

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS
CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

ANDRÉ GUILHERME MARTINS COSTA

INFLUÊNCIA DO MINÉRIO DE FERRO NAS PROPRIEDADES DE LADRILHOS
HIDRÁULICOS

BELO HORIZONTE

2025

ANDRÉ GUILHERME MARTINS COSTA

**INFLUÊNCIA DO MINÉRIO DE FERRO NAS PROPRIEDADES DE LADRILHOS
HIDRÁULICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Materiais, do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Dr. Augusto Cesar da Silva Bezerra

Coorientador: M. Luis Felipe dos Santos Lara

BELO HORIZONTE

2025

ANDRÉ GUILHERME MARTINS COSTA

**INFLUÊNCIA DO MINÉRIO DE FERRO NAS PROPRIEDADES DE LADRILHOS
HIDRÁULICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Materiais, do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Aprovado em __/__/__

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Augusto César da Silva Bezerra

Profa. Dra. Elaine Carballo Siqueira Corrêa

Prof. Dr. Marcello Rosa Dumont

Prof. Dr. Carlos Eduardo dos Santos

M. Luis Felipe dos Santos Lara

BELO HORIZONTE

2025

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a minha mãe Marlúcia Nogueira, que mesmo não estando aqui nesse momento tão importante foi uma pessoa essencial na minha vida e com certeza tem muito orgulho dessa conquista. Também ao meu pai, Paulo César, por todo o suporte e amor incondicional ao longo de toda a minha jornada de estudos. Seu apoio e incentivo para minha formação acadêmica e intelectual foram fundamentais para que eu chegasse até aqui. Agradeço também aos meus irmãos, Matheus Vinícius e Samuel Felipe pela parceria e companhia, e a minha companheira Ana Luiza, por estar ao meu lado, pelo carinho e por acreditar em mim.

Aos meus orientadores, Augusto Bezerra e Luis Felipe, sou grato pela orientação, paciência e pelos ensinamentos técnicos compartilhados. Também a todo o suporte dado pelo laboratório Materiais Inovadores Sustentáveis onde este trabalho foi desenvolvido, agradeço ao Márcio, Gustavo, Paulo, Richard, Flávia, Maísa, Janaína, entre outros que fazem dessa equipe tão querida.

RESUMO

Os ladrilhos hidráulicos (LH) são peças artesanais de revestimento, tendo o cimento Portland como principal matéria-prima. Entretanto, o cimento Portland é produzido pela calcinação de calcário e argila, processo este que libera quantidades significativas de dióxido de carbono na atmosfera. Sua substituição por outras matérias-primas pode reduzir os impactos ambientais gerados. Neste estudo foi avaliado o desempenho da incorporação do rejeito de minério de ferro em LH como material cimentício suplementar. O rejeito *In Natura* utilizado passou por um processo de calcinação em duas temperaturas (350°C e 700°C) a fim de entender o seu comportamento sob tratamento térmico. Os ladrilhos foram produzidos com variação na composição de 25% e 50% do rejeito em substituição do cimento Portland. Os LH foram prensados e curados submersos por dois dias e cura ao ar por 25 dias. Foram avaliados os parâmetros mecânicos, de durabilidade, pigmentação e estética a fim de avaliar o potencial do rejeito de minério de ferro. Observou-se que o rejeito com tratamento térmico a 700° com 25% de substituição do cimento apresentou melhores condições de resistência a abrasão, flexão e permeabilidade comparativamente aos ladrilhos convencionais. O estudo foi capaz de validar o procedimento de substituição do cimento Portland pelo rejeito de minério de ferro como camada de revestimento em ladrilhos hidráulicos.

Palavras-chave: Ladrilho hidráulico. Cimento Portland. Tratamento térmico. Rejeito. Minério de ferro.

ABSTRACT

Hydraulic tiles (HT) are handmade covering pieces, with Portland cement as the main raw material. However, Portland cement is produced by calcining limestone and clay, a process that releases significant amounts of carbon dioxide into the atmosphere. Replacing it with other raw materials can reduce the environmental impacts generated. This study evaluated the performance of incorporating iron ore tailings into HT as a supplementary cementitious material. The in natura tailings used underwent a calcination process at two temperatures (350°C and 700°C) in order to understand its behavior under heat treatment. The tiles were produced with variations in the composition of 25% and 50% of the tailings replacing Portland cement. The HT were pressed and cured submerged for two days and cured in air for 25 days. The mechanical, durability, pigmentation and aesthetic parameters were evaluated in order to assess the potential of the iron ore tailings. It was observed that the waste with heat treatment at 700° with 25% cement replacement presented better conditions of resistance to abrasion, flexure and permeability compared to conventional tiles. The study was able to validate the procedure of replacing Portland cement with iron ore waste as a coating layer in hydraulic tiles.

Keywords: Hydraulic tile. Portland cement. Heat treatment. Waste. Iron ore.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Principais reservas globais de minério de ferro	14
Figura 2 – Dados de exportação de minério de ferro no Brasil entre 2001 e 2017	15
Figura 3 – Azulejo de faiança revestido com chumbo	19
Figura 4 – Fluxograma da metodologia utilizada	20
Figura 5 - Ladrilhos hidráulicos produzidos com desenhos personalizados	25
Figura 6 - LH In Natura, 350°C, 700°C com 25% de rejeito e Referência, respectivamente ..	27
Figura 7 - Modelo de execução do ensaio de permeabilidade.....	29
Figura 8 - Termogravimetria do rejeito de minério de ferro ultrafino.....	30
Figura 9 - Rejeito de minério In Natura, 350°C e 700°C respectivamente	31
Figura 10 – Difratoograma dos rejeitos de minério de ferro	32
Figura 11 - Microscopia dos rejeitos In Natura (a), 350°C (b) e 700°C (c) e o CPV (d).....	35
Figura 12 - Resultado de resistência à flexão dos ladrilhos produzidos.....	36
Figura 13 - Corpos de prova do ensaio de resistência à abrasão do ladrilho de referência.....	37
Figura 14 – Resultados de resistência a abrasão dos ladrilhos produzidos	38
Figura 15 – Resultados de permeabilidade dos ladrilhos produzidos	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dosagem de precursores e proporção de cada camada no ladrilho	24
Tabela 2 – Traços de ladrilhos produzidos	26
Tabela 3 – Composição química do rejeito de minério de ferro	31
Tabela 4 – Área superficial e granulometria dos precursores	34
Tabela 5 – Análise colorimétrica dos ladrilhos produzidos	40

LISTA DE SIGLAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

BET - Ensaio de Área Superficial

CO₂ - Dióxido de carbono

CPV ARI - Cimento Portland tipo V de Alta Resistência Inicial (CP-V ARI)

DRX - Difração de Raios X

DTG - Taxa de Perda de Massa

FRX - Fluorescência de Raios X

FTIR - Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier

IBRAM - Instituto Brasileiro de Mineração

LH - Ladrilho Hidráulico

MCS - Materiais Cimentícios Suplementares

MEV - Microscopia Eletrônica de Varredura

NBR - Norma Brasileira

RGB – Red/Green/Blue

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	11
2 OBJETIVO	13
2.1 Objetivo Geral	13
2.2 Objetivos Específicos	13
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
3.1 O minério de ferro e a produção de rejeito	14
3.2 Material Cimentício Suplementar (MCS).....	16
3.3 Ladrilhos hidráulicos e seu contexto histórico	18
4 MATERIAIS E MÉTODOS.....	20
4.1 Desenvolvimento geral	20
4.2 Materiais	21
4.2.1 Rejeito de minério de ferro	21
4.2.2 Cimento Portland	21
4.2.3 Areias industriais	21
4.3 Métodos	22
4.3.1 Preparação do Rejeito	22
4.3.2 Caracterização do Rejeito	23
4.3.3 Produção dos Ladrilhos	23
4.3.4 Ensaios dos Ladrilhos	27
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	30
5.1 Caracterização dos rejeitos	30
5.1.1 Termogravimetria	30
5.1.2 Fluorescência de Raios X (FRX).....	31
5.1.3 Difração de Raios X (DRX)	32
5.1.4 Ensaio de Sorção Gasosa e Granulometria a Laser	34

5.1.5 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	35
5.2 Ensaaios dos ladrilhos	36
5.2.1 Resistência à flexão	36
5.2.2 Resistência à abrasão	37
5.2.3 Permeabilidade	39
5.2.4 Colorimetria.....	40
6 CONCLUSÃO.....	42
7 REFERÊNCIAS	43

1 INTRODUÇÃO

O minério de ferro é uma das commodities mais exploradas e extraídas no Brasil. É uma matéria-prima que possui uma vasta aplicação no mercado há séculos e sua extração ainda é fundamental na sociedade moderna. Dados apontam que o Brasil é o segundo maior produtor do minério de ferro no mundo, apenas atrás da Austrália, e estima-se que em 2023 foram extraídos 378,5 milhões de toneladas do minério (IBRAM, 2024). Essa produção para o país representa cerca de aproximadamente 9% da exportação de commodities, atrás apenas da exportação de soja e petróleo (FAZCOMEX, 2024). Isso se deve ao fato de que o Brasil é um dos países que mais possuem reservas naturais do minério, acarretando então no grande investimento da sua extração e beneficiamento como país de indústria primária (NUNES, 2012).

Entende-se que a extração de minério de ferro traz consigo uma exploração exacerbada do meio ambiente com diversos danos colaterais que são causados. A produção do rejeito de minério de ferro é ocasionada durante o beneficiamento do minério em que são realizadas as etapas de extração, cominuição, concentração e disposição do minério (ZINATO, 2013). Estratégias de reaproveitamento do rejeito de minério de ferro são necessárias e estão sendo cada vez mais introduzidas, como no caso da Vale, empresa extratora do minério de ferro, que em Minas Gerais pretende em até 2030 possuir cerca de 10% da produção de minério de ferro por meio do rejeito, com cerca de 7 milhões de toneladas de rejeito recuperado por ano (VALE, 2024).

O cimento Portland é um material extremamente utilizado nas mais diversas aplicações da indústria civil. Segundo dados estatísticos da organização sem fins lucrativos Cimento.org, a produção anual do cimento no Brasil em 2022 chegou a 62,7 milhões de toneladas, consequentemente, grande parte dessa produção é emitida em forma de gases poluentes, como o CO_2 . Os impasses ambientais ocasionados devido a sua fabricação ocorrem durante a produção do clínquer, principal matéria-prima do cimento que libera diversos gases poluentes na atmosfera durante suas reações de calcinação. Portanto, medidas globais que regem a produção do cimento estão sendo tomadas, a fim de minimizar tais impactos ambientais (SILVA, 2012).

O ladrilho hidráulico (LH), artefato cimentício de revestimento, surge como uma opção viável em que se pode realizar a substituição do cimento pelo rejeito de minério de ferro, com

o objetivo de diminuir o consumo de cimento, agregar valor aos rejeitos e contribuir para a mitigação de impactos ambientais. O ladrilho hidráulico, feito a partir de material cimentício, é produzido de forma empírica e artesanal, e sua cura ocorre por imersão em água, sem necessidade de queima, o que representa uma vantagem ambiental em comparação com cerâmicas. Portanto, o uso de cimento Portland na fabricação de ladrilhos ainda causa impactos ambientais significativos, e sua substituição parcial pode trazer benefícios adicionais ao produto.

Neste trabalho foi realizado o estudo referente ao impacto de óxidos de ferro na composição da camada de revestimento em ladrilhos hidráulicos, avaliando propriedades de resistência mecânica e durabilidade ao produto. Foram moldados ladrilhos com incremento de 25% e 50% de rejeito de minério de ferro calcinado a 350°C e 700°C na composição, além de um ladrilho referência simulando o convencional comercializado, podendo ser possível comparar e discutir os resultados, avaliando o potencial de substituição do rejeito em função do cimento Portland.

2 OBJETIVO

2.1 Objetivo Geral

O trabalho tem como objetivo analisar a utilização do rejeito de minério de ferro como agente substituto do cimento Portland em ladrilhos hidráulicos.

2.2 Objetivos Específicos

- Avaliar os tratamentos térmicos de 350°C e 700°C realizados no rejeito de minério de ferro;
- Avaliar as dosagens de 25% e 50% de rejeito de minério de ferro como incorporação no ladrilho hidráulico;
- Avaliar as caracterizações do rejeito de minério de ferro baseado na sua composição química, estrutura cristalina, morfologia e granulometria;
- Investigar as propriedades mecânicas, de resistência à flexão e abrasão, de permeabilidade e pigmentação do rejeito incorporado no ladrilho hidráulico.

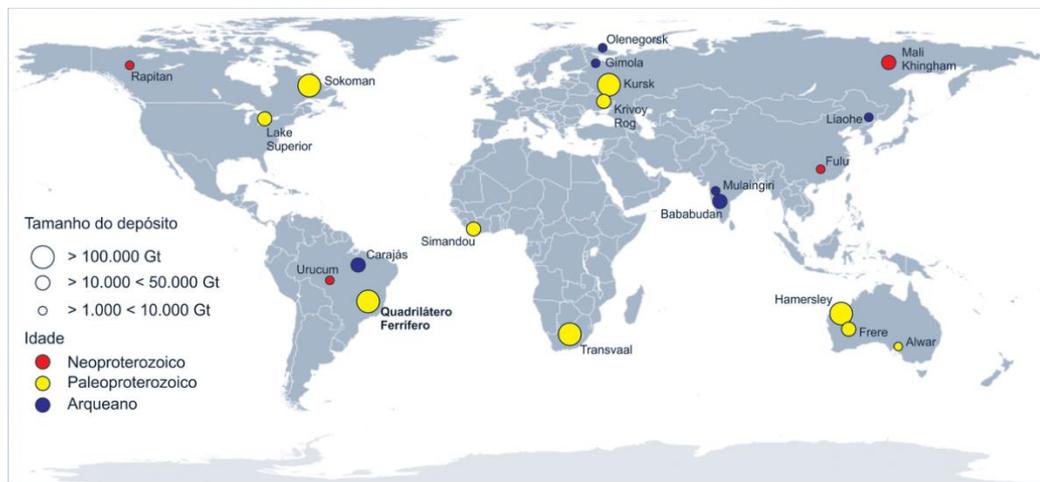
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 O minério de ferro e a produção de rejeito

O minério de ferro é uma das commodities mais importantes do setor mineral global, representando a principal matéria-prima para a produção de aço. Segundo Gupta e Kumar (2022), os maiores produtores globais de minério de ferro incluem Austrália, Brasil e China, que juntos respondem por mais de 70% da produção mundial. A Austrália lidera o mercado, com grandes depósitos de hematita. O Brasil ocupa a segunda posição, destacando-se pelas reservas de Carajás, reconhecidas como as maiores e de maior teor no mundo.

A demanda global por minério de ferro está intrinsecamente ligada à indústria siderúrgica, impulsionada principalmente pelo desenvolvimento de países emergentes, como Índia e China (WORLD STEEL ASSOCIATION, 2021). No entanto, há desafios relacionados à sustentabilidade ambiental, que incentivam a busca por soluções para reaproveitamento de rejeitos e otimização do uso do minério. Como ilustra a Figura 1, as principais reservas globais de minério de ferro se encontram no Brasil, Austrália, Índia e Sul da África.

Figura 1 – Principais reservas globais de minério de ferro

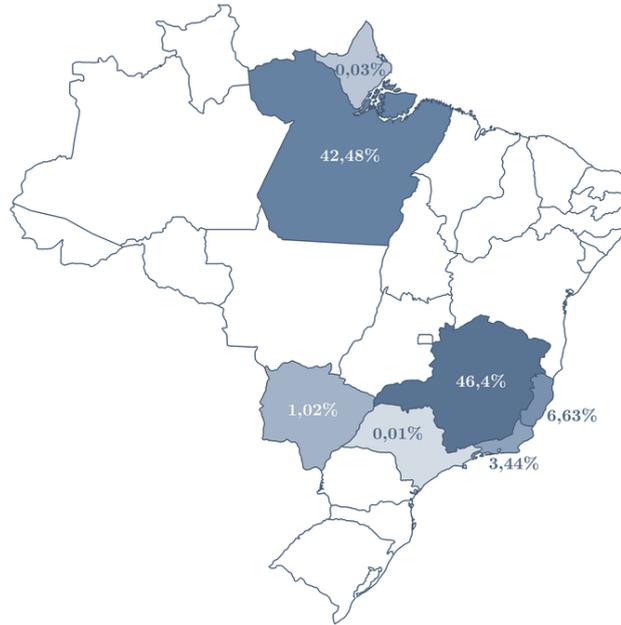


Fonte: Caxito, 2018.

O Brasil é o segundo maior produtor de minério de ferro no mundo, com destaque para os estados de Minas Gerais, Pará e Maranhão, como demonstra a Figura 2. Segundo estudos de Teixeira et al. (2018), a Província Mineral de Carajás é o maior complexo minerador em

operação no país, gerando minério de alta qualidade, com teor superior a 65% de ferro. Além disso, Minas Gerais se sobressai como um dos maiores polos de produção, respondendo por uma parcela significativa das exportações nacionais.

Figura 2 – Dados de exportação de minério de ferro no Brasil entre 2001 e 2017



Fonte: MDIC, 2017.

Segundo Almeida et al. (2019), estima-se que cerca de 30% do volume extraído seja descartado como rejeito. O estado de Minas Gerais, como principal polo minerador do país, é responsável pela maior parte desse resíduo, com destaque para as operações nas regiões de Itabira, Mariana e Congonhas.

A disposição inadequada de rejeitos de minério de ferro afeta drasticamente o meio ambiente, contribuindo para a contaminação de solos, corpos hídricos e ecossistemas locais. Segundo estudos de Silva et al. (2020), as barragens de rejeitos representam riscos constantes, principalmente em áreas densamente povoadas, como as regiões mineradoras de Minas Gerais. Além disso, os impactos ambientais abrangem a perda de biodiversidade, a alteração do regime hidrológico e a degradação visual da paisagem. Esses problemas reforçam a importância de desenvolver e implementar técnicas para a reutilização de rejeitos como forma de minimizar os efeitos adversos ao meio ambiente.

Apesar do potencial econômico, a produção brasileira enfrenta desafios ambientais, especialmente relacionados à geração de rejeitos e ao rompimento de barragens, como ocorrido em Mariana (2015) e Brumadinho (2019). Esses eventos reforçam a necessidade de alternativas sustentáveis para o gerenciamento de resíduos (FREITAS, 2019).

3.2 Material Cimentício Suplementar (MCS)

A utilização de rejeitos de minério de ferro na produção de ladrilhos cerâmicos tem se mostrado promissora (ALMEIDA, 2020). Os ladrilhos produzidos com até 30% de rejeito de minério de ferro apresentaram elevada resistência e durabilidade. A substituição parcial de argila e outros materiais cerâmicos por rejeitos de minério de ferro resultou em produtos com elevada resistência mecânica e desempenho estético, além de contribuir para a diminuição da demanda por recursos naturais (ALMEIDA, 2020).

No caso das argamassas, os rejeitos de minério de ferro têm sido utilizados com o objetivo de melhorar as propriedades reológicas e aumentar a durabilidade. Segundo Costa et al. (2021), quando incorporados à composição de argamassas, os rejeitos aumentam a resistência à compressão e à tração, além de melhorar a aderência do produto ao substrato. A pesquisa demonstrou que a utilização de até 15% de rejeito de minério de ferro na composição das argamassas agrega em termos de resistência e durabilidade, principalmente quando esses materiais são submetidos a ciclos de umidade e temperatura (COSTA, 2021).

O uso de rejeitos de minério de ferro na produção de concreto também tem sido explorado. De acordo com os estudos de Santos et al. (2021), a substituição do cimento Portland por até 20% de rejeito de minério de ferro em concretos não apenas melhora as propriedades mecânicas, como resistência à compressão, mas também aumenta a durabilidade do material, especialmente quando submetido a condições adversas, como exposição à umidade e agentes agressivos. Além disso, a incorporação do rejeito de minério de ferro no concreto pode reduzir o impacto ambiental, uma vez que o uso do rejeito contribui para a diminuição das emissões de CO₂ associadas à produção de cimento.

A substituição do cimento por rejeito de minério de ferro no concreto também traz benefícios econômicos, pois o custo do cimento é reduzido, sem comprometer a qualidade do

material final. O estudo de Oliveira et al. (2022) mostrou que a utilização de rejeito de minério de ferro na produção de concreto resulta em um custo significativamente menor, especialmente em regiões com grandes quantidades de rejeitos disponíveis, como Minas Gerais.

Estudos também de Costa et al. (2021) demonstram que esses resíduos apresentam propriedades pozolânicas que podem ser exploradas na produção de concretos e argamassas. Além de reduzir o impacto ambiental, essa prática contribui para a diminuição do consumo de cimento Portland, um dos maiores emissores de CO₂ na indústria da construção civil.

Pesquisas indicam que a substituição parcial do cimento por rejeitos de minério de ferro pode melhorar a resistência mecânica e a durabilidade de concretos, além de agregar valor a um material que, de outra forma, seria descartado (SANTOS et al., 2022). Dessa forma, a reutilização de rejeitos como material cimentício suplementar oferece uma abordagem sustentável e economicamente viável, alinhada aos princípios da economia circular.

A utilização desses resíduos pode não apenas contribuir para a redução da emissão de CO₂, um dos maiores problemas associados à indústria de cimento, mas também diminuir a necessidade de construção de novas barragens de rejeitos. Pesquisas indicam que a substituição de até 10% do cimento por resíduos de minério de ferro pode melhorar a resistência mecânica e a durabilidade do concreto, além de reduzir custos (COSTA, 2021). O uso de rejeitos na construção civil oferece uma solução viável para o reaproveitamento de resíduos industriais, promovendo a economia circular e contribuindo para a sustentabilidade ambiental.

Atrelado ao potencial do rejeito ser um MCS, é importante avaliar tratamento térmicos uma vez que o aquecimento no material pode ser um agente causador de modificação da estrutura cristalina e arranjos atômicos, alterando as fases dos componentes (MEDEIROS, 2020). É possível relacionar esse fenômeno à reatividade da amostra em determinadas faixas de temperaturas, e com isso, entender com outros ensaios complementares, como as fases do material se comportam sob um dado aquecimento. Portanto, o ensaio de termogravimetria permite identificar quais são as temperaturas para um possível tratamento térmico do material (MEDEIROS, 2020).

A abordagem de tratamento térmico de rejeitos de minério de ferro já foi utilizada em diversos outros trabalhos observando que as fases presentes do óxido de ferro variam conforme sua temperatura de tratamento, comprovando a eficiência da termogravimetria em detectar as

faixas de transição de fases. Segundo Fernandes et al. (2020), tratamentos térmicos de 500°C e 750°C foram capazes de garantir resistência mecânica compatível com normas brasileiras.

A calcinação então possibilita a formação de um material com características e propriedades diferentes ao *In Natura*, uma vez que as novas fases formadas trazem peculiaridades e podem ser de interesse para sua aplicação final, e por isso, precisam ser avaliadas.

3.3 Ladrilhos hidráulicos e seu contexto histórico

Os ladrilhos hidráulicos possuem três camadas que se diferem em quantidades e tipos de precursores, e que conseqüentemente, também possuem propriedades diferentes. A primeira é uma pasta que é formada com a hidratação do rejeito de minério de ferro e cimento, formando uma pasta com relação entre água e precursor. É de grande importância entender os fenômenos atrelados a esta camada uma vez que se trata da parte externa superficial do ladrilho, e por se tratar de um produto de revestimento, tal camada é a responsável por acarretar a maioria dos processos de durabilidade e resistência à degradação do meio na sua aplicação final.

Uma grande substituição do cimento pelo rejeito não é eficiente, pois, ainda que seja um modelo ideal quando se trata de questões ambientais, suas propriedades não são totalmente desejáveis, e portanto, ainda é necessário o uso do cimento (FERNANDES, et al. 2020). A segunda e terceira camada são responsáveis por garantir as propriedades internas do material e possuem juntamente ao cimento areia média e areia grossa na sua composição, respectivamente, como agregados miúdos. A hidratação do cimento com areia grossa promove compactação e ganho de grande parte da resistência mecânica do ladrilho (HASSMAN, 2016).

A produção de ladrilhos hidráulicos tem uma história com suas origens na Roma Antiga, como uma alternativa prática ao uso de mármore e pedras ornamentais, sendo um dos primeiros materiais a ser usado de forma eficiente em pavimentos e revestimentos. Esses ladrilhos foram fabricados utilizando uma mistura de cal, areia e água. De acordo com Loubet et al. (1999), a principal vantagem desse tipo de ladrilho é a sua resistência à umidade, o que permite sua utilização em ambientes como banheiros e cozinhas. Esse tipo de ladrilho, amplamente utilizado em pavimentos e revestimentos, destaca-se pela sua durabilidade e estética. A Figura 3 ilustra um tipo de revestimento utilizado há séculos de forma artesanal:

Figura 3 – Azulejo de faiança revestido com chumbo



Fonte: USP, 2019.

Atualmente, a produção de ladrilhos hidráulicos continua sendo uma técnica valorizada em muitos países, tanto para aplicações históricas quanto para projetos modernos. As principais mudanças incluem a utilização de novos materiais e tecnologias que melhoram a performance e a sustentabilidade do produto. No entanto, o processo de fabricação ainda mantém as características originais, com a moldagem manual ou semi-manual e o endurecimento em condições de alta umidade.

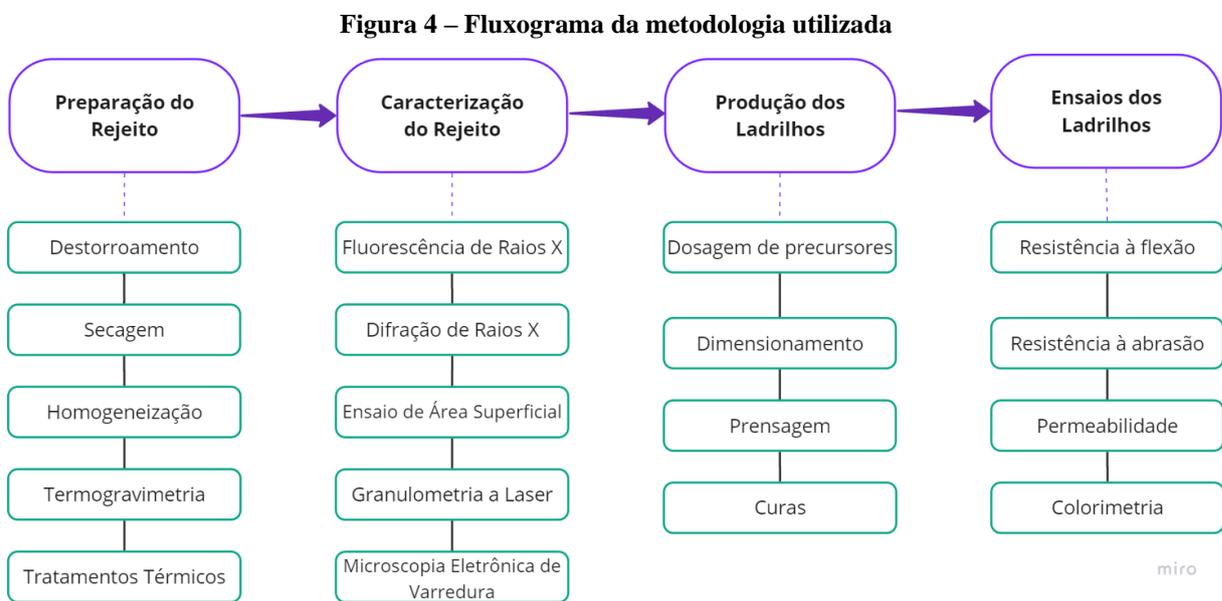
A inserção de materiais como pozolanas, escórias de alto-forno e cinzas volantes, conhecidos como materiais cimentícios suplementares, tem se mostrado uma tendência crescente na produção de ladrilhos hidráulicos. Esses materiais oferecem benefícios como a redução de custos de produção e o aumento da resistência a agentes agressivos, além de contribuírem para a sustentabilidade da construção civil. Segundo Cincotto e Souza (2013), o uso de cinzas volantes e escórias de alto-forno em substituição parcial ao cimento Portland é uma prática que tem se expandido devido à sua capacidade de melhorar a durabilidade e reduzir a pegada de carbono do produto.

Além disso, o uso desses materiais pode melhorar as características térmicas e a resistência ao fogo dos ladrilhos hidráulicos, o que os torna ainda mais adequados para ambientes exigentes. A sustentabilidade também é uma grande vantagem, pois esses materiais suplementares geralmente são resíduos de outras indústrias, como a siderurgia e a geração de energia, o que contribui para a economia circular.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Desenvolvimento geral

O presente trabalho passou por diversas etapas em sua metodologia, desde o recebimento e preparação do material, processo de tratamento térmico, caracterizações do rejeito, moldagem dos ladrilhos, e por fim, a realizações dos ensaios, que avaliaram de forma geral a resistência à flexão e abrasão, durabilidade e aspectos visuais dos ladrilhos produzidos. De forma mais detalhada, como observa-se no fluxograma na Figura 4, foram quatro etapas principais que envolveram a metodologia do trabalho.



Fonte: Próprio autor.

A primeira etapa de preparação foi responsável por tratar o rejeito de minério de ferro recebido, regulando então sua granulometria com o processo de destorroamento, e logo depois, o rejeito foi seco e homogeneizado garantindo ausência de umidade e uniformidade. Após isso, foi realizada a termogravimetria que identificou temperaturas em que houve mudanças de fases na estrutura e posteriormente seus tratamentos térmicos em tais temperaturas.

Na segunda etapa, com o rejeito calcinado em diferentes tratamentos térmicos foi realizada a caracterização deles. O processo passou pelo ensaio químico de Fluorescência de Raios X (FRX), ensaios físicos de Difração de Raios X (DRX), Ensaio de Área Superficial e Granulometria a Laser, e por fim, pela análise por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).

Na terceira etapa houve a produção dos ladrilhos, uma vez que os precursores já eram conhecidos e estavam devidamente preparados. Foi necessária inicialmente uma padronização de dosagem e então a moldagem das suas camadas. Durante a moldagem foi feito o dimensionamento adequado, a prensagem e desmoldagem, etapas que fecham o ciclo de produção de um ladrilho hidráulico. Recém produzidos, passaram por processo de cura até alcançarem 28 dias para realizarem os ensaios propostos.

A quarta e última etapa foi responsável pela realização dos ensaios após a cura dos ladrilhos, dentre eles os de resistência mecânica que foram resistência à flexão e resistência a abrasão, o ensaio de permeabilidade avaliando sua resistência a penetração de água, e o ensaio visual de colorimetria. A partir da metodologia que será detalhada a seguir foi possível obter as informações necessárias.

4.2 Materiais

4.2.1 Rejeito de minério de ferro

O rejeito de minério de ferro foi adquirido pela empresa Vale como doação, com o intuito da realização desse trabalho. O material foi recolhido de uma mina da cidade de Itabirito em Minas Gerais e foi selecionado já que é uma lama ultrafina com características satisfatórias para ser utilizada como um material cimentício suplementar. As suas propriedades e características, como composição química e granulometria, foram investigadas e serão abordadas posteriormente.

4.2.2 Cimento Portland

O cimento utilizado foi o Portland tipo V de Alta Resistência Inicial (CP-V ARI) adquirido pela empresa Cimento Nacional. É um material que, além de garantir uma alta resistência em períodos iniciais de cura, possui cerca de 95% de clínquer em sua composição com uma baixa concentração de aditivos.

4.2.3 Areias industriais

As areias usadas para a camada intermediária e inferior dos ladrilhos foram classificadas como média e grossa a partir da sua granulometria. A primeira possui grãos com diâmetro entre

0,42 mm e 2,0 mm, já a segunda é composta por grãos maiores, com diâmetro entre 2,0 mm e 4,8 mm. São materiais usualmente já empregados na produção de ladrilhos hidráulicos e sua combinação com o cimento é fundamental para aplicações com equilíbrio entre boa compactação, ganho de resistência mecânica e durabilidade.

4.3 Métodos

4.3.1 Preparação do Rejeito

O rejeito de minério de ferro utilizado foi recolhido da mina de Itabirito em Minas Gerais. Inicialmente foi realizado o destorroamento do rejeito em moinho de bolas de câmara de aço 1020. O processo ocorreu em três momentos com aproximadamente 12kg de rejeito em cada um, comportando o volume do moinho de forma adequada. O destorroamento ocorreu com 88 bolas metálicas, com rotação do moinho de 60rpm e em 3 ciclos de 15 minutos cada, até garantir que os torrões estivessem desfeitos e o material com aparente granulometria ajustada.

Após isso, o rejeito passou pelo processo de secagem, realizado em estufa em temperatura estabilizada em $100^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ durante 24 horas, a fim de garantir que o acúmulo de umidade presente no material tenha sido removido. Com o material destorroado e seco, foi realizada a homogeneização com auxílio de colher e espátula, garantindo que todo o rejeito a ser utilizado estivesse em condições iguais e ideais de uso.

Foi realizada a termogravimetria do rejeito *In Natura* a fim de entender o comportamento da amostra quando submetido a altas temperaturas. O ensaio foi realizado com a inserção de 21,35 gramas de amostra no cadinho de alumina presente no equipamento de modelo SHIMADZU DTG - 60H. Os parâmetros se deram pelo início do aquecimento em 20°C até 1100°C durante aproximadamente 4 horas totais de ensaio, com atmosfera controlada de N_2 e O_2 .

A partir da termogravimetria realizada identificou-se picos na análise DTG nas faixas de temperatura de 350°C e 700°C . Com base nisso, foi possível seguir para o processo de calcinação do rejeito que foi realizado durante 8h para cada temperatura em forno a gás Grion. A queima foi realizada com aproximadamente 12kg de cada tipo de rejeito, até garantir que todo o conteúdo estivesse homogêneo, sendo possível então separar o rejeito total em 3, sendo eles: *In Natura* (sem calcinação), calcinado a 350°C e calcinado a 700°C .

4.3.2 Caracterização do Rejeito

O ensaio de FRX foi realizado na empresa GeoSoL, localizada em Belo Horizonte, com tensão de 40kV, corrente de 15mA e tempo de exposição de 100 segundos. A referência analítica utilizada foi de minério de ferro.

O DRX foi realizado no Laboratório de Caracterização de Materiais do Departamento de Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG) com equipamento Shimadzu XRD-7000 e os parâmetros de ensaio foram passo 0,02°, velocidade de passo de 5s/passo com varredura de 5° a 90°.

Realizou-se também a adsorção gasosa, com o intuito de analisar a área superficial específica das amostras. O ensaio funciona com a inserção do material em pó no equipamento, a partir disso ele irá resfriar a câmara com nitrogênio líquido e então um gás de adsorção irá preencher tal câmara onde está a amostra, que de forma controlada, será medida esta quantidade de gás liberada e adsorvida, e, portanto, quanto mais gás adsorvido sugere maior área superficial (GREGG, 1982). Este ensaio pode ser relacionado com o ensaio de granulometria a laser realizado em equipamento Cilas 1090 Laser Particle Size Analyzer, que foi realizado a fim de conferir o tamanho do diâmetro médio dos grãos dos rejeitos. Correlacionando com o ensaio BET, é possível entender a relação de tamanho de grão e área superficial e compreender fenômenos de interações físicas e químicas.

Posteriormente foi realizado a MEV com o objetivo de observar visualmente grãos e aglomerados dos diferentes tipos de rejeitos. A partir da MEV é possível visualizar e identificar propriedades estruturais do material a partir da sua composição química e estrutura cristalina conhecidas. O ensaio é feito com a utilização de um feixe de elétrons que interagem com a superfície do material, gerando imagens de alta resolução e com grandes ampliações (COSTA, 2017). Neste trabalho, a MEV foi realizada com equipamento Hitachi TM3000 nos três tipos de rejeitos e no CPV com ampliação de 1000 vezes.

4.3.3 Produção dos Ladrilhos

A etapa de dosagem dos precursores não possui normatização, assim como o volume de cada camada, portanto, foi realizada uma vasta pesquisa em dosagens já utilizadas em processos

de produção de ladrilhos convencionais para que fosse possível ter o ponto de partida da moldagem. Alguns ladrilhos foram moldados como teste para que fosse realizada a padronização e garantir que as camadas dos ladrilhos tivessem coerência com sua aplicação real.

Em uma primeira moldagem, observou-se que a camada superficial que engloba o uso do rejeito de minério de ferro tinha sido pequena em volume quando comparada ao convencional. Em uma segunda tentativa, o objetivo foi aumentar o tamanho dessa camada a fim de garantir que os ladrilhos produzidos estivessem dentro do padrão comercial. Essa tentativa teve êxito, e a partir disso, foi adotada a dosagem dos precursores que segue a tabela a seguir, na qual foi utilizada para todos os ladrilhos produzidos de acordo com a Tabela 1:

Tabela 1 – Dosagem de precursores e proporção de cada camada no ladrilho

	Precursor em pó (%)	Água (%)	Proporção em volume no ladrilho (%)
Camada 1	Rejeito	25/50	50
	Cimento	75/50	
Camada 2	Cimento	50	0
	Areia Média	50	
Camada 3	Cimento	25	25
	Areia Grossa	75	

Fonte: Próprio autor.

Como observado, na camada superficial houve a utilização do rejeito em substituição parcial do cimento, em 25% e 50%, com hidratação de água com relação 0,5. Na segunda camada há apenas o empacotamento de areia média com cimento sem adição de água. Por fim, a camada 3 possui hidratação de areia grossa com cimento, com relação de água de 0,25. A

proporção final se refere à comparação de volume entre as camadas. Com a utilização do molde é possível realizar desenhos variados, aproveitando do aspecto de pigmentação dos rejeitos conforme ilustra a Figura 5:

Figura 5 - Ladrilhos hidráulicos produzidos com desenhos personalizados



Fonte: Próprio autor.

Foram produzidas 6 unidades de ladrilhos para 7 variações entre: tipo do rejeito (*In Natura*, 350°C ou 700°C) e a variação da composição de rejeito em substituição do cimento na primeira camada (25% ou 50%). Além da moldagem referênciada, moldado com 100% de cimento, ou seja, sem adição de rejeito de minério de ferro, como mostra na Tabela 2.

Conforme a norma brasileira de ladrilhos hidráulicos, ABNT NBR 9457:2013, a espessura do ladrilho hidráulico deve ser de, no mínimo, 20mm. O molde utilizado possui formato de base quadrada de 200mm lado, já a espessura varia com base na quantidade de matéria-prima adicionada, seguindo a norma supracitada para que não exceda os 20mm. Seguindo o método de produção citado, os ladrilhos produzidos tiveram 200mm de largura e comprimento e uma espessura média de 21,68mm, o que atendeu a norma especificando suas dimensões.

O processo de moldagem se deu com a mistura dos precursores para cada camada, contando com as hidratações para a camada 1 e 3. Como a camada 1 se trata de uma pasta, foi realizada em argamassadeira até garantir homogeneidade, já nas camadas 2 e 3 a mistura foi manual com auxílio de espátula e colher. Com cada camada devidamente medida e preparada, foi inserido no molde o material começando da camada 1 até a 3, uma vez que a face do molde fica de cabeça para baixo e, portanto, a primeira camada adicionada seria a 1 com o rejeito, logo, a última foi a camada 3 que seria então o fundo do ladrilho.

Tabela 2 – Traços de ladrilhos produzidos

Tipo de rejeito	Rejeito / Cimento (%)
<i>In natura</i>	25 / 75
	50 / 50
350°C	25 / 75
	50 / 50
700°C	25 / 75
	50 / 50
Referência	0 / 100

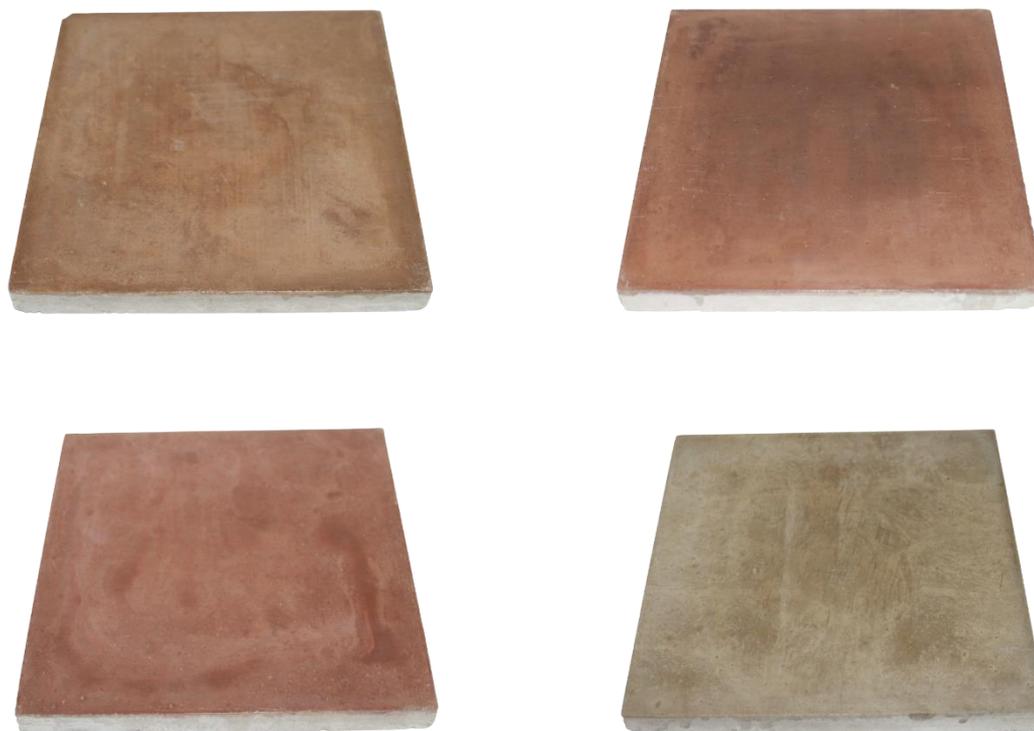
Fonte: Próprio autor.

O material dentro do molde foi prensado na Máquina Universal de Ensaio com carga de 10kN. Por meio disso foi possível garantir o empacotamento necessário para melhores condições de cura e ganho de resistência inicial dos ladrilhos. Logo após a força exercida, foi realizada a desmoldagem seguindo com os ladrilhos fabricados para o processo de cura.

A cura dos ladrilhos primeiramente ocorreu ao ar úmido durante 24h com uso de umidificador, após isso em cura submersa por 48h e ao ar com temperatura ambiente por 25 dias. O tempo mínimo total de cura é de 28 dias, garantindo que as principais reações tenham sido realizadas a fim de atingir as propriedades dos ladrilhos de forma adequada, como ganho de resistência e durabilidade.

A Figura 6 ilustra como os ladrilhos ficaram após a produção sendo eles o ladrilho *In Natura* 25%, 350°C 25%, 700°C 25% e Referência. Eles foram os ladrilhos utilizados no ensaio, e dessa forma, os desenhos personalizados conforme a Figura 5 aborda são meramente representações visuais, com o intuito de ilustrar o aspecto final do produto, e não refletem os detalhes técnicos para análise de desempenho:

Figura 6 - LH In Natura, 350°C, 700°C com 25% de rejeito e Referência, respectivamente



Fonte: Próprio autor.

4.3.4 Ensaios dos Ladrilhos

Inicialmente foi feito o ensaio de resistência à flexão a três pontos, que tem como relevância garantir a confiabilidade acerca dos esforços mecânicos que são exercidos sobre o ladrilho. De forma geral, é uma das abordagens mais importantes para sua aplicação pois como se trata de um produto de revestimento, o ladrilho pode sofrer fratura na flexão, e então, o ensaio garante que os ladrilhos produzidos estejam conforme os requisitos da norma ABNT NBR 9457:2013. A norma em questão exige resistência à flexão mínima de 3,5MPa para os corpos de prova moldados, com garantia estatística de pelo menos uma triplicata para o ensaio. O procedimento foi realizado na máquina universal de ensaios com o ajuste do equipamento para a flexão a três pontos e com distância entre apoios de 160mm. Os parâmetros do ensaio e resultados foram adequados conforme a ABNT NBR 13818:1987 Anexo C, como pede a norma ABNT NBR 9457:2013.

Ainda referente à resistência mecânica, foi feito também o ensaio de resistência à abrasão, essencial para aplicação de produtos de revestimento como o ladrilho hidráulico, já que simula o desgaste da sua superfície por abrasão. O ensaio constitui-se na moldagem de corpos de prova com mesma composição, cura e funções do ladrilho, porém com dimensões reduzidas e adequadas para a inserção no equipamento, já que com a peça inteira produzida não seria possível a realização do ensaio pela questão do dimensionamento inadequado para o ensaio. Dessa forma, as dimensões adequadas para as pastilhas para a abrasão foram de 72,8mm de comprimento, 25,4mm de largura e 17,2mm de espessura, e as pastilhas foram posicionadas com sua face superficial voltada para a roda.

O método utilizado foi de abrasão com roda de borracha usando areia como o agente abrasivo. Os parâmetros do ensaio foram: tempos de 4, 8 e 12 minutos; 200 rotações por minuto da roda; Força de 45N sob a roda; Vazão de areia de 92,73g/min.

Foi registrada a massa inicial das pastilhas antes do ensaio e após cada tempo era registrada a massa final, sendo possível calcular a massa perdida no fim do ensaio, que permite entender a resistência do material ao desgaste abrasivo, ou seja, quanto menor a perda de material mais resistente ele é.

Também foi realizado o ensaio de permeabilidade, em que inicialmente foi feita a limpeza das superfícies dos ladrilhos, certificando se estavam próprias para realização do ensaio sem contaminações ou imperfeições superficiais. Após isso, posicionou-se o permeâmetro sobre o ladrilho e fixou-o com resina epóxi para garantir que a água não vazasse por baixo do equipamento, caso isso acontecesse poderia influenciar negativamente nos resultados. Com ele devidamente posicionado, inseriu-se água até a marcação inicial e foram feitas as medições nos períodos de 1, 2, 4 e 5 horas, contabilizando então o decréscimo da marcação de água conforme ela penetrava na superfície.

Comparativamente, caso a marcação estivesse mais baixa, significa que houve uma maior permeabilidade, caso contrário o material resiste mais a sua infiltração. É importante salientar que os ladrilhos não tiveram sua superfície preparada com resinas ou tintas, tornando a experiência do ensaio mais representativa quanto ao uso do rejeito e sendo possível investigar a afinidade química e porosidade entre as diferentes superfícies.

A Figura 7 ilustra o modelo de execução utilizado para o ensaio de permeabilidade:

Figura 7 - Modelo de execução do ensaio de permeabilidade



Fonte: Próprio autor.

Para a análise colorimétrica, foi feito um registro fotográfico da superfície dos ladrilhos com 25% de rejeito, além do ladrilho referência. A partir disso, com a fotografia em alta qualidade foi utilizado o software Photoshop CC, no qual inseriu-se o arquivo de imagem e analisou-se cinco diferentes pontos na superfície dos ladrilhos, fazendo uma média de código RGB e de cores. Essa análise é interessante pois permite investigar as fases formadas durante a calcinação do rejeito, promover o uso de rejeitos como substituinte ao cimento e valorizar o visual estético do produto, isso porque, a pigmentação dos ladrilhos agrega valor ambiental e econômico ao produto final.

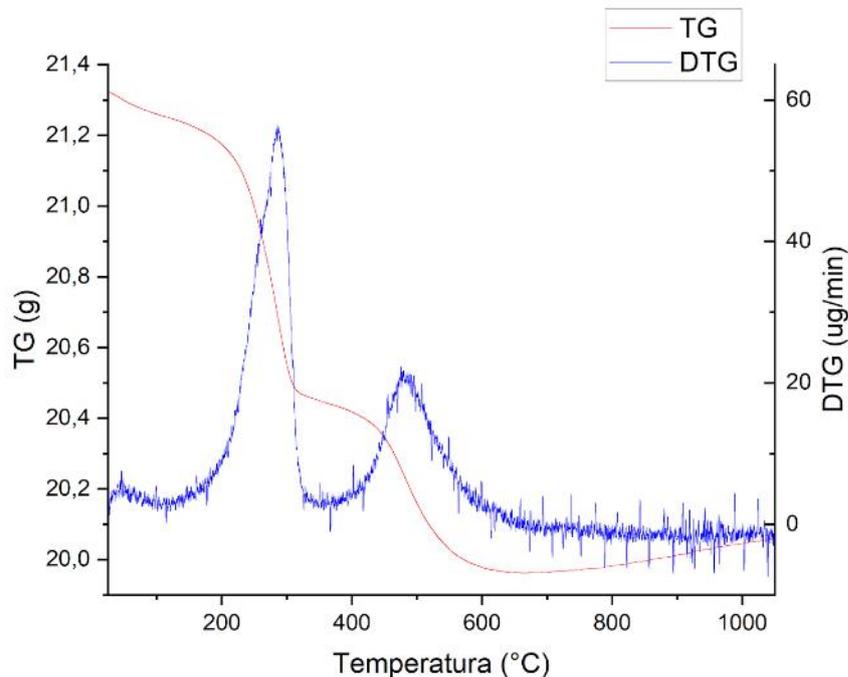
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Caracterização dos rejeitos

5.1.1 Termogravimetria

A seguir a Figura 8 indica a termogravimetria realizada a fim de entender o comportamento térmico do rejeito a partir da variação de massa e determinação de picos DTG para realização de calcinação. Como discutido, as temperaturas de picos DTG encontradas foram 350°C e 700°C.

Figura 8 - Termogravimetria do rejeito de minério de ferro ultrafino



Fonte: Próprio autor.

A seguir a Figura 9 é referente ao rejeito de minério de ferro *In Natura* e calcinado as temperaturas de 350°C e 700°C, podendo ser possível observar as diferenças de cores e tonalidades de cada um, sendo o *In Natura* marrom, o 350°C com tons avermelhados e o 700°C sem tons de marrom e mais próximo ao vermelho. Esse aspecto visual de tonalidades justifica as colorações que foram investigadas no ensaio de colorimetria para a superfície dos ladrilhos como observa-se nas Figuras 5 e 6.

Figura 9 - Rejeito de minério In Natura, 350°C e 700°C respectivamente



Fonte: Próprio autor.

5.1.2 Fluorescência de Raios X (FRX)

O resultado de FRX na qual identifica a composição química do rejeito utilizado segue na Tabela 3:

Tabela 3 – Composição química do rejeito de minério de ferro

Composição	Quantidade (%)
Fe_2O_3	47,40
SiO_2	42,00
Al_2O_3	4,38
MnO	0,73
P_2O_5	0,21
TiO_2	0,16
K_2O	0,11
Outros óxidos	5,01

Fonte: Próprio autor.

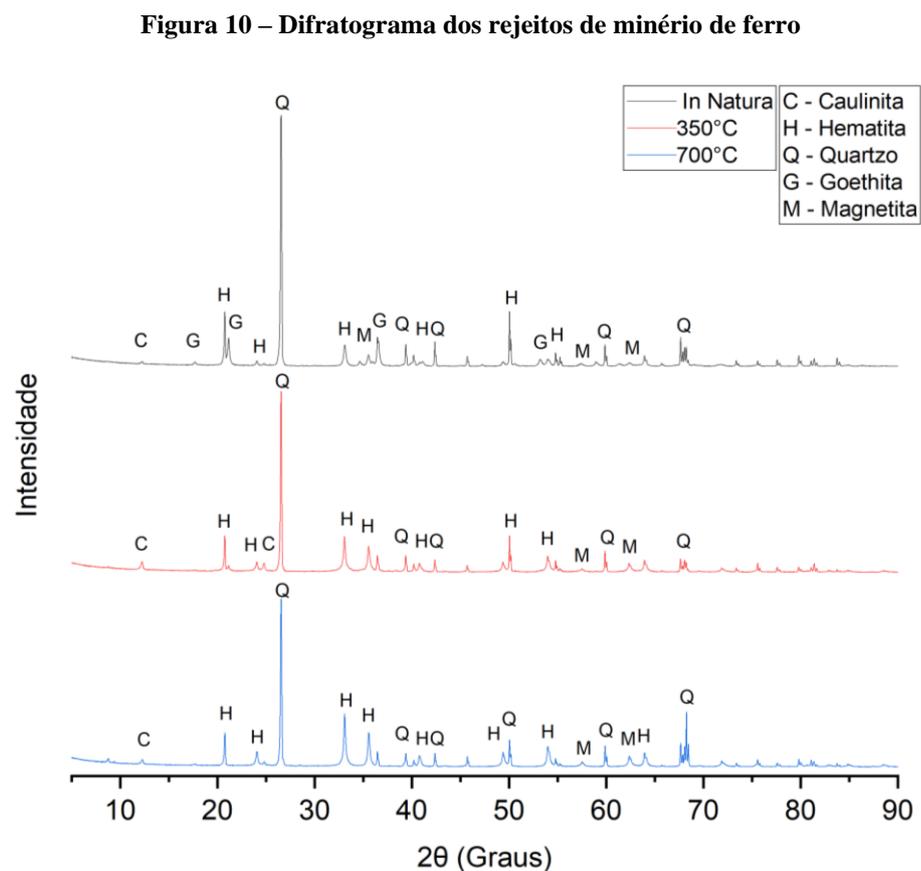
Entende-se que composição do rejeito não se altera para as faixas calcinadas, uma vez que o aquecimento altera as estruturas cristalinas das fases, mas não altera as composições químicas entre os elementos. Então, é correto afirmar que as difrações que serão descritas posteriormente podem apresentar dados diferentes entre si, porém, a composição química exposta pelo FRX se mantém aproximadamente constante. Mesmo assim, fazendo uma extrapolação da pesquisa, foi realizado o FRX das demais fases calcinadas a fim de garantir

esta análise, porém o observado foi a mesma composição química para os demais rejeitos, justificando o esperado.

Como observado, a maior parte da composição do rejeito é de óxidos de ferro e de óxido de silício, já os demais óxidos compõem quase 5% do total. Essa combinação está de acordo por se tratar de um rejeito de minério de ferro com concentração equilibrada de óxido de ferro e argilas, porém com concentração suficiente para ser um material substituinte ao cimento. Sua combinação de minerais ferrosos e argilosos propiciam propriedades que conferem resistência e durabilidade ideais para serem usados como material suplementar (FERNANDES, 2020).

5.1.3 Difração de Raios X (DRX)

O resultado de DRX está detalhado a seguir conforme a Figura 10:



Fonte: Próprio autor.

Com base no resultado de FRX, encontrou-se principalmente fases de óxidos de ferro, óxido de silício e argilominerais. Nesse caso foram identificadas principalmente as fases: Caulinita ($Al_4(Si_4O_{10})(OH)_8$), hematita (Fe_2O_3), quartzo (SiO_2), goethita ($FeO(OH)$) e magnetita (Fe_3O_4).

O quartzo encontrado era esperado pela composição de sílica no material, assim como a caulinita que é um argilomineral comumente encontrado em rejeitos de minério de ferro. A caulinita traz fonte de plasticidade ao material, enquanto o quartzo confere a resistência mecânica e química, que em conjunto aos óxidos de ferro pode garantir as propriedades adequadas para o LH (DEER, 2013).

Referindo aos óxidos de ferro encontrados, observa-se que a goethita aparece apenas para o rejeito *In Natura*, não sendo encontrado nos rejeitos calcinados. Isso ocorre porque é um mineral que sofre desidratação em que a água na sua estrutura é liberada, formando um óxido mais estável para maiores temperaturas, como a própria hematita ou magnetita (JONES, 2013). Portanto, para o material *In Natura* a goethita está presente, mas sofre desidratação e para as faixas seguintes de temperatura não é encontrada. A goethita é um mineral que possui dureza de 5 a 5,5 na escala Mohs e uma densidade média de $3,83g/cm^3$, variando com base na presença de impurezas (IGC, 2024). Estas propriedades são fundamentais para se avaliar os ensaios físicos de resistência à abrasão relacionando a dureza do material, e permeabilidade relacionando a sua densidade média.

Em seguida observa-se a presença de hematita, fase ferrítica presente em todas as temperaturas e de forma mais abundante. A hematita é um óxido de ferro muito abundante do planeta, estando estável em situações oxidantes, sendo então, resultado de oxidação da goethita e magnetita (DEER, 2013). Por esse motivo, nota-se que a hematita é bastante observada nos resultados de DRX e se torna cada vez mais presente ao longo das calcinações conforme a temperatura aumenta, uma vez que, como mencionado, a desidratação da goethita proporciona a formação estável de hematita. Um exemplo claro é em 33° , em que a fase se faz presente nos três rejeitos, porém conforme se aumenta a temperatura a sua intensidade de difração aumenta. A hematita é um mineral que possui dureza entre 5,5 a 6,5 na escala Mohs e densidade média de $5,26g/cm^3$ (IGC, 2024). Uma vez que está presente em todos os rejeitos, é essencial entender suas propriedades pois elas serão capazes de justificar os resultados práticos.

Por fim, a magnetita é um mineral em estado reduzido da hematita, com dureza igual a 6 na escala Mohs e densidade média de $5,18g/cm^3$ (IGC, 2024). Segundo Ponomar, 2019, a

presença de carbono no sistema de aquecimento do rejeito promove a redução de hematita em magnetita. Diante disso, pode-se inferir que a partir dos resultados observados de DRX, há um aumento de intensidade de picos da magnetita para os rejeitos, como em 57° em que se observa um leve pico para *In Natura* e 350°, mas em 700°C há um aumento. Logo, interpreta-se essa informação relacionando com a redução de parte da hematita em magnetita para o rejeito 700°C principalmente.

A partir dos resultados observados pode-se inferir as relações entre fases analisadas e suas propriedades, uma vez que interferirão consideravelmente nos resultados práticos dos ensaios realizados. Em resumo, o rejeito *In Natura* apresentou faixas de goethita e hematita, com magnetita em menor escala, para o rejeito calcinado a 350°C a magnetita ainda não tinha sido formada em grande expressão, porém não apresentou goethita, tendo a hematita como fase principal. Por fim, a 700°C o rejeito apresentou faixas maiores de magnetita, mas predominantemente hematita, com formação total de goethita em outros óxidos.

5.1.4 Ensaio de Sorção Gasosa e Granulometria a Laser

Os ensaios de BET e granulometria a laser são descritos a seguir conforme a Tabela 4:

Tabela 4 – Área superficial e granulometria dos precursores

	<i>In Natura</i>	350°C	700°C
Área superficial (m^2/g)	8,87	20,80	10,13
Diâmetro médio (μm)	23,23	24,62	29,51

Fonte: Próprio autor.

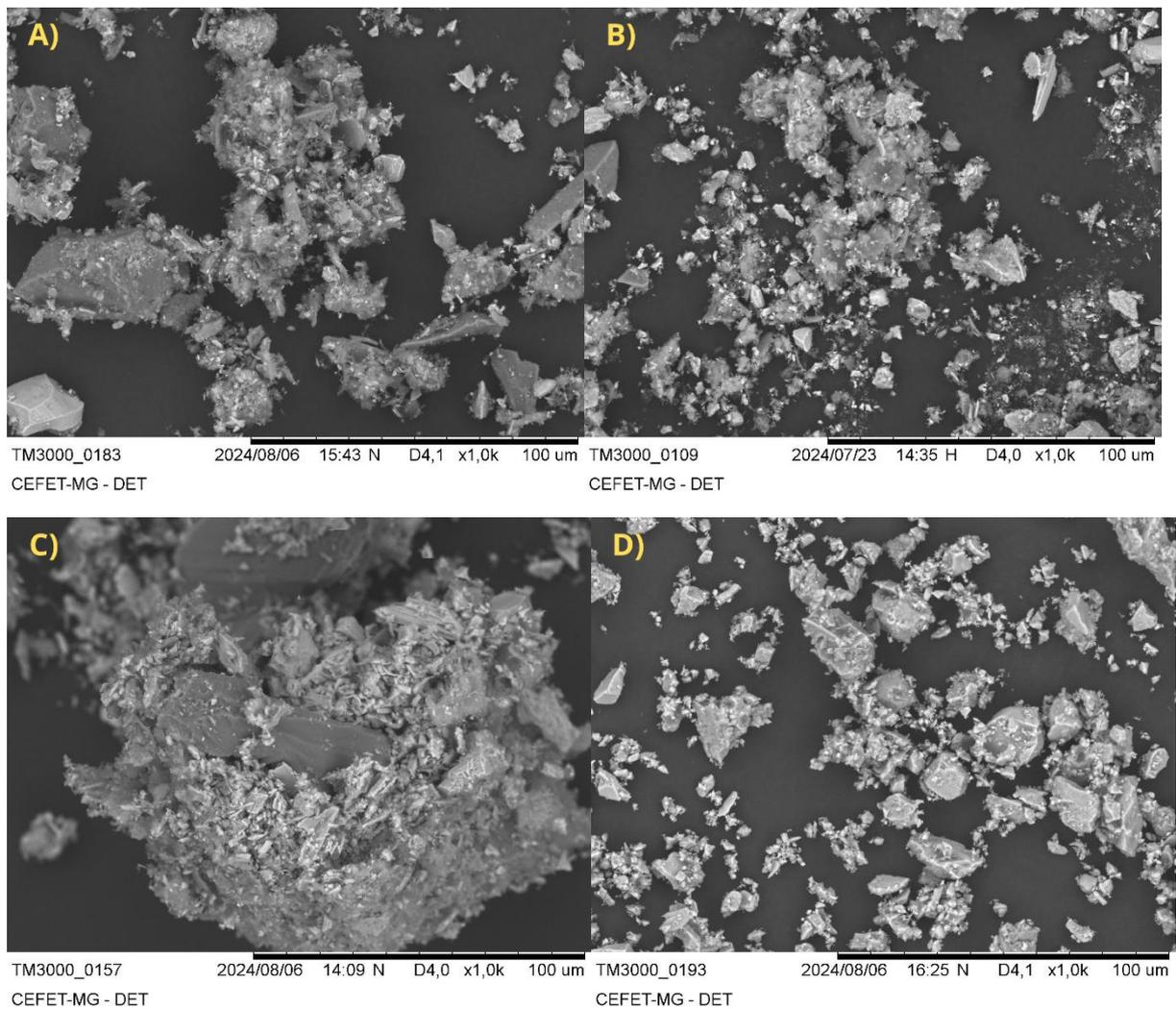
Com base nos ensaios, percebe-se que o diâmetro médio dos grãos entre os rejeitos é bem próximo, de modo que o *In Natura* apresente menor diâmetro, seguido do rejeito calcinado a 350°C e a 700°C. Em relação a área superficial, o rejeito calcinado a 350°C se destaca por possuir uma área duas vezes maior que as demais, que entre elas são bem próximas. Notando que a área superficial do calcinado a 350°C pode ser destoante das demais e sabendo que possui um diâmetro médio intermediário, infere-se que os seus grãos possuem elevada rugosidade, pois a sua área pode ser interferida diretamente pelos picos e vales formados na superfície durante o processo de calcinação.

Tais propriedades determinam diretamente nas interações físicas e químicas de materiais. Nesse caso, partículas menores são responsáveis por garantir o adensamento de partículas maiores, preenchendo os espaços vazios gerados. Isso garante uma matriz mais coesa com relação direta a resistência mecânica, resistência química, permeabilidade, resistência térmica, durabilidade, entre outros (NEVILLE, 2016).

5.1.5 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

As imagens de MEV foram dispostas para cada tipo de rejeito e para o CPV, sendo possível analisar a morfologia de modo geral dos grãos. A seguir está disposta a Figura 11:

Figura 11 - Microscopia dos rejeitos In Natura (a), 350°C (b) e 700°C (c) e o CPV (d)



Fonte: Próprio autor.

Começando pelo rejeito *In Natura* (a) é possível observar formatos aciculares na microestrutura característicos de goethita no material. Esse formato de agulhas, ou prismas

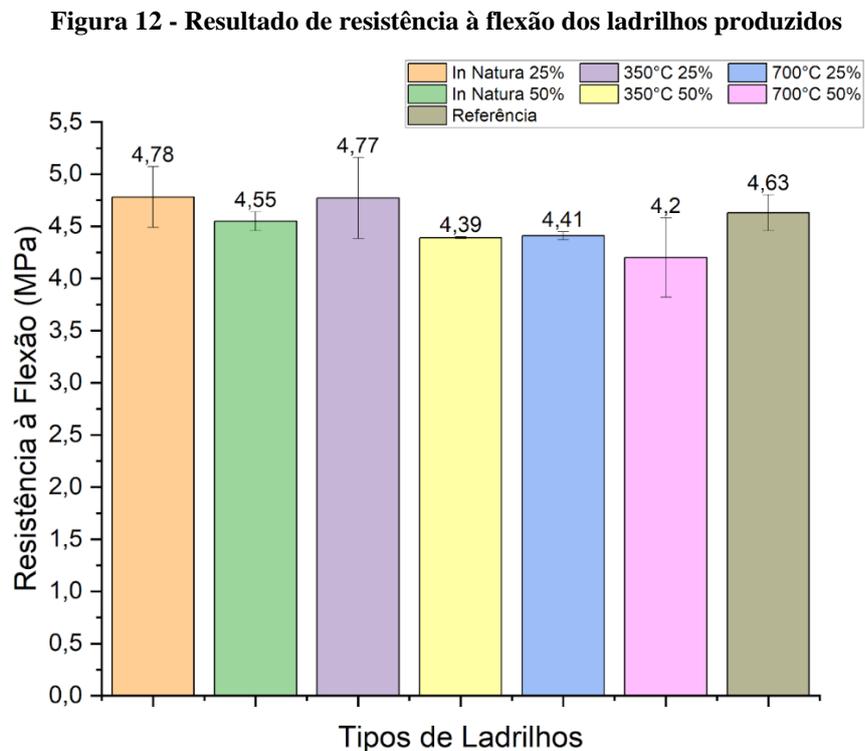
alongados, é esperado pela identificação desta fase no rejeito. Além disso, identifica-se a presença de quartzo, com cristais lisos e quinas vivas. Para o rejeito 350°C (b) observam-se grãos variados em formas e tamanhos, podendo inferir a variedade de tipos de constituintes, sendo os óxidos de ferro, argilominerais, óxido de silício, entre outros.

Além disso, nota-se a característica de baixa granulometria do rejeito classificado como ultrafino, uma vez que grande parte dos grãos apresentados são demonstrados com até menos de 10µm pela escala. Diante do rejeito 700°C, observa-se um grão de quartzo englobado por grãos de hematita (região mais clara). A imagem mostra como a presença de óxido de ferro no rejeito atua diante o quartzo disponível e sua influência da calcinação. Por fim, o CPV é mais homogêneo que os rejeitos apresentados, com formatos e diâmetros menos dispersos e possíveis fases de silicatos de cálcio.

5.2 Ensaios dos ladrilhos

5.2.1 Resistência à flexão

Os resultados de resistência à flexão dos ladrilhos produzidos estão descritos a seguir com base na Figura 12:



Fonte: Próprio autor.

Conforme a norma ABNT NBR 9457:2013, a resistência mínima requerida para ladrilhos hidráulicos é de 3,5MPa, e, portanto, observa-se que todas as composições tiveram resistência superior e estão de acordo ao exigido.

Em relação ao ladrilho referência, nota-se que obteve um valor médio próximo aos demais ladrilhos principalmente aos substituintes de 25%, o que significa que a substituição pouco interferiu na resistência à flexão do ladrilho de forma geral. Uma forma de visualizar isso é a partir da inferência de que, como mencionado, o LH possui três camadas e a substituição ocorreu apenas na primeira sendo ela a que possui menor volume no ladrilho, ou seja, a resistência à flexão no ladrilho se atribui majoritariamente nas outras camadas com areias industriais principalmente, visto que as substituições na primeira pouco interferiram nos resultados práticos.

Resumindo, mesmo que observando um padrão de diminuição de resistência no aumento de rejeito no sistema, os LH tiveram sua resistência acima do exigido pela norma, o que os tornam aptos a aplicações, entretanto, é importante ressaltar que a resistência é majoritariamente influenciada pelo conjunto de composição das três camadas, e não somente pela primeira em que foi adicionado o rejeito, por isso observou-se pequena diferença de resistência entre cada tipo de LH.

5.2.2 Resistência à abrasão

Para os resultados de resistência à abrasão segue abaixo a Figura 13 dos corpos de prova após o ensaio de resistência a abrasão:

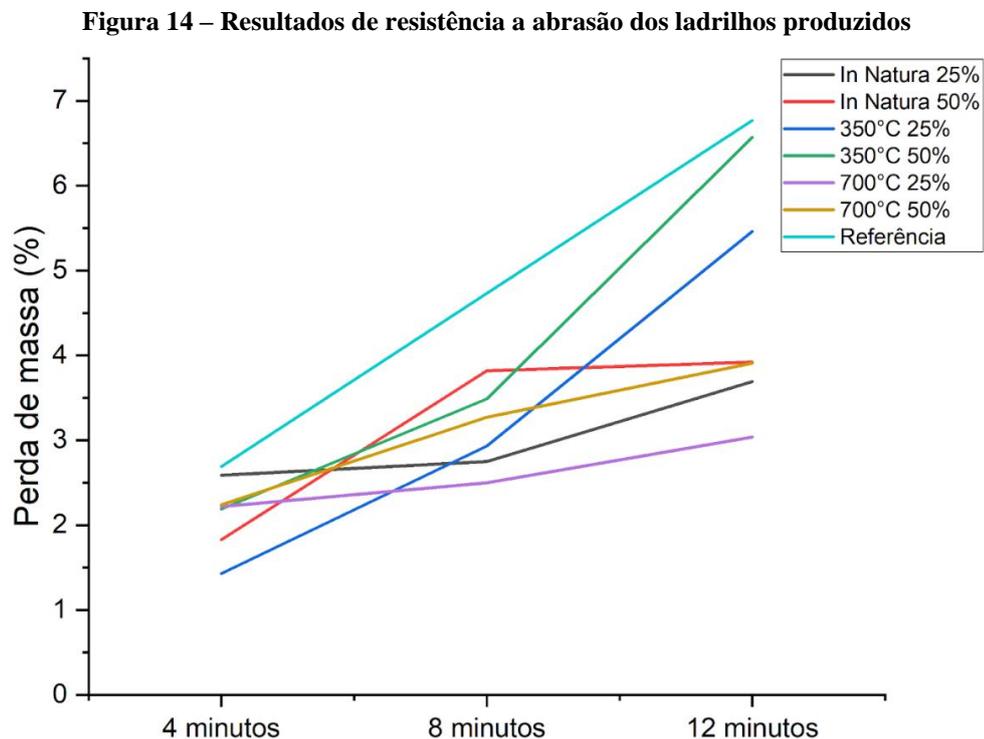
Figura 13 - Corpos de prova do ensaio de resistência à abrasão do ladrilho de referência



Fonte: Próprio autor.

Para esta análise, pode-se inferir que a perda de massa registrada no ensaio pode ser relacionada à resistência sobre desgaste abrasivo, de modo que um material com maior desgaste apresentará maior perda de massa no ensaio, e também, um menor desgaste infere menor perda de massa. Isso porque, mecanismos físicos originados pelo atrito repetitivo na superfície provocam a retirada de material, estando mais suscetível o que houver menos coesão interna, menor dureza ou estiver mais fragilizado (FONTES, 2021).

O resultado de resistência à abrasão está descrito na seguinte figura 14:



Fonte: Próprio autor.

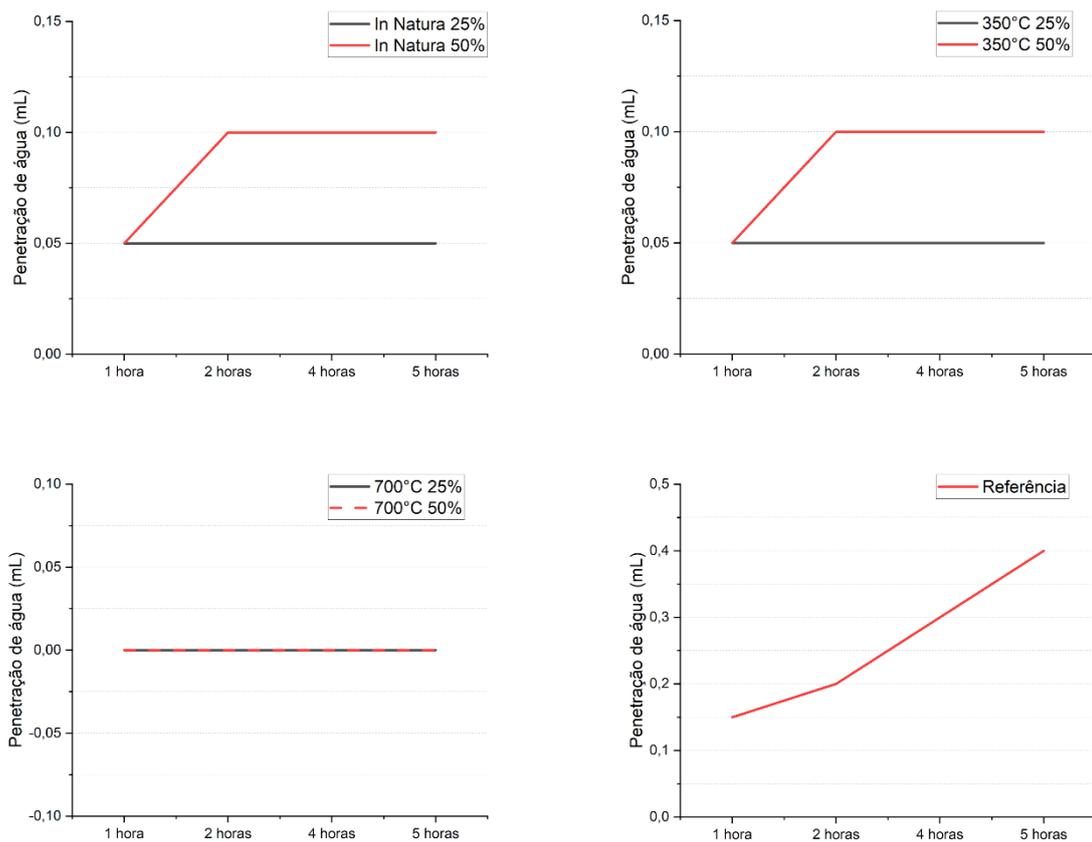
Primeiramente, observa-se que o ladrilho Referência, representado pela linha ciano na figura, obteve a maior perda de massa ao longo dos ensaios de forma aproximadamente linear, enquanto todos os outros com rejeito em sua composição resistiram mais ao desgaste. Isso sugere que as fases presentes no cimento são menos resistentes ao desgaste abrasivo, enquanto a variação de óxidos de ferro garante maior resistência ao longo do tempo. Além disso, nota-se um padrão de maior desgaste em ladrilhos com 50% de rejeito comparativamente ao de 25%. Acredita-se que o aumento de óxidos de ferro no sistema pode interferir na compactação do sistema entre partículas com maior e menor diâmetro.

Referente a menor perda de massa para o rejeito a 700°C pode-se inferir que o material possui componentes duros, em comparação com os demais ladrilhos, como a hematita e magnetita de dureza de aproximadamente 6 na escala Mohs, que garantem a resistência do material ao desgaste, e também, devido a interação forte da hidratação do cimento com o rejeito durante o processo de moldagem e cura. Portanto, a variação de temperatura de calcinação permitiu uma maior resistência para o rejeito calcinado a 700°C, seguido do *In Natura* e 350°C.

5.2.3 Permeabilidade

Os resultados de permeabilidade dos ladrilhos produzidos estão descritos a seguir com base na Figura 15:

Figura 15 – Resultados de permeabilidade dos ladrilhos produzidos



Fonte: Próprio autor.

O ensaio de permeabilidade indica a penetração de água na superfície dos ladrilhos ao longo do tempo. Com isso, considera-se que um ladrilho que permitiu maior penetração de água

possui maior permeabilidade. Como o LH se baseia em um artefato cimentício de revestimento, procura-se para suas aplicações gerais um material que seja impermeável em maioria.

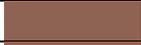
Com isso, nota-se que o ladrilho Referência obteve maior permeabilidade ao longo do tempo com 0,4mL no final das 5 horas observadas, portanto, pode-se inferir que as porosidades externas e interna do ladrilho referência eram maiores que os demais. Enquanto isso, os ladrilhos com rejeito chegaram a 0,1mL no máximo de penetração, que é o caso do rejeito *In Natura* 50% e 350°C 50%. Ainda sobre eles, foi possível observar que para suas composições de 25% a água penetrante foi ainda menor, de 0,05mL, o que indica que a maior concentração do rejeito na camada superficial aumenta a permeabilidade do material. Como visto anteriormente, o diâmetro médio do cimento é menor que do rejeito, portanto, uma maior concentração de rejeito no sistema pode influenciar em partículas maiores e menos adensamento, permitindo maior permeabilidade.

Além do explicitado, o LH com menor permeabilidade foi o calcinado a 700°C, uma vez que não se observou penetração de água durante o ensaio. Isso pode ser explicado pela remoção de grupos hidroxila da caulinita formando metacaulim de modo que este material favorece a reação de sílica que auxilia na hidratação do cimento presente. Isso faz com que a camada absorva menos água, e portanto, se torna mais impermeável (FERNANDES, 2020).

5.2.4 Colorimetria

O resultado de colorimetria está descrito conforme a Tabela 5 abaixo:

Tabela 5 – Análise colorimétrica dos ladrilhos produzidos

Traços	RGB	Código da cor	Tonalidade
<i>In Natura</i> 25%	(146, 106, 78)	#926a4e	
350°C 25%	(142, 99, 83)	#8e6353	
700°C 25%	(152, 96, 79)	#98604f	
Referência	(149, 134, 105)	#958669	

Fonte: Próprio autor.

Como se observa, o ladrilho *In Natura* possui uma tonalidade próxima ao marrom, característico pela presença de argilas, silicatos e goethita no material, como analisados na caracterização do rejeito pelo DRX e FRX. O ladrilho 350°C possui tonalidade marrom

avermelhado, isso porque a hematita se destaca parcialmente com a tonalidade avermelhada na qual está sendo convertida pela goethita, como também analisado. Já o ladrilho 700°C possui cor mais avermelhada que os demais pela maior presença de hematita pura. Para o ladrilho referência é esperado o tom cinzento dos seus constituintes, entre eles óxidos de cálcio, óxidos de silício e óxidos de ferro.

A cor é um aspecto fundamental para a produção de ladrilhos hidráulicos e é uma característica que agrega valor para o produto final, e, com os rejeitos utilizados, foi possível abrir o leque de opções diversas ainda mais com as calcinações realizadas. Portanto, a análise realizada foi capaz de diferenciá-los e associá-los a composição de seus constituintes.

6 CONCLUSÃO

Infere-se, portanto, que os objetivos do trabalho foram sanados de forma geral. Começando pela realização de tratamentos térmicos no rejeito de minério de ferro a 350°C e 700°C que foi bem-sucedida, sendo possível distinguir as características de cada um. O rejeito *In Natura* apresentou exclusivamente goethita na sua composição, enquanto a 350°C e 700°C observou-se principalmente magnetita e hematita. Quanto a morfologia, os grãos de sílica observados são lisos enquanto os óxidos de ferro são mais irregulares.

Referente a moldagem dos ladrilhos, foi possível estabelecer uma dosagem padrão satisfatória para a sua produção, alinhada com as normas técnicas. Referente as propriedades analisadas, embora LH com 25% de rejeito tiveram maior resistência à abrasão e menor permeabilidade, os ladrilhos moldados com 50% tiveram resultados próximos aos de 25% e ambos são viáveis para aplicação. Em relação a aplicação prática, observou-se que a utilização de 50% de rejeito é mais favorável uma vez que atua ainda mais como um agente de pigmentação e material cimentício suplementar, além de amenizar os impactos ambientais.

As caracterizações realizadas forneceram informações sobre a estrutura, composição e análise granulométrica dos materiais. A análise dessas propriedades foi fundamental para entender a presença de fases principais como caulinita, quartzo, hematita, magnetita e goethita nos materiais. Além disso, analisou-se a composição química do rejeito de sílica e óxidos de ferro oriundos de materiais argilominerais, e a análise de granulometria e área superficial que aferiu valores próximos característicos de um rejeito ultrafino com 8,87 m²/g de área e 23,23 µm de granulometria para o rejeito *In Natura*.

Os resultados dos ensaios de resistência à flexão indicaram que os ladrilhos atendem e até superam as exigências estabelecidas pela norma brasileira, demonstrando a adequação do material. Além disso, o ladrilho tratado a 700°C apresentou maior resistência à abrasão e menor permeabilidade devido à sua composição, estrutura mais compacta e à interação entre os componentes, o que contribui para sua durabilidade. Por fim, o ensaio de colorimetria permitiu avaliar e destacar as cores dos ladrilhos com base na composição agregando um valor estético, além de agregar valor econômico ao produto.

O rejeito de minério de ferro ultrafino apresentou propriedades relevantes quanto a sua possível aplicação em ladrilhos hidráulicos como produto de revestimento.

7 REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO. **Sumário Mineral 2018: Ferro**. Disponível em: https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/economia-mineral/publicacoes/sumario-mineral/pasta-sumario-brasileiro-mineral-2018/ferro_sm_2018. Acesso em: 16 jan. 2025.
- ALMEIDA, A. S. et al. Produção de ladrilhos cerâmicos utilizando rejeito de minério de ferro. **Revista Brasileira de Materiais Cerâmicos**, v. 43, p. 90-105, 2020.
- ALMEIDA, J. R. et al. Gerenciamento de rejeitos de mineração no Brasil: panorama atual e desafios futuros. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 49, n. 2, p. 245-260, 2019.
- AMRAN, Y. H. M. et al. Clean production and properties of geopolymer concrete: a review. **Journal of Cleaner Production**, v. 251, 2020. p. 119679.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13818:1987 – Placas cerâmicas para revestimento - Especificação e métodos de ensaios**. Rio de Janeiro, 1987.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 9457 - Ladrilhos hidráulicos para pavimentação - Especificação e métodos de ensaio**. Rio de Janeiro, 2013.
- BEZERRA, E. et al. Effect of partial replacement with thermally processed sugar cane bagasse on the properties of mortars. **Revista Materials**, v. 22, 2017.
- BHAGATH, P. R. et al. Production and characterization of low-energy Portland composite cement from post-industrial waste. **Journal of Cleaner Production**, v. 239, 2019.
- CAXITO, F.; GONÇALVES, T. **Ferro – Recursos Minerais de Minas Gerais**. Disponível em: <http://recursomineralmg.codemge.com.br/substancias-minerais/ferro/>. Acesso em: 20 jan. 2025.
- CINOTTO, M. L.; SOUZA, F. F. **Uso de materiais cimentícios suplementares na construção civil**. São Paulo: Editora Técnica, 2013.
- COSTA, A. C. et al. Incorporação de rejeito de minério de ferro em argamassas: efeitos nas propriedades reológicas e de durabilidade. **Journal of Building Materials and Construction**, v. 36, p. 58-72, 2021.
- COSTA, A. C. et al. Utilização de rejeitos de minério de ferro como material cimentício suplementar. **Revista Brasileira de Engenharia Civil**, v. 12, n. 3, p. 45-60, 2021.

COSTA, F. S. (2017). **Microscopia Eletrônica de Varredura: potencialidades e aplicações**. Universidade Federal do Maranhão.

DEER, W. A.; HOWIE, R. A.; ZUSSMAN, J. **An introduction to the rock-forming minerals**. 3. ed. London: Mineralogical Society of Great Britain and Ireland, 2013.

DELMOTTE, M. **A história dos ladrilhos hidráulicos**. Paris: Presses Universitaires de France, 2005.

DIAS, B. L. Do N.; OLIVEIRA, D. F.; ANJOS, M. J. Dos. A utilização e a relevância multidisciplinar da fluorescência de raios X. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 39, n. 4, 2017.

DÍAZ, A. I. et al. Limestone calcined clay cement as a low-carbon solution to meet expanding cement demand in emerging economies. **Development Engineering**, v. 2, 2017. p. 82-89.

FAZCOMEX. **Exportação de minério de ferro**. Disponível em:

<https://www.fazcomex.com.br/comex/exportacao-de-minerio-de-ferro/>. Acesso em: 16 jan. 2025.

FERNANDES, L. et al. Iron ore tailings as a supplementary cementitious material in the production of pigmented cements. **Journal of Cleaner Production**, v. 274, p. 123260–123260, 1 nov. 2020.

FONTES, W. C. et al. Hydraulic tiles produced with fine aggregates and pigments reclaimed from iron ore tailings. **Journal of sustainable metallurgy**, v. 7, n. 1, p. 151–165, 2021.

FREITAS, C. M. et al. Da Samarco em Mariana à Vale em Brumadinho: desastres em barragens de mineração e Saúde Coletiva. **Cadernos de Saúde Pública**, v. 35, n. 5, 2019.

GALVÃO, T. C. et al. Reuse of iron ore tailings from tailings dams as pigment for sustainable paints. **Journal of Cleaner Production**, v. 200, 2018. p. 412-422.

GEOINOVA. **Gestão de resíduos em atividades minerárias**. Geoinova Blog, Goiânia, 24 fev. 2022. Disponível em: <https://geoinova.com.br/uma-breve-historia-da-mineracao-no-brasil/>. Acesso em: 21 jun. 2024.

GHALEHNOVI, M. et al. Effect of red mud (bauxite residue) as cement replacement on the properties of self-compacting concrete incorporating various fillers. **Journal of Cleaner Production**, v. 240, 2019.

GREGG, S. J.; SING, K. S. W. **Adsorption, Surface Area and Porosity**. 2^a ed., Academic Press, 1982.

GUPTA, S.; KUMAR, R. Iron ore: Global production, consumption, and market trends. **Journal of Mining Studies**, v. 34, n. 2, p. 120-138, 2022.

HASMANN, Bernardo Beckenkamp. **A influência da granulometria da areia na resistência à compressão e no módulo de elasticidade do concreto**. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil) – Universidade de Santa Cruz do Sul (UNISC), Santa Cruz do Sul, 2016.

IBRAM. **Em 2023, mineração repete faturamento do ano anterior e pretende ampliar investimentos até 2028**. Disponível em: <https://ibram.org.br/release/em-2023-mineracao-repete-faturamento-do-ano-anterior-e-pretende-ampliar-investimentos-ate-2028/>. Acesso em: 16 jan. 2025.

IGC. **Goethita**. Disponível em: <https://didatico.igc.usp.br/minerais/oxidos-hidroxidos/goethita/>. Acesso em: 21 jan. 2025.

IGC. **Magnetita**. Disponível em: <https://didatico.igc.usp.br/minerais/oxidos-hidroxidos/magnetita/>. Acesso em: 21 jan. 2025.

IGC. **Magnetita**. Disponível em: <https://didatico.igc.usp.br/minerais/oxidos-hidroxidos/hematita/>. Acesso em: 21 jan. 2025.

IMBABI, M. S. et al. Trends and developments in green cement and concrete technology. **International Journal of Sustainable Built Environment**, v. 1, 2012. p. 194-216.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. **Demanda chinesa impulsiona preços do minério de ferro**. Disponível em: <https://ibram.org.br/noticia/demanda-chinesa-impulsiona-precos-do-minerio-de-ferro/>. Acesso em: 16 jan. 2025.

JONES, M.; GILL, R.; ANDERSON, R. Thermal transformation of iron *ores*. **Minerals and Metallurgical Processing**, v. 12, n. 4, p. 210-217, 1995.

LIMA, M. E. et al. Pozzolanic properties of iron ore tailings for sustainable concrete applications. **Construction and Building Materials**, v. 25, p. 675-689, 2020.

LOUBET, S.; RICHARD, F.; JOLY, L. **Os ladrilhos hidráulicos na Roma Antiga: análise de sua composição e tecnologia**. Paris: Éditions du CNRS, 1999.

M M F SINUHAJI; S HARJANTO; A HAPID. Thermal characteristics and phase transformation of iron ores containing varied crystalline water with coal mixtures. **IOP Conference Series Materials Science and Engineering**, v. 602, n. 1, p. 012065–012065, 1 ago. 2019.

MEDEIROS, J. L. G. DE; MORAIS, C. R. DA S. Aplicação de técnicas termoanalíticas (TGA/DTA) para avaliação do comportamento térmico de amostras de argilas para obtenção de pozolanas. **Revista Principia - Divulgação Científica e Tecnológica do IFPB**, v. 1, n. 50, p. 54, 17 jul. 2020.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concrete: Microstructure, Properties, and Materials**. 4. ed. New York: McGraw-Hill Education, 2014. 675 p.

MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES. **Corredores Logísticos Estratégicos: Minério de Ferro**. Disponível em: <https://www.gov.br/transportes/pt-br/assuntos/portal-da-estrategia/noticias-gestao-estrategica/ministerio-dos-transportes-lanca-estudo-para-melhorar-o-escoamento-de-minerio-de-ferro>. Acesso em: 16 jan. 2025.

NEVILLE, Adam M. **Propriedades do Concreto**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2016.

NUNES, Rodrigo Pacheco. **A Importância dos Minerais no Comércio entre China e América do Sul**. Dissertação de Mestrado — Instituto de Economia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2012. Disponível em: <https://www.ie.ufrj.br/images/IE/PEPI/disserta%C3%A7%C3%B5es/2012/RODRIGO%20PACHECO%20NUNES.pdf>. Acesso em: 16 jan. 2025.

O Mercado do Cimento Brasil em 2022. Disponível em: <https://cimento.org/o-mercado-do-cimento-brasil-em-2022/>. Acesso em: 27 jan. 2025.

OLIVEIRA, J. P. et al. Uso de rejeito de minério de ferro na produção de concreto: uma análise econômica e ambiental. **Cement and Concrete Composites**, v. 89, p. 102-114, 2022.

PADRILHA, A. F.; RIOS, P. R. **Difração de raios X: uma introdução para iniciantes**. Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN-CNEN/SP), 2022.

PARIS, J. M. et al. A review of waste products utilized as supplements to Portland cement in concrete. **Journal of Cleaner Production**, v. 121, 2016. p. 1-18.

PONOMAR, V. P. et al. Kinetics of hematite to magnetite transformation by gaseous reduction at low concentration of carbon monoxide. **Chemical Engineering Research and Design**, v. 148, p. 393–402, ago. 2019.

SANTOS, M. E. et al. Efeitos do uso de rejeito de minério de ferro na resistência e durabilidade do concreto. **Construction and Building Materials**, v. 250, p. 115-130, 2021.

SANTOS, M. E. et al. Propriedades pozolânicas de rejeitos de minério de ferro para a construção civil. **Construction and Building Materials**, v. 250, p. 112-125, 2022.

SCRIVENER, K. L. et al. Eco-efficient cements: potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry. **Cement and Concrete Research**, v. 114, 2018. p. 2-26.

SCRIVENER, K. L. Options for the future of cement. **Indian Concrete Journal**, v. 88, n. 7, 2014. p. 11-21.

SCRIVENER, K. L.; MALLON, D. L.; HASTIE, P. Cimento e materiais cimentícios suplementares: impactes na sustentabilidade. **Journal of Cement and Concrete Research**, v. 34, n. 6, p. 879-889, 2004.

SILVA, T. C. et al. Blocos de concreto com rejeito de minério de ferro: desenvolvimento e avaliação de propriedades mecânicas. **Revista de Engenharia Civil**, v. 44, p. 134-145, 2022.

SILVA, T. C. et al. Impactos ambientais das barragens de rejeitos em Minas Gerais. **Environmental Science and Policy Review**, v. 34, n. 1, p. 15-28, 2020.

SILVA, A. L. da; SILVA, M. A. da; SILVA, R. A. da. Determinação das emissões de dióxido de carbono das matérias-primas e do concreto. **Arquitetura e Construção**, São Paulo, v. 10, n. 1, p. 1-10, 2012. Disponível em:
<https://www.scielo.br/j/ac/a/SvtDDYjsv4tpPgpsQbZn6zR/>. Acesso em: 20 jan. 2025.

SOUZA, Camila. **Pesquisa reconstitui história dos ladrilhos hidráulicos**. Jornal da USP, 14 nov. 2018. Disponível em: <https://jornal.usp.br/ciencias/ciencias-humanas/pesquisa->

reconstitui-historia-dos-ladrilhos-hidraulicos/?utm_source=chatgpt.com. Acesso em: 28 jan. 2025.

TEIXEIRA, L. E. et al. Mineração no Brasil: desafios e perspectivas. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 48, n. 1, p. 15-32, 2018.

USGS. Iron Ore Statistics and Information. **National Minerals Information Center**.

Disponível em: <https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/iron-ore-statistics-and-information>. Acesso em: 16 jan. 2025.

VALE. **Vale planeja recuperar cerca de 7 milhões de toneladas de minério de ferro a partir do reaproveitamento de rejeitos e estéril este ano**. Disponível em:

<https://www.vale.com/w/vale-planeja-recuperar-cerca-de-7-milhoes-de-toneladas-de-minerio-de-ferro-a-partir-do-reaproveitamento-de-rejeitos-e-esteril-este-ano>. Acesso em: 16 jan. 2025.

WELLE, Deutsche. **Brasil tem 1 milhão vivendo perto de barragens de risco: ao todo, 1.220 são classificadas como barragens com alto potencial de dano**. Poder360: Blog, 30 abr. 2022. Disponível em: <https://www.poder360.com.br/brasil/brasil-tem-1-milhao-vivendo-perto-de-barragens-de-risco/>. Acesso em: 21 nov. 2024.

WORLD STEEL ASSOCIATION. **Steel statistical yearbook, 2021**. Disponível em: <https://worldsteel.org>. Acesso em: 28 jan. 2025.

YADAV, M. et al. An overview of the influences of mechanical and chemical processing on sugarcane bagasse ash characterisation as a supplement. **Journal of Cleaner Production**, 2019.

ZINATO, N. L.; CORDEIRO, L. C. A.; ARAÚJO, F. G. da S.; MENDES, J. J.

Caracterização tecnológica dos rejeitos de minério de ferro gerados no processo de beneficiamento e dispostos em barragens de rejeito: faixas finas e ultrafinas. Disponível em: <https://abmproceedings.com.br/en/article/download-pdf/caracterizacao-tecnologica-dos-rejeitos-de-minerio-de-ferro-gerados-no-processo-de-beneficiamento-e-dispostos-em-barragens-de-rejeito-faixas-finas-e-ultrafinas>. Acesso em: 16 jan. 2025.