

Universidade Federal de Ouro Preto

Escola de Minas

Programa de Pós-Graduação em Engenharia das
Construções

Mestrado Profissional em Construção Metálica

Dissertação

Tijolo prensado produzido com rejeito de barragem de minério de ferro

Ouro Preto

2023



TIJOLO PRENSADO PRODUZIDO COM REJEITO DE BARRAGEM DE MINÉRIO DE FERRO

Andréia da Conceição de Faria

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia das Construções da Universidade Federal de Ouro Preto, como parte dos requisitos para obtenção do grau de Mestre em Engenharia das Construções.

Área de concentração: Engenharia das Construções

Orientador: Prof. Dr. Guilherme Jorge Brigolini Silva

Coorientador: Prof. Me. José Carlos Borba Junior

Ouro Preto

2023

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

F224t Faria, Andreia Da Conceicao De.
Tijolo prensado produzido com rejeito de barragem de minério de ferro. [manuscrito] / Andreia Da Conceicao De Faria. - 2023.
80 f.: il.: color., gráf., tab.. + Organograma.

Orientador: Prof. Dr. Guilherme Jorge Brigolini Silva.
Coorientador: Prof. Me. José Carlos Borba Junior.
Dissertação (Mestrado Profissional). Universidade Federal de Ouro Preto. Departamento de Engenharia Civil. Programa de Pós-Graduação em Engenharia das Construções.
Área de Concentração: Engenharia das Construções.

1. Barragens de rejeitos - Minérios de ferro. 2. Tijolos - Tijolo prensado. 3. Tijolos. I. Silva, Guilherme Jorge Brigolini. II. Junior, José Carlos Borba. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 624.014

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB-1716



FOLHA DE APROVAÇÃO

Andréia da Conceição de Faria

Tijolo Prensado Produzido Com Rejeito De Barragem De Minério De Ferro

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia das Construções da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de mestre

Aprovada em 27 de fevereiro de 2023

Membros da banca

Dr. Guilherme Jorge Brigolini Silva - Orientador - Universidade Federal de Ouro Preto
Me. - Coorientador - José Carlos Borba Junior - Universidade Federal de São João Del Rei
Dra. - Mariana Arruda Pereira - Universidade Federal de São João Del Rei
Dr. - White José dos Santos - Universidade Federal de Minas Gerais

[Digite o nome do orientador (apenas a primeira letra de cada nome maiúscula)], orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito no Repositório Institucional da UFOP em 16/05/2023



Documento assinado eletronicamente por **Guilherme Jorge Brigolini Silva, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 16/05/2023, às 12:07, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0525673** e o código CRC **EE5BAD5E**.

Aos meus pais, por ter me proporcionado a oportunidade que eles não tiveram de estudar, aos meus irmãos e companheiro por me incentivar a buscar o conhecimento, e aos meus professores por me instruir e ensinar da melhor maneira possível.

AGRADECIMENTOS

À Deus, pela conquista deste momento. Foi muita luta e persistência até chegar aqui, muitas escolhas que tive que fazer, abrindo mãos de momentos de lazer e momentos em família, que sem a força que me deste, eu não seria capaz de chegar até aqui. À minha família, principalmente aos meus pais, que mesmo na simplicidade da vida que levam, me incentivaram a buscar o conhecimento através do estudo, sem eles eu não seria nada. Aos meus irmãos e meu companheiro que me acompanharam nessa vida, e vivenciaram comigo os momentos mais importantes da minha vida. Aos meus tios e tias que me ajudaram de diversas formas, dando conselhos e abrigo. Aos meus professores que fizeram parte dessa caminhada longa e árdua caminhada.

*... Nunca deixe que lhe digam que não vale a pena, acreditar no sonho que se tem
Ou que seus planos nunca vão dar certo, ou que você nunca vai ser alguém
Tem gente que machuca os outros, tem gente que não sabe amar
Mas eu sei que um dia a gente aprende, se você quiser alguém em quem confiar
Confie em si mesmo, quem acredita sempre alcança...*

(Flavio Venturini / Renato Russo)

RESUMO

FARIA, Andréia da Conceição. **Tijolo prensado produzido com rejeito de barragem de minério de ferro**. Dissertação. (80p). Programa de Pós-Graduação em Engenharia das Construções, Universidade Federal de Ouro Preto. 2023.

A Construção civil é umas das áreas que mais consomem matéria prima no mundo, contribuindo para a degradação ambiental. Diversos estudos têm sido realizados para torná-la mais sustentável, e o reaproveitamento de resíduos da mineração, tem sido incentivado. O rejeito de minério de ferro é um coproduto da mineração, gerado em grandes volumes no estado de Minas Gerais. Esses rejeitos são geralmente depositados em barragens que, quando mal executadas, podem trazer riscos conhecidos à população, como no desastre de Mariana. Esse trabalho propõe uma aplicação para esse rejeito, desenvolvendo um estudo de dosagens que podem ser utilizados na produção de tijolos prensados. Para a estabilização dos tijolos, se propõe a ativação alcalina com hidróxido de sódio e silicato de sódio, desenvolvendo 12 traços contendo o rejeito de minério de ferro como matéria prima principal. A partir destes materiais, foi definida uma metodologia para a produção de protótipos, que representem os tijolos. Os protótipos foram caracterizados, e ensaiados quanto à resistência à compressão e absorção de água. A partir destes ensaios três traços apresentaram resultados satisfatórios, com resistência a compressão entre 13,15 MPa a 19,51 MPa aos 7 dias, e absorção de água com valores entre 9,52% e 10,24 %, sendo comprovado que este material pode ser utilizado na produção de tijolos prensados para a construção civil.

Palavras chaves: rejeito de barragem de minério de ferro, tijolo prensado, ativação alcalina.

ABSTRACT

Civil construction is one of the areas that most consume raw materials in the world, contributing to environmental degradation. Several studies have been carried out to make it more sustainable, and the reuse of mining waste has been encouraged. Iron ore tailings are a co-product of mining, generated in large volumes in the state of Minas Gerais. These tailings are usually deposited in dams that, when poorly executed, can pose known risks to the population, as in the Mariana disaster. This work proposes an application for this waste, developing a study of dosages that can be used in the production of pressed bricks. For the stabilization of the bricks, alkaline activation with sodium hydroxide and sodium silicate is proposed, developing 12 traces containing iron ore waste as the main raw material. From these materials, a methodology was defined for the production of prototypes that represent the bricks. The prototypes were characterized and tested for compressive strength and water absorption. From these tests, three traits showed satisfactory results, with compressive strength between 13.15 MPa and 19.51 MPa after 7 days, and water absorption with values between 9.52% and 10.24%, proving that this material can be used in the production of pressed bricks for civil construction.

Keywords: iron ore dam tailings, pressed brick, alkaline activation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Modelo conceitual simplificado da geopolimerização de alumino silicatos.....	36
Figura 2: Fluxograma do desenvolvimento da pesquisa.	38
Figura 3: Preparação e moldagem dos protótipos dos tijolos de RMF.	47
Figura 4:Ensaio de Difração de Raio X do RMF.....	49
Figura 5: Termogravimetria do RMF.	51
Figura 6: Morfologia de RMF obtida via MEV e EDS.	52
Figura 7: Distribuição granulométrica via granulômetro a laser.....	55
Figura 8:Limite de Liquidez do RMF.....	56
Figura 9:Ensaio de Compactação do RMF.....	56
Figura 10: Protótipos dos tijolos de RMF.	57
Figura 11: Resistência à compressão: protótipos de hidróxido de sódio.....	58
Figura 12: Resistência à compressão: protótipos de silicato de sódio.	59
Figura 13: Ensaio de absorção de água dos protótipos de NaOH.	61
Figura 14: Ensaio de absorção de água dos protótipos de Na ₂ SiO ₃	62
Figura 15: Resistência à compressão das misturas de NaOH e Na ₂ SiO ₃	63
Figura 16:Absorção de água dos traços de mistura de ativadores.....	64
Figura 17: Gráfico de DRX do traço.	65
Figura 18: Gráfico de DRX do traço 2.	66
Figura 19: Gráfico de DRX do traço 3.	67
Figura 20: Ensaio de resistência à compressão dos Protótipos de tijolo de RMF.	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Composição química das amostras de RMF de Minas Gerais.....	23
Tabela 2: Resumo dos materiais e porcentagens utilizadas nas referências pesquisadas.	31
Tabela 3: Ensaio realizados e composições dos RMF utilizados nas pesquisas.	33
Tabela 4: Definição dos traços para teste com hidróxido de sódio.	45
Tabela 5: Definição dos traços para teste com Silicato de sódio.	46
Tabela 6: Definição dos traços com a mistura de silicato de sódio com hidróxido de sódio.....	46
Tabela 7: Composição mineralógica do RMF.....	50
Tabela 8: Composição química de cada ponto.	53
Tabela 9: Traços que se enquadraram na normatização de tijolos.....	65
Tabela 10: Composição química dos traços 1, 2 e 3.....	68
Tabela 11: Ensaio de absorção de água nos traços 1, 2 e 3.	70

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

RMF - Rejeito de Minério de Ferro

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente

LL - Limite de Liquidez

LP - Limite de Plasticidade

IP - Índice de Plasticidade

DRX - Difração de Raios X

EDS - Espectroscopia de Dispersão de Energia de Raios X

FRX - Fluorescência de Raios X

MEV - Microscopia Eletrônica de Varredura

NBR - Norma Brasileira Regulamentadora

UFOP - Universidade Federal de Ouro Preto

DTECH - Departamento de Tecnologia em Engenharia Civil, Computação, Automação, Telemática e Humanidades

UFSJ - Universidade Federal de São João Del Rei

LCC - Laboratório de Construção Civil

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
2 OBJETIVOS	17
2.1 OBJETIVO GERAL	17
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
3 JUSTIFICATIVAS	18
4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
4.1 REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO (RMF): PRODUÇÃO, COMPOSIÇÃO E UTILIZAÇÃO COMO MATERIAL DE CONSTRUÇÃO	20
4.2 PRODUÇÃO DE TIJOLOS SUSTENTÁVEIS PARA A CONSTRUÇÃO CIVIL ..	24
4.3 PRODUÇÃO DE TIJOLOS A BASE DE RMF.....	28
4.4 ESTABILIZAÇÃO DO RMF ATRAVÉS DA ATIVAÇÃO ALICALINA PARA PRODUÇÃO DE TIJOLOS.....	33
5 METODOLOGIA	37
5.1 MATERIAIS.....	37
5.2 MÉTODOS	37
5.2.1 Coleta e preparação inicial do RMF	39
5.2.2 Preparação de amostras para ensaios de caracterização.....	39
5.2.3 Caracterização mineralógica do RMF	40
5.2.4 Caracterização Física do RMF.....	43
5.2.5 Definição dos traços para teste.....	44
5.2.6 Preparação dos protótipos para a produção de tijolos de RMF	46
5.2.7 Avaliação dos protótipos produzidos.....	48
6 RESULTADOS	49
6.1 CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA DO RMF	49
6.1.1 Difração de Raio X do RMF	49
6.1.2 Fluorescência de Raio X do RMF	50
6.1.3 Termogravimetria do RMF	51
6.1.4 Microscopia eletrônica de varredura do RMF.....	52
6.1.5 Ensaio de pH e condutibilidade elétrica do RMF	53
6.2 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO RMF	54
6.2.1 Composição granulométrica do RMF	54
6.2.2 Massa específica do RMF.....	55
6.2.3 Limites de consistência do RMF	55
6.2.4 Ensaio de compactação do RMF	56

6.3 PREPARAÇÃO DOS PROTÓTIPOS DE RMF	57
6.4 AVALIAÇÃO DOS PROTÓTIPOS PRODUZIDOS COM OS TRAÇOS DEFINIDOS.....	58
6.4.1 Resultado do ensaio de resistência à compressão nos protótipos de hidróxido de sódio.....	58
6.4.2 Resultado do ensaio de resistência à compressão nos protótipos de silicato de sódio.....	59
6.4.3 Resultado do ensaio de absorção de água dos protótipos de hidróxido de sódio.....	60
6.4.4 Resultado do ensaio de absorção de água dos protótipos de silicato de sódio	61
6.4.5 Resultado dos ensaios resistência à compressão e absorção de água dos protótipos produzidos com a mistura de hidróxido de sódio e silicato de sódio	63
6.5 CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA DOS TRAÇOS QUE ENQUADRARAM NOS REQUISITOS DE PRODUÇÃO DE TIJOLOS.....	64
6.5.1 Ensaio de difração de raio x dos protótipos.....	65
6.5.2 Ensaio de fluorescência de raio x dos protótipos	67
6.5.3 Resultado da condutividade elétrica e pH dos traços 1, 2 e 3	68
6.6 RESULTADO DOS ENSAIOS DE RESISTÊNCIA E ABSORÇÃO DOS TRAÇOS QUE ENQUADRARAM NOS REQUISITOS DE PRODUÇÃO DE TIJOLOS.	69
7 CONCLUSÃO	72
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	74

1 INTRODUÇÃO

A construção civil é uma das áreas que mais contribui com a economia brasileira, gerando emprego e renda para todas as classes sociais e atuando diretamente no aumento do seu Produto Interno Bruto (PIB). Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2021), dentre as atividades industriais que influenciaram positivamente o PIB no primeiro trimestre de 2021, a construção civil ocupa o segundo lugar com um crescimento de 2,1 %, ficando atrás somente das indústrias extrativas que tiveram um crescimento de 3,2 % no mesmo período.

Porem o setor consome, em escala mundial, 40 % da produção total de energia elétrica, 12 a 16 % de toda a água disponível, 32 % de recursos não renováveis e renováveis, 25 % de toda a madeira, 40 % de todas as matérias-primas, 30 a 40 % de todos os resíduos sólidos e emite 35 % de CO₂, (SON *et al*, 2011).

A mineração é outra área muito importante para a economia do Brasil, porém também gera grande impacto socioambiental. Segundo o Ministério de Minas e Energia, (MME, 2022), apesar da recente crise mundial causada pela pandemia de Covid-19 ter afetado todos os setores industriais, o setor mineral foi o um dos que se recuperaram mais rapidamente, sendo responsável por cerca de 2,4 % do PIB do país em 2021. O principal produto exportado foi o minério de ferro, que representou 16 % das exportações nacionais, totalizando US\$44,6 bilhões, crescimento de 73 % em relação a 2020. As importações, por sua vez, somaram US\$39,1 bilhões, sendo o potássio e o carvão metalúrgico os principais produtos da pauta.

Contudo, exploração do minério de ferro é umas das atividades que mais geram impactos ambientais, e um deles é a quantidade de rejeito com pouca utilidade econômica. Souza Júnior, Moreira e Heineck (2018) informam que a elevada produção dos rejeitos minerais advindos da etapa de beneficiamento do minério torna viável a construção de diques para estocagem deste material formando então as barragens de rejeitos. Entretanto, se construída ou concebida de forma inadequada, essas estruturas representam um grande risco para a biodiversidade local.

Segundo Freitas *et al.* (2022) entre o fim de 2015 e o início de 2019, o Brasil registrou os dois mais graves desastres envolvendo barragens de mineração do século XXI, entre eles o da mineradora Samarco, em Mariana/MG, onde houve 19 óbitos e derramamento no meio ambiente de volume maior que 50 milhões m³ de rejeitos, que atingiu 36 municípios em 650 km ao longo da Bacia do Rio Doce. A partir daí, a necessidade de dar destinação sustentável aos resíduos da mineração, em especial os rejeitos, ganhou mais relevância após os desastres das barragens de rejeito em Mariana (2015) e Brumadinho (2019), e o aproveitamento econômico desses materiais surge como alternativa à deposição em estruturas como pilhas e barragens (ANM, 2021).

Segundo Carmignano *et al* (2021) o rejeito de minério de ferro (RMF) pode ser utilizado na indústria da construção civil de diversas maneiras: agregados para concreto, argamassa, aditivos para cimento Portland, indústria cerâmica, geopolímeros, síntese de novos materiais como zeolitas, sílica mesoporosa, nanotubos de carbono, adsorventes, catalisadores para diferentes reações em baterias e em células de combustível. Coelho (2008), analisando a utilização de rejeitos de uma mina de ferro do Quadrilátero Ferrífero, também constatou que RMF constituem materiais potencialmente interessantes para a construção civil, desde que atendidas às premissas de melhoria de suas propriedades geotécnicas.

Buscando a aplicação do RMF proveniente do desastre de Mariana MG, na produção de um produto para a construção civil, este trabalho buscou o desenvolvimento de um material sustentável, que emita menos gases nocivos ao meio ambiente durante seu processo de produção, sendo o tijolo ecológico a opção almejada. Para isso, será necessário investigar qual o melhor método de estabilização para que ele se enquadre nos parâmetros exigidos na sua produção, aproveitando a maior quantidade possível de RMF.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo deste trabalho é propor o desenvolvimento de um tijolo prensado utilizando o RMF proveniente do desastre ambiental ocorrido pelo rompimento da barragem de Fundão, em Mariana MG.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para alcançar o objetivo geral, têm-se os seguintes objetivos específicos:

- Identificar as características do RMF para definir qual o melhor processo de produção dos tijolos.
- Identificar os ativadores alcalinos adequados para a produção do tijolo.
- Estudar o processo de obtenção de tijolos crus, que melhor se enquadre na produção do tijolo de RMF.
- Estudar os tijolos produzidos no que se refere à absorção de água, resistência à compressão e composição química.

3 JUSTIFICATIVAS

Segundo Souza *et al* (2008), a produção de tijolos cerâmicos pode gerar grande impacto ambiental, pois a principal matéria-prima bruta utilizada na sua produção é a argila comum encontrada na natureza, e a sua extração vem aumentando devido à forte demanda no setor de construção civil, sendo uma das consequências diretas desta situação o aumento significativo na extração e no consumo de argilas pelo setor.

De acordo com Schneider e Moreiras (2021), o alto consumo energético é mais um problema do setor industrial de tijolos cerâmicos. A etapa de queima é a principal responsável por isto, visto que o tempo de queima pode variar de 7 a 8 dias em fornos do tipo intermitente, e de 6 a 10 dias em fornos do tipo Meda, e pode chegar à temperatura máxima de até 900° C por alguns dias.

Devido a estes fatores, a utilização de tijolos crus pode ser apontada como uma opção mais sustentável ao se comparar com a utilização do bloco cerâmico na construção civil, pois segundo Mellaikhafi *et al* (2021), estão em perfeita conformidade com as normas ambientais, pois não necessitam de queima para sua produção, e tem a vantagem de reduzir os requisitos de energia de aquecimento e resfriamento nos ambientes onde são empregados, graças às excelentes propriedades de isolamento e à capacidade de armazenamento de calor dos materiais terrestres, o que representa um ganho para o meio ambiente.

Além disso, o rompimento da barragem de Fundão da Empresa de mineração Samarco S.A em Mariana MG no dia 05 de novembro de 2015, foi considerado uma das maiores tragédias socioambientais do país, (DE SOUZA PORTO, 2016). De acordo com dados divulgados pela Samarco Mineração S.A, no dia do rompimento, a onda de rejeito saiu da estrutura e chegou à barragem de Santarém, que reteve grande parte desse material. O restante atingiu Bento Rodrigues, distrito do município de Mariana MG. Em seguida, alcançou os rios Gualaxo do Norte, impactando a cidade de Barra Longa, e depois o rio Doce. Chegando à Usina Hidrelétrica Risoleta Neves, também conhecida como candonga, parte ficou contida no barramento e na área de seu reservatório. Cerca de 10 milhões de metros cúbicos foram carregados além dos limites do reservatório de candonga e se diluíram ao longo do rio Doce, até chegar ao distrito de Regência, no município de Linhares, no litoral do Espírito Santo. Após

este trágico acidente, novas políticas públicas foram implantadas para desativar as barragens e dar outra destinação ao RMF.

O Ministério Público Federal, MPF (2016), criou a RECOMENDAÇÃO Nº 0 14 /2016-MPF-GAB/FT, considerando que estes resíduos sendo estocados na forma de pilhas de estéreis ou barragens de rejeitos, geram considerável dano ambiental, e recomendou que a destinação ambientalmente adequada do RMF seja efetuada de forma progressiva, exigindo-se do empreendedor, no mínimo, o seguinte percentual de reaproveitamento de resíduos de mineração gerados a partir da lavra de minério de ferro: de 0,05 % em 2016 a 70 % até 2025.

O RMF é composto por minério de ferro e resíduos não ferrosos como quartzo e água, possuindo baixas concentrações de substâncias tóxicas, sendo classificado como material inerte, ou Classe II B, de acordo com as Normas brasileiras NBR 10004 (ABNT, 2004a), NBR 10005 (ABNT, 2004b) e NBR 10006 (ABNT, 2004c). Deste modo, ele pode ser usado na construção civil sem oferecer risco à saúde humana

Sendo assim, o tijolo prensado se mostra como uma opção sustentável, por não depender do processo de queima para a sua fabricação, não depender do emprego alta tecnologia podendo ser produzido a partir do RMF, que é um resíduo industrial de mineração produzido em abundância na região, o que torna ainda mais viável sua produção.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica abordará a produção de materiais de construção civil a partir do RMF, produzido nas várias mineradoras do estado de Minas Gerais. Também abordará a produção de tijolos ecológicos e estudos onde se utilizou o RMF na sua produção, além das maneiras de ativá-lo para alcançar a resistência estabelecida por norma.

4.1 REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO (RMF): PRODUÇÃO, COMPOSIÇÃO E UTILIZAÇÃO COMO MATERIAL DE CONSTRUÇÃO

A produção de minério de ferro no Brasil é concentrada, principalmente, nos estados de Minas Gerais, Pará e Mato Grosso do Sul. Somente o Estado de Minas Gerais é responsável pela extração de 180 milhões de toneladas/ano de minério de ferro. Mais ainda, o estado é responsável por aproximadamente 53 % da produção brasileira de minerais metálicos e 29 % de minérios, considerado o mais importante estado minerador do Brasil. Os dois tipos mais importantes de minério rico em ferro do país são hematita e itabirito. O tipo rico em hematita é extraído principalmente no estado do Pará e tem um teor médio de ferro superior a 60 %. O itabirito, por outro lado, é extraído principalmente no Quadrilátero Ferrífero (MG) e apresenta um teor de ferro em torno de 50 % (IBRAM, 2015).

Para aumentar a qualidade e o teor de ferro no produto, na maioria das vezes, é necessário se proceder o beneficiamento do minério. Entende-se por beneficiamento o tratamento dado aos minérios, visando preparar granulometricamente, concentrar ou purificar minérios por métodos físicos ou químicos sem alterar a constituição química dos minerais. Em decorrência desta etapa, grande volume e massa de resíduos misturados à água são gerados, material a que se dá o nome de rejeito (DNPM, 2012).

Segundo dados do Inventário de Resíduos da Mineração cerca de 289 milhões de toneladas de RMF são gerados anualmente no Brasil, dos quais 94,58 % são destinados para as barragens e 2,87 % para as pilhas de rejeitos e somente 0,003 % ou cerca de 9,9 mil toneladas são utilizadas (FEAM, 2018).

Diferente de barragens convencionais, que normalmente barram água, barragens de rejeito armazenam rejeitos dos processos minerais que podem

variar de materiais arenosos não plásticos (rejeitos granulares) até solos de granulometria fina e alta plasticidade, em forma de lama, (ARAÚJO, 2006). Além disso, as barragens para contenção de rejeitos são construídas em etapas, as quais, acompanham o ritmo de lavra do minério, desta forma à medida que são gerados rejeitos, são executados os alteamentos podendo ser a montante, ao centro e a jusante da barragem inicial. Estas, também são reconhecidas por gerarem um impacto ambiental significativo caso se rompam, e eventuais falhas resultam em grandes volumes de rejeitos descarregados no meio ambiente (DUARTE, 2008).

O uso alternativo para o RMF está diretamente ligado à sua composição, sendo determinante que se proceda o levantamento de suas propriedades visando seu reaproveitamento. Segundo Nociti (2011), as características dos rejeitos variam em função do material lavrado e dos processos empregados no beneficiamento dele. Além disso, podem variar, na área de disposição/barragem, e em função da distância do descarte.

Diversas pesquisas vêm sendo realizadas com o propósito de empregar o RMF em diversas áreas, inclusive como fonte de matéria-prima para a construção civil. Carmignano *et al* (2021) realizou um levantamento de trabalhos em alguns países produtores de RMF, e constatou que a caracterização físico-química destes rejeitos por diferentes técnicas, como FRX (fluorescência de raio X), DRX (difração de raio X), Mössbauer espectroscopia e granulometria, indicam que a composição da cauda fina é de hematita/goethita ($\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeOOH}$) variando de 10 a 55 %; Quartzo (SiO_2) de 18 a 65 %; e Óxido de alumínio (Al_2O_3) até 15 % com partículas de 6 a 40 μm , enquanto o rejeito grosso apresenta partículas de 40 a 150 μm com a composição de 8 a 48 % $\text{Fe}_2\text{O}_3 / \text{FeOOH}$, 30 a 90 % SiO_2 e Al_2O_3 até 20 %.

Algumas pesquisas realizadas com o RMF produzido em Minas Gerais foram relacionadas abaixo. Estes trabalhos apresentam a caracterização físico-química, no qual será usada como base para comparação da composição do RMF estudado nesta pesquisa, por se tratar de rejeitos da mesma região.

Silva *et al* (2019) apresentou um geopolímero a base de RMF como material precursor primário, e a adição de 0, 10 %, 20 % e 30 % de resíduos de lã de vidro. Também foram aplicados três tempos de moagem diferentes e três concentrações de solução de hidróxido de sódio (NaOH). O rejeito utilizado foi

coletado em uma barragem localizada na cidade de Ouro Preto, MG. Sua composição consistiu em 48,9 % de Fe_2O_3 ; 40,09 % de SiO_2 ; 8,7 % de Al_2O_3 e 1,9 % de outros componentes.

Machado (2018), produziu blocos a partir da mistura de carbonato de sódio (Na_2CO_3) (5 % em peso), água (13 % em peso) e rejeito coletado na Barragem de Candonga. Estes blocos foram prensados e tratados termicamente a 700°C . Os ensaios realizados mostraram que o rejeito é constituído, percentual em peso, de 77,8 % de SiO_2 , 11,4 % de Fe_2O_3 , 10,7 % de FeOOH , 0,1 % de argilas (principalmente caulinita) e matéria orgânica, cuja maior parte pode ser removida por catação.

Bezerra (2017) caracterizou a lama de RMF, proveniente do processo da deslamagem da barragem de Conceição no município de Itabira - MG, e avaliou a influência dela nas propriedades físico-químico-mecânica das pastas de cimento. Para determinação da composição química da lama de rejeito de Conceição II foi utilizada a técnica de FRX onde foi obtido o seguinte resultado: 31,5 % de SiO_2 em massa, 50,6 % de Fe_2O_3 , 4,2 % de FeOOH , 9,5 % de biotita, 1,5 % de clorita e 1,3 % de talco.

Andrade (2014) analisou rejeitos de quatro barragens de minério de ferro localizadas na região conhecida como Quadrilátero Ferrífero MG para o emprego na construção civil. As análises mineralógicas para os rejeitos brutos demonstraram uma composição básica de SiO_2 variando de 27,40 % a 48,20 %, Fe_2O_3 de 29,60 % a 46,4 %, FeOOH de 13,50 % a 21,40 %, e caulinita 2,80 % a 6,10 % e outros minerais como a gibsita em menores proporções. Por fim, as análises da microscopia eletrônica de varredura (MEV) corroboraram todas as análises supracitadas, em que se podem visualizar amostras heterogêneas do ponto de vista de granulometria, mas com composição mineralógica bastante semelhantes.

Pedroso *et al* (2020a) e Pedroso *et al* (2020b) utilizaram o rejeito de minério de ferro coletado nas proximidades do rompimento da Barragem de Fundão em Mariana MG, associado a outros tipos de resíduos industriais, para desenvolver compósitos que podem ser utilizados para produção de tijolo ecológico. Foi observado que as amostras do rejeito de minério de ferro dos dois trabalhos são compostas basicamente por 48,1 % de Fe_2O_3 ; 41,9 % de SiO_2 ; 6,3 % de Al_2O_3 ; 0,2 % de K_2O e 0,2 % de CaO .

A Tabela 1 mostra a composição química das amostras de RMF coletadas em barragens de empresas de Minas Gerais, apresentadas nas referências anteriormente citadas.

Tabela 1: Composição química das amostras de RMF de Minas Gerais

Bibliografia	Composição do RMF							Finalidade
	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	FeOOH	K ₂ O	CaO	Outros	
ANDRADE (2014)	27,40% a	29,60% a	2,80% a	2,80% a	—	—	—	Emprego na construção civil
BEZERRA (2016)	48,20%	46,4%	6,10%	6,10%	—	—	2,80%	Adição em pastas de cimento
MACHADO (2018)	31,50%	50,60%	9,50%	4,20%	—	—	0,05%	Blocos tratados termicamente a 700°C
MARTINS, SANTOS (2018)	7,12%	92,32%	—	—	—	—	0,56%	Tijolo ecológico
PEDROSO (2020) ^a	48,10%	41,90%	6,30%	—	0,20%	0,20%	0,01%	Compósito podendo ser usado em Tijolo ecológico e Paver
PEDROSO (2020) ^b	48,10%	41,90%	6,30%	—	0,20%	0,20%	0,01%	Compósito podendo ser usado em Tijolo ecológico e Paver
SILVA (2019)	40,09%	48,90%	8,70%	—	—	—	1,90%	Geopolímero a base de RMF e residuo de Lã de vidro

Fonte: autora

A partir da Tabela 1, observou-se que o RMF produzido em empresas do estado de Minas Gerais é composto por Fe₂O₃ variando de 11,4 % a 92,32 %; SiO₂ de 7,12 %; a 77,8 %; Al₂O₃ de 0 % a 8,7 % e FeOOH de 0 % a 21,40%. Além disso, para utilização do RMF como material de construção, na maioria das pesquisas, foi necessário utilizar algum tipo de correção na sua composição, como o acréscimo de outros materiais ou correção da granulometria, a fim de melhorar a composição do RMF e favorecer as reações na produção dos materiais. Silva *et al* (2019) utilizou a lã de vidro para melhorar a composição do RMF utilizado, além de calcinar e moer a mistura destes dois materiais.

Em outros trabalhos, Kuranchie, Shukla e Habibi (2016) utilizou apenas o processo de moagem do RMF para a produção de tijolos crus e Elói (2020) acrescentou sílica ativa ao RMF para produção de um aglomerante álcali ativado.

4.2 PRODUÇÃO DE TIJOLOS SUSTENTÁVEIS PARA A CONSTRUÇÃO CIVIL

Existem algumas maneiras de se produzir tijolos sustentáveis para utilização na construção civil, e a sua produção a partir da terra crua é uma delas, pois se trata de uma técnica bem simples, podendo ser executadas facilmente sem mão de obra qualificada com materiais locais. Vilela e Sant'anna (2019), afirmam que as principais técnicas que empregam a terra como matéria-prima para produção de tijolos são: tijolos de adobe e blocos de terra comprimida (BTC).

Segundo a NBR 16814 (ABNT, 2019) o Adobe é um tijolo de solo areno-argiloso, produzido através da mistura artesanal de solo e água até se tornar uma pasta em estado plástico firme (barro), sendo moldado em formas retangulares, que logo em seguida, é desmoldado e colocado para secar naturalmente. No entanto, também pode ser obtido por meios mecânicos de fabricação, apropriando-se de processos semi-industriais, conhecidos como adobes mecânicos (GONÇALVES; GOMES, 2012).

O BTC, segundo Pacheco-Torgal e Jalali (2010), é uma evolução do adobe por estabilização do solo utilizando meios mecânicos, consistindo na prensagem do solo confinado num molde, permitindo obter pequenos blocos de terra prensada, mais resistentes e duráveis em relação ao adobe. A NBR 8491 (ABNT, 2012a) relata que a utilização de estabilizadores químicos, como o cimento, também melhora a resistência mecânica dos tijolos. Assim surgiu outra técnica de produção de tijolos de solo, o tijolo de solo-cimento, também conhecidos como tijolos ecológicos, que é produzido através de uma mistura homogênea de solo, cimento Portland e água, prensados em uma prensa específica que pode ser manual ou elétrica, e secos naturalmente.

No entanto, a utilização do solo como matéria-prima, mesmo sem o processo de queima, nem sempre é a opção mais sustentável, pois ao ser explorado de forma excessiva pode causar danos ambientais. Lingling *et al* (2005) aponta que em países como a China, a argila foi proibida na indústria de fabricação de tijolos de qualquer tipo pelo governo, desde o início deste século devido à necessidade de economizar terras cultiváveis, sendo incentivado o uso de resíduos de industriais para esta finalidade. Kumar (2015) relata que na Índia, estima-se que 175 milhões de hectares de terra estejam degradados, e a

indústria de tijolos de argila queimada produz mais de 360 bilhões de tijolos anualmente com forte impacto adverso na erosão do solo e emissões não processadas, sendo essencial repensar as alternativas de matérias-primas da fabricação de tijolos, pois essa quantidade de tijolos consome 15.500 hectares de terra.

Gomes (2022) avaliou a utilização de rejeito da mineração de ouro, como matéria-prima principal, na composição de tijolos tipo solo-cimento. Para tal, foram preparadas misturas com traços cimento CII-Z-32 (1): rejeito (5-10): solo (0-5) e submetidas à caracterização física, química e mineralógica, além de parâmetros mecânicos dos tijolos. Os resultados que alguns traços alcançaram foram satisfatórios, como o traço 1:5:5, que alcançou resistência a compressão de 3,1 MPa e absorção de água de 17,0 %, compatíveis com a exigência de norma.

Sore *et al* (2018) usou geopolímeros a base de metacaulim e solução de hidróxido de sódio usados em tijolos de solo compactado, com o objetivo de estudar aglutinantes menos poluentes que o cimento em Burkina Faso. Os traços produzidos foram: 5 %, 10 %, 15 % e 20 % de polímero, para cada fração de solo, sendo comparados com tijolos compactados contendo 8 % de cimento Portland e tijolos sem estabilizantes. Após cura de 14 dias para os corpos de prova sem estabilizantes e tijolos geopolimerizados e de 21 dias para tijolos estabilizados com cimento Portland, eles foram submetidos a diversos ensaios de caracterização para avaliação de suas propriedades físico-mecânicas e térmicas. Os resultados mostraram que a geopolimerização melhorou significativamente o desempenho mecânico e deu-lhes propriedades térmicas muito semelhantes às de blocos não estabilizados. Para um teor de geopolímero de 15 %, esses materiais exibiram propriedades comparáveis às dos tijolos estabilizados com cimento Portland, em particular no que diz respeito à estabilidade em água.

Bertelsen *et al* (2021) usou as fibras artificiais compostas por rede de pesca usadas para reduzir a formação de rachaduras e melhorar o desempenho mecânico em tijolos de adobe na Dinamarca. Utilizou-se de 1 a 5 % de fibras por peso de tijolo. Realizou-se a caracterização química e geotécnica das matérias-primas utilizadas, e uma fração de cascalho mais grossa para estabilização granulométrica. Investigou-se também as propriedades mecânicas e

deformações de retração de secagem restrita em espécimes de adobe fabricados em escala de laboratório. A formação de fissuras devido à retração contida foi analisada por meio de uma técnica de correlação de imagem digital (DIC), que permite o monitoramento detalhado e contínuo e a quantificação das deformações superficiais. A partir dos testes mecânicos, a adição das fibras resultou em melhor tenacidade à flexão, resistência à flexão e resistência à compressão. Uma análise detalhada usando a técnica DIC revelou que a adição de fibras reduz significativamente e quantitativamente o grau de rachadura por contração.

Reis (2020) estudou o comportamento físico-mecânico de tijolos de solo-cimento confeccionados com a adição de rejeitos de mineração de quartzito oriundos da cidade de Alpinópolis MG. A metodologia adotada por ele incluiu a caracterização geotécnica das amostras de solo, dos rejeitos de quartzito e das misturas destes materiais visando a produção de tijolo. A definição das dosagens dos traços, foi realizada por meio de uma análise estatística de experimentos através de um planejamento fatorial 3^2 obtendo o traço 1:10 com adição de 30 % de quartzito como traço ótimo. Foi realizada a caracterização físico-mecânica dos tijolos, por meio dos ensaios de resistência à compressão simples e absorção de água, ambos aos 7 e aos 28 dias de idade. Os resultados dos ensaios de resistência à compressão e absorção de água indicaram a possibilidade do uso do rejeito de quartzito sem o comprometimento das propriedades mecânicas relacionadas à resistência e à absorção de água dos tijolos solo-cimento.

Mendes *et al* (2019) analisou a viabilidade técnica de substituição de parte do solo por rejeito magnético gerado no processamento de rocha fosfática na produção de tijolos solo-cimento. O material apresentou 100 % do material passante na peneira de abertura 4,75 mm, e aproximadamente 7 % passam na peneira de abertura 0,075 mm. Foram realizados ensaios de resistência à compressão, absorção de água e massa específica. Os resultados de resistência mecânica dos tijolos produzidos foram superiores em 24,4 % aos tijolos de controle, para a massa específica foi 22,5 % superior e absorção com 19,2 %*. Portanto, este estudo preliminar permite concluir que é possível a substituição parcial do solo por rejeito magnético na produção de tijolos solo-cimento, obtendo características semelhantes ou melhores.

Ramos Filho (2021) realizou um estudo onde o solo e a água do tijolo ecológico foram substituídos por subprodutos do extrativismo mineral e vegetal, como resíduo de scheelita, pó de pedra, manipueira (água do processamento da mandioca) e adição de cimento como aglomerante no Rio Grande do Norte. Foi realizada a caracterização física, química e mineralógica dos resíduos e em seguida o ensaio de compactação para se avaliar a melhor combinação da mistura dos subprodutos minerais. Foram realizados ensaios tecnológicos, em corpos de prova cilíndricos com adição de cimento e/ou cal hidratados com água, obtendo-se resultados satisfatórios para as formulações com cimento. Essas formulações com cimento foram utilizadas para produção dos tijolos, tendo adição de manipueira, em substituição à água, em 11 % com relação à massa total dos resíduos sólidos. Os ensaios tecnológicos dos tijolos apresentaram resultados satisfatórios, justificados pelo elevado empacotamento entre os minerais e pelas propriedades da manipueira, sendo observadas fases cimentícias nas análises de MEV e DRX.

Outro resíduo industrial que pode substituir o solo em tijolos ecológicos é o RMF. Pedroso *et al* (2020a) mostra que a composição química do RMF é semelhante à de argilas e pode ser utilizado como matéria-prima na fabricação de tijolos, e propriedades mineralógicas, físicas e mecânicas semelhantes à um aglomerante tendo potencial para ser utilizado na produção de cimento e compósitos cimentícios, e a disponibilidade e baixo custo tornam atraente a utilização deste rejeito.

Yellishetty (2008) avaliou o efeito do tamanho das partículas destes rejeitos para adequação como matéria-prima nos processos de fabricação de tijolos de solo-cimento, e concluiu que partículas com diâmetros inferiores a 4,75 mm eram adequados para substituir o solo. A classificação do tamanho de partícula nesses resíduos sugere que os resíduos da mina contêm rocha de granulação grossa, areia, silte e argila. De acordo com os resultados obtidos, os valores médios de resistência à compressão uniaxial de corpos de prova após 28 dias de cura foram da ordem de 21,93 MPa e 19,91 MPa com agregado de mina e agregado de granito, respectivamente. Por meio de testes de procedimento de lixiviação de toxicidade, o estudo também confirmou que o ligante hidráulico impede a mobilidade de metais pesados desses resíduos.

Assim, observou-se que é possível manter, e até mesmo melhorar as

propriedades dos tijolos a base de solo, estudando-se suas características físicas, microestruturais e químicas, tornando possível obter importantes informações sobre o material utilizado, o que possibilita uma melhor tomada de decisões quanto ao método de produção a ser utilizado, e o melhor método de estabilização.

4.3 PRODUÇÃO DE TIJOLOS A BASE DE RMF

Segundo o Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT, 2019), para cada tonelada de minério de ferro processado no Brasil são gerados cerca de 400 kg de RMF. Diante disso, a produção de tijolos a base desse rejeito se torna viável, pois terá abundância de matéria-prima. Alguns estudos referentes a este assunto serão apresentados a seguir.

Pedroso *et al* (2020a) desenvolveu novos compósitos para a construção civil, utilizando como matérias-primas o RMF, resíduos de concreto, resíduos da produção da cal e resíduos da produção de celulose, todos esses com elevada alcalinidade, sobretudo o RMF proveniente da barragem denominada “Fundão” do município de Mariana MG. Realizou-se os ensaios de DRX, MEV e EDS para explicar o considerável ganho de resistência, acompanhando as mudanças das propriedades mecânicas, estruturas morfológicas e os processos físico-químicos de formação de novas estruturas. Foram estudadas 19 composições para compor a proporção ideal de cada componente. A partir daí, confeccionou-se um tijolo maciço e um paver ecológico. Através da pesquisa constatou-se que foi possível neutralizar a alcalinidade, obtendo materiais não perigosos e ambientalmente corretos, tornando o reaproveitamento uma excelente ideia para que os materiais de construção possam ser de fato executados.

Pedroso *et al* (2020b) também confeccionou um tijolo e um paver ecológico através da mistura de RMF, de lodo de anodização de alumínio, de resíduo de concreto e de resíduo da produção da cal. O RMF usado por ela foi coletado nas proximidades da área do rompimento da Barragem de Fundão em Mariana MG. Para isso, foram pesquisadas as mudanças nas propriedades mecânicas e nas estruturas morfológicas durante os períodos de cura de: 3, 7, 14, 28, 60 e 90, 180, 360 e 720 dias. Foram elaboradas 17 composições variando os teores de resíduos, para compor o compósito estudado. Os resultados dos

ensaios demonstraram que a utilização destes resíduos para a produção do tijolo e do paver é viável, sendo importante conhecer as características desses insumos, que por se tratar de resíduos industriais, podem sofrer alterações físicas e químicas.

Bezerra *et al* (2019) produziu tijolos prensados utilizando RMF e cinza de eucalipto, onde foram desenvolvidas nove pastas com proporções diferentes dos dois resíduos, e utilizando como ativadores o hidróxido de sódio (Na_2O) e o silicato de sódio (Na_2SiO_3). Como resultado observou-se pela espectrometria FTIR a reação entre os resíduos industriais. Em relação à resistência à compressão, ele concluiu que oito formulações têm potencial para aplicação em blocos compactados pois a resistência mínima para aos 28 dias é superior a 2 Mpa e que o material álcali ativado pode ser utilizado como blocos compactados para a alvenaria de vedação, de forma a contribuir para o desenvolvimento de materiais mais ecológicos, mitigando os impactos ambientais causados pela disposição e transformando os resíduos sólidos industriais em produtos com valor agregado.

De Mantilla *et al* (2013) avaliou o desempenho de paredes executadas com tijolos de RMF estabilizados com cimento a uma proporção de 10 %, quando solicitadas à compressão simples. O rejeito utilizado foi doado por uma empresa de mineração de Mariana MG, e apresentava granulometria que permitia classificá-lo como rejeito grosso, com porcentagens correspondentes de 44 % de areia e 54 % de silte; e rejeito fino, com 14 % de areia e 79 % de silte, apenas para diferenciá-lo e compor duas amostras. Os tijolos apresentaram alta resistência à compressão média de 14,57 MPa, com coeficiente de variação em torno de 13,6 %.

Kumar *et al* (2017) produziu tijolos a partir da mistura de RMF, areia de escória, cinzas volantes e escória de alto-forno granulada moída (GGBS). Essa mistura foi estabilizada com hidróxido de sódio (NaOH), silicato de sódio (Na_2SiO_3) e água. Os materiais foram caracterizados e a partir daí foram produzidos tijolos com seis 6 traços diferentes. Eles foram curados, e testes resistência à compressão e absorção de água foram realizados em 7, 14 e 28 dias. Os resultados ficaram variaram de 18,38 MPa a 25,3 MPa aos 28 dias, e 2,83 % a 6,67 % de absorção de água. O RMF utilizado na análise foi adquirido de Bellary, uma importante cidade mineradora do estado de Karnataka na Índia.

Martins e Santos (2018) realizaram o estudo da viabilidade técnica para a fabricação do tijolo ecológico com incorporação do RMF e aplicá-lo na construção de casas populares em comparação aos tijolos cerâmicos. Para a fabricação dos tijolos ecológicos, foi substituído o solo natural pelo RMF. Foram utilizados 10 % de cimento referentes à proporção em rejeito, com isso, o traço estabelecido foi de 1:10. Para a realização desse estudo, as amostras de rejeito utilizadas foram obtidas da atividade mineradora da região do Quadrilátero Ferrífero MG, especificamente na cidade de Igarapé. Foram realizados ensaios de caracterização do material e ensaios resistência à compressão e absorção de água. Os resultados obtidos foram de 20,16 % de absorção média de água e 2,23 MPa de resistência média aos 28 dias.

Weishi *et al* (2018) discutiu a preparação de tijolos ecológicos usando RMF com baixo teor de sílica como matéria-prima principal, acelerador de endurecimento de trietanolamina e um agente de impermeabilização de emulsão de ácido esteárico também são empregados como componentes menores. Ele avaliou o efeito do conteúdo do agente impermeabilizante na resistência à compressão e resistência à água dos produtos resultantes. Também avaliou a composição da fase, a estrutura química e a microestrutura do rejeito e do tijolo. Os resultados obtidos variaram de 23,7 MPa a 32,4 MPa de resistência média aos 28 dias e 2,08 % a 7,91 % de absorção de água. Os rejeitos de ferro eram da usina Jinshandian, de *Wuhan Iron and Steel Corp*, na China.

Kuranchie, Shukla e Habibi (2016) apresentaram um estudo sobre fabricação de tijolos ecológicos, a partir dos rejeitos produzidos nas minas de minério de ferro da Austrália Ocidental (WA). Foi utilizado o processo de geopolimerização, onde uma solução de silicato de sódio foi adicionada aos RMF como um ativador para a formulação dos tijolos de geopolímero. Os principais parâmetros analisados foram o teor de silicato de sódio para solução, tempo de pega inicial e temperatura de cura. Através dos resultados obtidos, constatou-se que os parâmetros de base ideais para a produção dos tijolos de geopolímero são teor de solução de silicato de sódio de 31 %, tempo de pega inicial de 15 min e temperatura de cura de 80 °C.

A Tabela 2 apresenta um resumo das referências estudadas neste tópico, onde são apresentados os principais dados da produção de tijolos ecológicos à base de RMF realizada.

Tabela 2: Resumo dos materiais e porcentagens utilizadas nas referências pesquisadas.

Referências	Materiais	Estabilizante	Traços Utilizados	Melhor Traço
BEZERRA (2019)	Cinza de cavaco de eucalipto (CCE) e Rejeito de minério de ferro (RMF).	SiO ₂ /Na ₂ O; ativador; precursor plastificante.	Foram elaboradas 9 composições: RMF= 30 %, 50 % e 70 %; CCE=70 %, 50 % e 30 %; SiO ₂ /Na ₂ O =1,00; 1,55 e 1,85; Ativador/ Precursor plastificante =2 %.	Todas as composições exceto para aquela com 1,00 SiO ₂ / Na ₂ O.
DE MANTILLA (2013)	Rejeito de minério de ferro (RMF) Fino e Rejeito de minério de ferro (RMF) Grosso.	Cimento Portland - CP V – ARI.	Uma.	75 % de rejeito grosso e 25 % de rejeito fino 10 % de Cimento.
KUMAR (2017)	rejeitos de minério de ferro (RMF), areia de escória (AE), Cinzas volantes (CV) e escória de alto-forno granulada moída (EAM).	hidróxido de sódio (NaOH), silicato de sódio (Na ₂ SiO ₃).	6 composições: RMF= 20 %, 30 % e 40 % e AE = 20 %, 30 % e 40 %, CV= 15 % e EAM= 15 %. 10 % da solução de (NaOH) para (Na ₂ SiO ₃) = 2,5.	20 % RBM; 40 % AE; 15 % CV; 15 % EAM; 10 % Geopolímero; 30 % RBM; 30 % AE; 15 % CV; 15 % EAM; 10 % Geopolímero.
MARTINS, SANTOS (2018)	rejeitos de minério de ferro (RMF).	Cimento Portland - CP V – ARI.	1: 10 (relação cimento-rejeito).	1: 10 (relação cimento-rejeito).
PEDROSO (2020)a	Rejeito de Minério de Ferro (RMF); Resíduo de Concreto (RC); Resíduo da Produção da Cal (RPC); Resíduo da Produção de Celulose (RPCEL).	-----	Foram elaboradas 19 composições: RMF=10 % a 40 %; RC=25 % a 30 %; RPC=15 % a 25 %; RPCEL=10 % a 40 %.	40 % de RMF, 10 % RPCEL, 25 % RC e 25 % RPC.
PEDROSO (2020)b	Rejeito de Minério de Ferro (RMF); Resíduo de Concreto (RC); Resíduo da Produção da Cal (RPC) Lodo de anodização de alumínio (LAA).	-----	Foram elaboradas 17 composições: RMF de 10 a 40 %, IAA de 10 a 40 %, RC de 25 a 35 % e RPC de 15 a 25 %.	2 composições: 10 % de RMF, 40 % de LAA, 30 % de RC e 20 % de RPC, e 40 % de RMF, 10 % de LAA, 30 % de RC e 20 % de RPC.
WEISHI <i>et al</i> (2018)	rejeitos de minério de ferro (RMF); Agente de cura composto por: Cinza volante, Cal e gesso na proporção de 63: 29: 8 calcinados a 900° por 90 min.	trietanolamina e emulsão de ácido esteárico.	O teor de rejeito e agente de cura foi de 75 % e 25 %, para um teor de 0,3 % de trietanolamina e emulsão de ácido esteárico.	O teor de rejeito e agente de cura foi de 75 % e 25 %, para um teor de 0,3 % de trietanolamina e emulsão de ácido esteárico.
KURANCHIE, SHUKL e HABIBI (2016)	rejeitos de minério de ferro (RMF).	solução de silicato de sódio (Na ₂ SiO ₃) contendo: 8,9 % de Na ₂ O, 28,7 % de SiO ₂ e 62,4 % de H ₂ O em peso.	31 % de solução e RMF	31 % de solução e RMF.

Fonte: autora

Ao observar a Tabela 2, foi possível perceber que na maioria dos estudos realizados, houve o acréscimo de outros materiais ao RMF, com finalidade de corrigir os traços definidos e favorecer a composição química que melhor se enquadre ao estabilizante utilizado. Também se observou que a utilização de ativadores alcalinos e ácidos foi maior que os cimentícios, se destacando o uso do NaOH e do Na_2SiO_3 , principais ativadores utilizados nos processos de geopolimerização.

A Tabela 3 apresenta a composição química dos rejeitos utilizados por cada autor, juntamente com os ensaios de caracterização física, química e mineralógica dos rejeitos e os ensaios realizados com os tijolos apresentados em cada pesquisa.

Ela mostrou que o RMF utilizado nas pesquisas para produção de tijolos eram compostos principalmente por Fe_2O_3 variando de 0,56 % a 92,32 %; SiO_2 de 7,12 % a 57,31 %; Al_2O_3 de 0 a 16,32 %; CaO de 0 a 13,02 %, entre outros. Isso mostra que eles são compostos principalmente por hematita e quartzo e alumina.

Além disso, os principais ensaios realizados para a Caracterização dos Materiais foram Composição Granulometria; Difração de Raios X (DRX); Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Fluorescência de Raios X (FRX) entre outros, isso comprova que é fundamental conhecer a composição microestrutural do material para desenvolver uma melhor metodologia de produção de tijolos, pois como visto nos trabalhos estudados, a composição do rejeito estudado pode variar devido ao tipo de processo de produção do minério, a localização onde foi produzido entre outros.

Também foram realizados ensaios de resistência a compressão, absorção de água, expansão linear, durabilidade, entre outros com os tijolos e esses fatores são decisivos para a aceitação do tijolo como material de construção, pois e através deles será possível analisar a qualidade dos tijolos, e investigar sua aplicabilidade.

Tabela 3: Ensaio realizados e composições dos RMF utilizados nas pesquisas.

Referências	Ensaio realizados		Composição do RMF utilizado
	Ensaio de caracterização da matéria prima	Ensaio realizados com o tijolo	
BEZERRA <i>et al</i> (2019)	CG; FRX; MEV; EDS; DRX; FTIR.	Rcom.	Fe ₂ O ₃ = 65.78 %, SiO ₂ =22.3 %, Al ₂ O ₃ =4.25%.
DE MANTILLA <i>et al</i> (2013)	CG	Rcom.	Granulometria: Grosso=44 % de areia; 54 % de silte, Fino= 14 % de areia e 79 % de silte
KUMAR <i>et al</i> (2017)	W%; MEs; FRX; MEV; EDS; DRX.	Rcom; AAI; TQ; TDim; TEf; TSol; Dur.	SiO ₂ =30.73%; Fe ₂ O ₃ = 0.56%; Al ₂ O ₃ =16.32%; CaO= 38.47%; MgO =6.41%.
MARTINS e SANTOS (2018)	W%; MEV; DRX.	Rcom; AAI; Dur.	SiO ₂ = 7,12%; Fe ₂ O ₃ =92,32%; O ₃ =0,41 e outros= 0,15 %
PEDROSO <i>et al</i> (2020a)	W%; CG; MEs; Mpul; Ipoz; PH; FRX; MEV; EDS; DRX.	Rcom; CRa; AAI; Cexp.	Fe ₂ O ₃ = 48,1%; SiO ₂ = 41,9%; Al ₂ O ₃ = 6,3%; K ₂ O= 0,2% eCaO =0,2%.
PEDROSO <i>et al</i> (2020b)	W%; CG; MEs; Mpul; Ipoz; PH; FRX; MEV; EDS; DRX.	Rcom; CRa; AAI; Cexp.	Fe ₂ O ₃ = 48,1%; SiO ₂ = 41,9%; Al ₂ O ₃ =6,3%; K ₂ O= 0,2% eCaO =0,2%CaO =0,2%.
WEISHI <i>et al</i> (2018)	CG; MEV; DRX; FTIR.	Rcom; Cra.	Fe ₂ O ₃ = 11,23%; SiO ₂ = 34,52%; Al ₂ O ₃ =8,35%; MgO 8,05%, CaO= 13,02% e S=4,32%.
KURANCHIE e SHUKLA e HABIBI (2016)	CG; FRX; MEV; DRX.	Rcom; AAI; Cexp.	Fe ₂ O ₃ = 25,13%; SiO ₂ = 57,31 %; Al ₂ O ₃ =9,58; CaO= 0,03% MgO=0,08%, SO ₃ =0,16%, outros =0,69%.

Legenda: %W= Teor de umidade; CG=composição Granulométrica, MEs= Massa Específica Real; MPul= Material Pulverulento; Ipo=Índice Pozolanidade; PH= pH dos Resíduos; FRX= Fluorescência de Raios; MEV=Microscopia Eletrônica de Varredura; EDS= Microanálise Química pelo Método de Dispersão de Energia; DRX= Difração de Raios-X; FTIR= infravermelho por transformada de Fourier; RCom=Resistência à Compressão Axial; CRa=Coefficiente de Resistência à Água; AAI= Absorção de Água por Imersão; CExp=Coefficiente de Expansão Linear; TQ=Teste de Queda; TDim=Teste de dimensionalidade; TEf=Teste de Eflorescência; TSol=Teste de solidez e Dur=Durabilidade.

Fonte: autora

4.4 ESTABILIZAÇÃO DO RMF ATRAVÉS DA ATIVAÇÃO ALICALINA PARA PRODUÇÃO DE TIJOLOS

Ativação alcalina é um método alternativo que pode ser utilizado para a produção de tijolos, entre outros materiais de construção, que vem despertando o interesse de pesquisadores, pelos significativos benefícios ambientais e ecológicos, comparados a utilização de cimento Portland, associados ao

processo que pode ser definido como a reação sofrida entre minerais de aluminossilicato sólidos, com hidróxido alcalino aquoso altamente concentrado ou solução de silicato (KURANCHIE; SHUKLA; HABIBI, 2016).

Ativação alcalina é um termo aplicado à reação de um aluminossilicato sólido chamado de "precursor" sob condições alcalinas, induzidas pelo "ativador alcalino", para produzir um ligante endurecido (PROVIS, 2018). Esse processo químico pode ser chamado também de geopolimerização, onde determinadas estruturas parcialmente ou totalmente amorfas se transformam em estruturas com propriedades cimentícias. O geopolímero, é definido como a síntese dos polímeros orgânicos por um meio altamente alcalino e usado como materiais cimentícios suplementares (CASTRO 2015). Segundo Fernández-Jiménez et al. (2006), o precursor, que é rico em sílica e alumina (com o maior grau de amorfização); é baseado em metais alcalinos (geralmente sódio ou potássio) ou solução de ativação alcalino-terrosa de metal (geralmente cálcio).

As soluções de NaOH ou de potássio (KOH) de alta concentração são muito utilizadas como ativador alcalino, com ou sem adições de silicatos de sódio ou potássio (PROVIS, 2018). Quando é utilizado um ativador alcalino líquido para a produção de confecção de material álcali ativado, o processo é denominado de *two part mix*. Quando são utilizados ativadores alcalinos sólidos, que são misturados ao precursor antes de receberem adição de água, são chamados de *one part mix* (LUUKKONEN et al., 2018). O grupo dos ligantes álcalis ativados pode ser dividido em dois grupos principais, sendo eles: o grupo com materiais de baixo teor de cálcio, a base de aluminossilicatos, e ativados normalmente com hidróxidos e silicatos, que são conhecidos como geopolímeros, e o outro grupo com precursores com a presença de SiO₂, CaO e Al₂O₃, sendo rico em cálcio (LONGHI, 2015).

De acordo com Palomo et al. (2014) os processos de ativação se dividem em três categorias: Ativação de materiais com teor alto de cálcio e silício, onde o principal produto da reação é um gel C-S-H (hidrato de silicato de cálcio), semelhante ao gel obtido na hidratação do cimento Portland, que ocupa uma pequena porcentagem de Al em sua estrutura (gel C-A-S-H); ativação de materiais compostos principalmente de alumínio e silício onde materiais com baixo teor de CaO, como metacaulim ou cinzas volantes de usinas a vapor movidas a carvão, neste caso, condições de trabalho mais agressivas são

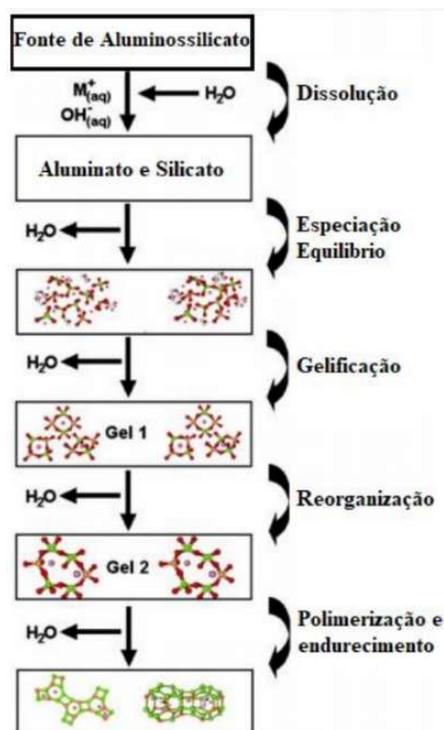
necessárias para iniciar as reações (meio altamente alcalino e temperaturas de cura de 60-200°C) formando um polímero alcalino inorgânico tridimensional, um gel N-A-S-H (geopolímero) que pode ser considerado um precursor de zeolitas; e um procedimento de ativação alcalina mista, uma combinação dos dois anteriores. O produto, neste caso, é um novo tipo de ligante conhecido como cimento alcalino híbrido, formado a partir da ativação alcalina de materiais com teores de CaO, SiO₂ e Al₂O₃ > 20 %.

Pinto (2004) explica que processo de ativação alcalina ocorre por fenômeno exotérmico devido a poli condensação dos compostos dissolvidos, com a ativação da sílica e da alumina presente no material em uma solução alcalina fortemente concentrada. Segundo Jaskulski (2022), Víctor Glukhovsky (1959) propôs um modelo conceitual geral para a ativação de materiais alcalinos, com ausência de Ca²⁺, composto por três fases: destruição-coagulação onde ocorre a dissolução de alumino-silicatos (monômeros) através de hidrólise alcalina gerando uma solução supersaturada que forma um gel; coagulação-condensação onde há a precipitação do gel e a perda de água; e condensação-cristalização onde ocorre a organização dos produtos de reação em uma estrutura cristalina tridimensional, ou seja, a polimerização.

Posteriormente, Duxson *et al.* (2007), ampliou essa teoria proposta por Glukhovsky, acrescentando conhecimentos sobre a síntese de zeólitas exclusivamente para ativação das cinzas volantes. Na Figura 1, é possível observar um modelo de reação muito simplificado para o processo de geopolimerização dos alumino silicatos.

Fracaro (2022) analisou a eficiência da estabilização do RMF através da ativação alcalina a base de metacaulim, silicato de sódio e hidróxido de sódio pelo método de “*two parts*”. Para isso, buscou-se a dosagem ótima do precursor e ativadores, variando as razões de SiO₂/Al₂O₃ entre 2,5 a 4,5, e de Na₂O/SiO₂ entre 0,3 a 0,5. A dosagem foi otimizada, sendo utilizados o Si/Al de 3,41 e Na/Si de 0,48. De acordo com o modelo estatístico utilizado, a resistência à compressão do RMF + geopolímero atinge um valor de 0,92 MPa em 24 horas. Quando testado experimentalmente o valor de resistência a compressão simples foi de 0,97 Mpa em 24 horas. Assim comprovou-se a eficiência da estabilização observando um aumento na resistência proporcionado pela cimentação do geopolímero.

Figura 1: Modelo conceitual simplificado da geopolimerização de aluminosilicatos.



Fonte: DUXSON et al., 2007

Já Jaskulski (2022) analisou o comportamento mecânico de um sistema de estabilização de RMF submetido a ativação alcalina pelo método “*One-Part*” utilizando como precursor o metacaulim ativado por hidróxido de sódio e silicato de sódio. Utilizando métodos de otimização foi capaz de prever os valores máximos de resistência à compressão das amostras consideradas. Ao otimizar o ligante alternativo obteve-se uma relação de 3,39 para a variável $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ e 0,49 para $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$. O comportamento tensão-deformação da amostra com dosagem otimizada foi obtido através de ensaios triaxiais, os quais revelaram um comportamento característico de solos estruturados, com valores de pico de $45,6^\circ$, com pico de 157,5 kPa e última de 42° .

5 METODOLOGIA

A metodologia utilizada para o desenvolvimento deste trabalho consistiu na investigação e escolha dos materiais para a produção de protótipos que representassem as principais características para a produção de tijolos de RMF.

Para isso, foi necessário a caracterização do RMF através de diversos ensaios, para identificar sua composição, suas características e a melhor forma de produzir os protótipos para posteriormente testá-los com ensaios de resistência à compressão e absorção de água.

5.1 MATERIAIS

O principal material utilizado na pesquisa foi o RMF, oriundo do rompimento da barragem de Fundão. Este RMF foi coletado na comunidade de Gesteira pertencente à cidade de Barra Longa, MG. A estabilização do tijolo prensado foi feita através da ativação alcalina, onde foi utilizado o hidróxido de sódio e o metassilicato de sódio.

Como o trabalho busca a produção de tijolos sustentáveis, procurou-se utilizar produtos mais acessíveis, que pudessem ser encontrados facilmente em mercados, ou lojas de materiais agrícolas da região. Assim, utilizou-se o hidróxido de sódio em escamas (padrão analítico, grau de pureza > 96/98 %) e o metassilicato de sódio ($\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_2$) em pó com cristais finos (relação $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ igual a 0,994).

A partir dos resultados obtidos da composição química do RMF utilizado na pesquisa, foi observado que este material pode ser usado para a produção de tijolos sem adição de outros materiais que favoreçam a ativação do rejeito e a estabilização do tijolo.

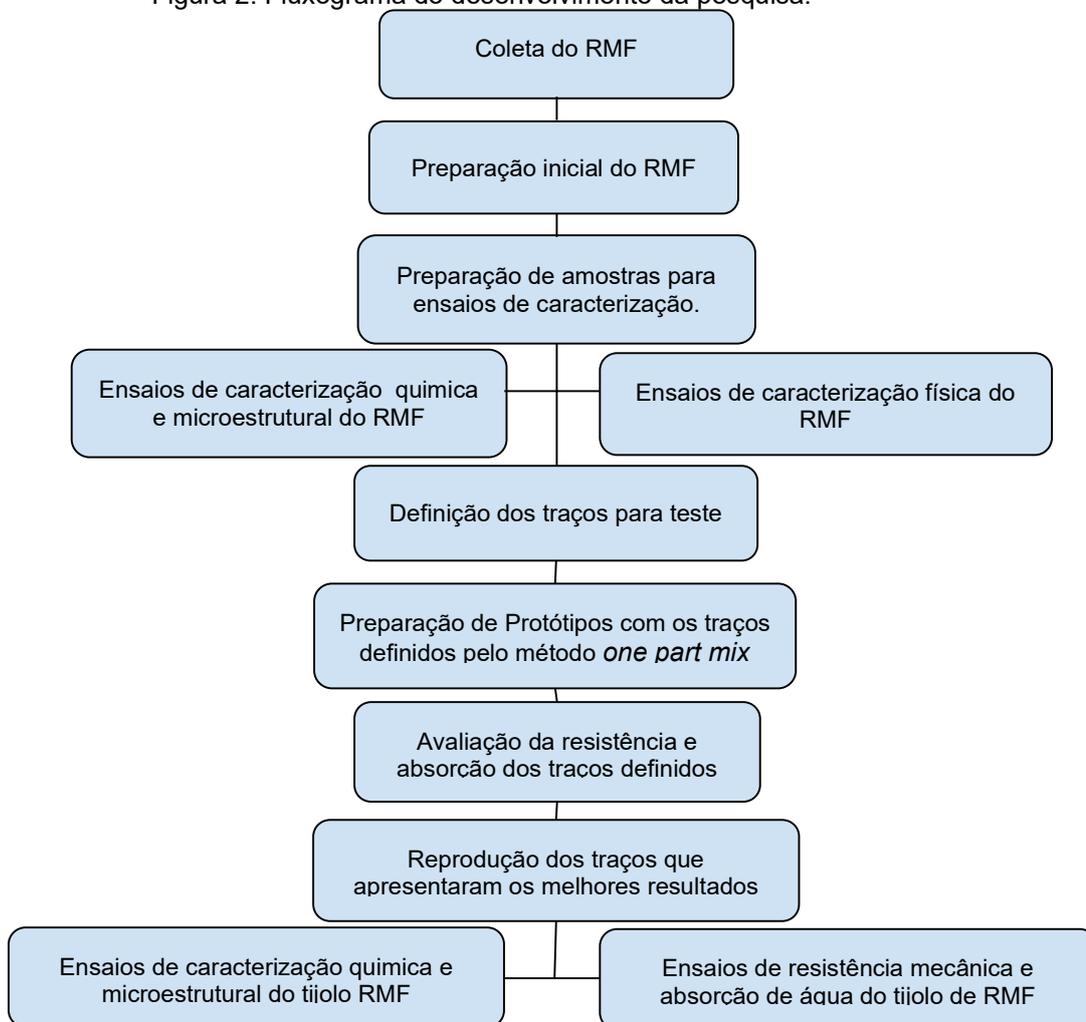
5.2 MÉTODOS

A metodologia utilizada no trabalho consistiu nas seguintes etapas: coleta RMF no distrito de Gesteira por funcionário da RENOVA, transporte até a UFOP, e armazenamento em pátio ao ar livre. A partir daí, foram coletadas pequenas quantidades de material que passaram por uma preparação inicial sendo

destorroadas e homogêneas, para os ensaios de caracterização física, química e microestrutural.

Com os resultados da caracterização do RMF foram definidos traços e produzidos protótipos com formatos cilíndricos para economia de material, através do método *one part mix*, e para testes de formulação para a confecção dos tijolos de RMF. Para isso, foram realizados ensaios de resistência à compressão e absorção de água, de onde foram selecionados os melhores traços para reprodução e realização de caracterização dos tijolos. O Fluxograma da Figura 2 representa as etapas de produção dos protótipos e realização dos ensaios.

Figura 2: Fluxograma do desenvolvimento da pesquisa.



Fonte: autora

5.2.1 Coleta e preparação inicial do RMF

O RMF foi depositado no pátio do Laboratório de Materiais de Construções da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), onde foi entregue a quantidade de aproximadamente 6 toneladas.

Para a realização dos ensaios de laboratório, foi realizada uma preparação inicial, onde coletou-se o RMF, seco-o ao ar e promoveu-se o destorroamento sobre lonas. Após sua secagem, ele foi peneirado na peneira de abertura de 4,75 mm, onde a parte retida nesta peneira (representado menos de 5 % do material), formada por pedras, resíduos de construção, galhos e raízes, foi descartado, conforme NBR 8491 (ABNT, 2012) por representar uma fração muito pequena do material.

O material passante na peneira 4,75 mm passou pelo processo de homogeneização das partículas em um quarteador de amostras, e foi armazenado em recipientes fechados, para evitar o contato com o ar.

5.2.2 Preparação de amostras para ensaios de caracterização

A preparação do RMF para os ensaios de caracterização química e mineralógica, consistiu na coleta do material, homogeneização com auxílio de quarteador de amostras, para alguns ensaios, foi moído manualmente em um almofariz até passar totalmente em peneiras com aberturas específicas, armazenado e vedado.

Para a preparação da amostra de RMF para o ensaio de DRX, a amostra passou pelo método de quarteamento, estando em forma de pó, foi cominuído até que cerca de 90 % do seu material passasse na peneira 325 mesh (45 μ m), sendo necessário no mínimo 5g de material preparado para análise.

Para o ensaio de FRX, a amostra passou pelo método de quarteamento, estando em forma de pó, foi cominuído até que cerca de 90 % do seu material passasse na peneira 200 mesh (75 μ m), sendo necessário no mínimo 10 g de material preparado para análise.

Para o ensaio de perda ao fogo (TG) preparou-se o material previamente, de acordo com o protocolo utilizado para o ensaio de FRX, secou-o em estufa e passou-o na peneira de abertura 75mm, colocou-o por duas horas a 1050 °C em uma mufla, sendo necessário cerca de 5g de material.

Para o ensaio de MEV secou-se a amostra em estufa, fixou-a a um pedaço de fita de carbono dupla face em um *stub*, encobriu-se a fita com o material a ser analisado, retirou-se o excesso de material com o auxílio do soprador, metalizou-se a amostra (metalização com ouro) e deixou-a no dessecador a vácuo até o momento do ensaio.

A preparação de amostra para os ensaios de caracterização física foi realizada conforme prescrito na NBR 6457 (ABNT, 2016), onde foi especificada a metodologia aplicada as amostras para os testes de teor de umidade do material armazenado; para o ensaio de massa específica pelo método do picnômetro; determinação da umidade ótima pelo método de compactação, e limites de consistência pelo método de Casa Grande.

A preparação da amostra para o ensaio de granulometria a laser consistiu em quarterar a amostra que estava em forma de pó, recomendando-se que o material tenha pelo menos 90 % do seu material seja passante na peneira 4,85 mm, sendo necessário no mínimo 2 g de material preparado para análise.

5.2.3 Caracterização mineralógica do RMF

A Caracterização mineralógica do RMF foi fundamental para identificação dos compostos químicos e minerais presentes nele, pois a partir daí, definiram-se os estabilizantes e os traços para a composição do tijolo. Estas caracterizações foram realizadas através dos ensaios de difração de raio X (DRX), fluorescência de raios X (FRX), análise termogravimétrica (TG), microscopia eletrônica de varredura (MEV), pH e Condutividade elétrica.

A análise por DRX consiste em uma técnica semiquantitativa de identificação de minerais, em que a amostra foi incidida por raios X característicos e contínuos. Este processo ocorreu a partir da análise dos feixes de raios X difratados, que foram medidos por meio de detectores de área em difratômetros. A partir da análise dos resultados ocorreu algumas associações que auxiliaram na identificação mineral em questão (MINAS JR. CONSULTORIA, 2020). Ele foi realizado com o material em forma de pó, onde a amostra foi prensada e fixada num porta amostras, sendo submetida a um feixe de raios-X. O método foi realizado sem a adição de padrão interno, sendo possível a identificação das substâncias cristalinas através da comparação do

difratograma com padrões difratométricos de fases individuais armazenados em bancos de dados. Cada composto cristalino apresentou um padrão característico e permitiu sua identificação através das posições angulares e intensidades relativas de picos difratados. Este ensaio foi executado no Laboratório Nanolab REDEMAT/UFOP, com um equipamento Shimadzu 6100 LAB X; operando a 40 Kv e 30 mA com radiação de Cu K α ; tempo de passo 1 s, passo 0,02 °, varredura de 5 ° a 75 °, ângulo 2 (θ), rotação de 8 rpm, janela de 0,19 a 0,22 mm. A análise e refinamento dos resultados foi executada utilizando software X'Pert High Score Plus Panalytical, utilizando banco de dados cristalográfico COD (Crystallography Open Database).

A análise por FRX consiste em uma técnica não destrutiva que permite identificar os elementos químicos presentes em uma amostra (análise qualitativa) assim como estabelecer a proporção (concentração) em que cada elemento se encontra presente na amostra (análise quantitativa). A amostra de material pulverizado foi bombardeada por um curto intervalo de tempo com raios X policromáticos, aos quais foram absorvidos. A partir disso, ocorreu o deslocamento dos elétrons nas camadas, de forma que raios X característicos foram gerados. As linhas espectrais identificadas no FRX são específicas de cada elemento químico, e por isso foi possível qualificar e quantificar a composição química de determinada amostra (MINAS JR. CONSULTORIA, 2020). O ensaio foi realizado no Laboratório de Materiais de Construção Civil na UFOP, no equipamento PANalytical Epsilon3x.

A análise térmica simultânea de TG/ foi efetuada com o objetivo de se verificar as regiões de alta taxa de calcinação, ou seja, onde ocorre a redução mais significativa de massa por esta se tratar de uma reação heterogênea de decomposição térmica gás-sólido com produto gasoso. Esse ensaio mediu a variação de massa da amostra em função da variação de temperatura imposta ao material analisado, onde a perda de massa da amostra pode acontecer por causa da remoção de substâncias adsorvidas, grupos hidroxilas ou libertação de gases a partir de uma amostra que consiste em uma fase condensada, já o ganho de massa, é devido ao processo de oxidação. Ele foi executado no Laboratório de Materiais de Construção Civil da UFOP, equipamento STARE System Metler Toledo, de 25 a 1050 °C, taxa de 10 °C/min e atmosfera inerte de N $_2$ (20 ml/min), com o objetivo de caracterizar o RMF, através da perda de massa

associada a picos exotérmicos ou endotérmicos.

O ensaio de MEV permite, que alcançar aumentos de imagem muito alto, dependendo do material pode atingir até 900 000 vezes, para a análise de materiais como o RMF normalmente o aumento é da ordem de 10 000 vezes. A área ou o micro volume a ser analisado foi irradiado por um fino feixe de elétrons e como resultado da interação do feixe de elétrons com a superfície da amostra, uma série de radiações foram emitidas tais como: elétrons secundários, elétrons retroespalhados, raios-X característicos, elétrons Auger, fótons, etc. Estas radiações quando captadas corretamente fornecem informações características sobre a amostra (topografia da superfície, composição, cristalografia, etc.). Os sinais de maior interesse para a formação da imagem foram os elétrons secundários e os retroespalhados. À medida que o feixe de elétrons primários foi varrendo a amostra estes sinais foram sofrendo modificações de acordo com as variações da superfície. Os elétrons secundários fornecem imagem de topografia da superfície da amostra e são os responsáveis pela obtenção das imagens de alta resolução, já os retroespalhados fornecem imagem característica de variação de composição (MALISKA, 2004). Ele foi realizado utilizando um microscópio eletrônico de varredura (MEV), equipamento VEGA 3, TESCAN, no Laboratório de Microscopia Eletrônica Nanolab REDEMAT/UFOP. Com o intuito de obter informações sobre a morfologia das partículas do rejeito. A análise por EDS foi executada no laboratório de microscopia eletrônica Nanolab REDEMAT/UFOP, utilizando o MEV, equipamento VEGA3 da TESCAN.

As medidas de pH utilizam o método potenciométrico para determinação do potencial hidrogeniônico, indicando a acidez, neutralidade ou alcalinidade do meio. Muito aplicado também para medida de concentração de íon seletivo, exemplo, flúor, cloreto, iodeto, amônia e etc. sendo realizadas em amostras submersas em água destilada, durante um período de 24 horas. Os valores de pH mais baixos podem indicar a facilidade de liberação ou transferência de metais pesados para o ambiente e valores de pH mais altos podem reter estas substâncias no rejeito, dificultando sua liberação. A análise do pH foi realizada em um pHmetro microprocessado de bancada, completo que faz medições em pH, em mV, no Lab. de Hidráulica DTECH/UFES. Calibração automática com reconhecimento automático das soluções tampão.

O ensaio de condutividade elétrica o é indicado para fazer controle de

qualidade de em águas de baixa e alta condutividade, etanol, efluentes, alimentos e soluções aquosas em geral. Além disso, usa-se para medir teor de cinzas em açúcar, concentração de alguns sais, ácidos e sólidos totais dissolvidos em materiais diversos. São realizados em amostras submersas em água destilada em um período de 24 horas. Este ensaio foi realizado em um medidor com ampla faixa de medição que vai de 0.0 uS/cm a 200 uS/cm, sendo dividida em 4 faixas menores. Equipado com calibrador eletrônico (1408 uS/cm), conta com memória para 50 registros, compensação manual e automática de temperatura e seleção entre graus °C e °F. Foi realizado no laboratório de Bioquímica e Imunologia (LABIO) DQBIO/UFSJ.

5.2.4 Caracterização Física do RMF

A NBR 6502 (ABNT, 1995) define solo como “material proveniente da decomposição das rochas pela ação de agentes físicos ou químicos, podendo ou não ter matéria orgânica”. Assim Couto (2017) diz que para classificação de solos e materiais granulares, o conhecimento do seu comportamento frente às solicitações, é necessário que se faça a caracterização física e geotécnica através de ensaios de laboratório. Assim, através de ensaios de caracterização desses materiais, que se pode prever o comportamento mecânico e hidráulico, assim como conhecer as formas de ocorrência e a geometria dos seus componentes, sendo possível observar se existe a necessidade de corrigir algumas características físicas do material, a fim de favorecer sua utilização, tais como moagem, secagem em estufa etc. A caracterização física do RMF foi composta pelos ensaios de distribuição granulométrica, massa específica, teor de umidade, índice de plasticidade, entre outros.

A distribuição granulométrica do RMF foi realizada com o objetivo de traçar o perfil granulométrico do material. A análise de distribuição granulométrica a *laser* foi realizada no equipamento Better Size modelo 2000, no Laboratório de Materiais de Construção da UFOP.

O ensaio de massa específica foi realizado observando a NBR 6508 (ABNT, 2016) onde foi utilizada a mistura do RMF com água destilada, colocada em um balão volumétrico com aplicação de vácuo, para retirada do ar contido na mistura, e pesado o conjunto. Este ensaio foi realizado no Laboratório de

Materiais de Construção Civil DTECH/UFSJ.

Os ensaios de limites de consistência dos materiais granulares (solos em geral) são determinados através de dois ensaios: o Limite de Liquidez (LL) que foi realizado segundo a NBR 6459 (ABNT, 2016) e Limite de Plasticidade (LP) NBR 7180 (ABNT, 2016) que também são conhecidos como limites de Atterberg. A consistência do material granular é um termo usado para descrever o seu estado físico, ou seja, o grau de ligação entre suas partículas. A plasticidade de um solo argiloso está relacionada à forma de suas partículas, e que é característica do argilomineral existente no solo. Segundo Correa (1982), os solos poderão ser classificados em: fracamente plásticos $1 < IP \leq 7$; medianamente plásticos $7 < IP \leq 15$ e altamente plásticos $IP > 15$. Estes ensaios foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção Civil DTECH/UFSJ.

O ensaio de compactação foi realizado conforme prescrito na NBR 7182 (ABNT, 2020). Ele foi realizado com a finalidade de descobrir qual o teor de umidade a ser adicionado a um material granular, que quando aplicada uma determinada energia de compactação na mistura, apresente seu maior peso específico seco. Este teor de umidade é conhecido como umidade ótima, pois com ela é possível atingir uma maior coesão das partículas do material com a água, após a compactação, aumentando assim a massa específica do material. Foi realizado no Laboratório de Geotecnia/Estradas DTECH/UFSJ.

5.2.5 Definição dos traços para teste.

Para a preparação dos protótipos, a definição do traço utilizados foi um fator primordial para este trabalho, e o planejamento inicial dos traços foi de fundamental importância para evitar o desperdício de material. Assim, foram definidos 5 traços diferentes utilizando dois tipos de ligantes: o hidróxido de sódio e o silicato de sódio utilizados em processos de ativação alcalina, ambos com uma variação de 0 a 10 % em massa em relação ao RMF, com intervalos de 2,5 % entre cada traço. O RMF utilizado foi seco ao ar, e a quantidade de água foi definida pelo ensaio de compactação sendo utilizado 14 % em relação ao RMF.

Também foi definido o tipo de cura empregada na produção dos protótipos, onde optou-se por utilizar dois tipos de cura, uma em ambiente sem controle de temperatura durante sete dias, e outra com temperatura controlada

de 45 °C durante sete dias. Também foi definida a força de compressão utilizada na produção dos protótipos, onde foi utilizada uma variação de 14,5 N a 15,5 N.

Após a preparação dos protótipos com os dois ativadores utilizados separadamente, eles foram submetidos a ensaios de resistência a compressão e absorção de água, e após análise dos resultados, mais dois traços foram testados, desta vez com a utilização dos dois ativadores utilizados em conjunto. A Tabela 4 apresenta os principais pontos para a preparação do protótipo de tijolo de RMF preparado com NaOH, tais como a proporção de materiais a serem utilizados, o teor de umidade, o tempo de cura e a força de compressão a ser utilizada no tijolo.

Tabela 4: Definição dos traços para teste com hidróxido de sódio.

% de NaOH	Teor de umidade da mistura (%)	Tipo de cura (7 dias)	Força de compressão (kN)
0	14	temperatura ambiente	14,5 a 15,5
2,5	14	temperatura ambiente	14,5 a 15,5
5	14	temperatura ambiente	14,5 a 15,5
7,5	14	temperatura ambiente	14,5 a 15,5
10	14	temperatura ambiente	14,5 a 15,5
0	14	estufa a 45 °C	14,5 a 15,5
2,5	14	estufa a 45 °C	14,5 a 15,5
5	14	estufa a 45 °C	14,5 a 15,5
7,5	14	estufa a 45 °C	14,5 a 15,5
10	14	estufa a 45 °C	14,5 a 15,5

Fonte: autora

A Tabela 5 apresenta os parâmetros utilizados para a preparação do protótipo de tijolo utilizando o Na_2SiO_3 como o ligante. Foram utilizados os mesmos parâmetros para os dois tipos de ativadores alcalinos utilizados, a fim de testar qual tem resultados mais satisfatório para aplicação na produção de tijolos ecológicos geopoliméricos.

Tabela 5: Definição dos traços para teste com Silicato de sódio.

% de Na ₂ SiO ₃	Teor de umidade da mistura (%)	Tipo de cura (7 dias)	Força de compressão (kN)
0	14	temperatura ambiente	14,5 a 15,5
2,5	14	temperatura ambiente	14,5 a 15,5
5	14	temperatura ambiente	14,5 a 15,5
7,5	14	temperatura ambiente	14,5 a 15,5
10	14	temperatura ambiente	14,5 a 15,5
0	14	estufa a 45 °C	14,5 a 15,5
2,5	14	estufa a 45 °C	14,5 a 15,5
5	14	estufa a 45 °C	14,5 a 15,5
7,5	14	estufa a 45 °C	14,5 a 15,5
10	14	estufa a 45 °C	14,5 a 15,5

Fonte: autora

A Tabela 6, apresenta os traços definidos a partir da mistura dos dois tipos de ativadores utilizados em conjunto, onde um traço foi utilizado 2,5 % NaOH e o outro 2,5 % de Na₂SiO₃, e o outro com 3,75 % de cada.

Tabela 6: Definição dos traços com a mistura de silicato de sódio com hidróxido de sódio.

% de NaOH	% de Na ₂ SiO ₃	Teor de água (%)	Tipo de cura (7 dias)	Força de compressão (kN)
2,5	2,5	14	estufa a 45 °C	14,5 a 15,5
3,75	3,75	14	estufa a 45 °C	14,5 a 15,5

Fonte: autora

5.2.6 Preparação dos protótipos para a produção de tijolos de RMF

Após análise das características do RMF a partir dos ensaios realizados e a definição dos traços, foi possível planejar a produção de protótipos que representassem os tijolos, para realização do ensaio de resistência à compressão e absorção de água de cada traço especificado. Com o resultado obtido nestes ensaios, foram escolhidos os melhores traços para reprodução, e caracterização final para ser empregado em tijolos em trabalhos futuros.

A moldagem destes protótipos consistiu na preparação da mistura definida, pelo método *one part mix*, onde o RMF seco foi misturado ao ativador

em uma argamassadeira elétrica durante 10 min, após esse tempo, foi colocada água, e procedeu-se a mistura por mais 10 min. Após a realização da mistura, pesou-se 225 g da pasta obtida anteriormente, e colocou-a em uma forma cilíndrica de 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura, ela tem fundo removível e abertura lateral para facilitar a desmoldagem.

Assim esta mistura foi prensada com o auxílio de um cilindro auxiliar de 5 cm de diâmetro por 17 cm de altura, em uma prensa manual, com uma força de compressão de 14,5 kN a 15,5 kN. Após a prensagem, o fundo do molde foi removido, abriu-se a lateral, e extraiu-se o protótipo com o auxílio do mesmo cilindro de prensagem. Inicialmente foram moldados 12 protótipos para cada traço de NaOH e 12 para cada traço de Na_2SiO_3 e 12 para cada traço utilizando a mistura dos dois ativadores. A Figura 3 representa o processo de moldagem dos protótipos.

Figura 3: Preparação e moldagem dos protótipos dos tijolos de RMF.



Fonte: autora.

Os protótipos moldados foram armazenados em sacos plásticos vedados por 24 horas, destinadas ao processo de cura. Metade dos protótipos foram destinados à cura sem controle de temperatura, e a outra metade à cura em

estufa a uma temperatura de 45 °C, ambos durante sete dias.

5.2.7 Avaliação dos protótipos produzidos

Após o processo de cura de sete dias aos quais foram expostos os protótipos, foi avaliada a resistência à compressão dos traços definidos, seguindo a NBR 10836 (ABNT, 2013). Para a avaliação de tijolos em geral, a resistência não pode apresentar a média dos valores inferior a 2 MPa, nem valores individuais inferiores a 1,7 MPa, com idade mínima de 7 dias, para tijolos a base de solo cru, assentado com argamassa comum, segundo a NBR 8491 (ABNT, 2012a).

Também foi avaliada a absorção de água seguindo com a NBR 8492 (ABNT, 2012b). Segundo a norma, o índice de absorção de água não deve ser inferior a 8 % nem superior a 22 % e o resultado de absorção de água não pode apresentar a média dos valores de absorção maior que 20 % nem valores individuais acima de 22 % com idade mínima de 7 dias para tijolos a base de solo cru, assentado com argamassa comum.

Após a análise dos resultados dos dois ensaios anteriores, selecionou-se os traços com os melhores resultados para reprodução, e avaliou-os novamente com os ensaios de resistência à compressão nas idades de 7,14,21 e 28 dias, além de se realizar os seguintes ensaios para uma caracterização mais minuciosa dos protótipos: pH; condutividade elétrica, FRX e DRX, realizados nos mesmos locais e utilizando os mesmos parâmetros definidos para a caracterização do RMF.

6 RESULTADOS

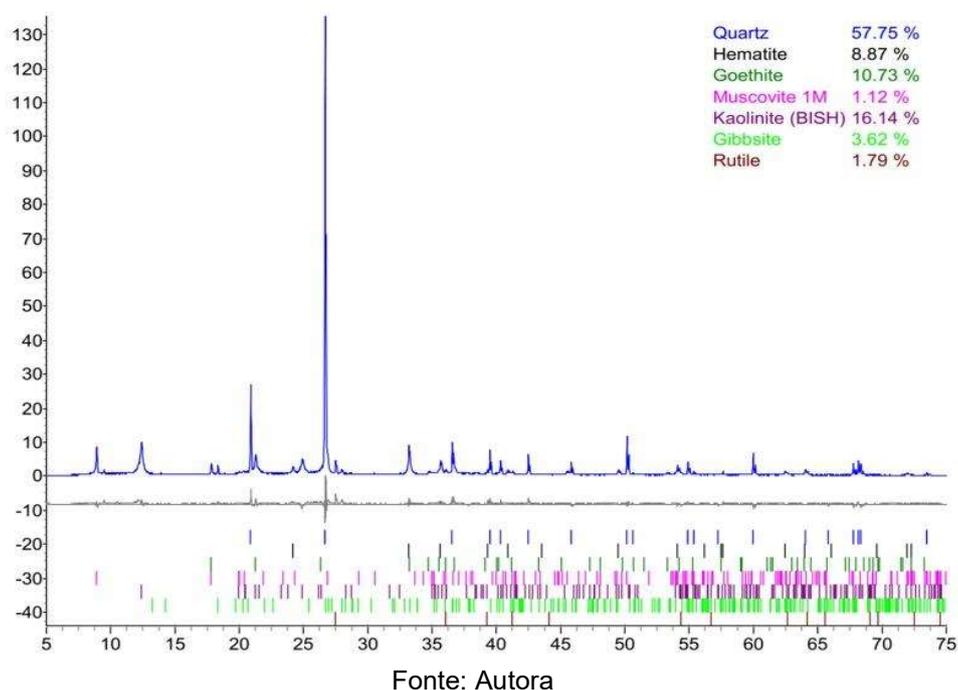
6.1 CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA DO RMF

A caracterização mineralógica do RMF foi composta pelos ensaios de DRX, FRX, termogravimetria, MEV, pH e condutibilidade elétrica. Os resultados destes ensaios foram apresentados a seguir.

6.1.1 Difração de Raio X do RMF

Os resultados do ensaio de DRX realizados no RMF, foram apresentados no gráfico da Figura 4.

Figura 4:Ensaio de Difração de Raio X do RMF.



Os minerais encontrados no ensaio de DRX foram: Quartzo = SiO_2 (sílica), na proporção de 46,7 % de Si e 53,3 % de O. Hematita = Fe_2O_3 (óxido de ferro), na proporção de 70,0 % de Fe, 30,0 % de O. Goethita = FeOOH um mineral de óxido de ferro. Muscovita= $\text{KAl}_2(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH}, \text{F})_2$ é um mineral do grupo dos flossilicato (micas). Caulinita = $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$, na medida que o alumínio pode ser parcialmente substituído pelo magnésio ou pelo ferro. $(\text{Al}, \text{Mg}, \text{Fé})_4(\text{Si}_4\text{O}_{10})$

(OH)₃. Gibbsita, Al (OH)₃, é uma das formas minerais do hidróxido de alumínio. Rutilo = TiO₂ mineral composto de dióxido de titânio.

A muscovita, caulinita e a gibbsita são minerais fundamentais no processo de ativação alcalina, quando possuem o Al₂O₃ em estado amorfo, pois ele, quando misturado um ativador alcalino, é responsável pela geossíntese, tornando o material formado mais resistente.

6.1.2 Fluorescência de Raio X do RMF

O resultado do ensaio de FRX realizado no RMF foi representado na Tabela 7.

Tabela 7: Composição mineralógica do RMF.

Composição do RMF-Gesteira	
Componente:	Quantidade (%)
Al ₂ O ₃	14,97
SiO ₂	60,39
Fe ₂ O ₃	23,01
K ₂ O	0,54
CaO	0,27
TiO ₂	0,43
Outros	1,63

Fonte: autora

O ensaio de FRX mostrou que o RMF de Gesteira é composto principalmente dióxido de silício (quartzo), com 60,39 % como também pode ser observado no ensaio de DRX, seguido por óxido de ferro III, presente principalmente na hematita e goethita, com 23,01 %, o que torna sua massa específica alta, e óxido de alumínio (alumina), com 14,97 %, que pode ser encontrada na fração argilosa do rejeito.

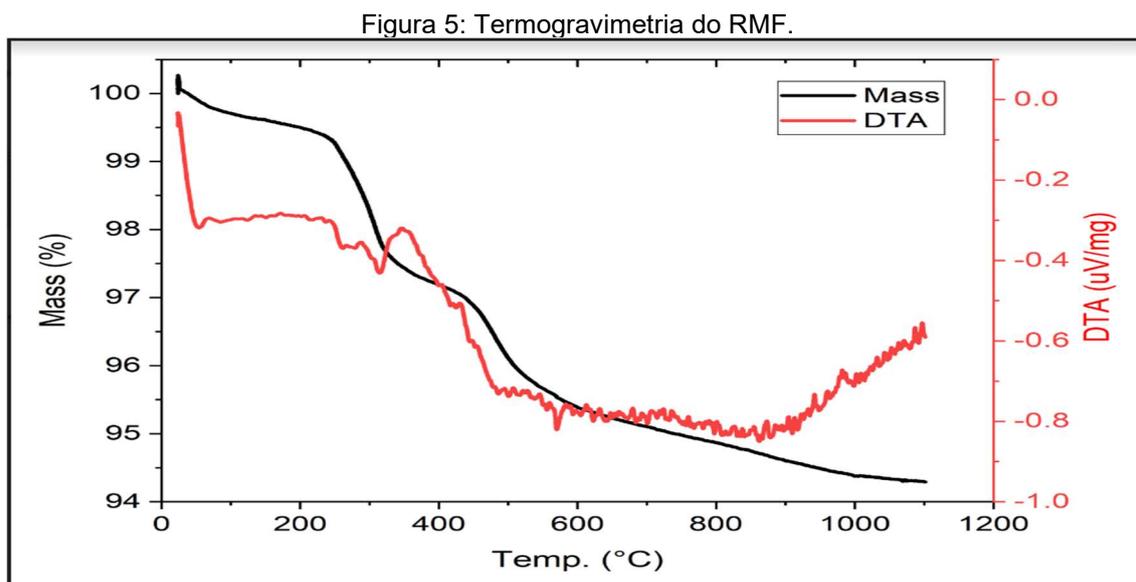
Esta composição se enquadra dentro dos intervalos das composições minerais citados no estudo de Carmignano *et al* (2021), sendo semelhante à do rejeito estudado por Pedroso *et al* (2020a) e Pedroso *et al* (2020b), que também se origina do rompimento da barragem de Fundão, em Mariana MG, e a do rejeito estudado por Kuranchie, Shukla e Habibi (2016) produzidos na Austrália Ocidental (WA)

Além da composição apresentada na tabela, o RMF ainda é composto por

vários outros minerais em quantidades muito pequenas, onde o somatório deles é cerca de 1,63 %. Entre eles se encontram o Óxido de chumbo (PbO) com 0,0079 % e o óxido de manganês com 0,086 %. Esses minerais são altamente prejudiciais à saúde humana, pois o chumbo atinge o sistema nervoso, a medula óssea e os rins, e o manganês causa problemas respiratórios e efeitos neurotóxicos. Porém a resolução do CONAMA 420/09 estabelece para o chumbo o valor de 900 mg/kg em solo e 10µg/L em água, e para o Manganês: o valor de 400 µg/L água, o que equivale a 0,09 % de chumbo em solos, sendo os valores encontrados menores.

6.1.3 Termogravimetria do RMF

A Figura 5 mostra o resultado do ensaio de termogravimetria realizado no RMF.



Fonte: autora

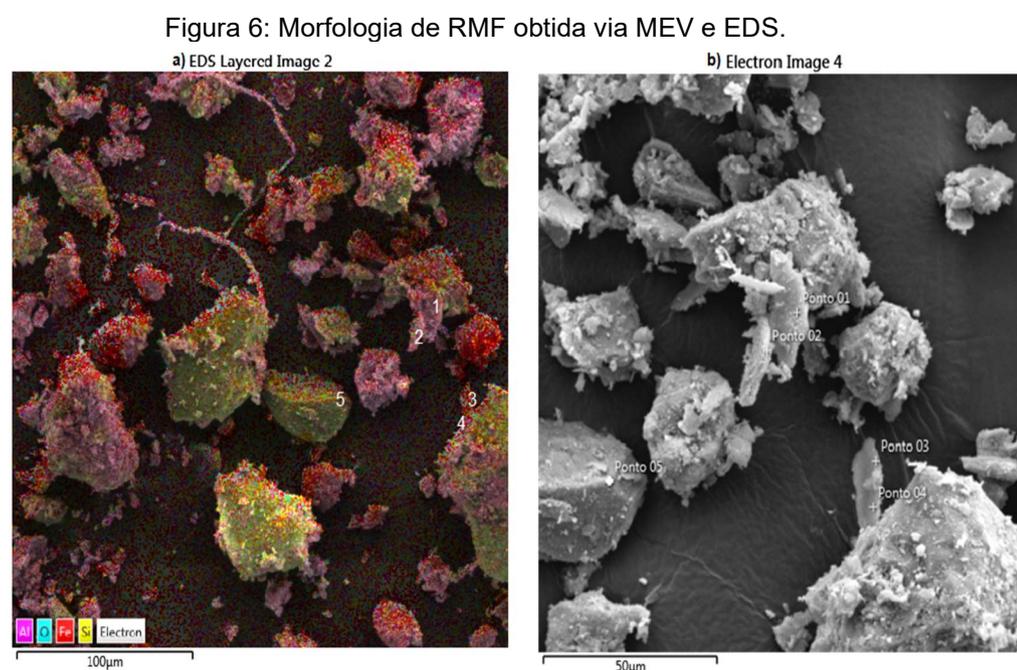
Observou-se que para a massa de RMF empregada, sob as condições submetidas de temperatura variando da temperatura ambiente a 1100 °C, apresentou uma redução mássica de aproximadamente 5,7 %. No intervalo de temperatura ambiente até a temperatura de 250 °C, houve uma perda de cerca de 0,5 % de massa onde acredita-se ser a perda de H₂O das camadas intermediárias observadas entre 60 e 200 °C (SCRIVENER, 2016).

Na temperatura de 250 °C a 450 °C houve uma queda brusca de cerca de

2,3 % de massa, devido à desidroxilação da Goethita (250 °C – 300 °C) e entre 450 °C e 550 °C houve uma perda de 1,5 % e podendo ser à desidroxilação da caulinita (450 – 550 °C) (ALVES, 2008). A partir de 550 °C até 1110 °C há uma perda constante 1,4 %, isso acontece porque em torno de 575 °C acontece um fluxo de calor endotérmico devido à transição estrutural $\alpha \rightarrow \beta$ do quartzo (BEZERRA, 2017).

6.1.4 Microscopia eletrônica de varredura do RMF

A Figura 6 representa a morfologia do RMF, geradas pelos elétrons retroespalhados (Figura 6 a) e pelos elétrons secundários (Figura 6 b).



Fonte: autora

A Figura 6 a), mostra a composição das partículas, e está em uma escala menor. A Figura 6 b), por estar em uma escala maior, apresenta com maior nitidez, o formato dos grãos, e os pontos a analisados. O ensaio também forneceu a proporção de minerais encontrados em cada ponto das figuras, como de ser analisado na Tabela 8.

Analisando a morfologia apresentada na Figura 6 a), é possível observar a predominância de partículas maiores e arredondadas onde a cor predominante é a amarela e azul que representa o silício e o oxigênio. Este material, está sendo

identificada com o ponto 5, sendo formada por 60,61 % de sílica, 12,38% de oxigênio e 15,84% de ferro, como observado na Tabela 8, onde com isso conclui-se que este material é composto predominantemente por quartzo, e óxido de ferro, o que também foi observado foi no DRX.

Tabela 8: Composição química de cada ponto.

Ponto	Elementos					
	O	Al	Si	Fe	K	Mg
1	3,92	5,34	5,74	1,73	1,78	0,14
2	14,09	5,27	8,72	9,42	8,09	0,21
3	4,43	0,77	1,56	14,42	0,16	0,00
4	5,50	0,96	1,99	8,42	0,21	0,00
5	12,38	2,02	60,61	15,84	0,00	0,00

Fonte: autora

Também é possível perceber partículas lamelares, representadas pelos pontos 1 e 2, onde se destacam, além do silício com 5,74 % e 8,72 % respectivamente, o alumínio com 5,34 % e 5,27 %, o oxigênio 3,92 % e 14,09 % e o ferro com 1,74 % e 5,43 %. Assim percebe-se que as partículas são apresentadas por pequenas quantidades de quartzo, argilas e óxido de ferro. Também foi observado a presença de menores quantidades de potássio com 1,78 % e 8,09 %, e magnésio com 0,14 % e 0,21 %, podendo ser identificadas como partículas de caulinita e muscovita como observado no ensaio de DRX.

No ponto 3, foi identificada a presença de ferro com 14,42 %, representado pela cor vermelha, oxigênio contendo 4,43 % e silício com 1,56 %, podendo-se concluir que ele é composto principalmente por sílica e óxido de ferro e pequenas quantidades de argilas. Já o ponto 4, tem uma grande porcentagem de ferro (8,42 %), sílica (1,99 %) e oxigênio (5,50 %), entre outros minerais, o que remete a sílica e hematita ou goethita, pela grande quantidade.

6.1.5 Ensaio de pH e condutibilidade elétrica do RMF

O resultado do ensaio de pH do rejeito puro deu 10,53, ou seja, o RMF é alcalino ou básico, este valor também foi encontrado por Pedroso (2020a) e Pedroso (2020b). O pH, sendo uma das características mais importante na caracterização do rejeito deve ser conhecido, além das demais características, garantindo o mínimo possível de ocorrência de impactos seja no local de

disposição desse material ou no local onde vai ser reaproveitado (PEREIRA, 2016). Este valor pode ser associado ao tipo de tratamento que o minério de ferro recebe para obtenção do mineral mais puro.

Yellishetty (2008) diz que a condutividade é medida para inferir a quantidade de sólidos dissolvidos, nutrientes e salinidade do solo. O ensaio resultou em um valor de 660,5 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a 25 °C, um valor considerado auto para o RMF. A condutividade elétrica encontrada para a amostra de rejeito é relativamente alta, podendo estar associados a presença de íons (sulfatos, sais, prótons e metais, principalmente o Fe, como vistos nos ensaios de FRX e DRX), e principalmente a presença de sulfetos que sofrem dissolução na geração de drenagem ácida de mina. A presença de substâncias residuais dos processos de beneficiamento dos minérios, tais como hematita e goethita pode aumentar a dissolução e, conseqüentemente, aumentar a condutibilidade elétrica.

6.2 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO RMF

A caracterização física do RMF foi composta pelos ensaios de composição granulométrica, massa específica, limites de consistência e compactação. Os resultados destes ensaios foram apresentados a seguir.

6.2.1 Composição granulométrica do RMF

Os resultados deste ensaio foram apresentados na Figura 7. A partir deste ensaio, observou-se que o RMF apresenta uma distribuição granulométrica composta por aproximadamente de 5 % de argila, de 45 % de silte e 50 % de areia, comparando com a escala granulométrica de WENTWORTH (1922), onde a argila tem dimensão máxima de 0,004 mm, o silte entre 0,004 e 0,063 mm, a areia entre 0,063 e 2,0 mm, o seixo entre 2 mm e 256 mm e o bloco acima de 256 mm.

Assim, o RMF é composto por materiais de partículas maiores, o que dificulta o processo de ativação alcalina no qual é indicado um material com partículas mais finas. Então, seria interessante aplicar o processo de moagem no RMF. Porém, isso afetaria a absorção de água, que precisa atender os requisitos de valor mínimo de absorção. Por fim, optou-se por testar o material

preservando sua granulometria original.

Figura 7: Distribuição granulométrica via granulômetro a laser.



Fonte: autora

6.2.2 Massa específica do RMF

O resultado obtido no ensaio de massa específica real, foi de $3,062 \text{ g/cm}^3$. Pedroso (2020a) obteve um valor de $3,280 \text{ g/cm}^3$, utilizando o método do frasco de Chapman, já é Pedroso (2020b) da obteve o valor de $3,298 \text{ g/cm}^3$ e SILVA (2019), obteve valores com variações de $2,903 \text{ g/cm}^3$ a $2,934 \text{ g/cm}^3$. Essa pequena diferença, pode ser explicada devido o método de ensaio utilizado ser diferente dos demais autores. Mesmo assim foi possível observar que apesar de ser um valor relativamente alto de massa específica, ele se enquadra nos valores obtidos. A alta concentração de ferro é uma das causas de valores mais elevados de massa específica para esse tipo de material.

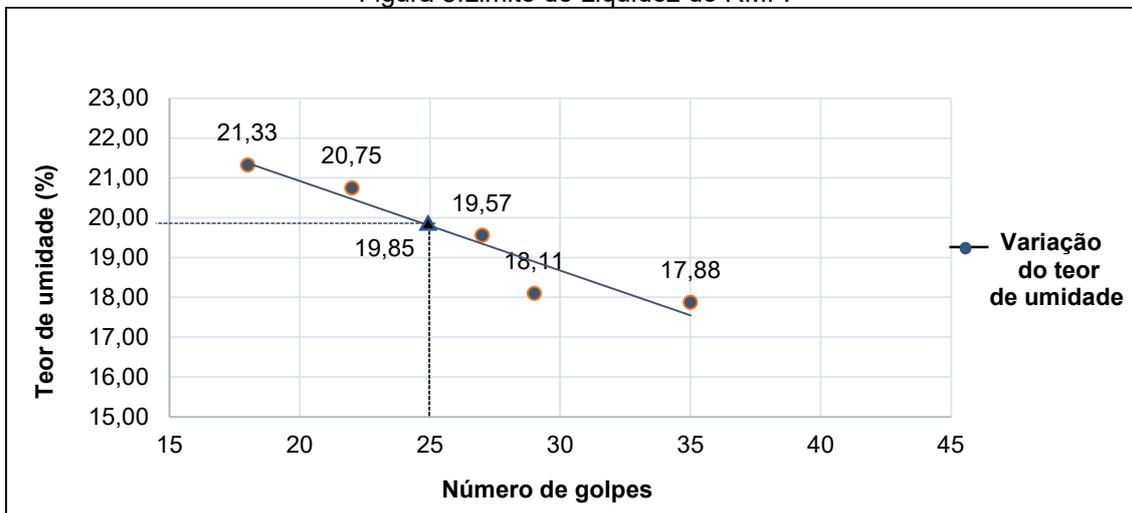
6.2.3 Limites de consistência do RMF

O Ensaio de Limite de Plasticidade do RMF foi realizado conforme a norma ABNT NBR 7180 (2016), onde foi obtido o resultado de 11,29 % de umidade. Já o ensaio de Limite de Liquidez foi realizado conforme a ABNT NBR 6459 (2016), e seu resultado foi de 19,85 % de umidade, conforme a Figura 8.

Com os resultados anteriores, calculou-se o Índice de Plasticidade, através da subtração dos valores de LP e LL, obtendo um valor de 8,56 %, onde foi possível observar que ele tem plasticidade média, o que comprova que o RMF tenha uma pequena quantidade de material coesivo, tal característica está

presente em argilas. Estes ensaios foram importantes para a determinação da quantidade de água necessária na mistura para a produção dos tijolos de RMF, pois eles definem os limites de consistência de um material formado por solos.

Figura 8: Limite de Liquidez do RMF.

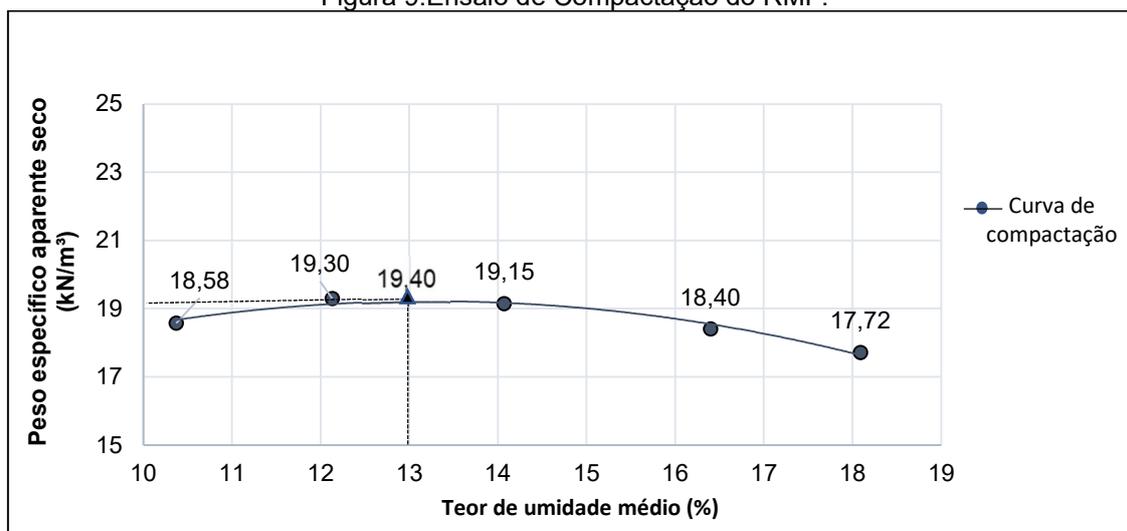


Fonte: autora

6.2.4 Ensaio de compactação do RMF

Este ensaio é realizado em solos para utilização em estradas, barragens e produção de tijolos. A Figura 9 representa os dados e o resultado do ensaio de compactação realizado com o RMF.

Figura 9: Ensaio de Compactação do RMF.



Fonte: autora

O teor de umidade ótimo obtido no ensaio foi de aproximadamente 13,01%. O peso específico máximo obtido foi de 19,40 kN/m³. O material apresentou baixa resistência úmida, sendo facilmente desmanchado ao ser comprimido manualmente, isso se deu por causa da granulometria do RMF ser composta principalmente por frações acima de 0,075 mm.

A partir desse resultado, e de testes visuais observados durante a moldagem dos corpos de prova do ensaio, definiu-se um teor de umidade de 14 % para a moldagem dos protótipos, pois como houve o acréscimo de estabilizante, o consumo de água foi um pouco maior.

6.3 PREPARAÇÃO DOS PROTÓTIPOS DE RMF

A Figura 10 apresenta alguns corpos de prova produzidos com a mistura de RMF e os ativadores alcalinos utilizados.

Figura 10: Protótipos dos tijolos de RMF.

- a) Protótipos sem adição de ativador, cura a 45°C e cura ambiente.



- b) Protótipos com 2,5 % NaOH, cura a 45°C e cura ambiente.



- c) Protótipos com 5,0 % NaOH, cura ambiente e cura a 45°C.



Fonte: autora

É possível notar que nas imagens que os protótipos que foram expostos a cura ambiente sofreram com o processo de eflorescência, onde os cristais de NaOH afloraram para a superfície dos protótipos devido a evaporação da água superficial dos protótipos e reação com o dióxido de carbono do ar, o que foi

observado em uma intensidade bem menor nos protótipos curados a 45°C.

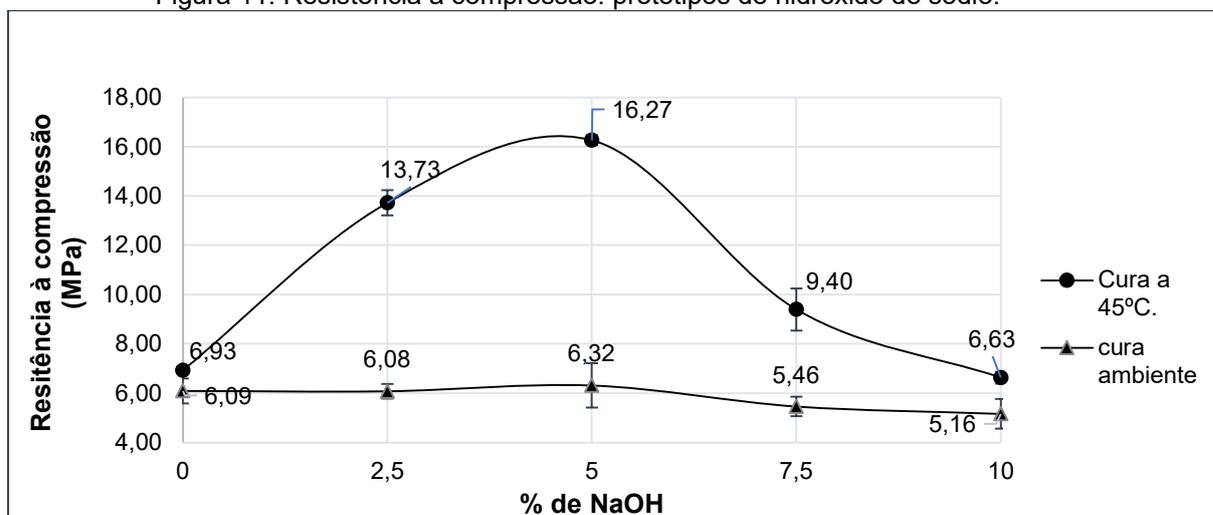
6.4 AVALIAÇÃO DOS PROTÓTIPOS PRODUZIDOS COM OS TRAÇOS DEFINIDOS

Os protótipos produzidos com os traços definidos, passaram por um processo de cura durante sete dias, e após este tempo eles foram destinados a ensaios de resistência à compressão e absorção de água. Os resultados destes ensaios foram apresentados a seguir.

6.4.1 Resultado do ensaio de resistência à compressão nos protótipos de hidróxido de sódio

O resultado do ensaio de resistência a compressão nos protótipos produzidos de NaOH foram apresentados na Figura 11.

Figura 11: Resistência à compressão: protótipos de hidróxido de sódio.



Fonte: autora

Observando-se o gráfico de resistência a compressão com cura à temperatura ambiente, foi possível observar que a adição de NaOH teve pouca influência no ganho de resistência, sendo que apenas o traço com 5,0 % de NaOH apresentou resistência maior que o traço sem estabilização. Observou-se que os protótipos com adição de NaOH apresentaram eflorescência, à medida que se aumentou a sua concentração na mistura. Apesar disso, todos os traços

com adição deste material, apresentaram resistência satisfatória para a produção de tijolos, pois apresentaram valor superior a 2,0 MPa.

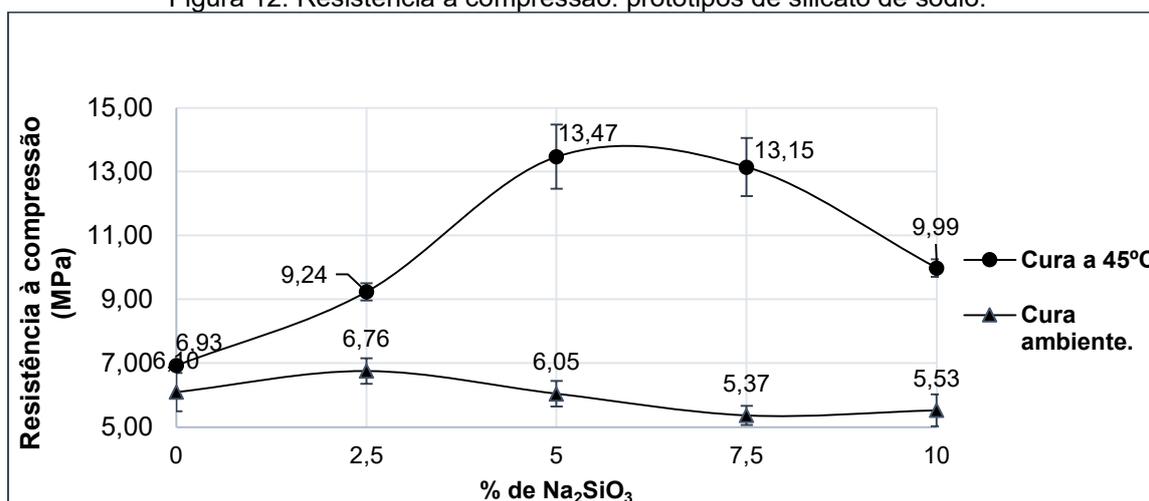
Com os resultados obtidos a partir dos protótipos com cura a temperatura de 45 °C, notou-se que os traços de 2,5 %, 5,0 % e 7,5 % de NaOH tiveram um ganho considerável de resistência, apresentando os valores de 13,75 MPa, 16,27 MPa e 9,40 MPa. Apenas os traços de 0 % e 10 % de NaOH tiveram um ganho menor. Não houve eflorescência nos protótipos com cura a 45 °C nos traços de 2,5 % e 5,0 %, e ela foi mínima nos traços de 7,5 % e 10,0 %.

Com isso conclui-se que o processo de cura a 45 °C proporcionou um aumento na resistência em todos os traços, sendo de 14,78 % para o traço de RMF sem adição de NaOH; de 125,82 % para o traço com 2,5 % de NaOH, de 157,44 % para o traço com 5,0 % de NaOH, de 72,16 % para o traço com 7,5 % de NaOH e de 28,49 % para o traço com 10,0 % de NaOH.

6.4.2 Resultado do ensaio de resistência à compressão nos protótipos de silicato de sódio

O resultado do ensaio de resistência a compressão nos protótipos produzidos com Na_2SiO_3 foram representados na Figura 12.

Figura 12: Resistência à compressão: protótipos de silicato de sódio.



Fonte: autora

Ao analisar o resultado de resistência à compressão com cura à temperatura ambiente, foi possível observar que a adição de silicato de sódio levou a um comportamento semelhante a resistência dos protótipos com

hidróxido de sódio, tendo pouca influência no ganho de resistência, onde apenas o traço com 2,5 % de Na_2SiO_3 apresentou resistência maior que o traço sem estabilização. Estes protótipos não apresentaram eflorescência em nenhum dos traços. E todos os apresentaram resistência satisfatória para a produção de tijolos, pois apresentaram valor superior a 2,0 MPa.

Observando o gráfico com os resultados de resistência dos protótipos com cura a temperatura de 45 °C, notou-se que todos os traços com adição de Na_2SiO_3 tiveram um ganho de resistência satisfatório, apresentando os valores de 9,24 MPa, 13,47 MPa, 13,15 MPa e 9,40 Mpa para os traços de 2,5 %, 5,0 %, 7,5 % e 10 % de adição, respectivamente.

Com isso, conclui-se que o processo de cura proporcionou um aumento na resistência em todos os traços, sendo de 13,61 % para o traço de RMF sem estabilização de Na_2SiO_3 , 36,65 % para o traço com 2,5 % de Na_2SiO_3 , de 122,64 % para o traço com 5,0 % de Na_2SiO_3 , de 144,87 % para o traço com 7,5 % de Na_2SiO_3 e de 80,65 % para o traço com 10,0 % de Na_2SiO_3 .

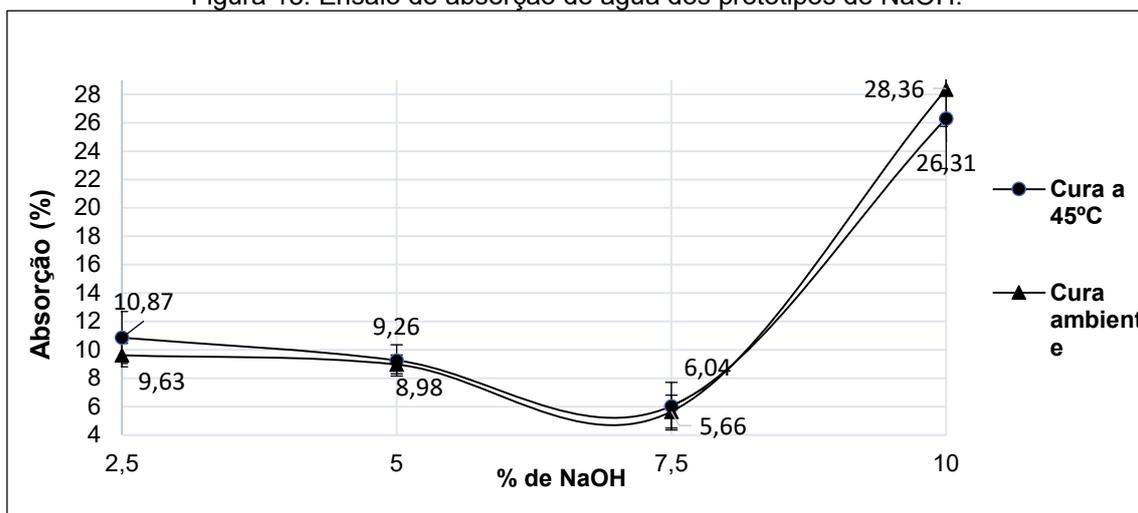
6.4.3 Resultado do ensaio de absorção de água dos protótipos de hidróxido de sódio

Foi realizado o ensaio de absorção de água nos protótipos de todos os traços que continha NaOH, e no traço de com 0 % de estabilizante, e que passaram pelos dois processos de cura. Este ensaio foi realizado com aproximadamente 30 dias de moldagem dos protótipos, e os seus resultados estão representados no gráfico da Figura 13 a seguir.

Analisando o gráfico da Figura 13, notou-se que não está representado o ponto referente ao protótipo com 0 % NaOH. Isso ocorreu porque este traço desfragmentou durante o ensaio de absorção de água, não apresentando estabilidade. Já os traços com 2,5 % e 5 % de NaOH, que apresentaram absorção média de 10,87 % e 9,26 % se enquadram no intervalo citado pela NBR 8492 (ABNT, 2013) de 8 % a 22 % (requisitos usados para tijolos assentados com argamassas comuns e tijolos a base de solos crus). Enquanto o traço de 7,5 % de NaOH, que apresentou absorção média de 6,04 % ficou abaixo do índice absorção desejado, e o traço de 10 % de NaOH com 26,31 %, apresentou um valor acima do desejado.

Analisando o protótipo sem adição de NaOH, onde houve a desfragmentação deles nos dois tipos de cura, ficou claro que a falta do ativador fez com que a coesão das partículas fosse quebrada com a presença de água. Com isso, foi possível observar a importância da utilização de um estabilizante na produção dos tijolos de RMF.

Figura 13: Ensaio de absorção de água dos protótipos de NaOH.



Fonte: autora.

Também se observou que o comportamento das duas curvas é semelhante, pois os traços com 2,5 % e 5 % também se enquadram nos intervalos imposto pela norma do ensaio, alcançando os valores de 9,63 % e 8,98 % de índice absorção média. Sendo que o traço contendo 7,5 % ficou abaixo do 10 % acima.

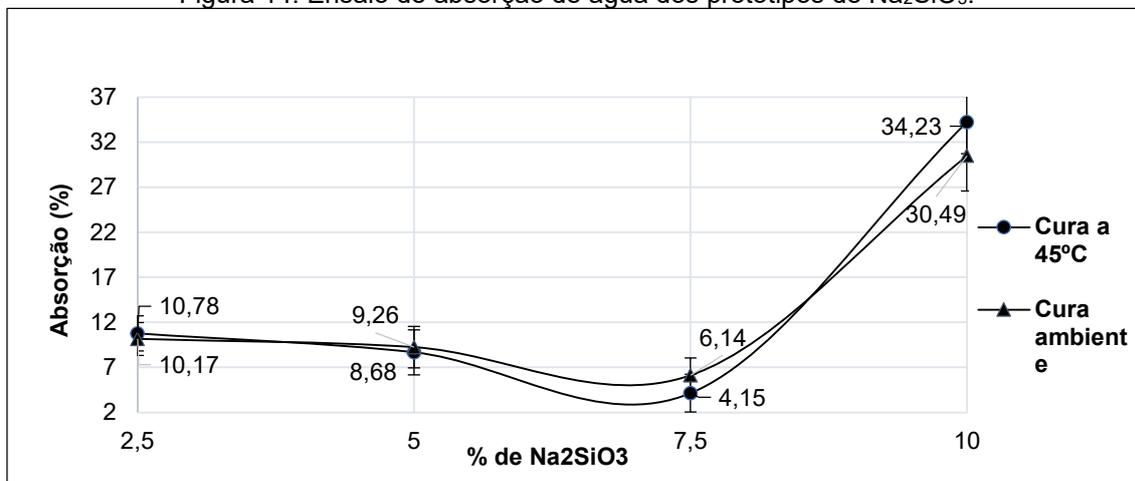
6.4.4 Resultado do ensaio de absorção de água dos protótipos de silicato de sódio

Também foi realizado o ensaio de absorção de água dos protótipos de Na_2SiO_3 , que passaram pelos dois processos de cura, em uma idade de aproximadamente 30 dias de moldagem. Os resultados estão representados no gráfico da Figura 14.

O gráfico da Figura 14 apresentou comportamento semelhante ao gráfico dos protótipos de NaOH, onde os traços com 2,5 % e 5 % de Na_2SiO_3 , que apresentaram absorção média de 10,78 % e 8,68 % se enquadram no intervalo de 8 % a 22 %, enquanto o traço de 7,5 % de Na_2SiO_3 , que apresentou absorção

média de 4,15 % ficou abaixo do índice de absorção desejado, e o traço de 10 % de Na_2SiO_3 com 34,23 %, apresentou um valor acima do desejado.

Figura 14: Ensaio de absorção de água dos protótipos de Na_2SiO_3 .



Fonte: autora.

Também se observou que o comportamento foi semelhante nos gráficos de NaOH e Na_2SiO_3 com cura a 45 °C, pois os traços com 2,5 % e 5,0 % também se enquadram nos intervalos imposto pela norma do ensaio, alcançando os valores de 10,17 % e 9,26 % de índice absorção média. Sendo que o traço contendo 7,5 % com 6,14 % de índice de absorção, ficou abaixo; e o traço contendo 10 % e apresentando 30,49 % de índice de absorção, ficou acima do valor desejado.

A partir dos resultados obtidos nos ensaios anteriores, observou-se que os traços 2,5 % e 5 % de NaOH com cura a 45 °C, e os de 2,5 % e 5 % de Na_2SiO_3 com os dois tipos de cura se enquadram nos parâmetros de absorção de água e resistência à compressão simultaneamente.

Apesar dos traços contendo somente Na_2SiO_3 também terem se enquadrado nos dois parâmetros, optou-se por não o utilizar, devido ao alto preço do produto, dificuldade de comercialização da região e alto consumo para a produção de tijolos que apresentaram resultados semelhantes com o uso de NaOH .

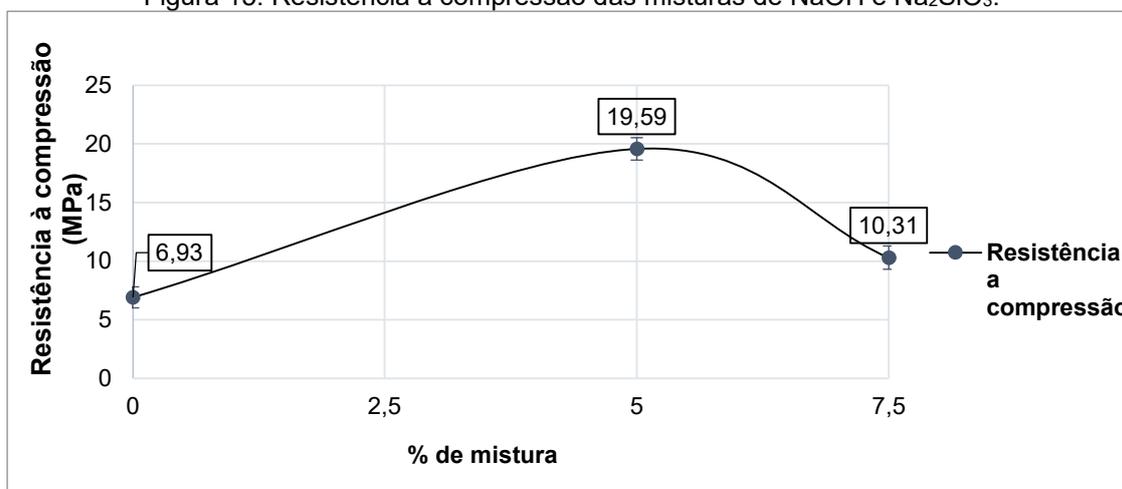
Logo, decidiu-se refazer os traços de 2,5 % e 5 % de NaOH , e produzir um traço com a mistura de 2,5 % de NaOH mais 2,5 % de Na_2SiO_3 (5 % de mistura de estabilizantes), e outro com 3,75 % de NaOH mais 3,75 % de Na_2SiO_3 (7,5 % de mistura de estabilizantes), seguindo os mesmos parâmetros definidos

para a moldagem dos traços anteriores.

6.4.5 Resultado dos ensaios resistência à compressão e absorção de água dos protótipos produzidos com a mistura de hidróxido de sódio e silicato de sódio

O gráfico da Figura 15 representa o resultado do ensaio de resistência à compressão dos traços produzidos com a mistura dos dois ativadores, ambos produzidos com os mesmos parâmetros dos outros traços.

Figura 15: Resistência à compressão das misturas de NaOH e Na₂SiO₃.



Fonte: autora

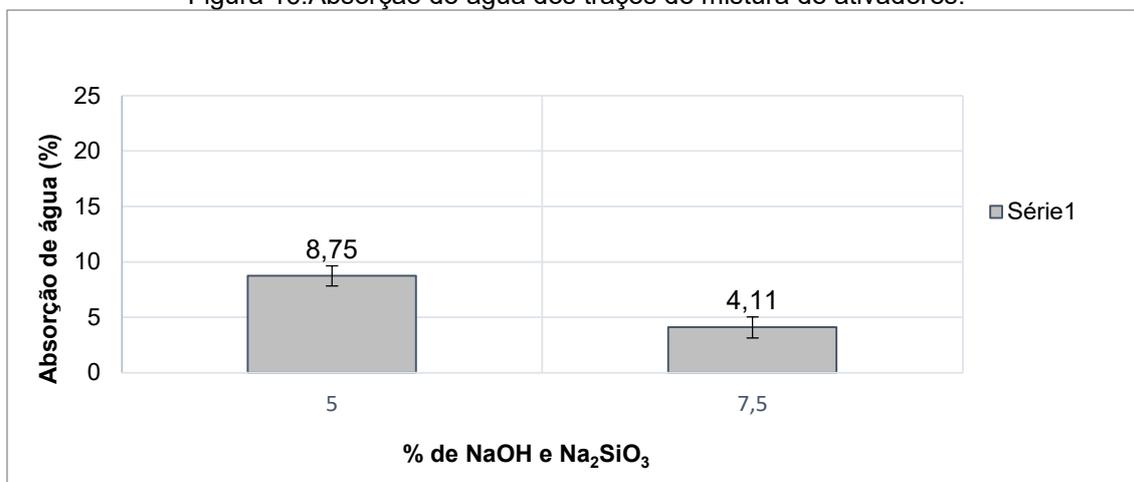
O resultado do ensaio de resistência à compressão média do traço de 5 % de mistura foi de 19,59 MPa, e o traço com 7,5 % de mistura foi de 10,31 MPa. O gráfico da Figura 16 representa o resultado da absorção de água dos traços de mistura de ativadores.

No ensaio de absorção de água o traço de 5,0 % de mistura resultou em um índice de absorção médio de 8,75 %, e o traço com 7,5 % em um de 4,11 %. Observando estes resultados, somente o traço com 5,0 % de mistura se enquadrou nos requisitos necessários para a produção de tijolos.

Os tijolos produzidos por Bezerra *et al* (2019) contendo RMF e Cinza volante como precursor a solução de NaOH e Na₂SiO₃, com cura ambiente, atingiu resistência a compressão de 1,5 MPa a 4,5MPa, aos 28 dias. Os tijolos produzidos por KURANCHIE e SHUKLA e HABIBI (2016), usando como ativador a mistura de NaOH e Na₂SiO₃ com teor de solução de silicato de sódio a 31 %;

e temperatura de cura de 80 °C, atingiram resistência a compressão a sete dias de 50,35 MPa, absorção de água de 9,0 %.

Figura 16: Absorção de água dos traços de mistura de ativadores.



Fonte: autora

Apesar dos protótipos deste trabalho serem produzidos com metodologias e proporções diferentes, eles atingiram valores intermediários aos dois trabalhos anteriores. E apesar de serem trabalhos diferentes, é notório que a temperatura de cura tem grande influência no ganho de resistência dos geopolímeros e álcali ativados, sendo o trabalho que utilizou uma temperatura maior, o que atingiu maior resistência.

6.5 CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA DOS TRAÇOS QUE ENQUADRARAM NOS REQUISITOS DE PRODUÇÃO DE TIJOLOS.

Analisando o resultado dos ensaios de resistência e absorção realizados em todos os traços testados, observou-se que três deles se enquadram nos parâmetros ditados pelas normas de tijolos, sendo eles os traços contendo 2,5 % de NaOH, 5,0 % de NaOH e 5,0 % da mistura dos dois ativadores, ambos com cura em estufa a 45 °C durante sete dias, como os melhores traços para a produção de tijolos de RMF, sendo nomeados de traços 1, traço 2 e traço 3 respectivamente como mostrado na Tabela 9.

A partir desta análise, produziu-se estes traços novamente, com o intuito de realizar ensaios de resistência a compressão no período de 7, 14, 21 e 28

dias, ensaio de absorção de água e ensaios de caracterização mineralógica de cada traço definido.

Tabela 9: Traços que se enquadraram na normatização de tijolos.

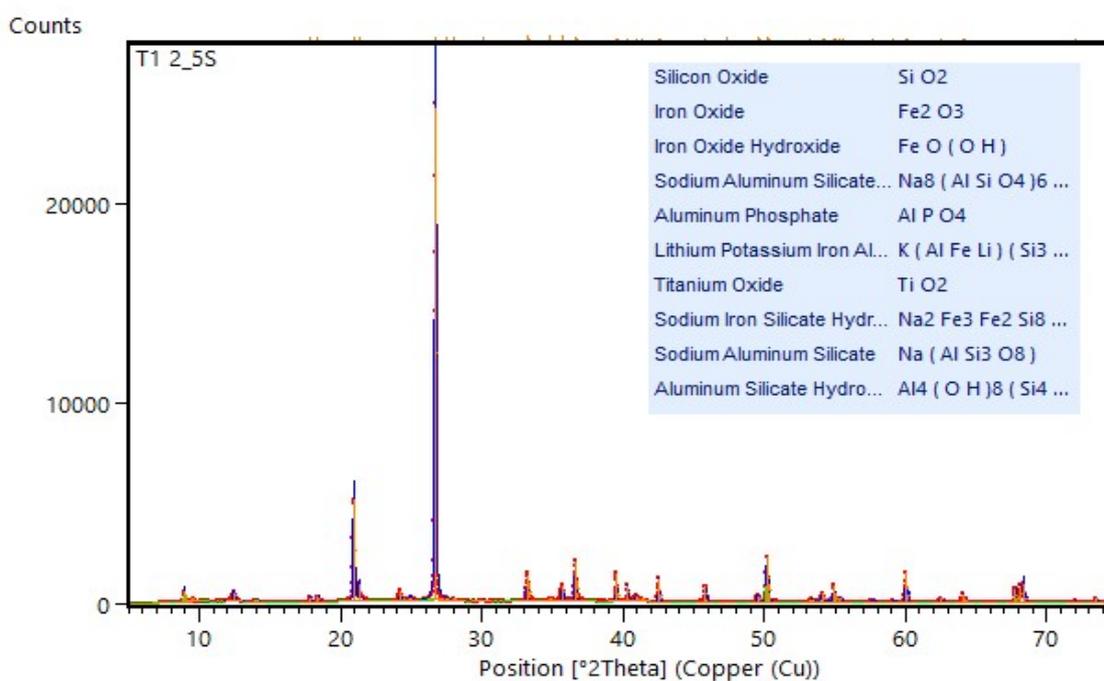
Traços que se enquadram nos parâmetros de norma para tijolos		
Nomenclatura	Composição	Tipo de Cura
Traço 1	2,5% de NaOH	Cura a 45°C
Traço 2	5,0% de NaOH	Cura a 45°C
Traço 3	5% de mistura (2,5% de NaOH e 2,5% de Na ₂ SiO ₃)	Cura a 45°C

Fonte: autora

6.5.1 Ensaio de difração de raio x dos protótipos

O ensaio de DRX para os três traços analisados obedeceu aos mesmos parâmetros do ensaio realizado par o RMF, sendo realizada a análise qualitativa do material, para avaliar a presença da formação de reações químicas nos traços testados. A Figura 17 apresenta o resultado do ensaio de DRX para o traço 1.

Figura 17: Gráfico de DRX do traço1.



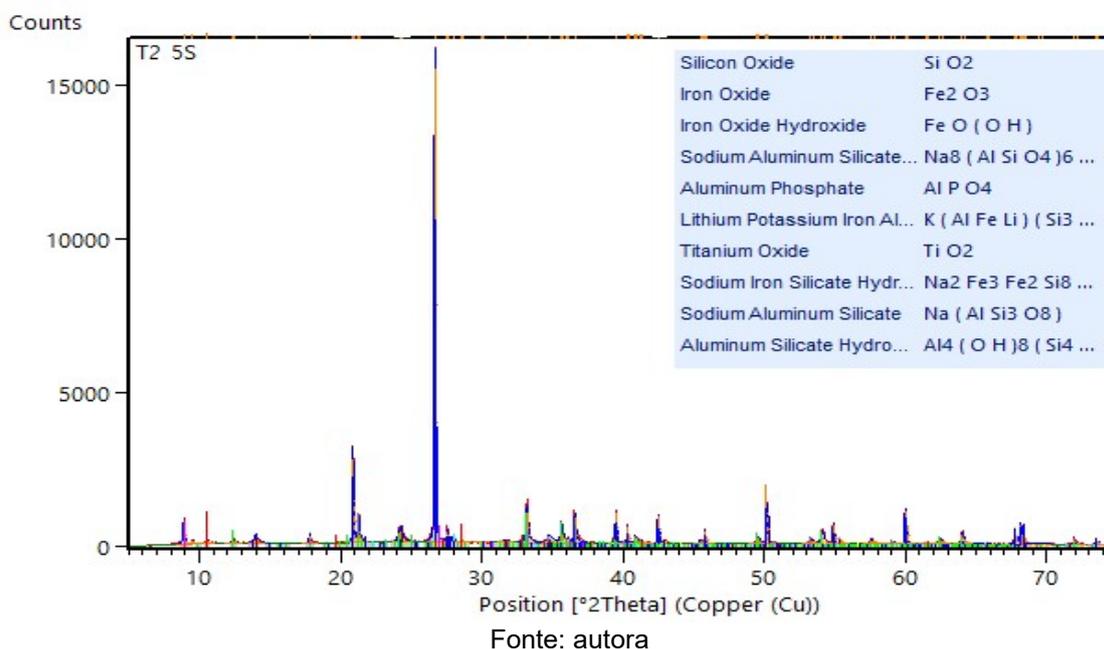
Fonte: autora

No traço 1, foi observada a presença de quartzo, hematita e goethita, ou seja, os mesmos minerais encontrados no RMF puro. Também foi observada a

presença da albita ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$), um composto formado por uma reação química entre o hidróxido de sódio, a alumina e a sílica, que fornece ao composto resistência mecânica devido o processo de ativação alcalina do qual se originou.

A maioria dos minerais encontrados neste gráfico também pode ser observado em outros ensaios, como o FRX e o TG. Esses minerais são compostos principalmente por SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , entre outros. a Figura 18 apresenta o resultado do DRX do traço 2.

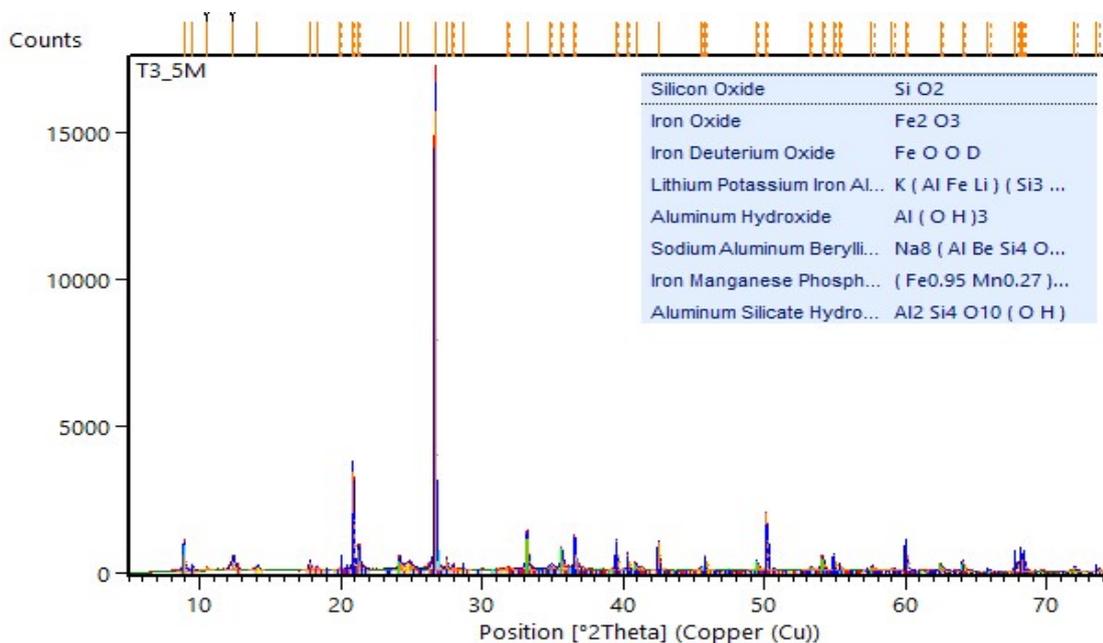
Figura 18: Gráfico de DRX do traço 2.



No traço 2, além dos minerais que estavam no rejeito antes da ativação, também foi observada a presença de albita ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$), assim como o composto alumino silicato de sódio ($\text{Na}_8[\text{AlSiO}_4]_6(\text{NO}_3)_2$) também conhecida como sodalita. Foi observado um maior consumo de SiO_2 e Al_2O_3 em comparação ao traço 1, devido ao alcance menor dos picos desses minerais. A Figura 19 apresenta o resultado do DRX do traço 3.

O traço 3 apresenta compostos muito parecidos com os traços anteriores, onde também foi observada a presença da albita, da sodalita e também o silicato de alumínio hidrolisado ($\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_6$), que apresenta alta inércia química, característica dos minerais filossilicatados, dando resistência química ao produto, o que favoreceu a um maior ganho de resistência a este traço, em comparação aos anteriores.

Figura 19: Gráfico de DRX do traço 3.



Fonte: autora

Analisando os gráficos das três figuras, foi possível perceber um comportamento semelhante na distribuição dos picos, havendo uma pequena diferença na amplitude deles. Observou-se a presença dos mesmos minerais encontrados no RMF no estado natural, tais como quartzo, hematita, goethita, muscovita e caulinita e gibsita, entre outros. Porém também foi possível observar a formação de novos compostos, com a presença hidróxido de sódio.

Nos três traços, observou-se que as reações químicas ocorridas não consumiram totalmente os minerais encontrados inicialmente no RMF em estado natural, tais como alumina e sílica também observados no ensaio de FRX, que são os principais compostos para a formação dos produtos alcalino ativados. Isso ocorreu devido o estado cristalino das partículas, e devido ao tamanho de seus grãos. Apesar disso, o ganho de resistência do material foi satisfatório considerando sua utilização, e isso se deu devido ao processo de produção, onde foi aplicada a compressão, o que proporcionou um ganho maior de resistência ao material.

6.5.2 Ensaio de fluorescência de raio x dos protótipos

O resultado dos ensaios de FRX dos três traços selecionados estão apresentados na Tabela 10:

Tabela 10: Composição química dos traços 1, 2 e 3.

Composição dos protótipos de tijolo de RMF-Gesteira			
Componentes	Quantidade (%)		
	Traço 1	Traço 2	Traço 3
Al ₂ O ₃	15,31	14,65	13,45
SiO ₂	54,37	48,57	52,24
Fe ₂ O ₃	19,20	17,07	16,99
Na ₂ O	9,47	18,32	15,50
Outros	1,66	1,39	1,88

Fonte: autora.

O resultado do ensaio de FRX do traço 1, mostra que houve uma diminuição nas porcentagens dos componentes, ao se comparar com o resultado do FRX do RMF puro, e a presença do óxido de sódio (Na₂O) foi detectada. Este resultado era esperado devido ao acréscimo de NaOH para a produção do tijolo.

O resultado do ensaio de FRX do traço 2, também mostra a diminuição nas porcentagens dos componentes devido ao acréscimo do NaOH, também sendo detectado também óxido de sódio (Na₂O). Como o acréscimo de NaOH neste traço foi o dobro do traço 1, a quantidade de Na₂O, na amostra também dobrou em relação ao traço 1.

O resultado do ensaio de FRX do traço 3, também houve diminuição nas porcentagens dos componentes devido ao acréscimo da mistura de Na₂O e Na₂SiO₃ e a presença do óxido de sódio (Na₂O) também foi detectada.

Houve uma pequena variação na porcentagem dos componentes em cada traço, isso por causa do acréscimo dos ativadores, e também por causa das reações que, mesmo sendo pouco perceptíveis, consumiu alguns minerais, tais como o SiO₂ e o Al₂O₃, como será observado nos ensaios de DRX de cada traço.

6.5.3 Resultado da condutividade elétrica e pH dos traços 1, 2 e 3

Os resultados dos ensaios de condutividade elétrica e pH do traço 1 foram de 6,60 μS/cm e 10,69 respectivamente. Já o traço 2, foram de 7,31 μS/cm e 12,12, e para o traço 3 foram de 11,87 μS/cm e 11,81.

Analisando os resultados de condutividade elétrica, foi possível notar que os traços têm valores de condutividade elétrica relativamente altos, sendo o traço 3 o que apresentou maior valor. Estes valores podem estar associados a presença de íons (sulfatos, sais, prótons e metais), e principalmente a presença de óxidos férricos, presente na composição do RMF, e nos compostos formados pela adição de NaOH e Na₂SiO₃ para a produção dos protótipos.

O pH dos traços estudados foram detectados como alcalinos devido ao seu alto valor, (acima de 7) em decorrência dos constituintes originais do rejeito ou dos processos envolvidos no beneficiamento do minério, e do acréscimo de NaOH e Na₂SiO₃. Esses valores mais altos representam um benefício, pois eles ajudam a reter os metais pesados presentes na composição do RMF, tais como o PbO e o MnO encontrados na análise de FRX do RMF.

6.6 RESULTADO DOS ENSAIOS DE RESISTÊNCIA E ABSORÇÃO DOS TRAÇOS QUE ENQUADRARAM NOS REQUISITOS DE PRODUÇÃO DE TIJOLOS.

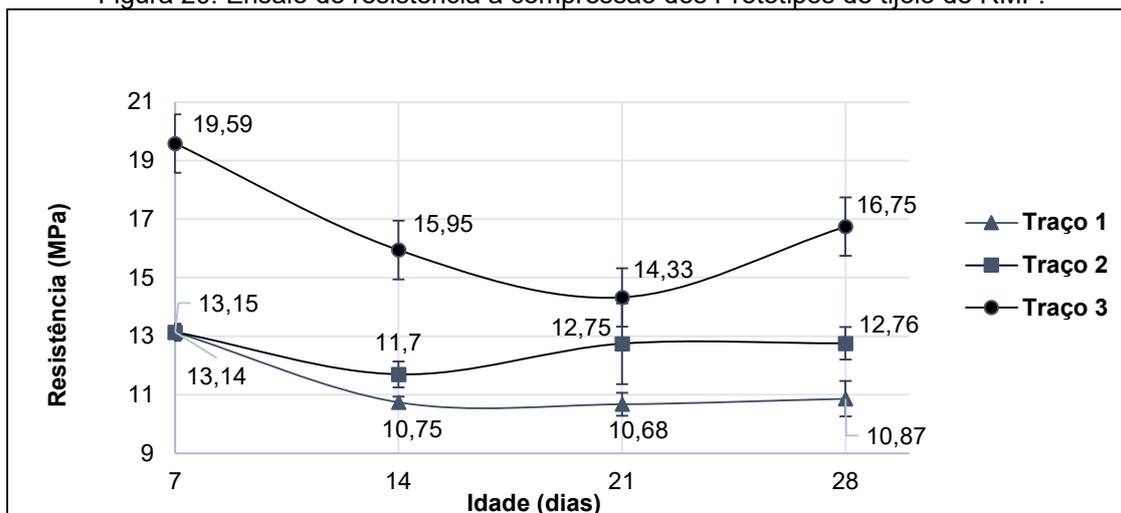
O ensaio de resistência à compressão foi repetido para os traços 1, 2 e 3, porém foram realizados nas idades de 7, 14, 21 e 28 dias, como mostrado na Figura 20.

Analisando os resultados apresentados no gráfico referente ao traço 1, notou-se que houve uma queda no valor da resistência à compressão do sétimo dia ao vigésimo primeiro dia num percentual de 18,78 %, após isso, apresentou um leve crescimento.

O traço 2 apresentou uma queda no valor de resistência à compressão num valor de 10,96 % do sétimo para o décimo quarto dia, e apresentou crescimento tendendo para a estabilização do valor.

Já o traço 3 apresentou comportamento semelhante ao traço 1, porém com uma queda maior no valor de resistência à compressão, resultando num valor de 26,63 % do sétimo para o vigésimo primeiro dia, e voltou a apresentar crescimento do vigésimo primeiro para o vigésimo oitavo dia.

Figura 20: Ensaio de resistência à compressão dos Protótipos de tijolo de RMF.



Fonte: autora.

Acredita-se que estas quedas nos valores de resistência nos três traços, se deu devido a absorção de umidade do ar. Porém, mesmo assim todos os valores são satisfatórios para a produção de tijolos, já que o valor mínimo de resistência média é de 2,0 MPa.

O ensaio de absorção de água também foi feito com os protótipos dos traços 1, 2 e 3. Os resultados foram apresentados na Tabela 11 abaixo:

Tabela 11: Ensaio de absorção de água nos traços 1, 2 e 3.

Ensaio de absorção de água				
Traços	Absorção de água (%)	Absorção de água (%)	Absorção de água (%)	Absorção de água média (%)
1	9,91	10,48	10,32	10,24
2	8,91	9,44	10,20	9,52
3	9,76	9,65	9,92	9,78

Fonte: autora

A partir dos ensaios de absorção de água apresentados, pode-se confirmar que os três traços analisados se enquadraram nos parâmetros definidos na norma para a produção de tijolos. A absorção de água alcançada nos trabalhos de Kumar (2017) foi de 14,07 % a 18,65 % e Kuranchie (2016) foi de 8,41 % a 9,0 %. A obtida neste trabalho foi 9,52 % a 10,24 %, não diferindo muito dos trabalhos de citados.

A maioria dos autores estudados utilizaram soluções de NaOH e Na₂SiO₃ para a produção de tijolos de geopolímeros e alcançaram bons resultados de

resistência a compressão, tais como: Bezerra (2019) com resultados entre 1,5 MPa e 4,5 Mpa aos 28 dias, Kumar (2017) com resultados entre 4,65 MPa e 5,15 Mpa aos 28 dias, Kuranchie (2016) 19,18 Mpa com um dia de cura, e 50,35 Mpa com sete dias de cura. Porém todos os autores citados utilizaram algum processo de melhoramento no RMF para favorecer o processo de ativação escolhida, e neste trabalho, apenas o processo de cura foi realizado com este intuito.

Outros autores usaram outros ativadores para obtenção de tijolos geopoliméricos, como WEISHI (2018) que usou como ativador trietanolamina e emulsão de ácido esteárico, obteve resistência a compressão de 23,70 Mpa a 32,40 Mpa e absorção de água de 2,08 % a 7,91 %. Pedroso (2020)^a utilizou como ativador resíduo da produção de celulose e obteve resistência a compressão ente de 4,0 MPa e 6,92 MPa e absorção de água entre 9,62 % a 10,86 %. E Pedroso (2020)^b utilizou lodo da anodização de alumínio, obteve resistência média de 7,15 MPa e absorção média de 8,5 %.

Outros utilizaram o cimento Portland como ativador, tais como De Mantilla (2013) e Martins e Santos (2018), obtiveram resistência a compressão média de 14,57 MPa, e de 2,23 MPa respectivamente. E Martins e Santos (2018), obteve absorção de 20,26 % de água. Assim constatou-se que a utilização do NaOH foi uma boa escolha devido aos resultados superiores de resistência a compressão.

Levando em consideração as diferenças no processo de produção entre o protótipo produzido neste trabalho, e os dos trabalhos anteriores, concluiu-se que os resultados obtidos foram satisfatórios, devido a simplicidade do processo de obtenção do protótipo, que poderá ser empregado no tijolo apenas mudando a forma e tamanho do material.

7 CONCLUSÃO

A caracterização física, química e mineralógica do RMF de Gesteira, foi imprescindível para o desenvolvimento do processo de produção dos protótipos. Através dos ensaios de caracterização física concluiu-se que se tratava de um material com classificação granulométrica de areia siltosa, com uma massa específica relativamente alta e plasticidade média-baixa. Com a caracterização mineralógica concluiu-se que ele é formado basicamente por quartzo, hematita e alumina, e alguns outros minerais em quantidades menores.

Em sua composição também foram encontrados minerais tóxicos, como óxido de chumbo (PbO) com 0,0079% e óxido de manganês com 0,086%, mas essas quantidades estão dentro dos limites estabelecidos, possibilitando assim a sua utilização como matéria-prima para a construção civil.

A composição química e granulométrica do RMF não favoreceu a produção de um composto álcali ativado muito resistente, pois apresenta uma formação cristalina na formação de suas partículas. Porém a metodologia utilizada, e os estabilizantes escolhidos para produzir os protótipos de tijolos resultaram em produtos que se enquadram de forma satisfatória nos requisitos normatizados para a produção de tijolos ecológicos com e resistência de até 6,5 vezes maior que a exigida para este material e absorção de água dentro dos limites estabelecidos por norma.

A utilização do NaOH para a produção dos protótipos resultou em dois traços que se enquadraram nos requisitos de aceitação da NBR 8491 (ABNT, 2012). Já a utilização do Na_2SiO_3 também apresentou resultados que se enquadraram nesta norma, porém devido ao alto custo do produto, e menor rendimento, optou-se por não utilizar neste trabalho. Já o traço com mistura dos dois ativadores apresentou o maior resultado de resistência a compressão.

Analisando a resistência e a absorção de água dos traços definidos no trabalho, foi possível observar que três traços se enquadraram nos requisitos de produção de tijolos, sendo eles os traços que contêm 2,5% de NaOH, 5,0 % de NaOH, e o com 5% da mistura dos dois reagentes (2,5% de NaOH e 2,5% de Na_2SiO_3). Nos três traços, o processo de produção foi fundamental para a obtenção dos resultados, sendo a compressão dos protótipos, cura a temperatura de 45°C e quantidade de água utilizada foram os fatores primordiais

para o ganho de resistência do material.

A partir da análise da composição química dos protótipos foi possível observar a formação de albita e sodalita, e compostos alumino-silicatos, provenientes da reação química entre a sílica, a alumina, o hidróxido de sódio e/ou silicato de sódio. Tais compostos ajudaram no processo de estabilização dos protótipos e no aumento da resistência a compressão do material.

A partir da pesquisa realizada, comprovou-se que a produção de tijolos feitos de RMF através do processo de ativação alcalina, foi totalmente possível, levando-se em conta a facilidade de encontrar os produtos que foram utilizados como estabilizantes, a disponibilidade da matéria-prima na região, e a facilidade do processo de produção dos tijolos.

Para trabalhos futuros sugere-se que sejam estudadas novas variações de traços; refinamentos dos traços através de métodos computacionais; variações de tempo e temperatura de cura; variações de força de compressão, teor de umidade acrescentada e acréscimo de outros resíduos industriais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457** - Amostras de solo: Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização, 2016.

ABNT. **NBR 16814**: Adobe - Requisitos e métodos de ensaio, Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2019.

ABNT. **NBR 6504**: Grãos de solo que passam na peneira 4,8mm-determinação da massa específica, Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2014.

ABNT. **NBR 6502**: Solos e rochas – Terminologia, Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2022.

ABNT. **NBR 7182**: Solo - Ensaio de compactação, Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2020.

ABNT. **NBR 8492: Tijolo de solo-cimento** – Análise dimensional, determinação da resistência à compressão, e da absorção de água, Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2013.

ABNT. **NBR 7180**: Solo – Determinação do limite de plasticidade, Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2016.

ABNT. **NBR 6459**: Solo – Determinação do limite de liquidez, Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2016.

ABNT. **NBR 8491**: Norma Tijolo de Solo Cimento Requisitos, Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2012a.ABNT.

ABNT. **NBR 10836**: Bloco de solo-cimento sem função estrutural — Análise dimensional, determinação da resistência à compressão e da absorção de água — Método de ensaio. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2013.

NBR 10004: Resíduos sólidos – Classificação. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2004a.

ABNT. **NBR 10005**: Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2004b.

ABNT. **NBR 10006**: Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2004c.

ABNT. **NBR 15270-1**: Componentes cerâmicos - Blocos e tijolos para alvenaria - Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2017.

ALVES, M. E. et al, 2008, "Comparação de procedimentos de quantificação de caulinita e gibbsita na fração argila desferrificada de Latossolos". Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 32, n. 2, pp. 569-577.

ANA. Relatório de segurança de barragens, 2017. **Agência Nacional de Águas**. Disponível em: <<https://www.snisb.gov.br/portal/snisb/relatorio-anual-de-seguranca-de-barragem/2017/rsb-2017-versao-enviada-ao-cnrh.pdf>>.

ANDRADE, L. C. R. **Caracterização de rejeitos de mineração de ferro, in natura e segregados, para aplicação como material de construção civil**. 2014. 96 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2014.

ARAÚJO, C.B. **Contribuição ao estudo do comportamento de barragens de rejeito de mineração de ferro**. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, 2006.

BERTELSEN, I. M. G. et al. Influence of synthetic waste fibres on drying shrinkage cracking and mechanical properties of adobe materials. **Construction and Building Materials**, v. 286, p. 122738, 2021.

BEZERRA, A. C. S. et al. Ativação alcalina de cinzas com alto teor de cálcio e rejeito de minério de ferro e seu potencial de reciclagem para utilização como material de construção. **Ambiente Construído**, v. 19, n. 3, p. 99-112, 2019.

BEZERRA, C. G. **Caracterização do rejeito de minério de ferro (iot) e avaliação da sua influência no comportamento físico-químico e mecânico de pastas de cimento**. 2017. 150f Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ. Rio de Janeiro, 2017.

BRASIL. Agência Nacional de Mineração. Sistema de Gestão de Segurança de Barragem de Mineração. Pesquisar barragens [Internet]. 2022 [acessado em 01 jun. 2022] Disponível em: <<https://app.anm.gov.br/SIGBM/Publico/ClassificacaoNacionalDaBarragem>>

BRASIL. Agência Nacional de Mineração. Aproveitamento de Estéreis e Rejeito. Pesquisar barragens [Internet]. 2023 [acessado em 20 abr. 23] Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/regulacao/analise-do-impacto-regulatorio-air/air_aproveitamento-de-esteril-rejeitos_02-2.pdf>

CARMIGNANO, O. R. et al. Iron Ore Mailings: Characterization and Applications. **Journal off the Brazilian Chemical Society**, v. 32, p. 1895-1911, 2021.

CASTRO, J. F. A. Melhoramento de um solo arenoso por ativação alcalina. Dissertação de Mestrado. Mestrado integrado em engenharia civil, Universidade do Porto, Faculdade em engenharia civil. Porto, 2015.

COELHO, E. F. F. **Estudo do comportamento mecânico de rejeitos de minério de ferro reforçados com fibras sintéticas**. Dissertação. Programa de

Pós-Graduação em Geotecnia. Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2008.

COUTO, André Vinícius Melo. **Avaliação das características geomecânicas do solo da área destinada à construção do campus definitivo da Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho-UFRPE**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso. Brasil.

CONAMA. Conselho Nacional do Meio Ambiente - Resolução Nº420 de 28 de dezembro de 2009. Ministério do Desenvolvimento Urbano e Meio Ambiente, Brasília-DF.

CORRÊA, L. R. **Sustentabilidade na construção civil**. Monografia (Curso de Especialização em Construção Civil) -Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, 2009.

CORREA, José Carlos. **Limites de consistência de solos da Amazônia Central e sua importância agrícola**. 1982.

DE MANTILLA, Judy Norka Rodo et al. AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO À COMPRESSÃO DE PAREDES INTERTRAVADAS COM TIJOLOS DE REJEITOS DE MINÉRIO DE FERRO. **CONSTRUINDO**, 2013.

DE SOUZA PORTO, Marcelo Firpo. A tragédia da mineração e do desenvolvimento no Brasil: desafios para a saúde coletiva The tragedy of mining and development in Brazil: public health challenges La tragedia de la minería y el desarrollo en Brasil. **Cad. Saúde Pública**, v. 32, n. 2, p. e00211015, 2016.

DOS SANTOS, F. P. *et al.* Quantificação das Emissões de CO₂ Dos Materiais Utilizados na Construção de uma Residência em Caçapava do Sul (RS). **Blücher Engineering Proceedings**, v. 3, n. 2, p. 603-611, 2016.

DUARTE, A. P. **Classificação das barragens de contenção de rejeitos de mineração e de resíduos industriais no estado de Minas Gerais em relação ao potencial de risco**. Dissertação. Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte 2008.

DUXSON, P., FERNÁNDEZ-JIMENEZ, A., PROVIS, J., LUKET, G. C., VAN DEVENTER, J. S. Geopolymer technology: The current state of the art, *Journal of Materials Science*, [s. l.], v. 42, n. 9, p. 2917-2933, 2007.

ELÓI, Fernanda Pereira da Fonseca. Ativação alcalina do rejeito de barragem de minério de ferro com adição de sílica ativa. 2020.

FEAM. Inventário de barragens do estado de Minas Gerais ano 2017 - 2018 **Fundação Estadual do Meio Ambiente**. Disponível em: <<http://www.feam.br/>>

FERNÁNDEZ JIMÉNEZ A., PALOMO A., SOBRADOS I. Y; SANZ J. (2006). The role played by the reactive alumina content in the alkaline activation of fly ashes, Microporous and Mesoporous. *Materials* vol. 91, núm. 1-3, p. 111-119. 2006.

FRACARO, Taciane Pedrotti. Análise do comportamento mecânico de rejeito de minério de ferro submetido a ativação alcalina pelo método “two parts”. 2022.)

FREITAS, Carlos Machado de et al. Desastres em barragens de mineração como riscos sistêmicos. **Revista Brasileira de Epidemiologia**, v. 25, 2022.

GLUKHOVSKY, V. D. Soil silicates. **Gosstroyizdat, Kiev**, v. 154, 1959.

GONÇALVES, T. D. GOMES, M. I. Construção de terra crua: potencialidades e questões em aberto. **Jornadas LNEC, Lisboa**, v. 18, 2012.

GOMES, Ana Cláudia Franca et al. Aplicação de rejeito de mineração em pequena escala de ouro na produção de tijolo de solo-cimento. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 27, 2022.

IBGE. Contas Nacionais Trimestrais: Indicadores de Volume e Valores Correntes, 2021. **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**. Disponível em:
< https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/2121/cnt_2021_1tri.pdf >.

IBRAM. Informações sobre a Economia Mineral Brasileira, 2015. **Instituto Brasileiro de Mineração**. Disponível em:
<<https://ibram.org.br/wp-content/uploads/2020/12/Economia-Mineral-Brasileira-MG.pdf>>

IPT. Rejeitos de mineração. **Instituto de Pesquisas Tecnológicas**. Disponível em: <http://www.ipt.br/noticias_interna.php?id_noticia=1043>. Acesso em: 08 ago. 2021.

JASKULSKI, Fernanda Maria. Análise do comportamento mecânico de rejeito de minério de ferro submetido a ativação alcalina pelo método “One-Part”. 2022.

KOVLER, K. Three Dilemmas in Sustainability of Construction Materials and Technologies. In: **2nd International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies**. 2010. p. 199-209.

KUMAR, S. A. **Study on Geopolymer Eco Bricks**, 2015. Department of Civil Engineering, Bharath University, Chennai, 2015.

KUMAR, R. *et al.* Utilization of iron ore tailings for the production of fly ash—GGBS-based geopolymer bricks. **Journal of Advanced Manufacturing Systems**, v. 16, n. 03, p. 275-290, 2017.

KURANCHIE, F. A.; SHUKLA, S. K.; HABIBI, D. Utilisation of iron ore mine tailings for the production of geopolymer bricks. **International Journal of Mining, Reclamation and Environment**, v. 30, n. 2, p. 92-114, 2016.

LINGLING, X. *et al.* Study on fired bricks with replacing clay by fly ash in high volume ratio. **Construction and building materials**, v. 19, n. 3, p. 243-247, 2005.

LONGHI, M. A. Aglomerante álcali-ativado contendo lodo de ETA e cinza de casca de arroz. 2015. 184f. Dissertação de mestrado em Engenharia Civil – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

LUUKKONEM, T., ABDOLLAHNEJAD, Z., YLINIEMI, J., KINNUNEM, P., ILLIKANEIN, M. One-part geopolymer mixes from geothermal silica and sodium aluminate. *Cement and Concrete Research*, [s. 1.], v. 103, p. 21-34, 2018.

MACHADO, Mayare de Souza Moura Maciel. Blocos para construção civil feitos com rejeitos depositados na Barragem de Candonga. 2018.

MALISKA, Ana Maria. Microscopia eletrônica de varredura e microanálise. **UFSC, Santa Catarina**, 2004.

MARTINS, CLENILSON CRISTIANO; SANTOS, VINICIUS DE OLIVEIRA. ESTUDO DA VIABILIDADE DO USO DOS TIJOLOS ECOLÓGICOS COM INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS DE BARRAGEM DE MINÉRIO DE FERRO PARA CONSTRUÇÕES UNIFAMILIARES. 2018.

MELLAIKHAFI, A. *et al.* Characterization of different earthen construction materials in an oasis of south-eastern Morocco (Errachidia Province). **Case Studies in Construction Materials**, v. 14, p. e00496, 2021.

MENDES, M. V. A. *et al.* Utilização de Rejeito Magnético para Moldagem de Tijolos.

MINAS JR. CONSULTORIA, **Diferença entre FRX e DRX**, 21 de janeiro 2020. Disponível em: <https://www.minasjr.com.br/diferencas-entre-drx-e-frx/> > Acesso em: 10 de outubro de 2022.

MME. PLANO NACIONAL DE MINERAÇÃO 2050 Sustentabilidade e Competitividade. **Ministério de Minas e Energia**. Disponível em: <http://antigo.mme.gov.br/c/document_library/get_file?uuid=deaa585a-197a-f5e6-f347-b12d65ea878b&groupId=404993>.

MPF - Procuradoria da República no Estado de Minas Gerais, Força Tarefa Rio Doce, Recomendação N° 014/2016-MPF-GAB/FT, 2016. **Ministério Público Federal**, Disponível em: <http://www.mpf.mp.br/mg/sala-de-imprensa/docs/recomendacao-dnmp>>

Nº, DNPM Portaria. 416, de 03 de setembro de 2012. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil. Brasília, DF**, 2012.

NOCITI, Denyse Meirelles. Aproveitamento de rejeitos oriundos da extração de minério de ferro na fabricação de cerâmicas vermelhas. 2011.

PACHECO-TORGAL, Fernando; JALALI, Said. A sustentabilidade dos materiais

de construção. 2010.

PEDROSO, C. L. **Compósitos à base de rejeito do minério de ferro, resíduo de concreto, resíduos da produção de celulose e resíduo da produção da cal.** Tese (Doutorado em Engenharia Civil) Universidade Tecnológica do Paraná, Curitiba, 2020a.

PEDROSO, D. E. **Aproveitamento do rejeito de minério de ferro em compósitos para construção civil.** Tese (Doutorado em Engenharia Civil) Universidade Tecnológica do Paraná, Curitiba, 2020b

PEREIRA, Marina Mendonça. **Avaliação da biodisponibilidade de metais em rejeitos de mineração empregando extrações simples.** 2016. 59 f., il. Monografia (Bacharelado em Engenharia Ambiental)- Universidade de Brasília, Brasília, 2016.

PINTO, A. T. Sistemas Ligantes Obtidos por Activação Alcalina do Metacaulino. Tese (Doutorado), Universidade do Minho, Portugal, 2004)

PROVIS, J. L. Alkali-activated materials. *Cement and Concrete Research*, v. 114, p. 40–48, 2018.

RAMOS FILHO, Ricardo Eugênio Barbosa. **Estudo da combinação de resíduo de scheelita, pó de pedra e manípueira com aglomerantes para produção de tijolos ecológicos.** 2021.

REIS, F. M. D. **Estudo do comportamento físico-mecânico de tijolos de solo-cimento com adição de rejeitos de mineração de quartzito.** 2020. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2020.

ROQUE, R. A. L. PIERRE, A. C. Uso inteligente de recursos naturais e sustentabilidade na construção civil. **Research, society and development**, v. 8, n. 2, p. e3482703-e3482703, 2019.

SCHNEIDER, C. M.; MOREIRAS, S. T. F. Produção de tijolos cerâmicos vazados com redução da temperatura de queima. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 3, p. 28848-28853, 2021.

SCRIVENER, Karen *et al.* (Ed.). **A practical guide to microstructural analysis of cementitious materials.** Boca Raton, FL, USA: Crc Press, 2016.

SILVA, Keoma Defáveri do Carmo *et al.* Iron ore tailing-based geopolymer containing glass wool residue: a study of mechanical and microstructural properties. 2019.

SON, H. *et al.* Implementing sustainable development in the construction industry: constructors' perspectives in the US and Korea. **Sustainable Development**, v. 19, n. 5, p. 337-347, 2011.

SOUSA, Ramile Gomes Uzeda. Quantificação das emissões de CO₂ dos materiais de construção: aço, areia, brita, cerâmica vermelha e cimento: Estudo de Caso em empreendimento habitacional de interesse social. Cruz das Almas, 2013. 70 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Ciências Exatas e Tecnológicas). Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Brasil.

SOUZA JUNIOR, T. F.; MOREIRA, E. B.; HEINECK, K. S. Barragens de contenção de rejeitos de mineração no Brasil. **Holos [recurso eletrônico]. Natal, RN. Vol. 5 (2018), p. 1-39**, 2018.

SOUZA, V. P. *et al.* Análise dos gases poluentes liberados durante a queima de cerâmica vermelha incorporada com lodo de estação de tratamento de água. **Cerâmica**, v. 54, n. 331, p. 351-355, 2008.

SORE, S. O. *et al.* Stabilization of compressed earth blocks (CEBs) by geopolymer binder based on local materials from Burkina Faso. **Construction and Building Materials**, v. 165, p. 333-345, 2018.

VILELA, D. P.; SANT'ANNA, D. O. Avaliação Qualitativa do Uso de Tijolos de Solo-cimento com Incorporação de Resíduos da Fibra de Bambu Produzidos no Município de Itajubá (MG). **Plural Design**, v. 2, n. 1, p. 41-54, 2019.

WEISHI, Li *et al.* The properties and formation mechanisms of eco-friendly brick building materials fabricated from low-silicon iron ore tailings. **Journal of cleaner production**, v. 204, p. 685-692, 2018.

WENTWORTH, Chester K. A scale of grade and class terms for clastic sediments. **The journal of geology**, v. 30, n. 5 p. 377-392, 1922.

YELLISHETTY, M., *et al.* Reuse of iron ore mineral wastes in civil engineering constructions: a case study. **Resour. Conserv. Recycle**. v. 52, p.1283-1289, 2008.