



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS DE ANANINDEUA
FACULDADE DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

FLÁVIA REGINA GUEDES DA SILVA

**ANÁLISE DE MASSAS CERÂMICAS UTILIZANDO ARGILA PIAUIENSE,
COM TEORES DE RESÍDUO DE PÓ DE BALÃO E REJEITO DE MINÉRIO DE
COBRE VISANDO A PRODUÇÃO DE CERÂMICA VERMELHA**

Ananindeua, PA
2022

FLÁVIA REGINA GUEDES DA SILVA

**ANÁLISE DE MASSAS CERÂMICAS UTILIZANDO ARGILA PIAUIENSE,
COM TEORES DE RESÍDUO DE PÓ DE BALÃO E REJEITO DE MINÉRIO DE
COBRE VISANDO A PRODUÇÃO DE CERÂMICA VERMELHA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia de Materiais, da Universidade Federal do Pará, Campus de Ananindeua, como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Me. Alacid do Socorro S. Neves.

Coorientador: Prof. Me. André Wilson da Cruz Reis

Ananindeua, PA
2022

À toda família Guedes e Silva, em especial aos meus avós, meus pais e irmãos, que sempre estiveram presentes na minha vida e me apoiando em tudo. Amo vocês!

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a **Deus** por sempre ter agido em minha vida, mesmo nos momentos que eu me julguei não merecedora.

Aos meus pais, **José Raimundo e Selma Celina** que me incentivaram a buscar o melhor de mim, me criaram da melhor forma que podiam e sacrificaram muitas coisas para que eu pudesse chegar aonde eu cheguei. Ao meu irmão, **Fabrcio Herlon** por ser um exemplo de nunca desistir de vencer na vida e à minha melhor amiga e irmã, **Fernanda Katarina** pelo apoio, presença e incentivo na vida.

Ao meu orientador **Prof. Me. Alacid Neves** por sempre lutar por mim, pela amizade que sei que levarei para além da faculdade, mais que um professor, é alguém que entende as reais necessidades de um discente, nunca perdendo o foco no “ensinar”. Ao Coorientador **Prof. Me. André Reis** pela paciência, disponibilidade, ensinamentos e dedicação concedida no desenvolvimento deste, foi peça fundamental para que eu conseguisse concluir este trabalho.

Aos colegas de classe **Jamylle, Dayse, Wellington, Rute Nara, Lucas** que me ajudaram nessa caminhada rumo à graduação principalmente nas descontrações do dia a dia, em especial, à minha equipe de trabalho e melhores amigos, que também fizeram parte deste projeto de alguma forma: **Josilene, Maurício Matos, Jéssica e Raphael Costa**, e por todos os momentos que passamos juntos, vocês são o maior presente que posso levar dessa jornada, amo vocês!

Ao meu namorado **Warleison Nunes**, que muito me ajudou nos estudos e trabalhos, e nunca mediu esforços para isto.

As minhas amigas da Atlético Mercúrio, **Damares, Jennifer, Michele e Sthefanny** que me proporcionaram momentos únicos de alegria, onde vivemos fortes emoções em jogos e pude viver ao máximo a faculdade. Guardarei grandes recordações com vocês!

À minha supervisora de estágio **Nara da Silva**, por me ajudar quando necessito; nunca permitiu eu despriorizar minha vida acadêmica. E à **Sheila Barbosa** pela cooperação e amizade.

À Faculdade de Engenharia de Materiais — **FEMat** por todos os conhecimentos repassados para a minha formação como Engenheiro de Materiais. Aos Laboratórios de Engenharia Química Campus Belém (**usina**), Laboratório de Química do campus Ananindeua e Laboratório de caracterização mineralógica do **IFPA** (Instituto Federal do Pará) pelos ensaios realizados. À **banca avaliadora** por dispor um tempo para me avaliar, em meio as mudanças.

E por fim, mas com certeza não menos importante, agradeço a mim por toda garra, por nunca desistir de ir em frente, arriscar e dar o meu melhor sempre.

RESUMO

A indústria da cerâmica vermelha é o setor responsável por uma expressiva parcela dos materiais utilizados na construção civil, sendo também tema recorrente de pesquisas que visam, através de formulações com adição de diferentes matérias-primas, aprimorar as propriedades tecnológicas do produto de modo a atender às demandas de engenharia. Deste modo, esse trabalho visa analisar a composição das misturas: argila da região de Jardim do mulato- Piauí, com rejeito de cobre e resíduo de pó de balão, através da caracterização física dos corpos de prova. Foram feitas também análises de fluorescência de raios X e difração de raios X. Após isto, foram conformados corpos de prova da argila com misturas contendo de 10% e 15% de rejeito de cobre e 5% e 10% de pó de balão. Os corpos de prova foram secos à 105°C e queimados a 950°C por 2h. As características físicas avaliadas foram: absorção de água, porosidade aparente e massa específica aparente. A caracterização mostrou que a argila é caulínica com elevados teores de SiO_2 e Al_2O_3 e que a melhor relação de misturas se obteve com a formulação contendo 15% de cobre e 10% de pó de balão, onde apresentou melhor desenvoltura nas propriedades tecnológicas.

Palavras-chave: Cerâmica Vermelha. Resíduos. Argila Piauiense.

ABSTRACT

The red ceramic industry is the sector responsible for a massive portion of the materials used in civil construction and is also a recurring theme of research that aims, through formulations with the addition of different raw materials, to improve the technological properties of the product to meet engineering demands. Then, this work aims to analyze the composition of the mixtures: clay from the region of Jardim do Mulato - Piauí, with copper waste and balloon powder residue, through the physical characterization of the test specimens. X-ray fluorescence and X-ray diffraction analyzes were also made. After that, clay specimens formed with mixtures containing 10% and 15% of copper waste and 5% and 10% of balloon dust. The specimens dried at 105°C and fired at 950°C for 2 hours. The physical characteristics evaluated was water absorption, apparent porosity, and apparent specific mass. The characterization showed that the clay is kaolinitic with elevated levels of SiO₂ and Al₂O₃ and that the best mixing ratio obtained with the formulation containing 15% copper and 10% balloon powder, where it showed better technological properties.

Keywords: Red Ceramics. Waste. Piaui clay.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURAS

Figura 1 - Localização do município de Jardim do Mulato no Piauí, área destacada em verde.	21
--	----

FLUXOGRAMA

Fluxograma 1 - Etapas do procedimento experimental do trabalho.....	31
--	----

FOTOGRAFIA

Fotografia 1 Equipamentos utilizados: a) Estufa; b) Moinho de bolas; c) Peneira; d) Balança digital analítica; e) Molde metálico; f) Prensa hidráulica.....	28
Fotografia 2 - Antes e depois de secagem da argila em estufa.....	34
Fotografia 3 - Mistura da argila e resíduos após o processo de tratamento.....	34
Fotografia 4 - Corpos de prova antes de secagem em estufa e após a sinterização.....	35

GRÁFICOS

Gráfico 1 – Difratoograma de raios x da argila.	37
Gráfico 2 - Difratoograma de raios x do resíduo de pó de balão.	38
Gráfico 3 - Difratoograma de raios X do rejeito de cobre	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composições das formulações a serem investigadas.....	30
Tabela 2 - Componentes químicos da argila.....	35
Tabela 3 - Componentes químicos do resíduo de pó de balão.....	36
Tabela 4 - Componentes químicos do rejeito de cobre.....	36
Tabela 5 - Resultados para absorção de água dos corpos de prova.	40
Tabela 6 - ANOVA para absorção de água dos corpos de prova.	41
Tabela 7 - Resultados para a porosidade aparente.	41
Tabela 8 ANOVA para a porosidade aparente dos corpos de prova.	42
Tabela 9 - Massa específica aparente dos corpos de prova.....	42
Tabela 10 - ANOVA para Massa específica aparente dos corpos de prova.	43

LISTA DE ABREVIATURA E SIGLAS

AA	Absorção de água
ANOVA	<i>Analysis of variance</i>
ABCERAM	Associação Brasileira de Cerâmica
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CP's	Corpos de Prova
DRX	Difração de Raios-X
FRX	Fluorescência de Raios-X
MEA	Massa específica aparente
M_i	Massa imersa
M_s	Massa seca
M_u	Massa úmida
NBR	Norma Brasileira
PA	Porosidade aparente
UFPA	Universidade Federal do Pará
IFPA	Instituto Federal do Pará

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 Objetivos	16
1.1.1 Objetivo Geral	16
1.1.2 Objetivos Específicos	16
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1 Argilas	17
2.1.1 Composição das argilas	17
2.2 Cerâmica Vermelha	18
2.3 Utilização de resíduos em cerâmica	18
2.4 Argila Piauiense	20
2.5 Resíduo de Pó de Balão	22
2.6 Rejeito de Cobre	23
2.7 Processos de fabricação de cerâmica vermelha	24
2.7.1 Preparação da matéria prima	24
2.7.2 Formulações	25
2.7.3 Tratamento térmico (secagem e queima)	25
2.7.4 Definições propriedades tecnológicas	26
3 MATERIAIS E MÉTODOS	27
3.1 Matérias-Primas	27
3.2 Equipamentos utilizados	28
3.3 Métodos	29
3.3.1 Teor de umidade da argila	29
3.3.2 Misturas	29
3.3.3 Conformação	30
3.3.4 Tratamento térmico	30
3.3.5 Caracterização das Matérias-primas	31
3.3.5.1 Composição Química	31
3.3.5.2 Composição Mineralógica	31
3.3.6 Determinação das Propriedades Físicas e Tecnológicas dos Corpos de Prova	32
a) Absorção de Água (AA)	33
b) Porosidade Aparente (PA)	33
c) Massa Específica Aparente (MEA)	33

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	34
4.1 Teor de umidade da argila.....	34
4.2 Misturas.....	34
4.3 Sinterização.....	35
4.4 Caracterização das Matérias-primas	35
4.4.1 Composição Química	35
4.4.2 Composição Mineralógica.....	37
4.5 Determinação das Propriedades Físicas e Tecnológicas	40
4.5.1 Absorção de Água	40
4.5.2 Porosidade Aparente	41
4.5.3 Massa Específica Aparente	42
4.6 Relação entre as propriedades tecnológicas determinadas	43
5 CONCLUSÃO	44
6 SUGESTÕES	45
REFERÊNCIAS	46

1 INTRODUÇÃO

Mesmo com os avanços tecnológicos na área de engenharia de materiais, os resíduos industriais provenientes dos diversos setores da mineração continuam tendo uma destinação imprópria. A geração de resíduos industriais é uma das principais formas de danos ao meio ambiente. Para essas empresas, a grande quantidade de resíduos e a falta de destinação adequada ocasionam um grande problema não resolvido (OTTOBONI, 2018).

A geração de rejeitos tem levado a um aumento significativo das estruturas de armazenamento, tornando as barragens de rejeitos um dos mais importantes projetos de mineração e grande objeto de estudos quanto a acidentes ambientais (SOARES; BOSCOV, 2018).

A demanda por cobre, por exemplo, exige pesquisas sobre a geração de subprodutos dos resíduos da flotação para beneficiar a sociedade, garantir a sustentabilidade das operações industriais e potencialmente gerar receita operacional para as empresas. A recuperação e reprocessamento dos rejeitos é uma interessante oportunidade de negócio para agregação de valor financeiro às operações atuais além de permitir a redução das pressões dos órgãos ambientais por novas áreas para disposição de rejeitos (Silva, 2017; Silva et al, 2021b; Silva et al., 2021c).

Um dos resíduos gerados pelo setor siderúrgico, pó de balão, é pouco utilizado dentro do setor siderúrgico como coproduto, embora possa ser aglomerado por sinterização e adicionado às matérias-primas no alto-forno. A presença de óxidos/hidróxidos de ferro oriundo da hematita e/ou da magnetita pode permitir a geração de um pellet feed hematítico e/ou magnetítico a partir dos rejeitos e altos teores de K_2O , P_2O_5 , CaO e MgO , também podem viabilizar o uso dos rejeitos como mineralizadores de solo ou na produção de cimento ou material cerâmico (JACOMINO et al., 2002).

Neste contexto surge o aproveitamento de resíduos, buscando a transformação destes em materiais aproveitáveis, com valor agregado, além de benefícios ambientais e vantagens econômicas para as indústrias (SILVA, 2014; MACHADO, 2018).

A Agência Nacional dos Fabricantes de Cerâmica (ANFACER) subdivide o setor em diversos segmentos com características particulares. O mais comum é o da cerâmica vermelha, que compreende materiais constituídos principalmente por argilas com coloração de queima avermelhada, e que são empregados majoritariamente na construção civil (tijolos, telhas, elementos vazados, lajes, tubos cerâmicos e argilas expandidas), (ANFACER, 2022).

A cerâmica vermelha é uma das principais partes da indústria cerâmica, responsável pela produção de tijolos, telhas, blocos etc. A argila é uma das matérias-primas mais utilizadas em suas formulações devido a sua abundante disponibilidade na natureza (CALLISTER, 2016).

E o estado do Piauí é um grande produtor de cerâmica, com diversas aplicações em diferentes partes do estado e adjacências. O principal polo está localizado no município de Teresina, onde existem grandes jazidas de argila utilizadas para a produção de cerâmica artesanal e estrutural, principalmente telhas e tijolos (CEPRO, 2005).

Mas antes de se dar um fim para as argilas, uma parte essencial é a formulação de corpos de provas, essa é a etapa de desenvolvimento dos blocos cerâmicos em que são determinadas as quantidades de matérias-primas a serem misturadas para a obtenção de um produto com propriedades específicas a fim de melhor aproveitar suas propriedades estruturais (UDESC, 2018).

Portanto, o presente trabalho tem como objetivo avaliar e determinar o desempenho do processo de corpos cerâmicos formulados com argila, resíduos de cobre e resíduos de pó de balão, e determinar as proporções mais adequadas na fabricação de produtos de cerâmica vermelha.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Analisar o potencial da mistura da argila do Piauí com resíduos industriais, como mais uma alternativa para a cerâmica vermelha. E assim, começar o estudo visando ajudar a comunidade local para a confecção de novos materiais cerâmicos.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Avaliar as características mineralógicas (por Difração de Raios-X) e química (por Fluorescência de Raio-X) da argila e dos resíduos;
- Analisar o efeito da incorporação dos resíduos nas propriedades físicas (Massa específica aparente, Absorção de água, Porosidade aparente), das formulações;
- Mostrar uma alternativa de reutilização de resíduo de pó de balão e rejeito de cobre, designando um fim para elas;
- Ajudar na confirmação da argila do município como própria para cerâmica.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Argilas

Segundo Figueiredo 2016, o termo argila é empregado para designar um material inorgânico natural, de aspecto terroso, de comportamento plástico quando adicionada uma determinada quantidade de água.

As argilas são formadas basicamente por argilominerais de composição variável; sílica livre, que na maioria das vezes é o quartzo cristalino, com tamanho de partícula superior a 10 μ m; carbonatos, com tamanho de partícula bem fina; feldspato, representado pelos alcalinos e alcalinos-terrosos; micas não hidratadas, como a muscovita e biotita; compostos de ferro e titânio; sais solúveis; matéria orgânica e resíduos carbonáticos (ABREU, 2013).

Para classificação no meio industrial e tecnológica são levadas em consideração as propriedades físico-químicas, tais como capacidade de troca de cátions, distribuição granulométrica, área superficial, plasticidade dentre outras (SANTOS, 1989).

2.1.1 Composição das argilas

A ABCERAM (2022) estabelece que os principais grupos de argilominerais são caulinita, illita e esmectitas ou montmorilonita. A caulinita ($Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$) é a forma mais pura da argila encontrada na natureza, e o que os diferenciam são os tipos das estruturas e as composições químicas, as quais podem apresentar diferenças por conta da substituição do alumínio por magnésio ou ferro, e do silício por alumínio ou ferro. O mesmo órgão afirma que a neutralização das cargas residuais geradas pelas diferenças de cargas elétricas dos íons por alguns cátions representa outra diferença entre esses argilominerais.

Como exemplo, argilas constituídas essencialmente pelo argilomineral caulinita são as mais refratárias, pois são constituídas essencialmente de sílica (SiO_2) e alumina (Al_2O_3), enquanto os outros, devido à presença de potássio, ferro e outros elementos, têm a refratariedade sensivelmente reduzida. A presença de outros minerais, muitas vezes considerados como impurezas, pode afetar substancialmente as características de uma argila para uma dada aplicação; daí a razão, para muitas aplicações, de se eliminar por processos físicos os minerais indesejáveis, processo este chamado de beneficiamento (ABCERAM, 2022).

Em função principalmente das possibilidades de emprego tecnológico, que são influenciadas pela gênese e pela composição mineralógica do material, em muitos casos as

argilas recebem designações como: caulins, bentonitas, argilas refratárias e ball clays (ABCERAM, 2022).

Além de o baixo poder fundente, a argila caulínica tem elevada perda ao fogo e granulometria mais grosseira (menos plásticas). Estes fatores dificultam o processo de vitrificação devido à baixa quantidade de fase líquida e formação de poros provenientes, sobretudo, da perda de água de constituição dos argilominerais (SOUZA et al., 2004).

Graças aos argilominerais, as argilas na presença de água desenvolvem uma série de propriedades tais como: plasticidade, resistência mecânica a úmido, retração linear de secagem, compactação etc., de suspensões aquosas que explicam sua grande variedade de aplicações tecnológicas (ABCERAM, 2022).

A argila geralmente contém matéria orgânica, sais solúveis, partículas de quartzo, pirita, mica, calcita, dolomita e outros minerais não cristalinos. (MILLER; SPOOLMAN, 2009).

2.2 Cerâmica Vermelha

Geralmente a cerâmica era feita de forma artesanal utilizando técnicas de raspagem, incisão, remoção e pintura. Mesmo desconhecendo o torno e operando com instrumentos rudimentares, os índios conseguiram criar uma cerâmica de valor, que dá a impressão de superação dos estágios primitivos da Idade da Pedra e do Bronze (ANFACER, 2022).

A indústria de cerâmica vermelha é uma atividade de base que possibilita a construção civil da forma mais simples à mais sofisticada (PEREZ, 2010), que compreende todos os materiais inorgânicos, não metálicos, obtidos após tratamento térmico em altas temperaturas (ABDI, 2016), sendo considerado um grande consumidor de energia térmica em sua cadeia produtiva.

Em geral, é adotada esta classificação, onde os principais produtos são: blocos/tijolos (metade da produção), telhas e tubos (ISHIDA, 2018), que compreende os materiais com coloração avermelhada e utensílios de uso doméstico e de adorno (ABDI, 2010).

2.3 Utilização de resíduos em cerâmica

A NBR 10.004/2004 é a principal norma de classificação utilizada no Brasil e divide os resíduos em classes, as quais são elencadas de acordo com os riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública. Para a determinação da classe a qual o resíduo pertence são

realizados os ensaios constantes nas Normas Brasileiras 10.005 a 10.007/2004, após os quais permitem classificar os resíduos da seguinte maneira:

- Resíduos classe I – Perigosos: Aqueles que apresentam periculosidade (característica apresentada por um resíduo que, em função de suas propriedades físicas, químicas ou infectocontagiosas, pode apresentar risco à saúde pública ou risco ao meio ambiente) ou características como: inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade.
- Resíduos classe II – Não Perigosos: Divididos em outras duas classificações:
 - Classe II A – Não Inertes: Aqueles que não são enquadrados como classe I – Perigosos ou de classe IIB – Inertes, de acordo com o disposto na NBR 10.004/2004. Os resíduos classe IIA podem ter propriedades como: biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água;
 - Classe II B – Inertes: Quaisquer resíduos que, quando amostrados de uma forma representativa, e submetidos a um contato dinâmico e estático com água destilada ou deionizada, à temperatura ambiente, não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade da água, excetuando-se aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor (ABNT, 2004).

Sendo assim, rejeitos podem ser definidos como os materiais que não possuem outra utilidade que não a disposição final ambientalmente adequada em aterros sanitários ou encaminhamento para a geração de energia (BESEN et al., 2016) seja por sua composição, baixo valor para venda ou contaminação por determinadas substâncias. A fração de rejeitos é formada por todos os resíduos presentes que não foram separadas nas etapas anteriores do processo produtivo e que não atendem os requisitos para serem recuperados, reutilizados ou reciclados (GALLARDO et al., 2014).

Segundo Arcelor Mittal (2012), a indústria cerâmica é uma tradicional consumidora de sucata de aço. A indústria de cerâmica vermelha tem uma forte capacidade de absorção de resíduos, sejam eles resíduos industriais ou resíduos urbanos. Isso se deve ao grande rendimento desses materiais e à variabilidade natural das propriedades das argilas, que constituem a principal matéria-prima utilizada na fabricação de produtos cerâmicos (VIEIRA et al., 2006).

Um estudo de diversos tipos de resíduos incorporados em blocos de argila para produção de materiais cerâmicos destaca sua relevância com o objetivo de reduzir o impacto ambiental causado pela argila, foram realizados para diversos tipos de rejeitos incorporados a massas argilosas buscando produzir materiais cerâmicos, cuja relevância é destacada com o objetivo de reduzir os impactos ambientais causados pelos mesmos, bem como melhorar as propriedades funcionais e estruturais das cerâmicas vermelha:

- Carvalho et al. (2014) verificou a influência da incorporação do rejeito do minério de manganês de Carajás - PA e filito de Marabá - PA em cerâmicas vermelhas. Os resultados mostraram que, com o aumento do teor de rejeito de manganês incorporado, houve um aumento na resistência mecânica, sem comprometer sua densidade aparente. Tais melhorias são necessárias devido ao rejeito se apresentar como um ótimo fundente.
- VIEIRA et al (2016), por exemplo, estudou a reutilização de resíduo de vidro de lâmpada fluorescente na cerâmica vermelha e conseguiu obter melhoras nas propriedades físicas.
- Barbosa (2017) realizou um estudo sobre o aproveitamento de rejeito da concentração de minério de ferro na produção de cerâmica vermelha. A autora verificou que os parâmetros analisados mostraram que a composição está dentro das especificações para produção de alguns tipos de materiais cerâmicos.
- Cardoso (2018) avaliou a Incorporação do Rejeito de Minério de Cobre em Massas Argilosas para a produção de cerâmica vermelha. A autora verificou em diferentes temperaturas a composição de argila de Icoaraci com outras porcentagens de cobre e confirmou que as matérias-primas em estudo são adequadas para a utilização em cerâmica vermelha.
- Gomes (2019) fez o estudo da caracterização e influência do resíduo siderúrgico pó de balão em massas cerâmicas para produção de bloco estrutural cerâmico e constatou como favorável para a produção de bloco estrutural cerâmico a composição com 10% de resíduo sinterizado a 950°C, como a mais indicada.

Dessa forma, os estudos sobre a incorporação de rejeitos em matrizes de cerâmica vermelha têm se tornado cada vez mais frequentes e alvo de pesquisas científicas. E como já visto, a incorporação de rejeitos em cerâmica vermelha pode minimizar os prováveis impactos causados ao ambiente.

2.4 Argila Piauiense

O setor da indústria cerâmica representa de forma significativa sua importância na economia do Estado do Piauí, sendo uma grande geradora de empregos para o Estado (ALMEIDA, 2015).

O Piauí é apontado pelos sites nacionais especializados em mineração como a nova fronteira do minério. Essa afirmação é confirmada com os números do Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), órgão vinculado ao Ministério das Minas e Energia que mostram o Estado como o segundo do Nordeste e entre os dez maiores do país com incidência

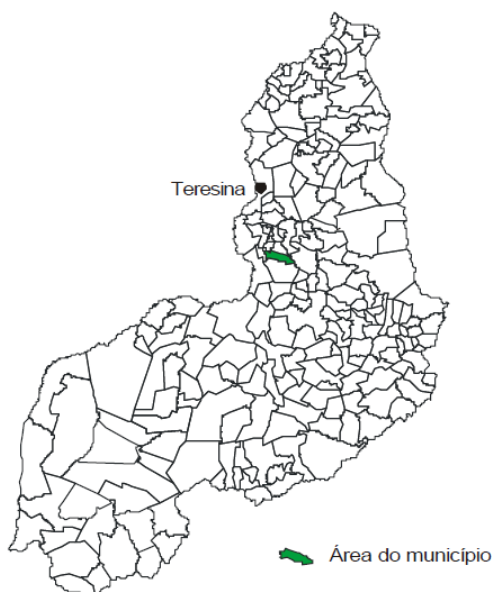
de minérios. Pesquisas realizadas em 22 municípios do Médio e Alto Parnaíba por órgãos como o Serviço Geológico do Brasil e a Agência Nacional de Petróleo apontam para fortes indícios da existência de gás na Bacia do Rio Parnaíba. Isso sem falar na vasta quantidade de água no subsolo piauiense (IBRAM, 2012)

A geologia do estado do Piauí apresenta potencialidades minerais diversificadas, em que se incluem substâncias minerais metálicas e não-metálicas, ferrosas e não-ferrosas, além de minerais gemológicos, todos de larga aplicação industrial (DIAS,2013).

O Estado possui muitas jazidas de minerais como de calcário, quartzito, minerais pesados, materiais de construção (areias, seixos, pedras para fundação, brita etc.), argilas de queima branca e argilas para cerâmica vermelha, localizadas principalmente nas margens dos rios Parnaíba e Poty, sendo responsável por 70% da extração de argila do Estado. Beneficia-se também dessas jazidas, cerâmicas localizadas em cidades vizinhas (CEPRO, 2005).

De acordo com a pesquisa feita por Rezende 1997, a região do Paranaíba compreende solos pouco desenvolvidos, rasos a muito rasos, fase pedregosa, com floresta caducifólia e/ou floresta cerrado. Há um predomínio de argilas esmectitas, um grupo de argilominerais, mais especificamente de filossilicatos, que apresentam uma estrutura organizada em folhas e camadas. Em sua maioria ílticas e caulínicas, a identificação de argilas esmectitas apesar de raras ganham significado por sua localização em zonas de intensa atividade agrícola

Figura 1 - Localização do município de Jardim do Mulato no Piauí, área destacada em verde.



Fonte: Aguiar, B.R. (CPRM – Serviço Geológico do Brasil, 2004).

2.5 Resíduo de Pó de Balão

O pó de balão consiste no material particulado captado no alto-forno pelo sistema de despoejamento denominado balão gravitacional. As matérias-primas minério de ferro, carvão vegetal ou coque e os fundentes (calcário e sílica, dentre outros) são carregadas no alto-forno apresentam finos agregados, que durante o processo de redução do aço se desprendem no interior do alto forno sendo arrastados pelo gás ascendente. O gás que é produzido e empregado como combustível em diversos processos da usina siderúrgica podendo ser reaproveitado, no aquecimento de fornos, panelas, regeneradores, além de outros equipamentos (SILVA, A.R.P et al., 2017).

O sistema de limpeza de gás tem a seguinte importância, remover as particuladas contidas nos gases de saída do alto forno. Possui altos teores de óxidos de ferro. Ao entrar em contato com a carga, acabam envolvendo material particulado, que é coletado pelo sistema de limpeza a seco (filtros) e direcionados a coletores, e onde estes resíduos são armazenados ou voltam ao processo, devido à grande quantidade de Fe_2O_3 (SILVA R. N. et al., 2017).

O sistema de limpeza de gás de alto-forno é composto por três equipamentos instalados em série: Coletor de Pó ou Balão de Pó, Primeiro Venturi e Segundo Venturi. A primeira fase começa com a limpeza que é feita através do Coletor de Pó, do tipo gravimétrico, que tem como objetivo reter as partículas mais pesadas. Nesse estágio a limpeza é a seco. O pó perde velocidade, decanta no fundo do equipamento, de onde é retirado posteriormente. Na segunda fase da limpeza é úmida, acontecendo em dois estágios, sendo utilizados para esse fim dois venturis colocados em série. O primeiro Venturi é empregado para esfriar e limpar parcialmente o gás através da pulverização de água no gás, fazendo com que as partículas de pó, molhadas, decantem no fundo do Venturi (SILVA, A.R.P, 2017).

Na literatura existem poucos trabalhos técnico-científicos que abordem a incorporação de pó de balão em massas cerâmicas. Pesquisas já realizada na literatura apontam que a adição do pó de balão de forma homogênea à massa cerâmica numa concentração de 10% em peso pode trazer uma economia de combustível em torno de 40% e o tempo de cozimento cai de cerca de 80 horas para aproximadamente 48 horas. Devido ao alto teor de carbono presente neste resíduo. A presença do carbono contribui também para a uniformidade da temperatura nos fornos, evitando o cozimento mais rápido de parte do lote ou a perda de parte da produção devido às diferenças de temperatura (RIBEIRO, et al., 2011).

A incorporação do pó de balão em massas de cerâmica vermelha requer uma análise de composição química e mineralógica, para se obter formulações específicas que colaborem na

busca da melhoria nas propriedades dos materiais fabricados. A utilização da mistura argila e pó do balão é possível considerando que ambas são constituídas de material inorgânico oxidado, mais Carbono, sendo compatível quimicamente com os argilominerais utilizados na produção de artigos de cerâmica vermelha. JACOMINO et al., (2002) comprovou em seu trabalho que o pó de balão pode ser incorporado em cerâmicas vermelhas, à massa de argila. Utilizando-se no máximo 10% do resíduo na fabricação de tijolos, traz uma economia de até 50% no consumo energético.

2.6 Rejeito de Cobre

O resíduo de cobre é formado no processo do tratamento de minério de cobre, na etapa da flotação onde separa-se a ganga do minério de interesse, o resíduo obtido possui granulometria fina e grande quantidade de SiO_2 , Fe_2O_3 , Al_2O_3 , e óxidos fundentes (CASTRO et al., 2015).

Os principais depósitos no Pará são os de: Salobo, Cristalino, Sossego e Alemão, sendo a maioria sulfetada, contendo ouro, prata e molibdênio. Em Salobo a mineralização está relacionada a xistos em ambiente Vulcano-sedimentar e constituem as reservas de cobre mais significativas e promissoras do Brasil, de nível internacional (KATO, 2016).

Nesse meio encontram-se as minas e os rejeitos que são liberados na exploração delas. Embora ainda existam poucos estudos, partindo de rejeito de cobre como matéria-prima na fabricação de peças cerâmicas, um fator que deve ser levado em consideração quando se estuda esse tipo de rejeito, são os impactos que eles causam ao meio ambiente. O cobre é um metal muito importante do ponto de vista econômico para as tecnologias usadas atualmente e para as que serão desenvolvidas futuramente. Aproximadamente 80% da produção do cobre metálico é obtida através do tratamento piro metalúrgico dos concentrados sulfetados contendo esse metal (Potysz et al., 2015; Gbor et al., 2000; Sarfo et al., 2017).

Em torno de 70% do cobre é proveniente do mineral calcopirita (CuFeS_2) e o restante é oriundo dos minerais secundários, entre eles, a calcosita (Cu_2S) e a bornita (Cu_5FeS_4) (SANTOS et al., 2017).

Os minérios sulfetados de cobre contém entre 0,8% e 1,0 % de cobre e entre 15% e 40% de ferro, assim, como a presença de outros elementos, tais como: Al, Ca, Mg, Si, Zn, Mo, Pb, Ni, As, F e U (Gbor et al., 2000; Sarfo et al., 2017; Silva et al., 2021a).

A técnica da flotação é aplicada ao minério britado e moído em granulometria adequada para permitir a liberação dos minerais de cobre das gangas. O processo de flotação gera os

concentrados sulfetados de cobre. Porém, entre 95% e 98% da massa do minério de cobre são rejeitos que são estocados em pilhas ou armazenados em barragens, causando impacto ambiental e social (SILVA, A.R.P, 2017).

Na indústria, buscam-se cada vez mais alternativas ecológicas para evitar qualquer tipo de dano ao meio ambiente devido à sua produção e para alguns fins lucrativos, embora nem sempre com bons resultados. E depois do alumínio, o cobre é o metal não ferroso mais utilizado a nível mundial, devido às excelentes propriedades de condução de eletricidade e calor que apresenta (BRAGA et. Al 2011).

2.7 Processos de fabricação de cerâmica vermelha

2.7.1 Preparação da matéria prima

A primeira etapa para a produção é a extração da argila que ocorre a céu aberto, preferencialmente nos meses de menor precipitação, podendo ser realizada manualmente ou mecanizada (FIEMG/FEAM, 2013).

Depois disto, a argila é estocada nas empresas, onde ficam no processo de sazonalidade até o início da preparação da massa. Esta é constituída a partir da composição de duas ou mais matérias primas, além de aditivos e água, que são dosados seguindo o rigor das formulações pré-estabelecidas (CNI, 2010). Em seguida são misturadas, moídas, homogeneizadas com água e laminadas (TUBINO, 2006; FIEMG/FEAM,2013).

O processo de extração é executado a céu aberto, e posteriormente é realizado o procedimento de beneficiamento (desagregação ou moagem), seguidamente por via rodoviária ou ferroviária são transportadas até a área de processamento na qual é estocada (MOREIRA, 2013).

A massa cerâmica comumente é alcançada a partir da combinação entre duas ou mais matérias primas, aditivos, água ou outros meios, para obter as cerâmicas estruturadas se faz necessário à introdução de dois ou mais tipos de argila que tem a finalidade de ajustar a plasticidade. Dificilmente é utilizada apenas uma única matéria-prima. Consequentemente, a dosagem das matérias primas e dos aditivos é uma das etapas essenciais do procedimento de fabricação de produtos cerâmicos, devendo ser adotada com exatidão as formulações de massas, previamente estabelecidas (ABREU, 2013).

2.7.2 Formulações

Para obtenção de uma massa com uniformidade química e física, é fundamental que as matérias primas estejam bem homogeneizadas sendo inseridas em quantidades controladas. Nessa etapa são formados pequenos montes de argilas que são misturados e homogeneizados por equipamentos mecânicos, como retroescavadeiras, para serem transportadas para a caixa alimentadora. Em seguida, a mistura é umedecida com água para simplificar a homogeneização, seguindo para o laminador. A mistura, em forma de pasta consistente, é transportada por meio de correia para a etapa de extrusão (MAIA, 2012).

2.7.3 Tratamento térmico (secagem e queima)

O tempo de secagem deve ser otimizado, tal que, demasiadamente rápida ocorrerá defeitos como trincas ou empenamento, e demasiadamente lenta será impraticável economicamente. Esta otimização é realizada com conhecimento da distribuição da água no interior do produto, e dos movimentos físicos que regem a secagem. A água presente na argila pode ser encontrada em algumas formas. São elas: água Inter partículas ou intercamadas, água dos poros, água adsorvida e água do reticulado (VAN VLACK, 2006).

Esta etapa vem logo após a conformação da peça cerâmica crua. É adotado este procedimento para evitar a formação de trincas na superfície da peça. O principal objetivo da secagem e a eliminação da água adicionada à massa cerâmica, tem como finalidade proporcionar a plasticidade necessária para o processo de conformação (AMORIM, 2008).

Após a etapa de modelagem, a massa geralmente continua contendo umidade devido ao seu preparo. Para evitar desgastes e defeitos nas peças, é necessário retirar essa umidade de forma lenta e gradual em “secadores” em temperaturas variáveis entre 50 °C e 150 °C (ABCERAM,2022).

A queima confere ao produto as propriedades desejadas, como dureza, resistência mecânica, baixa absorção de água, resistência a intempéries e agentes químicos. Durante esta etapa, a peça conformada se contrai acontecendo a redução da porosidade e melhoria da resistência mecânica. O resultado da queima é a redução ou eliminação quase total dos poros, acompanhada pelo aumento da densidade do produto e uma junção dos grãos cristalinos em seus constituintes mineralógicos individuais, formando uma massa rígida e resistente (MAIA, 2012).

"Nessa operação, conhecida também por sinterização, os produtos adquirem suas propriedades finais." ("Processo de Fabricação – ABCERAM"). As peças, após secagem, são submetidas a um tratamento térmico a temperaturas elevadas, que para a maioria dos produtos situa-se entre 800 °C e 1700 °C, em fornos contínuos ou intermitentes que operam em três fases: aquecimento da temperatura ambiente até a temperatura desejada; patamar durante certo tempo na temperatura especificada; resfriamento até temperaturas inferiores a 200 °C (ABCERAM,2022).

Durante esse tratamento ocorre uma série de transformações em função dos componentes da massa, tais como: perda de massa, desenvolvimento de novas fases cristalinas, formação de fase vítrea e a soldagem dos grãos. Portanto, em função do tratamento térmico e das características das diferentes matérias-primas são obtidos produtos para as mais diversas aplicações (ABCERAM,2022).

Fatores como temperatura, velocidade de aquecimento, velocidade de resfriamento e tipo de forno influenciam no processo de queima. O controle da temperatura durante todo o ciclo de queima é importante para evitar defeitos nas peças. No intervalo de temperatura entre 560 e 580°C ocorre transformações alotrópicas do quartzo que é acompanhada de forte dilatação, podendo gerar trincas de queima. Estes fatores devem ser controlados para evitar defeitos no produto como deformações, fissuras, rupturas e outros (BACCELLI, 2010).

O patamar é a temperatura máxima de queima mantida constante por um intervalo de tempo; o resfriamento, assim como o pré-aquecimento, só que com a diminuição da temperatura, também é gradual e cuidadoso, evitando o aparecimento de defeitos, e demora entre 38 e 50 horas (RÊGO; SOARES, 2015).

Propriedades como a resistência mecânica, contração linear, absorção de água, porosidade e outras, não estão relacionadas apenas em as etapas anteriores, como preparação da massa por exemplo, mas também com um bom processo de queima (ANICER, 2015).

2.7.4 Definições propriedades tecnológicas

Após a sinterização, há formação de muitos poros vazios ocasionados pela perda de massa. Para Menezes e Varela (2016) porosidade aparente é o provável percentual de poros abertos em relação ao volume total da peça. A depender da distribuição granulométrica, do processo de mistura da massa cerâmica e ainda do modo como foram conformados os corpos,

a porosidade se evidenciará em maior ou menor grau e influência, necessariamente, na finalidade à qual se destina determinado uso dos materiais cerâmicos.

A absorção de água é definida como a propriedade dos materiais cerâmicos que em contato com a água a absorve, e tem relação direta com a porosidade do material (ENGEMAT SOLUÇÕES, 2020).

E tem-se ainda a massa específica aparente, que é a relação entre a massa seca do material e seu volume, ou seja, a densidade. Durante o processo de conformação das peças e a consequente deformação plástica dos grãos, eles passam a ocupar espaço até então vazios. Nesse sentido a densidade está associada à capacidade com que os grânulos se deformam plasticamente. Com o efeito da plasticidade se mantendo constante é o aumento da pressão que faz com que a deformação plástica ocorra em maior ou menor grau (SOARES, 2008).

Por outro lado, o aumento da massa específica aparente ocasiona uma diminuição na quantidade de interstícios entre as partículas por unidade de volume e conseqüentemente a capacidade de mobilidade das partículas também diminui, e assim, os espaços para a interação com a água adicionada também diminui e com isso o efeito da plasticidade (CASAGRANDE, 2002).

Propriedades fundamentais como a porosidade, absorção d'água, retração linear (que não será abordado neste trabalho) tanto de secagem como de queima, resistência mecânica, por exemplo, estão intimamente associadas à massa específica aparente, definida pela equação expressa na ABNT NBR ISO 10545-3:2020.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Matérias-Primas

O procedimento experimental foi desenvolvido em basicamente três etapas, a saber: caracterização das argilas e resíduos; definição da formulação da massa cerâmica; preparação dos corpos de prova e execução dos ensaios.

A argila foi obtida *in natura*, extraída na microrregião do Médio Parnaíba Piauiense, na região de Jardim de Mulato. Dista cerca de 140 km de Teresina.

Após coleta, foi feito o pré-tratamento do material, onde primeiramente foi separado para secagem ao ar livre e depois seco em estufa. Desagregado no moinho de bolas, obteve-se material com partículas menores. Em seguida, foram passados em peneira de malha de nº 80

mesh (abertura 0,180 mm) para tonar por igual o tamanho dos grãos facilitando assim a compactação dos materiais, a fim de diminuir o número de vazios que poderiam ser formados para os casos de grãos maiores que 2,0 mm. A argila foi moída e caracterizada em sua composição química por fluorescência de raios X por energia dispersiva (FRX). A análise mineralógica foi obtida por ensaios de DRX.

Pó de balão foi cedido, por uma usina siderúrgica localizada no estado do Pará, a SINOBRAS, já pré-tratado e pronto para ser utilizado nas formulações.

Já o rejeito de flotação oriundo do processo de beneficiamento do minério de cobre foi cedido por uma indústria de Extração e Beneficiamento de Minérios, localizada na serra do Sossego, situada no município de Canaã dos Carajás/PA e doado também pré-tratado.

3.2 Equipamentos utilizados

Para realizar os primeiros processos de pré-tratamento, utilizou-se: Estufa, Balança analítica, Bandejas metálicas, Moinho de bolas, Peneiras com abertura de 35 a 80 mesh e Prensa hidráulica manual Karl Kolb D-6072. Os equipamentos mencionados são apresentados na fotografia 1 abaixo.

Fotografia 1 Equipamentos utilizados: a) Estufa; b) Moinho de bolas; c) Peneira; d) Balança digital analítica; e) Molde metálico; f) Prensa hidráulica.



Fonte: Autora, 2022

Após a utilização destes, utilizamos outros equipamentos, a saber: Paquímetro, Forno tipo mufla da Zezimaq (faixa de trabalho de 800 a 1200 °C), Difratorômetro X'Pert MPDPRO Panalytical, Espectrômetro por fluorescência de raio X Epsilon 3 e Espectrômetro de FRX S2 RANGER da Bruker

3.3 Métodos

3.3.1 Teor de umidade da argila

Coletou-se amostras da argila, foram pesados 5,9 Kg de argila e em seguida foi colocado em uma estufa a 105°C com tempo de duração de 24 horas, no laboratório de Química da UFPA campus Ananindeua. Após esse período foi retirada para nova pesagem e foi verificado se houve alguma redução de massa. O teor de umidade seguiu os procedimentos adaptados da norma NBR 6457/2016, é encontrado pela seguinte equação 1 abaixo:

$$\% \text{teor de umidade} = \frac{\text{massa após estufa}}{\text{massa coletada} + \text{massa após estufa}} \quad (1)$$

3.3.2 Misturas

A homogeneização das matérias primas foi realizada a seco utilizando moinho de bolas por aproximadamente 15 minutos, posteriormente passaram por peneiras de N° 60, 80 e 100 até obter quantidade suficiente para ser utilizada nas formulações.

A mistura das amostras foi disposta de forma homogênea em uma bandeja metálica e com um auxílio de um borrifador foi umedecida por tentativas com variações de 8 a 9% de água para a amostra 1, 10% para a amostra 2 e 11% para amostra 3, de modo a possibilitar a conformação dos corpos de prova. Após isso, o material foi disposto em um molde de aço sendo preenchido completamente e com auxílio de uma espátula sendo retirado seu excesso, em seguida foi colocada à parte superior do molde desta forma sendo levada à prensa hidráulica.

A partir de dados de análise química e mineralógica, tornou-se possível dispor das formulações dos corpos cerâmicos a serem produzidos. Definindo teores em massa de argila e de resíduo. Com isso, cada composição foi combinada para totalizar 1 Kg. Foram elaboradas cinco composições com misturas de argila e rejeitos, conforme mostra a Tabela 1.

Tabela 1 - Composições das formulações a serem investigadas.

Formulações	Argila	Rejeito de Cobre	Pó de balão
F-A	100%	0%	0%
F-B	85%	10%	5%
F-C	75%	15%	10%

Fonte: autora, 2022.

3.3.3 Conformação

A prensagem uniaxial foi baseada na equação da pressão para encontrar a força necessária para evitar a presença de vazios nos corpos de prova. Desta forma, com a amostra no molde metálico (nas dimensões 10,0 x 5,0 x 1,0 cm) foi colocada na prensa hidráulica manual Karl Kolb D-6072 e foi aplicada a força de 100 KN, após isso foi removido cuidadosamente para evitar possíveis quebras, sendo conformado o total de 5 corpos de prova por formulação.

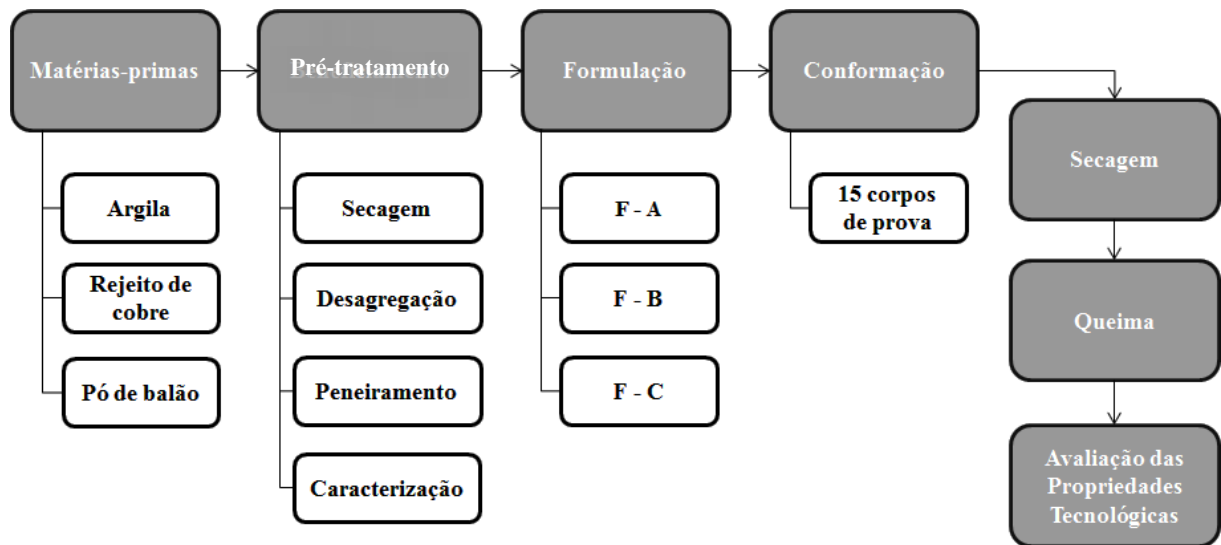
Cada corpo de prova foi identificado e secado em temperatura ambiente por 24 horas. Em seguida, foram dispostos em uma bandeja metálica, levados para secagem em estufa durante 24 horas objetivando a perda de água restante para posteriormente passarem pelo processo de sinterização.

3.3.4 Tratamento térmico

Os corpos de prova foram sinterizados, em forno de laboratório tipo mufla da Zezimaq (faixa de trabalho de 800 a 1200 °C), na temperatura 950 °C. Essa temperatura foi definida a partir das análises de trabalhos anteriores.

Utilizou-se uma taxa de aquecimento constante de 1,23 °C/min e mantidos na temperatura patamar por 2 horas, posteriormente, resfriados por convecção natural desligando-se o forno.

O fluxograma 1 abaixo apresenta etapas do procedimento experimental do trabalho. As etapas serão descritas posteriormente, adotando-se a metodologia usada por Hildebrando (1998).

Fluxograma 1 - Etapas do procedimento experimental do trabalho.

Fonte: Autora, 2022.

3.3.5 Caracterização das Matérias-primas

A caracterização das matérias-primas consistiu na determinação da composição mineralógica, realizada por meio de ensaio de difração de raios X (DRX) e análise química utilizando difração por fluorescência de raios x (FRX).

3.3.5.1 Composição Química

A análise química da argila foi feita em parceria com o Instituto Federal do Pará (IFPA), usando o espectrômetro de FRX S2 RANGER da Bruker, tubo de Paládio, no Laboratório de Caracterização de Materiais (LCM IFPA) - Campus Belém.

Os teores de pó de Balão apresentados foram determinados por análise sem padrões (standardless) de elementos químicos de sódio a urânio, em espectrômetro por fluorescência de raio X Epsilon 3, marca PANalytical. E foi realizada no Laboratório de Controle Químico de Processo, da própria empresa que nos forneceu a amostra (Sinobrás).

Já o rejeito de cobre não será possível apresentar os resultados, mas pode-se basear em estudos anteriores para prever o tipo de composição química deste material e contar com análise de DRX e prever o comportamento na formulação.

3.3.5.2 Composição Mineralógica

Para a análise de DRX da argila e resíduos, foi usado um difratômetro X'Pert MPD-PRO Panalytical. A técnica foi realizada através do método do pó e foi empregada na identificação mineralógica da matéria-prima e o procedimento foi realizado no laboratório de Geociências da UFPA (IG/UFPA).

As análises foram realizadas em um Difratômetro de Raios-X modelo X'PERT PRO MPD (PW 3040/60) da PANalytical, com Goniômetro PW3050/60 (Theta/Theta), tubo de Raios-X cerâmico e anodo de cobre ($K\alpha_1=1,540598 \text{ \AA}$), modelo PW3373/00 com foco fino longo (2200W- 60kV) e filtro $K\beta$ de níquel. O detector utilizado é o X'Celerator, do tipo RTMS (Real Time Multiple Spanning), atuando no modo Scanning e com um activelength de 2, 122°. (“Produção de Zeólita A, a partir de Caulim do Rio Capim ... - ABCERAM”)

As condições instrumentais utilizadas foram: varredura de 5° a 75° em 2θ ; voltagem de 40kV e corrente de 30mA; tamanho do passo: $0,017^\circ$ em 2θ e 10,34s o tempo/passo; fenda divergente de $1/4^\circ$ e anti-espalhamento de $1/2^\circ$; máscara de 10 mm; amostra em movimentação circular com frequência de 1 rotação/s.

O software usado para o processamento de dados da análise foi o X'Pert Data Collector, versão 2.1a, e o software usado na identificação de fases cristalinas foi o X' Pert High Score versão 2.1b, ambos da Panalytical.

O resultado apresentado da análise de DRX do rejeito de cobre neste trabalho será referente à feita por Cardoso, 2018 onde a autora gentilmente cedeu o resultado da análise, já que se trata do mesmo material utilizado, cooperando assim com a pesquisa.

3.3.6 Determinação das Propriedades Físicas e Tecnológicas dos Corpos de Prova

Os ensaios de determinação de propriedades tecnológicas foram realizados na Usina de Materiais (USIMAT) no laboratório de Engenharia Química da UFPA.

Após a etapa de queima foram determinadas as propriedades tecnológicas tais como: Absorção de Água (AA), Porosidade Aparente (PA) e Massa Específica Aparente (MEA) descritas mais à frente.

Os procedimentos para a determinação da absorção de água e porosidade aparente seguiram a norma ABNT NBR 15270-2 (2017).

A massa seca foi pesada logo após sinterização. Após isto os corpos de provas foram dispostos em uma bandeja metálica com adição de água até ficarem submersos, sendo levados para aquecimento sobre o fogão e após o início da ebulição da água foi desligado após 2 horas.

Após esfriados, foram retirados da água e secos superficialmente com papel toalhas dispostas nas mesas, e após foi determinado novamente suas massas e dimensões, para medir a massa úmida.

O peso imerso foi determinado com o uso da balança de precisão, com os corpos de prova mergulhados em água para determinação da porosidade aparente e da massa específica aparente.

a) Absorção de Água (AA)

Para a determinação da absorção de água utilizou-se a Equação 2.

$$AA (\%) = \frac{M_u - M_s}{M_s} \times 100 \quad (2)$$

Onde: AA = Absorção de Água; M_U = Massa úmida (g) e M_S = Massa Seca (g).

b) Porosidade Aparente (PA)

A medida da porosidade aparente foi determinada seguindo a equação 3.

Cada corpo de prova suspenso por um fio de arame foi pesado individualmente utilizando uma balança digital. Após esse procedimento, foram submetidos a secagem na estufa na temperatura de 105 °C por 24 horas, em seguida, foram pesados para determinação da massa seca novamente.

$$PA (\%) = \frac{M_u - M_s}{M_u - M_i} \times 100 \quad (3)$$

Onde: PA = Porosidade Aparente; M_U = Massa úmida (g), M_S = Massa Seca (g) e M_i = Massa Imersa (g).

c) Massa Específica Aparente (MEA)

A massa específica aparente das peças queimadas foi obtida a partir da razão entre a massa do corpo-de-prova seco e sua diferença das massas secas e massas imersas, foi calculada seguindo a norma ABNT NBR ISO 10545-3 empregando-se a Equação 4.

$$MEA = \frac{M_s}{M_s - M_i} \quad (1g/cm^3) \quad (4)$$

Sendo: MEA: Massa Específica Aparente; M_S : Massa Seca (g); M_i : Massa Imersa dos corpos de prova (g).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Teor de umidade da argila

Após seco em estufa com temperatura de 105°C, durante 24 horas houve uma perda de 1,56 Kg de água, a nova massa foi de 4,38 Kg, ou seja, temos que o teor de umidade em porcentagem é cerca de 42,67%, devido ao processo de evaporação de água. Esta etapa é importante principalmente para definir o quanto de massa será necessário para se utilizar nas formulações. Pode-se verificar o antes e depois da argila na estufa, como parte do pré-tratamento, na fotografia 2 abaixo.

Fotografia 2- Antes e depois de secagem da argila em estufa



Fonte: Autora, 2022.

4.2 Misturas

Houve o processo de homogeneização das massas antes de conformar os corpos de prova, na fotografia 3 abaixo encontra-se a mistura.

Fotografia 3 - Mistura da argila e resíduos após o processo de tratamento.

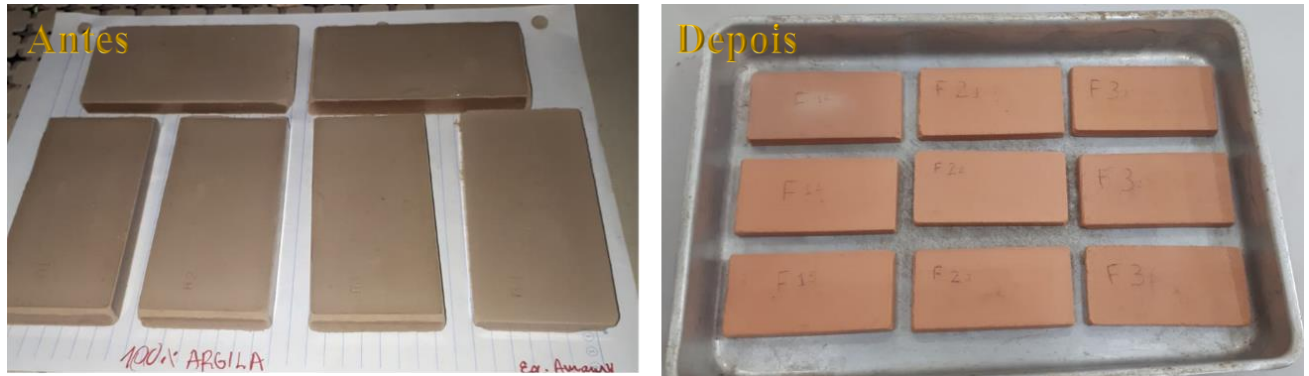


Fonte: Autora, 2022.

4.3 Sinterização

A fotografia 4 apresenta o material após a secagem e após sinterização. Verificou-se a mudança de tom para avermelhado, uma característica típica para cerâmicas vermelhas.

Fotografia 4 - Corpos de prova antes de secagem em estufa e após a sinterização.



Fonte: Autora, 2022.

4.4 Caracterização das Matérias-primas

4.4.1 Composição Química

A argila possui uma composição de característica caulinitica com elevados teores de SiO_2 e Al_2O_3 . Há presença significativa de F_2O_3 e TiO_2 que fornece a cor avermelhada, características de cerâmica vermelha. Além desses elementos, houve presença significativa de K_2O , um óxido fundente que é de suma importância para baixar a temperatura de fusão da argila, essencial para a fabricação de cerâmicas de baixa porosidade, auxiliando na sinterização de cerâmicas. Pode ser observado no resultado do FRX na tabela 2 abaixo:

Tabela 2- Componentes químicos da argila.

Amostra	% argila
MgO	1,66
Al₂O₃	23,7
SiO₂	60,0
P₂O₅	0,187
K₂O	2,25
CaO	0,249
TiO₂	1,76
MnO	0,136
F₂O₃	9,59

Fonte: Autora, 2022

Será discutido mais a frente sobre a tabela 3 abaixo, onde encontra-se os resultados para o resíduo de pós de balão, o elemento químico com maior teor na amostra foi o Fe_2O_3 com 63,86%.

Tabela 3 - Componentes químicos do resíduo de pó de balão

Amostra	Resíduo Pó de Balão
Na₂O	0,18
MgO	0,81
Al₂O₃	0,22
SiO₂	6,98
SO₃	0,31
Cl	0,34
K₂O	0,46
CaO	6,55
TiO₂	0,21
MnO	0,52
Fe₂O₃	63,86
ZnO	0,35

Fonte: Autora, 2022.

Na Tabela Tabela 4 abaixo, adaptado do estudo feito por Souza (2019) , observa-se os componentes químicos resultantes da análise de FRX e o elemento químico com maior teor na amostra foi o SiO_2 com 58,95%. Sendo assim, será feita a comparação desta análise em específico com a análise de drx do rejeito de cobre e poderá ser feita a previsão as fases formadas.

Tabela 4 - Componentes químicos do rejeito de cobre

Amostra	Rejeito de cobre
SiO₂	58,95
Al₂O₃	11,45
Fe₂O₃	11,65
MgO	3,28
K₂O	1,46
CaO	4,69
TiO₂	0,96
MnO	0,04
P₂O₅	0,55
Na₂O	3,78

Fonte: Adaptado de Martins Sousa, Douglas, 2019

A presença de outros componentes como óxido de cálcio (CaO), dióxido de titânio (Ti₂O), óxido de potássio (K₂O), tem relações com outras propriedades, desde que associadas aos componentes argilominerais, como plasticidade, retração linear de queima, resistência e tais combinações e contribuições serão observadas nos ensaios que serão realizados.

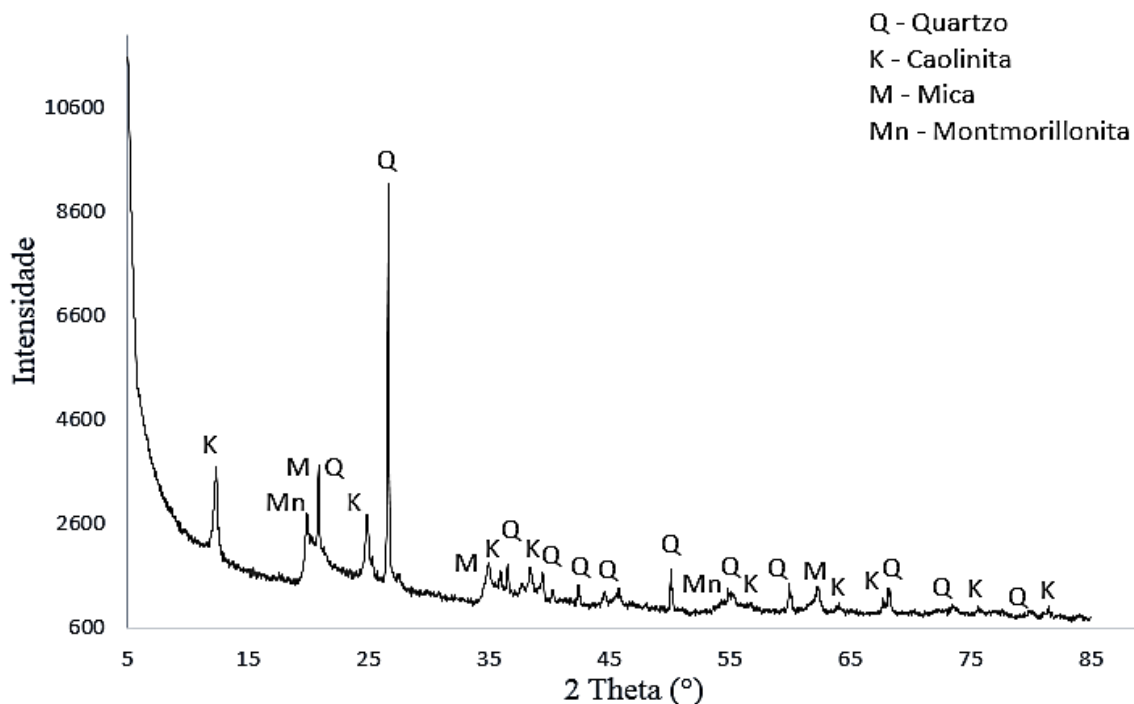
A presença de óxido de potássio, com concentrações não muito divergentes, é importante, uma vez que o potássio é um fundente e a sua presença garante uma baixa porosidade e os valores apresentados corroboram os tais resultados.

O componente que confere a coloração avermelhada após a queima, o óxido de ferro (Fe₂O₃), está presente. As concentrações apresentadas justificam a demonstração da caracterização visual de coloração.

4.4.2 Composição Mineralógica

Os gráficos 1, 2 e 3 a seguir, apresentam os difratogramas de raios X da argila, do pó de balão e do rejeito de cobre, respectivamente.

Gráfico 1 – Difratograma de raios x da argila.



Fonte: Autora, 2022.

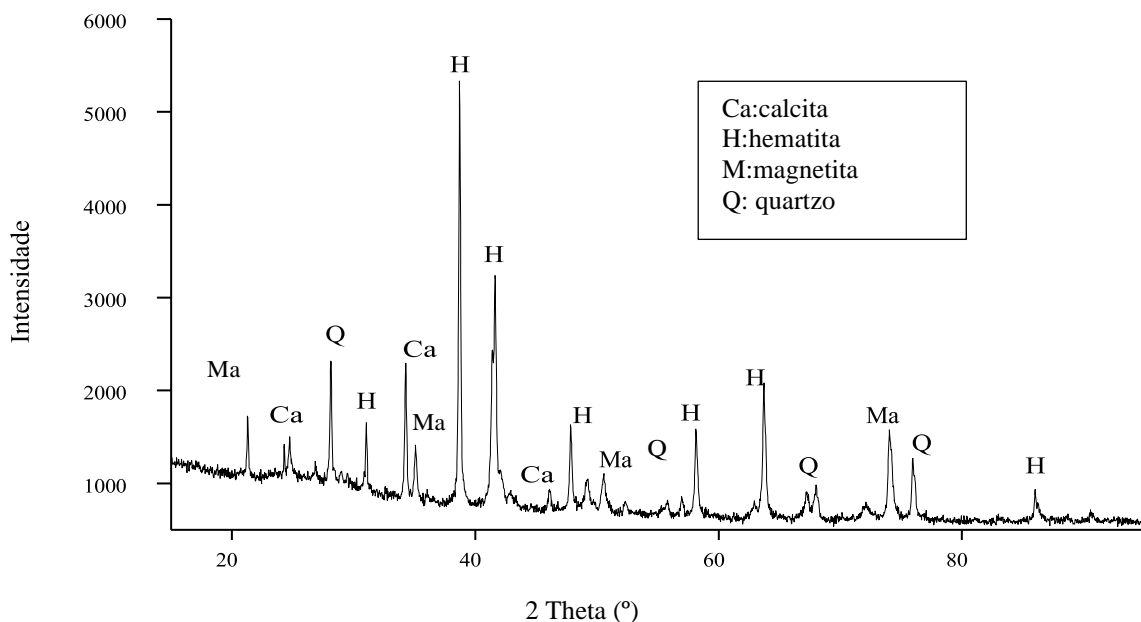
Com base nos picos característicos de difração da argila, pode-se observar que tais materiais são constituídos essencialmente por quartzo - (SiO₂), caulinita - (Al₂O₃.2SiO₂.2H₂O). Podendo ser observado predominantemente uma maior presença de quartzo em relação aos

demais constituintes. Corroborando os resultados de composição química pela presença de óxidos: silício, alumínio, potássio e ferro. Assim como no estudo de Almeida et al 2019, também confirma alguns destes mesmos constituintes, porém com argila de outra região do Piauí.

O quartzo atua durante a queima como fase inerte e não plástica e também pode ser parcialmente dissolvido na fase líquida formada. A caulinita é responsável pelo desenvolvimento de plasticidade na mistura com água e ainda apresenta o comportamento refratário de durante a queima. Caulinita é o principal componente mineral da argila, responsável pela alta resistência mecânica dos produtos cerâmicos (SOUZA SANTOS, 1989). Possuindo uma textura lamelar, a mica muscovita pode atuar como fundente já que em sua estrutura existe a presença de óxidos alcalinos (RIBEIRO, 2010).

Estudos realizados por Silva et al. (2013) para argila proveniente da mesma região, mostraram os aspectos qualitativos dos elementos constituintes da argila, sendo observado a maior presença de quartzo em detrimento a caulinita, demais constituintes.

Gráfico 2 - Difratograma de raios x do resíduo de pó de balão.



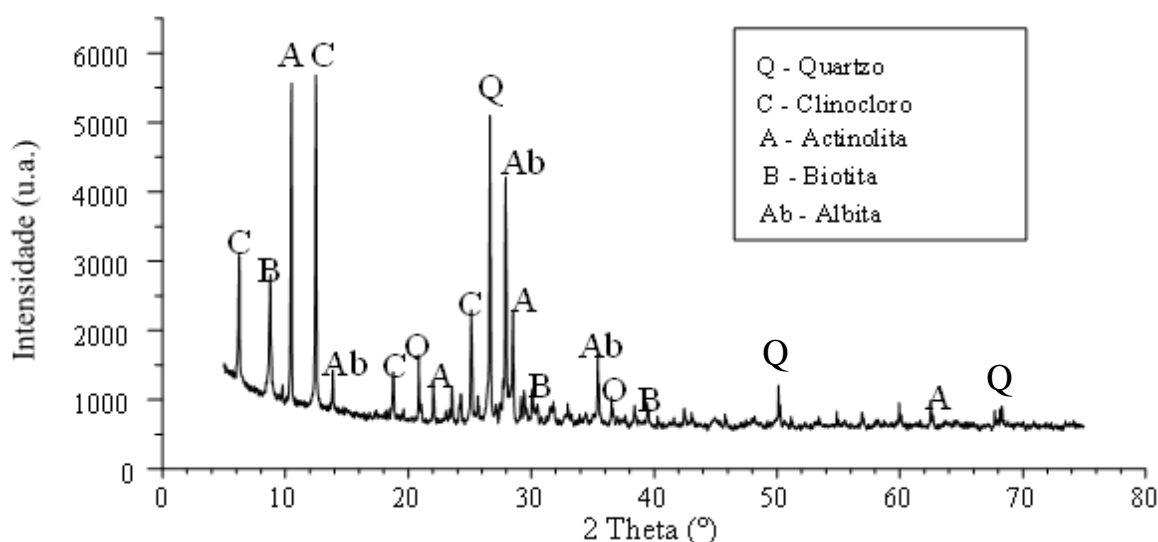
Fonte: Autora, 2022.

A análise por difratometria de raios-x do pó de balão revelou a presença de fases como a hematita, e magnetita que estão associadas a compostos de ferro. Além dessas fases associadas a óxidos de ferro, fases como calcita e quartzo também foram observadas. Os

maiores picos foram a Hematita, resultado confirmado pela análise do FRX, tendo este como maior percentual.

O elemento ferro presente no pó de balão, por exemplo, pode ser responsável pela coloração vermelha do produto, porém a concentração elevada pode aumentar a temperatura interna na queima, ocorrer perda da peça com trincas e diminuição de resistência do produto. Por isto a importância de manter uma baixa porcentagem deste, além de ser uma segurança de inertização dos metais presentes. A mistura deste// com a argila é possível considerando que ambas são constituídas de materiais inorgânicos oxidados mais carbono, sendo compatível quimicamente com os argilominerais utilizados na produção de artigos de cerâmica vermelha.

Gráfico 3 - Difratoograma de raios X do rejeito de cobre



Fonte: Cardoso, A.C., 2018.

A amostra do rejeito que pode ser notado na figura 9, indicou a presença predominante de quartzo - SiO_2 , biotita - $\text{KFeMg}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$, albita - $\text{Na}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$, actinolita - $\text{Ca}_2(\text{Mg,Fe})_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})$ e clinocloro - $(\text{Mg,Fe})_6(\text{Si,Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$. Estudos realizados por Coral e Lafon et al (2015) para rejeito de cobre proveniente da mesma região do utilizado neste trabalho, apresentaram mineralogia semelhante, tendo como fases principais minerais de quartzo, feldspatos e micas.

Já o rejeito do minério de cobre, é um material não plástico, cuja composição química é constituída principalmente de alumina e quartzo, além de óxidos fundentes como cálcio e magnésio. O quartzo presente no rejeito de cobre vai facilitar o controle da dilatação e o ajuste

da viscosidade da fase líquida formada durante a queima, além de facilitar a secagem e a liberação dos gases durante a queima (SOUZA SANTOS, 1989). As micas (clinocloro, actinolita e biotita) vão melhorar a flexibilidade do material, proporcionando baixa condutividade térmica e elétrica, além de permitir uma maior resistência ao material diante das mudanças de temperatura. Já o feldspato (albita), atua como fundente, seu ponto de fusão é menor que a maioria dos outros componentes, e serve como cimento para as partículas das várias substâncias cristalinas, além de proporcionar outros aspectos, como as reações físico-químicas (CORAL; LAFON, 2015).

Os resultados são corroborados pelo FRX, foram identificados picos relativos as fases dos materiais argilominerais: caulinita, mica muscovita e quartzo. Desse modo o argilomineral muscovita confere boa resistência mecânica tanto a seco com após a queima, e deverá ser confirmado nos resultados de tensão de flexão a ruptura. Enquanto às composições quando combinadas com CaO, K₂O e Na₂O, deve contribuir para uma retração linear de queima no intervalo ótimo, ficando estes ensaios para trabalhos futuros.

4.5 Determinação das Propriedades Físicas e Tecnológicas

4.5.1 Absorção de Água

Na tabela 5 apresenta o comportamento da absorção de água para os corpos de prova sinterizados. Estudos realizados por Vieira *et al* (2009), dizem que as transformações de fases começam a ocorrer a 850 °C, isso pode acarretar o aumento da porosidade e, conseqüentemente, da absorção de água. A 950 °C também foi observado que a absorção de água apresentou uma leve queda em relação à massa argilosa, porém, não foi tão expressiva.

Os melhores resultados para absorção de água foram obtidos. Segundo Vieira *et al* (2009), tal resultado está associado às reações de sinterização que nesta temperatura estão em estágio avançado.

Tabela 5- Resultados para absorção de água dos corpos de prova.

CP'S AA	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	MÉDIA	DES. PAD	COEF. Δ
F-A	19,69%	19,60%	19,64%	19,11%	19,80%	19,57%	0,00267	1,36%
F-B	17,53%	17,29%	17,12%	17,54%	17,41%	17,38%	0,00177	1,02%
F-C	16,31%	15,95%	16,96%	17,48%	17,08%	16,76%	0,00616	3,68%

Fonte: Autora, 2022.

A partir dos resultados obtidos neste ensaio, é possível verificar a importância da pressão de compactação à medida que se aumenta a quantidade de resíduos, pois menores são os poros internos, maior o grau de empacotamento e menor valor de absorção de água.

O resultado de cada ensaio foi obtido com o cálculo da média aritmética para cada percentual das formulações.

Estudos realizados por Souza Santos (1989), diz que, para a utilização da argila na indústria de cerâmica vermelha deve estar entre 0% e 25% para a absorção de água. Portanto, todas as amostras atenderam os valores sugeridos.

Realizou-se análise de variância (ANOVA), com a finalidade de averiguar se isoladamente a substituição de rejeitos na mistura possui de fato significância estatística. O resultado está apresentado na tabela 6 para variância de absorção de água, para verificar o nível de significância foi estabelecido em 5%, portanto toda vez que o valor de “p” for menor que 0,05 significa que houve grande variância estatística. Onde é possível verificar que não houve variância significativa para este ensaio.

Tabela 6- ANOVA para absorção de água dos corpos de prova.

FONTES DE VARIÇÃO	GRAU DE LIBERDADE	SOMA DE QUADRADOS	QUADRADO MÉDIO	F	P
TRATAMENTO	2	0,002181721	0,001090861	67,87195	0,99891
RESÍDUO	12	0,000192868	1,60723E-05		
TOTAL	14	0,002374589			

Fonte: autora, 2022.

4.5.2 Porosidade Aparente

A Tabela 7 apresenta os resultados do ensaio de porosidade aparente, que tem a finalidade de mostrar o valor percentual de poros abertos presentes.

Tabela 7- Resultados para a porosidade aparente.

CP'S PA	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	MÉDIA	DES. PAD	COEF. Δ
F-A	39,23%	39,19%	39,09%	38,44%	39,30%	39,05%	0,00349	0,89%
F-B	35,82%	35,12%	34,97%	35,64%	35,28%	35,37%	0,00356	1,01%
F-C	33,55%	33,05%	34,72%	35,60%	34,93%	34,37%	0,01045	3,04%

Fonte: autora, 2022.

A redução da absorção de água e conseqüentemente, da porosidade aparente, pode estar relacionado à proximidade no tamanho das partículas dos materiais, contribuindo significativamente para a ausência de vazios. Este resultado também já era esperado, uma vez que a porosidade aparente está diretamente ligada à capacidade de absorção do líquido pelo sólido.

Segundo Souza Santos (1989), para porosidade aparente os valores máximos são de 35% para uma temperatura de 950°C e 30% para uma temperatura de 1250°C, valores considerados aceitáveis para cerâmica vermelha. As demais composições contendo rejeitos ficaram no intervalo máximo e mínimo dos valores citados.

O resultado está apresentado na tabela 8 para variância de porosidade aparente, portanto toda vez que o valor de “p” for menor que 0,05 significa que houve significância estatística. Onde é possível verificar que não houve variância significativa para este ensaio.

Tabela 8 ANOVA para a porosidade aparente dos corpos de prova.

FONTE DE VARIAÇÃO	GRAU DE LIBERDADE	SOMA DE QUADRADOS	QUADRADO MÉDIO	F	P
TRATAMENTO	2	0,006077712	0,003038856	68,0605	0,996967
RESÍDUO	12	0,000535792	4,46493E-05		
TOTAL	14	0,006613504			

Fonte: Autora, 2022.

4.5.3 Massa Específica Aparente

A tabela 9 apresenta os resultados obtidos para massa específica aparente.

Tabela 9- Massa específica aparente dos corpos de prova.

CP'S MEA	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	MÉDIA	DES. PAD	COEF. Δ
F-A	1,6	1,61	1,6	1,63	1,59	1,606	0,01517	0,90%
F-B	1,69	1,68	1,69	1,68	1,67	1,682	0,00837	0,50%
F-C	1,72	1,74	1,7	1,68	1,7	1,708	0,0228	1,30%

Fonte: Autora, 2022.

A faixa de variação para os corpos de prova sinterizados a 950 °C foi de 1,60 a 1,74 g/cm³.

Observa-se que houve um leve aumento na massa específica à medida que aumentamos as composições. Esse ligeiro aumento na massa específica pode estar associado a um melhor empacotamento das partículas durante a etapa de sinterização.

Segundo a NBR 15270-2/2005 a densidade máxima permitida para cerâmica vermelha fica abaixo de 2,7%. Diante dos resultados obtidos pode-se observar que todas as amostras estiveram dentro dos valores citados pela norma, no entanto, nota-se que não houve diferença significativa entre as composições sinterizadas em diferentes temperaturas.

Estudos realizados por Souza Santos (1989), dizem que os valores de massa específica aparentem das argilas devem estar entre 1,7 e 2,1g/cm³ para sua utilização em cerâmica vermelha. Logo, todas as composições obtiveram valores neste intervalo, estando entre os valores de mínimo e máximo recomendado pela literatura.

O resultado está apresentado na tabela 10 para variância de massa específica aparente, portanto toda vez que o valor de “p” for menor que 0,05 significa que houve significância estatística. Onde é possível verificar que não houve variância significativa para este ensaio.

Tabela 10 - ANOVA para Massa específica aparente dos corpos de prova.

FONTE DE VARIAÇÃO	GRAU DE LIBERDADE	SOMA DE QUADRADOS	QUADRADO MÉDIO	F	P
TRATAMENTO	2	0,028093333	0,014046667	51,39024	0,986068
RESÍDUO	12	0,00328	0,000273333		
TOTAL	14	0,031373333			

Fonte: Autora, 2022.

4.6 Relação entre as propriedades tecnológicas determinadas

Através dos ensaios tecnológicos são avaliadas as propriedades físicas dos produtos cerâmicos, com estes resultados são previstos a qualidade do produto acabado.

Foi possível verificar que a porosidade aparente foi menor nas amostras F-C que possui uma maior concentração de pó de balão do que nas demais, isto pode ter ocorrido devido a quantidade de calcita ser baixa (R. A. L. Soares et al 2014).

A relação do aumento da massa específica aparente e diminuição da absorção de água ocorreu devido à sinterização, aumentando a densificação, o que permite a obtenção de materiais com melhores propriedades mecânicas na formulação F-C que possui maior teor de Cobre.

A formulação com maior porcentagem de rejeito de cobre foi a que se apresentou dentro dos parâmetros exigidos em norma para cerâmica vermelha, estando no mínimo da massa específica aparente e dentro das faixas nas porosidades aparente e absorção de água.

A absorção de água e a porosidade aparente diminuíram gradativamente para todos os corpos de prova com adição de rejeito de cobre mais o pó de balão, entretanto, ficaram no

intervalo de máximo e mínimo dos valores citados, não superando os intervalos determinados por Souza Santos (1992).

Diante dos resultados encontrados, percebeu-se que todas as composições se apresentaram, de certa forma, dentro dos parâmetros exigidos pela NBR.

5 CONCLUSÃO

A argila, bem como as formulações de modo geral contêm teores de quartzo e de ferro adequados. Obtendo alta plasticidade. Verificou-se excesso de quartzo e hematita nas formulações, e é possível prever baseado nas literaturas e nos elementos presentes na análise química, que a argila é esmectita montmorilonita do tipo caulinita, que por sua estrutura lamelar requer um cuidado maior no preparo para a conformação, devido à quantidade de água contida na mesma. Nas formulações com maiores teores de rejeito de cobre e pó de balão, maior formação de fase vítrea.

A adição de rejeitos não produz alterações relevantes na absorção, na porosidade e na massa específica das amostras prontas. Também não existe modificação significativa na rugosidade, portanto, a agregação dos rejeitos se mostra viável no aspecto de absorção. Utilizando os testes estatísticos básicos como ANOVA é possível afirmar que não houve alteração significativa entre nos ensaios para os corpos de prova.

Apesar de necessitar de maiores faixas de temperatura de sinterização e ensaios como de tensão de ruptura para consolidar as análises das propriedades mecânicas, com este estudo já se torna possível concluir que das misturas argilosas formadas, a amostra com 15% de rejeito de cobre e 10% de pó de balão é mais adequada para produção de cerâmica vermelha, com a necessidade de adequações no processo produtivo para melhoria de qualidade dos produtos. Portanto, para a produção de blocos cerâmicos a sua utilização é viável, porém, deve-se especificar com estudo mais aprofundados, uma classe.

A análise e a interpretação dos resultados dos ensaios, das diferentes misturas estudadas neste trabalho, possibilitam destacar que as matérias-primas em estudo são adequadas para a utilização em cerâmica vermelha.

6 SUGESTÕES

- Realizar a avaliação da granulometria das matérias-primas em estudo, buscando um modelo para um melhor empacotamento das partículas.
- Realizar o ensaio de retração linear.
- Realizar a análise de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) nas amostras, para analisar a microestrutura dos corpos de prova e a interação entre as matérias primas nas diferentes temperaturas.
- Realizar a análise de tensão de ruptura à flexão nas amostras, para analisar a resistência em relação ao comportamento mecânico, pelo ensaio de flexão em três pontos.
- Testar as formulações para produção de blocos, tijolos e telhas.

REFERÊNCIAS

ABCERAM. Associação Brasileira de Cerâmica. **Panoramas Setoriais: matérias primas naturais**. Disponível em: <https://abceram.org.br/materias-primas-naturais/>. Acesso em: 17/10/2022.

ABCERAM. Associação Brasileira de Cerâmica. **Panoramas Setoriais: processos de fabricação**. Disponível em: <https://abceram.org.br/processo-de-fabricacao/>. Acesso em: 17/10/2022.

ABDI. Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial. **Estudo Técnico Setorial da Cerâmica Vermelha**, 2010.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10005**. Lixiviação de resíduos. Rio de Janeiro: ABNT, 2004a. 16p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10006**. Solubilização de resíduos. Rio de Janeiro: ABNT, 2004b. 3p.

ABNT - ASSOCIACAO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS. **NBR. 15.270-2**. Blocos cerâmicos para alvenaria estrutural e de vedação, 2017.

ABNT - ASSOCIACAO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS. **NBR. 15.310**. Componentes cerâmicos — Telhas — Terminologia, requisitos e métodos de ensaio, 2017.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR-10004**. Classificação de Resíduos Sólidos. Rio de Janeiro, 2004. 68 p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Placas cerâmicas. Determinação de Densidade Aparente, da Porosidade Aparente e da Absorção de Água. **NBR ISO 10545-3:2020**

ABREU, M. M. **Reciclagem de lama de alto forno em cerâmica vermelha**. 2013. 98 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Engenharia e Ciência de Materiais. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro – Uenf, Campos dos Goytacazes – Ri, 2013. Cap. 5.

AGUIAR, B.R. **Projeto cadastro de fontes de abastecimento por água subterrânea, estado do Piauí: diagnóstico do município de Jardim do Mulato** / Organização do texto

[por] Robério Bôto de Aguiar [e] José Roberto de Carvalho Gomes. (“Characterization of the geomorphological feitions of the municipality ...”) Fortaleza: CPRM - Serviço Geológico do Brasil, 2004. Figura 1.

ALMEIDA, KELSON SILVA DE, SOARES, ROBERTO ARRUDA LIMA AND MATOS, JOSÉ MILTON ELIAS de. (“Kelson Silva de Almeida | Escavador”) "**Characterization of clay deposit in the central region of Piauí for use in the ceramic industry.**" (“SciELO - Brasil - Characterization of clay deposit in the central ...”) (“Characterization of clay deposit in the central region of Piauí for use ...”) Matéria (Rio de Janeiro) [online]. 2020, v. 25, n. 04 e-12864. Available from: <<https://doi.org/10.1590/S151707620200004.1164>>.Epub 11 Dec 2020.Acessoem:17/10/2022

ALMEIDA, Kelson Silva de. **Análise de Incorporação de Resíduos de Serragem de Granito em Formulação de Cerâmica Vermelha.** 2015. 120 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí, PPGEM – IFPI, 2015.

ANFACER - Associação Nacional dos Fabricantes de Cerâmica para Revestimento. Acesso em 18/09/2022.

ANFACER. Associação Nacional Dos Fabricantes De Cerâmica Para Revestimento. 2010 - [Http://www.anfacer.org.br](http://www.anfacer.org.br) - Acesso em 12/12/2020.

ANICER– Associação Nacional da Indústrias Cerâmicas, <https://www.anicer.com.br/educanicer/>, (Fonte: IBGE 2008 para Seção C, Divisão 23, Grupo 234, Classe 2342-7, **Fabricação de Produtos Cerâmicos Não-Refratários para Uso Estrutural na Construção, excluídas as palavras pisos e azulejos da razão social**), 2021.

ARCELOR MITTAL BRASIL (2012). Disponível em <http://www.arcelormittal.com/br>. Acessado em 03 de outubro de 2022.

BACCELLI JR., G. **Avaliação do Processo Industrial da Cerâmica Vermelha na Região do Seridó – RN.** 2010. 200f. Tese (Doutorado) Engenharia Mecânica – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN, 2010.

BRAGA, A. L. C.; RAUL, N. C.; PAIVA, R. S.; SILVIO, B. Estudo do comportamento da recuperação metalúrgica do cobre oxidado da mina do Sossego, de Canaã dos Carajás, submetido à lixiviação com H₂SO₄. XXIV ENTMME – 2011.

CALLISTER JR., W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e Engenharia dos Materiais: Uma Introdução**. LTC, v. 8^o Edição, 2016.

CARDOSO, A.C. **Avaliação da incorporação do rejeito de minério de cobre em massas argilosas para a produção de cerâmica vermelha**. Trabalho de Conclusão de Curso da Universidade Federal do Pará, 2018.

CARVALHO, P. S. L.; MESQUITA, P. P. D.; ARAÚJO, E. D. G. **Sustentabilidade da siderurgia brasileira: eficiência energética, emissões e competitividade**. BNDES Setorial, v. 41, p. 181-236, 2015.

CARVALHO, T.U.S, DOS SANTOS, E.A.; BORBA, S. C.; ARANHA, R. C.; FAGURY NETO, E. **Influência da incorporação do rejeito do minério de manganês de carajás-pa e filito de marabá-pa em cerâmicas vermelhas**. 21^o CBECIMAT. Cuiabá, 2014.

Castro, A. T., Perissé, E. G.,Lopes, F.P.,Coelho, G.,Campos, R. A. & Dutra, R. (2010). Análises Térmicas e Aplicações. <<http://www.ufjf.br/fisica/2010/08/grupo-7-Analises-Termicas-e-Aplicacoes.pdf>>. Acesso em 18/10/2022.

CEPRO –Fundação Centro de Pesquisas Econômicas e Sociais do Piauí. (“CEPRO FUNDAÇÃO CENTRO DE PESQU em Teresina, PI: (86) 3221...” (2005). Diagnóstico e diretrizes para o setor mineral do estado do Piauí. (“Fundação Cepro lança Diagnóstico e Diretrizes para o Setor Mineral”).

COCHILCO - Comision Chilena del Cobre - Tendencias de usos y demanda de productos de cobre. Chile, 2017. 41pg.

CORAL, NATASHA & LAFON, JEAN MICHEL, ET AL; **Caracterização Mineralógica dos Rejeitos do Beneficiamento do Minério de Cobre da Mina do Sossego** (Canaã dos Carajás/PA). CBGQ, 2015.

COSTA, Jaime Henrique Barbosa da. **Panorama dos Estudos de Aproveitamento de Rejeitos de Mineração do Estado do Pará de 2010 a 2020**. (“Repositório de Instituto

Federal do Pará: Panorama dos Estudos de ...”) 2022. 55 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Engenharia de Minas) - Universidade Federal de Alfenas, Poços de Caldas, 2022. Disponível em: <http://192.168.0.209:8080/jspui/handle/prefix/335>. Acesso em:

DIAS, C. A. **Reciclagem de lama de alto forno em cerâmica vermelha**. 2011. 158 f. Tese (Doutorado) Departamento de engenharia e ciências dos materiais – Universidade do Norte Fluminense, Rio de Janeiro, 2011. Cap. 3.

DIAS, R. **Gestão ambiental responsabilidade social e sustentabilidade**. 2. ed. São Paulo: Atlas S.A., 2011. Disponível em: <https://periodicos.ufv.br/jcec/article/view/13974>. Acesso em: 17 nov. 2022.

ENGEMAT SOLUCÕES. **Absorção de água em materiais cerâmicos**. 2020/08 de maio. Disponível em: <http://engematsolucoes.com.br/absorcao-de-agua-em-materiais-ceramicos/>. Acesso em: 18/12/2022.

FEAM – Fundação Estadual de Meio Ambiente. **Guia Ambiental da Indústria de Cerâmica Vermelha, 2013**. Disponível em: <http://www.sindicermg.com.br/estudante/GuiaAmbientalCeramicaVermelha.pdf>>. Acesso em: 10 mai.2021.

FERREIRA V.H.; ALMEIDA, L. R.; OLIVEIRA, G. C.; COELHO, H. C. M.; COSTA, D.S.; PINHEIRO, A. P.; COSTA, D. S. **Cinzas Volantes em compósitos poliméricos: análise mecânica e flamabilidade**. In: Engenharia no Século XXI, Volume 3. 1. Ed. Belo Horizonte: Poisson, 2019. Cap. 8, p. 56 - 62. doi:10.5935/978-85-7042-091-6.

FIEMG – Federação das Indústrias do Estado de Minas Gerais. **Guia Ambiental da Indústria de Cerâmica Vermelha, 2013**. Disponível em: <<http://www.sindicermg.com.br/estudante/GuiaAmbientalCeramicaVermelha.pdf>>. Acesso em: 10 mai.2021.

FIGUEIREDO, J. D. C. **Aplicação de uma fração de resíduo do sheredder na fabricação de blocos cerâmicos estruturais**. 2016. 146 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia dos materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

GOMES, C. A. D. O. **Estudo da caracterização e influência do resíduo siderúrgico pó de balão em massas cerâmicas para produção de bloco estrutural cerâmico**. 2019. 67 p.

Monografia (Engenharia de materiais) — UFPA campus Ananindeua. Disponível em: https://bdm.ufpa.br:8443/jspui/bitstream/prefix/1233/1/TCC_EstudoCaracterizacaoInfluencia.pdf. Acesso em: 18/11/2021.

HILDEBRANDO, E.A. **Aplicação do rejeito do processo Bayer (lama vermelha) como matéria-prima na indústria de cerâmica estrutural.** (“SciELO - Brazil - The use of red mud and kaolin waste in the production ...”) Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Pará, Belém, 1998.

IBRAM - Instituto Brasileiro de Mineração. **Gestão e Manejo de Rejeitos da Mineração.** 1º ed. – Brasília: IBRAM, 2016.

IBRAM - MINERACÃO DO BRASIL. **Piauí é apontado como a nova fronteira da Mineração do país.** 12/03/12. Disponível em: <https://ibram.org.br/noticia/piaui-e-apontado-como-a-nova-fronteira-da-mineracao-do-pais/>. Acesso em: 18/12/2022.

INT – INSTITUTO NACIONAL DE TECNOLOGIA/MINISTÉRIO DA CIÊNCIA TECNOLOGIA E INOVAÇÃO. Temos de Compromisso de Gestão 2012/Relatório de Avaliação Anual 2012. 181f. Brasília – DF, 2012. Disponível em: <http://www.int.gov.br/docman/informacoesinstitucional/termodecompromissodegestao/571relatorio-tcg-2012/file>>. Acesso em 21 jun. 2021.

ISHIDA, Heitor Kazuhito; VALENTE, Ana Carla Ferreira. **Análise da eficiência energética em segmentos industriais selecionados.** Pesquisa/Produto/Trabalho executado com recursos provenientes do Acordo de Empréstimo nº 8.095-BR, formalizado entre a República Federativa do Brasil e o Banco Internacional para Reconstrução e Desenvolvimento. 2018.

JACOMINO, V. M. F.; RIBEIRO, E. D. L; CASTRO, L. F. A. **Seleção de padrões de emissão atmosférica.** Um estudo de caso para as pequenas e médias empresas produtoras de ferro gusa do estado de Minas Gerais. Engenharia Sanitária e Ambiental, 2002, v.7, N.3, p.112-116.

JUNIOR, Marsis Cabral *et al.* **Argila para Cerâmica Vermelha, 2008.** Disponível em: http://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/cetem/1136/1/33.%20ARG%20CER%20VERM%20_2008_rev.pdf. Acesso em: 21 jun. 2020.

KATO, R. B. **Estudo da influência do resíduo de beneficiamento de cobre sulfetado nas propriedades do concreto asfáltico**. Belém, 2016. 147p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Pará, 2016.

MACEDO, R. S.; MENEZES, R. R.; NEVES, G. A.; FERREIRA, H. C. **Influência de aditivos na produção de blocos cerâmicos**. *Cerâmica*, v. 54, p. 371-381, 2008.

MAGALHÃES, R. dá S.; ALMEIDA, K. S. de; GOMES, Érico R. **Caracterização físico-química, mineralógica e tecnológica de argilas de Caxias/MA**. *The Journal of Engineering and Exact Sciences*, Viçosa/MG, BR, v. 8, n. 2, p. 13974–01e, 2022.
DOI:10.18540/jcecvl8iss2pp13974-01e.

MAIA, F. S. **Avaliação De Massas Cerâmicas, Processamento E Propriedades Dos Produtos De Cerâmica Vermelha**. (“2018 Eve E oliveira | PDF”) 2012. 105 f. Dissertação (Mestrado), 2012 - Curso de Engenharia e Ciência dos Materiais. Centro de Ciência e Tecnologia da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro – Uenf, Campos dos Goytacazes – RJ, 2019. Cap. 3.

MENEZES, Romualdo Rodrigues. **Estudo da Argila Usadas em Cerâmica Vermelha**. *Revista Cerâmica*, São Paulo, v. 54. n. 332, p. 411-417, out. Dez, 2008. Disponível em: . Acesso em 21 jun. 2021.

MILLER, G.T.; SPOOLMAN, S. *Living in the environment: principles, connections, and solutions*. 16 ed. Belmont: Brooks/Cole, 2009. 353p. **nanocompósitos poliméricos com retardo de propagação de chama**. Tese Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN, 2015.

OLIVEIRA, F. R.; SILVEIRA, C. S.; ASSIS, P. S. **Análise da Lama de Alto-Forno como Insumo em Siderúrgicas e Cerâmicas**. *Revista Eletrônica de Materiais e Processos*, 2017, 12.1.

OLIVEIRA, G.E.; HOLANDA, J.N.F. (2004) **Análise do impacto ambiental causado pela utilização do resíduo sólido do setor siderúrgico em cerâmica vermelha**. (“Análise do impacto ambiental causado pela utilização de resíduo sólido ...”) *Cerâmica*, 50:185-189.

OLIVEIRA, L.C.P. (2017). **Panorama da Gestão de resíduos: evolução e tendências.**

Disponível: http://www.abmbrasil.com.br/Panorama_da_Gestao_de_Residuos. Acesso em 26 de novembro de 2018.

OLIVEIRA, M. R. C; MARTINS, J. (2003) **Caracterização e classificação do resíduo sólido “pó de balão” gerado na indústria siderúrgica não integrada a carvão vegetal: estudo de um caso na região de Sete Lagoas/ MG.** Química Nova, 26 (1): 5-9.

OTTOBONI, J. **Resíduo industrial é ainda o grande vilão do meio ambiente.** 5 jun. 2018.

Disponível em: <https://envolverde.cartacapital.com.br/residuo-industrial-e-ainda-o-grande-vilao-no-meio-ambiente/>. Acesso em: 27 jun. 2020.

R. A. L. SOARES A, R. M. DO NASCIMENTO B, C. A. PASKOCIMAS B, R. J. S.

CASTRO C. **Efeito da Adição de Calcita Oriunda de Jazida de Argila em Massa de Cerâmica de Revestimento.** Cerâmica Industrial, 2014.

RIBEIRO, E. D. L., **Estudo comparativo entre sistemas de limpeza de gases de alto-forno em siderúrgicas não-integradas a carvão vegetal e alternativa de reaproveitamento do pó do balão. (“Estudo comparativo entre sistemas de limpeza de gases de alto-forno em ...”)** 2011. 104 f. Tese (Doutorado) Engenharia Metalúrgica e de Minas – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011. p. 66-69.

RIBEIRO, M. M. **Material particulado da planta de sinterização de usina siderúrgica integrada em composição de massa de cerâmica vermelha.** 2010. 104 f. Dissertação (Mestrado) Curso de Engenharia e Ciência dos Materiais. Centro de Ciência e Tecnologia da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro – Uenf, Campos dos Goytacazes – Rj, 2010. Cap. 2.

SANTOS, O.C., **Influência da adição de rejeitos cerâmicos nas propriedades de cerâmica vermelha da região do Recôncovo Baiano,** Natal-RN, 2001. 80p. Dissertação (mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

SILVA M. L. G. S. **Obtenção e caracterização de argila piauiense paligorsquita (atapulgita) organofilizada para uso em formulações cosméticas.** (“Efeitos cosméticos dos diferentes tipos de argilas - Farmacon Jr”) Dissertação (Mestrado em ciências farmacêuticas), Universidade Federal do Piauí, Teresina, 2011.

SILVA, A.R.P, CARDOSO, A.C., TAVARES, A.R.D., SILVA, L.D.P., CANDIDO, V.E., HILDEBRANDO, E.A. **Adição de resíduo da siderurgia “Charcok” em blocos cerâmicos estruturais.** 2017, Pará. Anais. Belém: ENTMMME. 2017. p. 46-59.

SILVA, R. V., et al. **The role of glass waste in the production of ceramic-based products and other applications: a review.***Journal of cleaner production*, 2017, 167: 346-364.

SILVA, R.N., BRANCO, N. T, NEVES, A. S. S, MACEDO, E. N, SOUZA, J. A. S., MELO, A. O. **Caracterização do resíduo pó de balão de alto forno de uma siderúrgica integrada do Sudeste do Pará.** XXVII Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa, 2017.

SOARES, Arruda Lima Soares. **Efeito da Adição de Carbonato em Formulação de Massa Cerâmica para Revestimento Cerâmico Utilizando Matérias-primas do Piauí.** 2010. 145 f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Instituto Federal do Rio Grande do Norte, PPGCEM – IFRN, 2010.

SOUZA, D. M., **"Utilização de rejeito de minério do cobre como agregado miúdo na produção de concreto."** (“RIUFPA”) Orientador: Paulo Sérgio Lima Souza. 2019. XIII, 85 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Infraestrutura e Desenvolvimento Energético) - Núcleo de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia, Universidade Federal do Pará, Tucuruí, 2019. Disponível em: <http://repositorio.ufpa.br:8080/jspui/handle/2011/12604>. Acesso em: 17/10/2022.

SOUZA SANTOS, P. **Ciência e Tecnologia de argilas.** São Paulo: Edgard Blücher, 1992, 1975, 1989.

VAN VLACK, Lawrence H. **Princípios de ciência e tecnologia dos materiais.** (“CIÊNCIA DOS MATERIAIS | UFPel”) 5. ed. Rio de Janeiro: Campus, 2006

VIEIRA, C. M. F.; MONTEIRO, S. N. **Effect of the particle size of the grog on the properties of bricks.** In: TMS (The Minerals, Metals & Materials Society), 249–254, 2009.

VIEIRA, C.M.F. **Efeito da incorporação de resíduo de minério de ferro nas propriedades de queima de cerâmica argilosa.** 17º CBECIMAT. Paraná, 2006.