão Ramos, 6200 -
Coroado I, Manaus – AM.

E-mails: sb-ramos.eng.ambiental@hotmail.com, humbertoclima@ufam.edu.br

Introdução
Materiais e método
 Localização e coleta
 Caracterização e formulação
 Secagem e queima dos corpos de prova
Resultado e discussão
 Ensaios tecnológicos
Conclusão
Agradecimento
Referência

RESUMO – A preparação de massa é importante para um bom desempenho da fabricação de tijolos na indústria de cerâmica vermelha. Nessa temática, o presente estudo objetiva avaliar as matérias-primas compostas de duas argilas coletadas numa indústria cerâmica de Manacapuru. Neste estudo, as matérias-primas foram caracterizadas por meio das técnicas de FRX, DRX, granulometria a *laser* e limites de Atterberg. Nos resultados químicos, foram identificados teores elevados de dióxido de silício (SiO_2) e óxido de alumínio (Al_2O_3); já na mineralogia, podem ser observados percentuais predominantes de caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) e quartzo (SiO_2); enquanto os ensaios físicos mostraram granulometria fina, bem como uma argila altamente plástica e a outra menos plástica. Em laboratório, foram feitas cinco formulações diferentes, denominadas M1, M2, M3, M4, M5, e confeccionados 75 corpos de prova, queimados em três temperaturas planejadas, 700 °C, 800 °C e 900 °C. Nos ensaios tecnológicos de retração linear, absorção de água, porosidade aparente e tensão de ruptura à flexão, é avaliado o comportamento das peças em relação à mistura e às temperaturas. Ao final da pesquisa, observou-se que o controle na formulação da massa e a temperatura serviram como base para propor adaptações dos ensaios de laboratório visando melhorar a qualidade do produto final na indústria.

Palavras-chave: Argila, Cerâmica, Controle, Massa, Temperatura.

ABSTRACT – The preparation of the mass is important for a good performance in the manufacture of bricks in the red ceramic industry. In this theme, the present study aims to evaluate the raw materials composed of two clays collected in a ceramic industry in Manacapuru. In this study, the raw materials were characterized using FRX, DRX, laser granulometry and Atterberg limits techniques. In the chemical results, high levels of silicon dioxide (SiO_2) and aluminum oxide (Al_2O_3) were identified; in the mineralogy, predominant percentages of kaolinite ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) and quartz (SiO_2) can be observed; while the physical tests showed fine granulometry, as well as a highly plastic clay and the other less plastic. In the laboratory, five different formulations were made, called M1, M2, M3, M4, M5, and 75 specimens were made and fired at three planned temperatures, 700°C, 800°C and 900°C. In the technological tests of linear retraction, water absorption, apparent porosity and flexural rupture stress, the behavior of the pieces in relation to the mixture and temperatures is evaluated. At the end of the research, it was observed that the control in the formulation of the mass and the temperature served as a basis to propose adaptations of the laboratory tests aiming to improve the quality of the final product in the industry.

Keywords: Clay, Ceramics, Control, Mass, Temperature.

INTRODUÇÃO

A cerâmica vermelha, também conhecida como cerâmica estrutural, é denominação atribuída à categoria de produtos utilizados na construção civil, como tijolos, blocos e telhas (SALES, 2012). Esses produtos são fabricados de argila, material natural terroso de granulação fina e definidos como uma rocha dividida, constituída essencialmente de minerais, matéria orgânica e outras impurezas (REIS et al., 2019). Uma das principais propriedades desses materiais é desenvolver plasticidade com quantidade apropriada de água e endurecer após secagem e queima (SAVAZZINI, 2016).

No Brasil, a indústria cerâmica tem participação em cerca de 1% do PIB nacional, sendo aproximadamente 40% representado por olarias de cerâmica vermelha (ANICER, 2021a). Em escala regional, o polo oleiro no estado do Amazonas concentra-se, majoritariamente, nos municípios de Iranduba e Manacapuru, região metropolitana de Manaus, atualmente com 29 olarias ativas (NASCIMENTO, 2019). As jazidas favoráveis à exploração das argilas dessa região estão situadas, principalmente, nas regiões de planícies de inundação do Rio Negro e do Rio Solimões e, secundariamente, em depósitos sedimentares formados pelo intemperismo de rochas da Formação Alter do Chão com potencial para compor massas na fabricação de tijolos com alta qualidade (RODRIGUES et al., 2015).

Porém, para Campelo, (2010) essa qualidade apresentou deficiência quando, em seus estudos, foi verificado que as empresas desse polo trabalham de forma empírica, utilizando as experiências visual e tátil, obtendo pouco ou nenhum controle quanto aos processos, principalmente na formulação de massa e na queima das peças cerâmicas, fato ainda comum atualmente. Rodrigues et al., (2015) também destacam a constatação, por meio de ensaios tecnológicos, de que mais de 50% dos tijolos estudados provenientes desse polo demonstraram inconformidade com os padrões exigidos pela norma brasileira.

A falta de gerenciamento técnico na preparação da massa acarreta problemas quanto ao aproveitamento eficiente dessas matérias-primas, além de influenciar negativamente a qualidade dos produtos e gerar entraves de

projetos e no desenvolvimento de novas produções (LIMA, 2010). Esse contexto, com um mercado cada vez mais competitivo, obriga as empresas a atender a diversas exigências na padronização para garantir excelência do produto desejado pelo consumidor, aplicando melhorias no processo de fabricação (GONÇALVES, 2021)

Diante dessa temática, a Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT apresenta, em seu acervo, métodos de ensaios e especificações próprias para os blocos cerâmicos, (SENA, 2014)Essas normas para controle distinguem-se em atributos qualitativos geralmente observados a olho nu e combinação com as variáveis verificadas por meio dos ensaios em laboratório, (KILLER, 2019).

Sendo assim, entende-se que a falta de estudos prévios sobre a melhor mistura a ser empregada pode ser um dos fatores que levam ao alto índice de perdas, ocasionadas por retracções excessivas, geralmente acompanhadas por trincas que conduzem ao enfraquecimento dos produtos, (AZEREDO, 2015). Esse fator contribui para o elevado número de blocos quebrados na movimentação e no armazenamento (CORREA, 2020). Segundo Laursen, (2019), as deformações e a baixa resistência das peças fabricadas consistem na deficiência de controle tecnológico, na escolha e na dosagem de matérias-primas e nos mecanismos no processo. Para alcançar bons resultados, faz-se necessária a caracterização das matérias-primas por meio de ensaio químico, mineralógico, físico e mecânico, permitindo o fortalecimento dos requisitos para tomada de decisão na definição de controle e preparação da massa (QUEIROZ, 2021). Lima (2010) afirma que o atendimento a esses requisitos está relacionado com a forma como as atividades são desenvolvidas no controle de formulação.

Seguindo esse raciocínio, a presente pesquisa direciona-se a avaliar as matérias-primas argilosas quanto a seu emprego na fabricação de tijolos, almejando sugerir técnica de controle na obtenção de uma massa cerâmica mais adequada para o processo produtivo em uma indústria cerâmica localizada no polo cerâmico de Manacapuru. O objetivo é avaliar em laboratório as matérias-primas compostas de

duas argilas e elaborar formulação de massa mais adequada para queima dos Corpos de Prova (CP), visando melhorar a qualidade do

produto final, gerando dados técnico-científicos para propor adaptações na indústria.

MATERIAIS E MÉTODO

Este tópico descreve a metodologia e os equipamentos utilizados para controle na formulação da massa e na queima, bem como os ensaios tecnológicos nos corpos de prova

cerâmica. Para isso, organizou-se um planejamento metodológico composto de quatro etapas sequenciadas cronologicamente com atividades e experimentos conforme a figura 1.

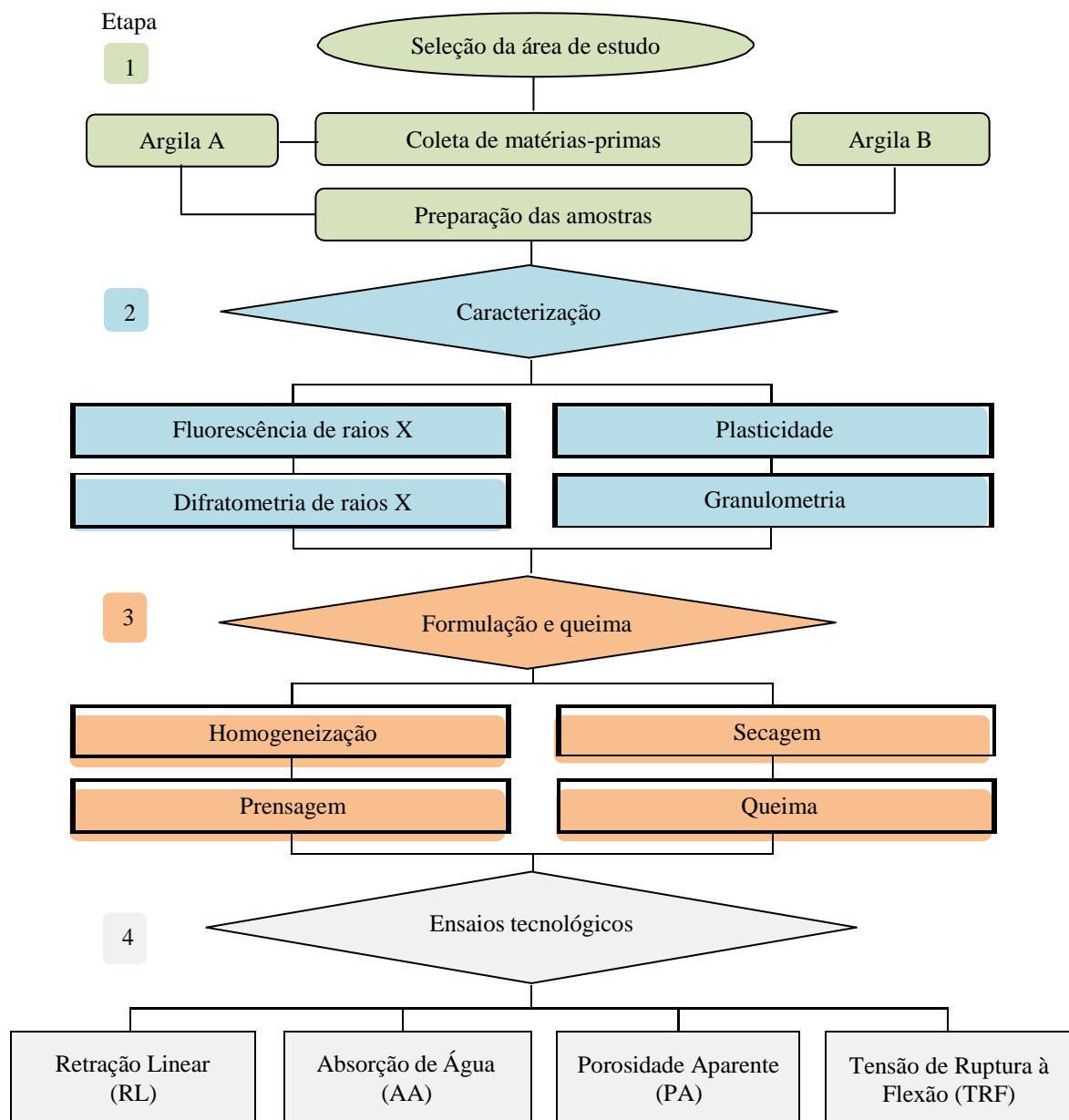


Figura 1 – Fluxograma das atividades metodológicas realizadas nesta pesquisa (Fonte própria 2022).

Localização e Coleta

Para o desenvolvimento desta pesquisa, foram utilizadas duas matérias-primas classificadas como: argila A, de coloração bege e alta plasticidade, originada em aluviões

recentes relacionados ao ambiente de planícies de inundação do período neógeno holocênico de formação Rio Solimões; e argila B, apresentando baixa plasticidade, de cor

avermelhada a mosqueada e com textura argiloarenosa proveniente de sedimentos residuais de alterações de rochas da Formação Alter do Chão, do Grupo Javari e do Cretáceo da Bacia do Amazonas. As coletas foram realizadas em uma empresa que utiliza esses minerais na indústria ceramista para fabricação de tijolos.

Essas argilas foram retiradas do pátio de armazenagem utilizado para o sazonamento das matérias-primas, etapa necessária para ocorrer estabilização e uniformidade após ações

mecânicas na extração. A indústria cerâmica parceira nesta pesquisa está localizada no km 2 do ramal Bela Vista, zona rural vicinal da Rodovia Manuel Urbano, no município de Manacapuru – AM (ver coordenada na figura 2). Após a coleta e o armazenamento adequado em sacos plásticos, as referidas argilas foram levadas ao Laboratório de Laminação e Matérias-Primas Minerais do Departamento de Geociências, pertencente à Universidade Federal do Amazonas (UFAM), para a realização das análises.

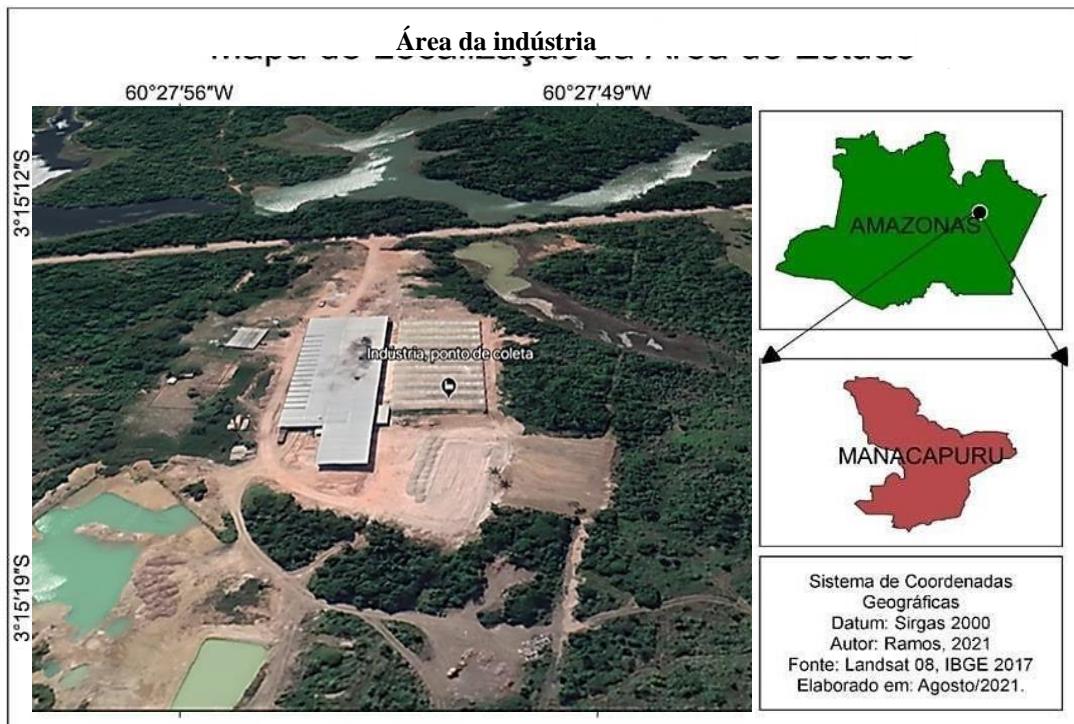


Figura 2 – Localização da indústria onde foram coletadas as amostras de argila (Fonte própria 2021).

Caracterização e Formulação

Todas as matérias-primas foram analisadas observando as características química, mineralógica e física, como granulometria e plasticidade. As argilas fornecidas pela empresa estavam na forma de torrões grosseiros e foram, inicialmente, deixadas ao ar livre em bandejas de alumínio por um período de aproximadamente uma semana, a fim de eliminar a umidade higroscópica e facilitar o processo de redução granulométrica para melhor trabalhabilidade. Para isso, as argilas foram moídas separadamente em moinho de bolas, passadas em peneira de 100 mesh ($0,149\text{ }\mu\text{m}$), C por 24 horas.

Em seguida, foi realizada a caracterização de composição química, por meio de um espectrômetro de fluorescência de raios X por

dispersão de ondas, utilizando espectrômetro WDS sequencial, modelo Axios Minerals da marca PANalytical, com tubo de raios X cerâmico, anodo de ródio (Rh) e máximo nível de potência, 3,0 kW. Para a realização desse procedimento, as amostras foram transformadas em pó usando almofariz e pistilo de ágata, sendo, posteriormente, separadas em volume de 10 g em porta-a mostras a fim de serem analisadas. Para identificação das fases cristalográficas, foram executados ensaios de difratometria de raios X num difratômetro de raios X modelo X'pert Pro MPD (PW 3040/60), da PANalytical, com goniômetro PW3050/60 (Theta/Theta) e tubo de raios X cerâmico de anodo de Cu ($\text{K}\alpha 1$ 1,5406 Å), modelo PW 3373/00, foco fino longo, 2200 W, 60 kV. O

detector utilizado é do tipo RTMS, Pixel/1D. A aquisição de dados foi feita com o *software* X’Pert Data Collector, versão 2.1a, e o tratamento dos dados, com o *software* X’Pert HighScore, versão 3.0d, ambos da PANalytical. Ainda foram utilizadas as seguintes condições de análise: *voltage* (kV) 40; *current* (mA) 40; *scan range* ($^{\circ}$ 2 θ) 5-70 (MA) e 5-50 (RJ); *step size* ($^{\circ}$ 2 θ) 0,02; *scan mode continuous*; *counting time* (s) 50; *divergence slit slit fixed* 1/2 $^{\circ}$; *mask fixed* 10 mm; *anti-scatter slit name* 5,7 mm.

As características granulométricas foram identificadas pelo método espalhamento a *laser* ou granulometria a *laser* por meio de granulômetro Malvern Instruments, mastersizer 2000, *in MAN0384 issue 1.0*, 2007. Essas análises foram realizadas no Laboratório de Análises Minerais (LAMIN), instalado no Serviço Geológico do Brasil (CPRM/Manaus). Já os ensaios de determinação da plasticidade utilizaram os limites de Atterberg, com base nas normas da ABNT, NBR 6459 (ABNT, 2016a) (Limite de Liquidez) e NBR 7180 (ABNT, 2016b) (Limite de Plasticidade). Esses ensaios foram realizados no Laboratório de Laminação

do Departamento de Geociências (DEGEO), da UFAM.

Na formulação da massa cerâmica, as argilas foram homogeneizadas manualmente e umedecidas por aspersão a 8% de umidade, separadas nas devidas proporções em massa e, quando apresentavam torrões, eram peneirados em peneira tamanho 40 mesh (420 μm) para manter a distribuição de umidade uniforme.

Em seguida, elas foram acondicionadas em sacos plásticos durante um período de 24 horas, buscando uma homogeneização de umidade e tamanho para cada amostra.

As formulações foram compostas da mistura das duas argilas conforme percentuais planejados e definidos em peso por meio de uma balança analítica. Foram elaboradas cinco composições identificadas como M1, M2, M3, M4 e M5, sendo duas massas puras das argilas como referência para comparação de resultados, em que M1 = A100% e M2 = B100%. Posteriormente, foram elaboradas outras três composições nas seguintes proporções: M3 = A85% – B15%; M4 = A80% – B20%; e M5 = A75% – B25%, conforme, tabela 1.

Tabela 1 – Formulação de massa cerâmica para conformação dos corpos de prova.

Formulação de massa	% em peso de matérias-primas		
	Argila A	Argila B	Total
M1	100	0	100
M2	0	100	100
M3	85	15	100
M4	80	20	100
M5	75	25	100

Para definir umidade de prensagem, foi realizado ensaio em balança analítica para leitura do percentual de umidade da massa, que indicou a quantidade de água a ser adicionada para atingir umidade planejada de 8%. Esse controle é importante na preparação de massa para prensagem. A análise foi feita de acordo com os parâmetros estabelecidos em roteiro de norma técnica da ABNT (NBR 15.270 - 1, 2017) (NBR-15270-2, 2017). Os resultados dessa análise foram obtidos pelo cálculo das Massas úmidas (Mu) e das Massas secas (Ms) por meio da equação 1.

$$U (\%) = \frac{(Mu - Ms)}{Ms} \times 100 (g) \quad (1)$$

Em que: U = Umidade; Mu = Massa úmida; Ms = Massa seca.

Tais resultados serviram como base de dados para avaliar a densidade de prensagem recomendando acima de 1,8%, que permite prever o comportamento das peças durante a secagem, (MORENO et al., 2016).

Após a definição de umidade, foram produzidos 75 CP em molde de aço imprimindo pressão de 25 MPa. Na prensagem, foi utilizada uma prensa hidráulica, modelo MPH 30 da marca Marcon, com capacidade de 30 toneladas, compatível com a pressão utilizada na empresa. Os CP foram dimensionados e pesados para determinação da densidade verde por meio da equação 2.

$$d = \frac{m}{V} \quad (g/mm^3) \quad (2)$$

Em que: d = densidade; m = massa; v = volume.

No tratamento térmico, os CP foram secos a 110 °C para eliminação de umidade em estufa do modelo MA 033 da marca Marcon, série FOI 7170. A queima final foi em forno tipo mufla da marca Jung, modelo/série FOI 7170, com temperatura controlada por termopar digital programando três patamares com diferentes temperaturas, 700 °C, 800 °C e 900 °C, respectivamente. Foi considerada a temperatura inicial ambiente de 30 °C.

O ciclo térmico foi realizado à taxa de aquecimento de 5 °C por minuto, com tempo na rampa de aquecimento para 700 °C foi de 2h20min, para 800 °C de 2h40min e para 900 foi de 3h e o tempo queimando em patamar máximo foi de 1h20min para todas temperaturas

no patamar de queima. O resfriamento de modo geral para as três queimas ocorreu pelo método de desligamento do forno de finalizando ciclo térmico em 12h, quando foram retiradas as peças.

O tempo de 12h foi estipulado por medida de segurança operacional e visando evitar choque térmico nas peças em contato brusco com ar frio.

Conforme a programação estabelecida, foi elaborado um gráfico com as representações das curvas de queima planejada (Figura 3).

A elaboração das curvas foi planejada com base em estudos anteriores sobre controle térmico (GONDIM, 2010), (SENAI, 2015) e (GUIMARAES 2017).

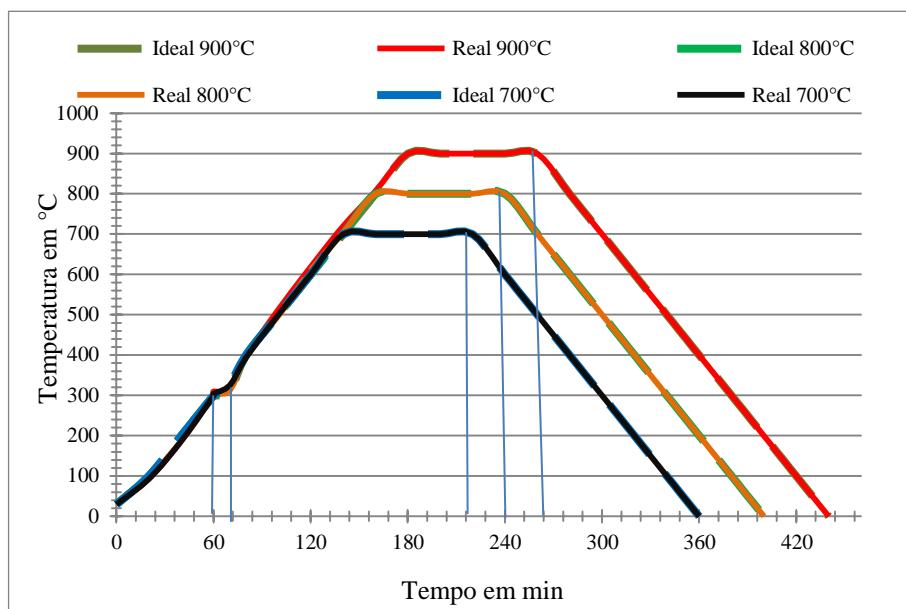


Figura 3 – Curva da queima dos corpos de prova (Fonte própria 2022).

Após a queima, os CP foram resfriados lentamente e removidos de dentro do forno para realização das análises de Retração Linear (RL), Absorção de Água (AA), Tensão de Ruptura à Flexão (TRF), Porosidade Aparente (PA) e Densidade Aparente (DA).

Para determinação da RL, as dimensões dos CP foram medidas por meio de um paquímetro com o objetivo de analisar comprimento, largura e espessura e calculados por meio da equação 3.

$$RL (\%) = \frac{L_0 - L_1}{L_0} \times 100 \text{ (mm)} \quad (3)$$

Onde: (L_0 = Comprimento verde), (L_1 = Comprimento após queima)

No ensaio de absorção, os CP foram colocados em um recipiente com água com volume suficiente para mantê-los submersos. O

recipiente foi gradativamente aquecido até entrar em ebulição, mantendo os CP em água fervente por 2 horas. Transcorrido o tempo, os CP foram resfriados via substituição lenta da água quente por água à temperatura ambiente de acordo com NBR-15270-2 (ABNT, 2017a). Em seguida foi realizada a pesagem dos CP, obedecendo ao tempo-limite de tolerância máxima estabelecido na norma técnica 15270-1, que é de 15 minutos (ABNT, 2017b). As medidas de massa seca (P_s) e massa úmida (P_u) mostraram a variação de absorção de água conforme equação 4.

$$AA (\%) = \frac{P_u - P_s}{P_s} \times 100 \text{ (g)} \quad (4)$$

Em que: P_u = massa do corpo úmido (g); e P_s = massa do corpo seco (g).

Já os cálculos para determinar a PA foram utilizados na fórmula presente na equação 5. usando os dado massa úmida, massa seca e massa imersa (Pi).

A tensão e a ruptura da flexão foram determinadas em um flexímetro da marca Nannetti Faenza, modelo CC 6696.20076, série 1402012. Nesse equipamento, os CP foram alinhados sobre os mancais fixados na base do equipamento, com distância entre as peças da ordem de 20% em relação ao comprimento.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados da composição química das argilas A e B, em forma de óxidos, são expostos na tabela 2. Vê-se que a constituição da argila A é principalmente de SiO_2 , seguida de Al_2O_3 e percentuais menores para Fe_2O_3 e K_2O , enquanto a argila B tem, em sua maioria, SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 e K_2O . Observa-se que o percentual de óxido de silício (SiO_2) variou entre 59,25% e 70,41%, e os teores de óxidos de alumínio (Al_2O_3) estiveram entre 27,29% e 20,33%, para argilas A e B respectivamente.

Os níveis elevados de sílica e alumínio estão relacionados com a estrutura básica dos aluminossilicatos, no caso específico a caulinita, formados por poliedros tetraédricos (SiO_2) e octaédricos (Al_2O_3) conjuntamente.

De acordo com Azeredo (2015), a sílica é responsável por garantir boa resistência à mudança de dimensões durante a secagem e a queima de tijolos. Já os teores de Fe_2O_3 variaram de 3,09% nas argilas A e 4,18% na argila B; na análise, TiO_2 mostrou 0,91 A e 0,48 B; para K_2O , teor foi de 3,15 A e 0,62 para a argila B. O teor de Fe_2O_3 e TiO_2 pode influenciar a tonalidade do produto queimado a partir de 4%, promovendo uma cor avermelhada (Correa et al., 2020). Nota-se, também, que as argilas apresentaram teores baixos de álcalis (K_2O , Na_2O , CaO e MgO). Os compostos alcalinos (K_2O , Na_2O) e alcalinoterrosos (CaO e MgO) possuem efeito fundente, o que facilita a formação de fase líquida necessária à consolidação das partículas e, consequentemente, aumenta a RL das peças no processo de queima, (RACANELLI et al., 2020). A porcentagem de óxidos de sódio (Na_2O) e potássio (K_2O), que geralmente se apresentam na forma de feldspatos, é fator preponderante para o processo de fabricação da

$$PA (\%) = \frac{Pu - Ps}{Pu - Pi} \times 100 \quad (g) \quad (5)$$

Em que: Pi = massa do corpo imerso em água (g).

Os resultados fornecidos pela leitura de rompimento foram impressos nas conversões de unidade, MPa e kgf/mm², sendo que, para esta pesquisa, foram considerados os resultados em MPa para analisar a resistência mecânica dos corpos de provas.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

cerâmica vermelha e contribui para boa resistência mecânica (NASCIMENTO, 2019). O percentual representado pelo pentóxido de fósforo P_2O_5 corresponde à presença de matéria orgânica que geralmente é volatilizada durante o processo de queima das peças.

Tabela 2 – Composição química média das amostras.

Composição Química (%)	Amostras	
	Argila A	Argila B
SiO_2	59,25	70,41
Al_2O_3	27,29	20,33
Fe_2O_3	3,09	4,18
TiO_2	0,91	0,48
K_2O	3,15	0,62
Na_2O	3,29	2,02
MgO	1,60	< 0,1
CaO	0,93	1,46
P_2O_5	0,49	0,20

Nos resultados das análises de Difração de Raios X (DRX), foram mostradas as fases minerais na argila, basicamente representadas por caulinita e quartzo, com pequenas frações de outros minerais, conforme exposto na figura 4. No difratograma, é possível identificar que a argila A é extraída de depósitos de aluvões contém teor elevado de caulinita $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ e, nos picos com menor intensidade, mostra pequenas frações de quartzo (SiO_2).

Segundo Rodrigues et al. (2015), essas características correspondem a depósitos situados ao longo da AM-070 em leito e nas margens da drenagem, incluindo as planícies de inundação e as áreas delta com material mais fino extravasado dos canais nas cheias.

Para Sabino (2016), a presença elevada de caulinita é atributo que confere a essa material boa plasticidade, tornando-o ideal para o controle de formulação quando misturado com argilas mais ricas em sílica na composição de

massas ótimas para fabricação de tijolo na indústria de cerâmica vermelha. O difratograma da argila B evidencia picos com maior intensidade para o quartzo, pequenas

frações de caulinita e hematita. A presença elevada de quartzo justifica a baixa plasticidade do material oriundo da alteração da formação.

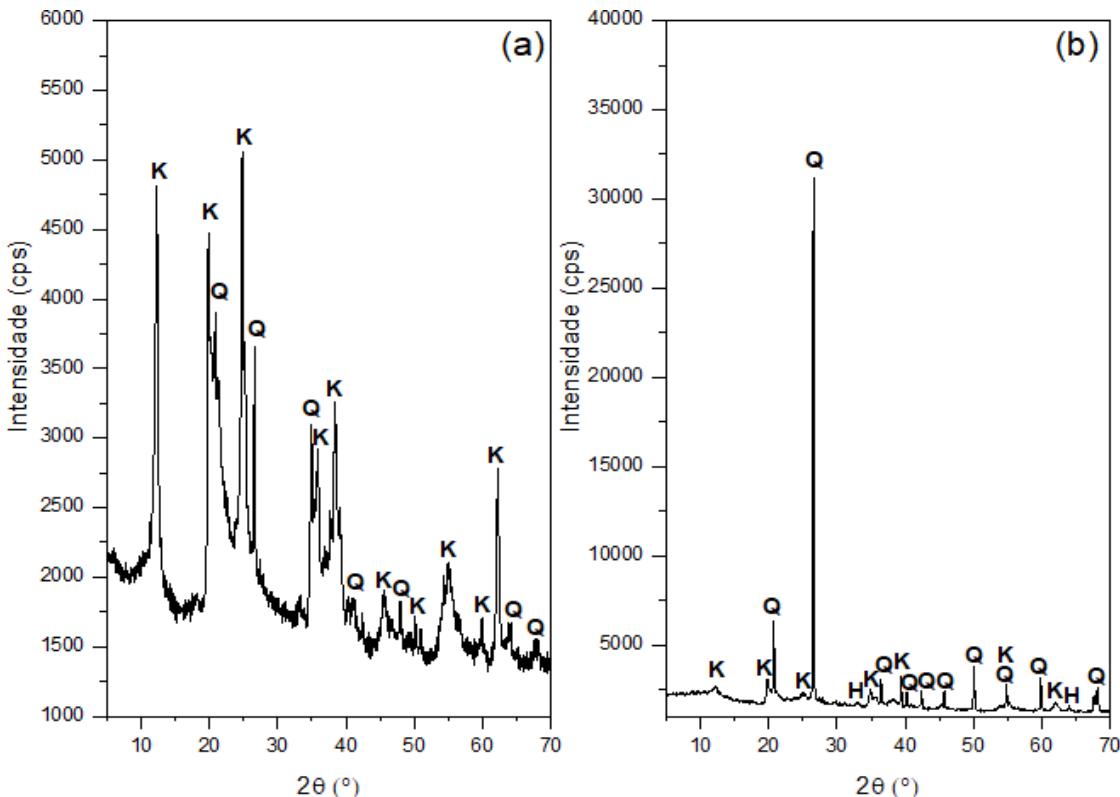


Figura 4 – Difratograma da análise de mineralogia das argilas: (a) Argila A: Q – Quartzo (ICSD 079634) / K – Caulinita (ICSD 068697); (b) Argila B: Q – Quartzo (ICSD 089278) / K – Caulinita (ICSD 068697) / H – Hematita (ICSD 082136) (Fonte própria 2022).

Os resultados das análises granulométricas das argilas podem ser observados na figura 5. Verifica-se que a argila A apresenta uma constituição granulométrica caracterizada por um maior grau de desuniformidade dos tamanhos de partículas em comparação à argila B, o que pode ser quantificado pelos valores obtidos por meio da relação $D_{90}/D_{10} = 135,72$ (argila A) e 53,99 (argila B). A maior amplitude do espectro granulométrico ocupado pelas partículas da argila A revela que essa matéria-prima deve contribuir para o processo de densificação dos produtos cerâmicos, em especial durante a etapa de conformação.

A argila A também exibe um expressivo volume de partículas abaixo de 2 μm , com percentuais de volumes acumulados na ordem de 27,5%, enquanto, na argila B, foi detectado um volume de apenas 14,1% nessa faixa granulométrica. A apreciável quantidade de partículas abaixo de 2 μm na argila A é mais um indicativo da forte presença de argilominerais do grupo da caulinita. A argila B é

particularmente siltosa e, portanto, possui significativo volume de partículas na faixa de 2 μm a 60 μm (aproximadamente 72,45%).

A elevada concentração de SiO_2 e a alta intensidade dos picos característicos de quartzo levam à conclusão de que a partícula situada nesse intervalo granulométrico é predominantemente do supracitado mineral. Na faixa arenosa (acima de 60 μm), há frações volumétricas próximas em ambos os materiais analisados, com um percentual volumétrico discretamente menor na argila B (13,2%) em comparação à argila A (14,1%).

Moreno et al. (2016) ressaltam as principais diferenças granulométricas pelo maior conteúdo de $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ em A, indicando tratar de um material menos alterado em relação à argila B, na qual as quantidades de SiO_2 devido ao intemperismo são mais acentuadas. Esses resultados norteiam a tomada de decisão no planejamento da formulação de massa adequada para obter melhor desempenho na qualidade do produto final (SABINO, 2016).

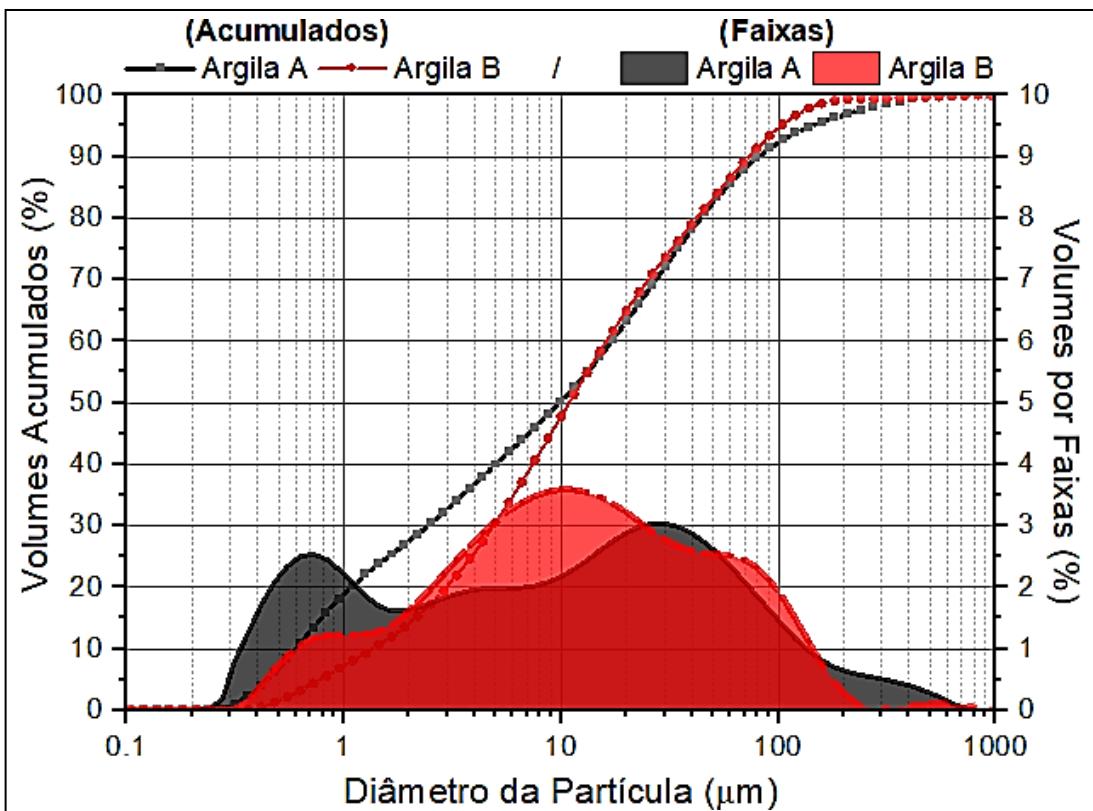


Figura 5 – Comportamento da distribuição granulométrica da argila A e B (Fonte própria 2022).

Os limites de Atterberg, identificados na tabela 3, revelam que o Índice de Plasticidade (IP) mais elevado na amostra A é influenciado pela granulometria mais fina com predominância de caulinita.

O resultado indica que a argila A é um material altamente plástico, com ($IP \geq 15$). Isso configura como indicador para a demanda de água aplicada na composição da massa a ser moldada.

O percentual hídrico influencia o controle do tratamento térmico, estabelecendo menor ou maior tempo de secagem e queima (GOMES, 2015). Entretanto, em função da plasticidade, as

argilas tendem ter maior resistência mecânica após queima devido à boa coesão entre os argilominerais, (CROZETTA et al., 2016). Já os valores de IP abaixo de 15% para a argila B mostram que é um material pouco plástico relacionado à predominância de quartzo. Nesse caso, a argila B exige menor quantidade de água para a conformação.

No entanto, para Dias, (2016), essa argila não adquire boa resistência e, devido à interação mais lenta das partículas, ela precisa de temperatura mais elevada para que ocorra o cozimento ou a sinterização dos minerais dominantes.

Tabela 3 – Valores de Limite de Liquidez (LL), Limite de Plasticidade (LP) e Índice de Plasticidade (IP).

Argila	LL (%)	LP (%)	IP (%)
A	46,64	27,54	20,46
B	28,00	24,74	8,26

Ensaios Tecnológicos

Este item mostra os valores referentes aos ensaios de RL, AA, PA e TRF após queima nas temperaturas de 700 °C, 800 °C e 900 °C, considerando as médias dos resultados de cinco

amostras. De posse dos dados, foram elaborados gráficos para melhor interpretação dos resultados obtidos nos ensaios após tratamento térmico. A figura 6 mostra o gráfico das curvas

de retração linear pôs queima de todas as formulações nas temperaturas de 700 °C, 800 °C, e 900 °C.

Os dados dispostos abaixo são as médias relativas a cinco amostras para cada formulação. Nas análises, é possível observar que, nos testes das argilas puras, a amostra M1, com maior percentual de partículas finas e maior plasticidade, teve retração acentuada quando comparada com a argila M2, que possui menor plasticidade. Porém, quando as argilas A e B foram misturadas em proporções diferentes, ocorreu certa estabilidade nos valores de retração em relação aos percentuais de mistura da massa M3, M4 e M5.

Nota-se que a formulação M5 apresentou o menor resultado de retração similar para todas as temperaturas, provavelmente influenciado pela mistura, reduzindo a plasticidade com incremento de material menos plástico com predominância de quartzo.

Quando analisadas, as misturas M3 e M4 também permaneceram dentro da faixa tolerável dos parâmetros e das normas da ABNT, que estabelece que a retração permitida seja abaixo de 2% após a queima. De acordo com Racanelli et al. (2020), também foi comprovado, em seus estudos, que, quanto mais plástico o material, maior tende a ser a retração obtida.

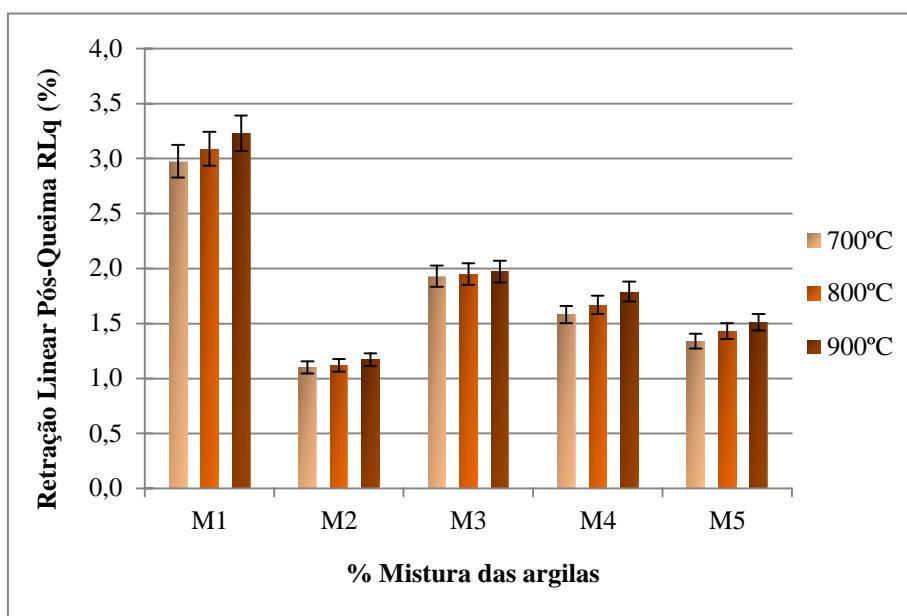


Figura 6 – Retração linear dos corpos de prova queimados (Fonte: Elaboração Própria 2022).

A figura 7 salienta o comportamento da absorção de água das peças cerâmica queimadas. Em relação aos resultados de absorção de água, considerando a mistura e a temperatura usada, entende-se que não ocorreram grandes variações mesmo com a mudança da temperatura de queima, com exceção da amostra M2, que teve o resultado influenciado provavelmente pelo teor de areia e quartzo presente nessas amostras, dificultando o empacotamento eficiente das partículas e aumentando o percentual de poros.

A diferença granulométrica entre as amostras plásticas (partículas mais finas) e as menos plásticas (partículas mais grossas) evidencia a influência que essa propriedade exerce sobre a

queima das peças quando há aumento da temperatura no teste em M1 e M2.

A interação de contato intergranular com a redução do tamanho dos poros ocorre mais rápida na argila plástica, enquanto, na menos plástica, acontece de forma lenta, influindo no índice de absorção (Lima, 2010).

À medida que se misturam as duas argilas tendem a equilibrar a variação de absorção, conferindo melhor estabilidade considerando desvio padrão.

Vale ressaltar que apenas M2 apresentou inconformidade de acordo com os parâmetros das normas NBR 15270-1 e NBR 15270-2 (ABNT, 2017b, 2017a), que estabelecem os limites permitidos de absorção entre 8% a 25%.

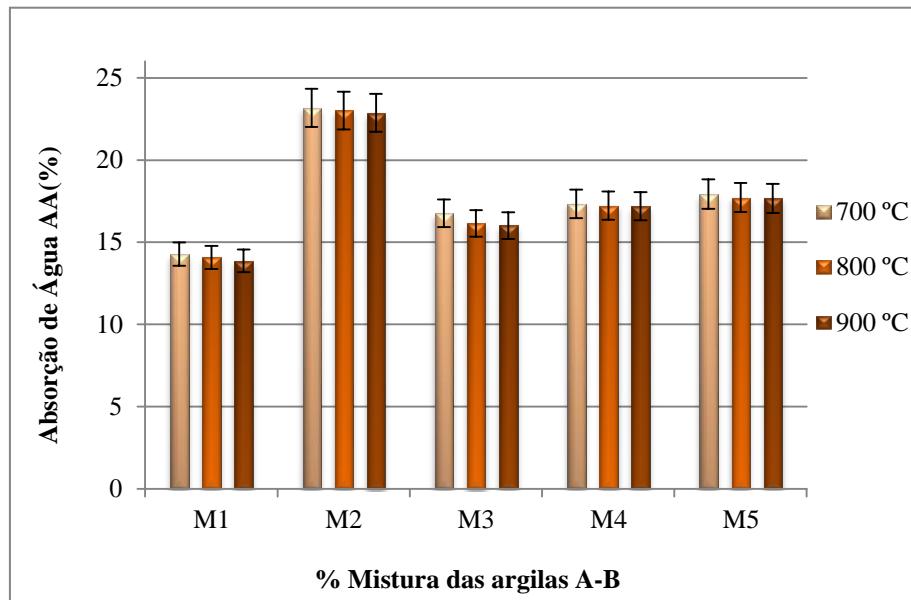


Figura 7 – Absorção de água e corpos de prova queimados (Fonte: Elaboração Própria 2022).

A porosidade mostrada tem relação com a capacidade dos materiais de absorver água, fato que é confirmado pela comparação entre as figuras 7 e 8, mostrando que, quanto maior a absorção, maior a porosidade.

Assim, foi analisada uma discrepância entre as amostras M1 e M2, a qual foi estabilizada após mistura planejada, o que conferiu resultados similares para M3, M4 e M5, considerando a curva no gráfico. A relação entre absorção e porosidade está associada às

propriedades de granulometria e plasticidade. A porosidade, quando excessiva, é um dos fatores que prejudica o desempenho mecânico; no entanto, dentro dos parâmetros normativos, ela ajuda no processo de secagem e evita o aparecimento de defeitos por consequência dos gases produzidos na queima. No gráfico da figura 8, podemos observar o comportamento poroso dos materiais, principalmente ao traçar uma linha imaginária entre M1 e M5, analisando as barras de desvio padrão.

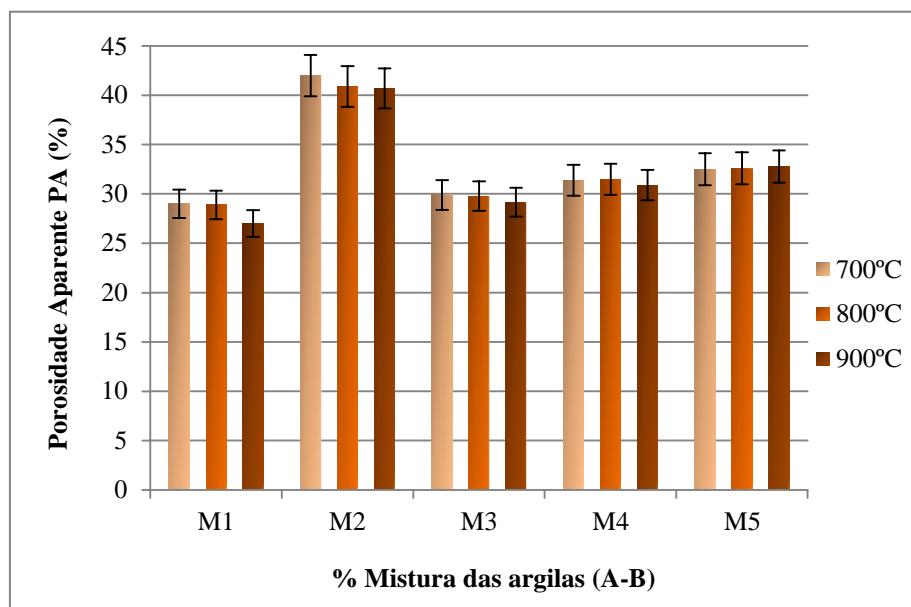


Figura 8 – Porosidade aparente dos corpos de prova queimados (Fonte: Elaboração Própria 2022).

O resultado de resistência observa-se em relação ao de retração; à medida que a temperatura aumenta, também coincide com os

resultados de menor absorção e porosidade. Na M1 (plástica), a porosidade aparente diminuiu, e os grãos se uniram por efeito de maior

reatividade, adquirindo maior resistência. Esse efeito é reduzido na M2 (menos plástica). Com o incremento na formulação de mistura da massa entre M1 e M2, verifica-se que as massas M3, M4 e M5 apresentaram estabilidade entre si, mostrando resistência após queima dentro da mesma faixa de desvio padrão e considerando a possibilidade de usar diferentes temperaturas de

queima. Vale ressaltar que os resultados de resistência obtidos atendem aos parâmetros da NBR-15270-2, sendo acima de 1,5 MPa para fabricação de tijolos de vedação com furos horizontais e acima de 3 MPa para tijolos estruturais com furos verticais (ABNT, 2017a). Os dados de resistência estão representados no gráfico da figura 9.

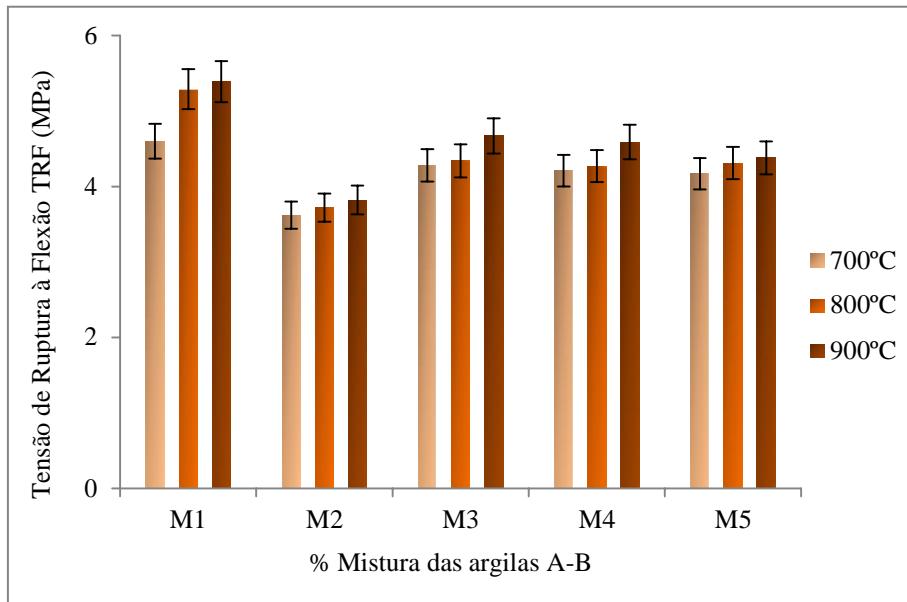


Figura 9 – Tensão de ruptura à flexão nos corpos de prova queimados (Fonte: Elaboração Própria 2022).

CONCLUSÃO

Este trabalho demonstra a importância do processo de caracterização e controle de matérias-primas na formulação de massa e na temperatura de queima para fabricação de artefatos de cerâmica vermelha testados em laboratório.

Para encontrar as melhores proporções no preparo das massas cerâmicas, é necessária a realização de testes que definem, de forma adequada, a variação nas propriedades.

A compreensão elementar da argila coopera com o planejamento para o uso racional das matérias-primas em sua aplicação.

O conhecimento das características das argilas nos aspectos físico, químico e mineralógico serve como subsídio para estabelecer parâmetros de controle na preparação de massa cerâmica, o que permite compreender o comportamento das argilas durante o processo de queima das peças.

Com o estudo realizado nesta pesquisa, pode-se concluir que a caracterização química das amostras indicou teores de óxido de alumínio de (Al_2O_3) e dióxido de silício (SiO_2),

bem como percentuais baixos de óxido de ferro (Fe_2O_3) e presença elevada de alumina e sílica para as argilas A e B, respectivamente.

O teor químico apresenta, em sua composição, o principal constituinte que justifica a mineralogia, com predominância de caulinita na argila A e quartzo na argila B, também com picos pequenos de hematita, responsável pela cor laranja das peças após queima.

A caulinita é o mineral responsável pelo desenvolvimento de plasticidade, com maior retração em função de melhor arranjo das partículas finas. O quartzo atua como matéria-prima não plástica e inerte durante a queima, além de contribuir com a vitrificação após queima.

Os elementos químicos e a mineralogia também colaboraram com influência direta na granulometria, com predominância de argilominerais caulinitíticos com maior percentual de partículas finas na argila A, contribuindo com plasticidade elevada, efeito característico da caulinita. Já com os grãos mais

grossos na argila B refletem em menor percentual plástico influenciado pelo quartzo.

2 Com base nos estudos de caracterização, foi possível avaliar o comportamento dos componentes individuais e das misturas para elaborar formulações mais adequadas no balanço de mistura do material plástico com o menos plástico, objetivando melhorar a qualidade do produto final.

3 Para as cinco formulações experimentadas, conclui-se que a mistura M5, após queima nas temperaturas de 700 °C, 800 °C e 900 °C, obteve melhor desempenho nos resultados de retração linear, absorção de água, porosidade e resistência à compressão. Porém, quando analisado o desvio padrão, as formulações M3 e M4 também revelaram resultados semelhantes aos de M5, atendendo aos parâmetros estabelecidos em normas da ABNT NBR 15270 – 2, 2017.

Do ponto de vista técnico, essa similaridade nos resultados tecnológicos é importante à medida que aumenta a capacidade de propor adaptação dos testes em laboratório para aplicação na indústria. Com os controles

laboratoriais aplicados nesta pesquisa para formulação de massa e temperatura de queima, puderam ser observadas a instabilidade e a uniformidade das peças do corpo de prova em cada caso.

4 Os resultados obtidos nesse processo permitiram concluir que, quando queimadas nas temperaturas entre 700 °C a 900 °C, as misturas M3, M4 e M5 apresentam característica semelhante nos resultados tecnológicos, apesar porem M3 apresentou risco com resultado próximo do limite máxima de retração linear.

Final Em razão desses resultados, esta pesquisa destaca as mistura de M4 e M5 como mais apropriada para aplicação na indústria com base nos resultados obtidos em laboratório.

Nesse sentido, a proposta desta pesquisa tem como finalidade sugerir o gerenciamento no controle na formulação de massa e queima em temperatura na faixa entre 700 °C e 900 °C, na fabricação de tijolo numa indústria de cerâmica vermelha do polo oleiro de Manacapuru.

Esse controle visa melhorar continuamente os resultados positivos na fabricação de produtos uniformes e padronizados.

AGRADECIMENTO

Os autores agradecem a Deus, à Universidade Federal do Amazonas (UFAM), ao Programa de Pós-Graduação em Geociências (PPG GEO) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Amazonas (FAPEAM) pelo apoio à pesquisa.

REFERÊNCIAS

ABNT NBR 15.270-2 Componentes cerâmicos — Blocos e tijolos para alvenaria parte 2: Métodos de ensaios. Associação Brasileira de Normas Técnicas, v. 2, p. 29, 2017.

ABNT NBR 15270-1: Componentes cerâmicos. Parte 1: Blocos cerâmicos para alvenaria de vedação - Terminologia e requisitos. Associação Brasileira de Normas Técnicas, p. 15, 2017.

ABNT, NBR 6459 Solo — Determinação do limite de liquidez Soil — Liquidez. Associação Brasileira de Normas Técnicas, p. 8, 2016.

ABNT, NBR 7180 Solo - Determinação do limite de plasticidade. Associação Brasileira de Normas Técnicas, p. 8, 2016.

ANICER. Associação Nacional da Indústria Cerâmica - Relatório anual <https://www.anicer.com.br>. Associação Nacional da Indústria 2021a.

ANICER. Acabando a argila e agora revista da Anicer 7 de maio de 2021, Associação Nacional da Indústria 2021b.

ANICER. Programa setorial da qualidade dos blocos cerâmicos PSQ-BC. V. 2021, n. 21, 2022.

AZEREDO, N. G. Avaliação das propriedades físicas e mecânicas em blocos cerâmicos estruturais através do método de ultrassom na região de Campos dos Goytacazes RJ. n. 129–139, p. 130, 2015.

- CAMPELO, N. S. Determinação da formulação de massas argilosas para emprego em cerâmica vermelha, oriundas do polo oleiro de Iranduba chemical stabilization of amazonian tropical soils view project. <<https://www.researchgate.net/publication/322031358>> 2010.
- CONCONI, M. S. et al. Comportamento térmico, TG-DTA-TMA, sinterização e propriedades de uma argila caulinítica da província de Buenos Aires , Argentina. v. 65, p. 227–235, 2019.
- CORREA. L. C.; BIANCHINI S. S. B. Importância do cerenciamento colorimétrico na cerâmica. v. 25, n. 1, p. 14–33, 2020.
- CROZETTA, J. R. et al. Influência da granulometria na plasticidade e retração de secagem das argilas. Crâmica Industrial, v. 21, n. 1, p. 21–29, 2016.
- DIAS, D. K. D. R. Reutilização do resíduo cerâmico oriundo do polo oleiro de Iranduba e Manacapuru para emprego como elemento constituinte de base e sub-base de pavimento. p. 166, 2016.
- GONÇALVES, R. S. GONÇALVES, R. S. Teste de Precisão e Análise Estatística em Lotes de Blocos Cerâmicos Segundo A ABNT / NBR 15270-1 DE 2017, No Município de Santa Helena de Goiás Tecnologia Goiano – Campus Rio Verde. . 2021.
- GONDIM, I. L. M. Myxedema coma induced by ingestion of raw bok choy. The New England journal of medicine, v. 362, n. 20, p. 1945–6, 20 maio, 2010.
- KILLER, R. A. A Evolução e as estratégias do setor cerâmico. ou evolution and strategies of the ceramic sector in the brazilian context. ix cogresso brasileiro de egenharia de produção, 2019.
- LAURSEN, et. al. Characterization of Brazilian Northeastern plastic clays. Cerâmica, v. 65, n. 376, p. 578–584, 2019.
- LIMA, R. H. C. Preparação e controle de massa para o APL de cerâmica vermelha de Russas - Ceará. Raimundo Humberto Cavalcante Lima. - Fortaleza: Banco do Nordeste Brasileiro, 2010. 138 p.: il.ISBN 978.85.7791.126.4, 2010.
- MORENO, M. M. T. et al. Caracterização de argilas e composição de massas cerâmicas preparadas com base na análise de curvas de consistência de misturas argila-água. Ceramica, v. 62, n. 361, p. 21–31, 2016.
- NASCIMENTO, L. C. Otimização de massa cerâmica de caulim com a incorporação de resíduo de vidro e rochas para produção de material cerâmico Lilia Cardoso Nascimento 2019.
- QUEIROZ, A. Caracterização mineralógica e física de argila do amazonas para a indústria cerâmica. n. Equação 1, p. 1–6, 2021.
- RACANELLI, L. de A. et al. Caracterização e estudo das propriedades físicas, químicas e mecânicas das argilas cauliníticas da região Nordeste do Estado do Pará. Matéria (Rio de Janeiro), v. 25, n. 1, 2020.
- REIS, A. S. DOS et al. Caracterização de Argila para utilização em cerâmica vermelha estrutural. n. February, p. 8301–8309, 2019.
- RODRIGUES. Caracterização de argilas e crostas lateríticas da porção nordeste do estado do Amazonas, visando aplicabilidade como pigmentos. 2018.
- RODRIGUES, V. O. et al. Caracterização das matérias-primas empregadas na fabricação de produtos do pólo cêramico de Iranduba-AM. Crâmica Industrial, v. 20, n. 1, p. 37–40, 2015.
- SABINO. Características físico-químicas das argilas utilizadas na indústria de cerâmica vermelha no município de tabatinga-am: um estudo de caso em indústrias do município / Artemizia Rodrigues Sabino. - 2016. Euphytica, v. 18, n. 2, p. 22280, 2016.
- SALES JUNIOR. J. C. C. Estudo de massa cerâmica triaxial visando à otimização do ciclo de queima da indústria de cerâmica estrutural. Materials Science and Engineering A, v. 27, n. 1, p. 1–14, 2012.

SALES. J. C. A extração da argila para fabricar cerâmica vermelha no ceará. 59º Congresso Brasileiro de Cerâmica 17 a 20 de maio de 2015, Barra dos Coqueiros, Aracaju, SE, v. 1, n., 2015.

SAVAZZINI et. al. Caracterização e propriedades cerâmicas de argilas usadas em cerâmica vermelha no estado do Espírito Santo. Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais (22º CBECiMat), v. 3, n. 3, p. 822–832, 2016.

SENA, N. O. 21º CBECIMAT - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais 09 a 13 de Novembro de 2014, Cuiabá, MT, Brasil. Investigation of the mechanical properties of magnesium metal matrix composites with a fine dispersion of CeO₂ particles, v. 5738, n. 1, p. 2665–2672, 2014.

SENAI. Guia Técnico Ambiental da Indústria de Cerâmica Vermelha. n. december, p. 1–6, 2015.