

Victor Torres Bersan Lage

**REJEITOS DE MINÉRIO DE FERRO: UMA AVALIAÇÃO DE SUA  
APLICAÇÃO NA CONSTRUÇÃO CIVIL**

Belo Horizonte  
2024

Victor Torres Bersan Lage

**REJEITOS DE MINÉRIO DE FERRO: UMA AVALIAÇÃO DE SUA  
APLICAÇÃO NA CONSTRUÇÃO CIVIL**

Trabalho final de conclusão do curso de especialização do CEERMIN – UFMG, para obtenção do título de especialista em Engenharia de Recursos Minerais, do programa de especialização da UFMG.

Orientadora: Geriane Macedo Rocha

Belo Horizonte  
2024



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS  
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM ENGENHARIA DE RECURSOS MINERAIS**

**ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**MONOGRAFIA**

Aos vinte e três dias do mês de novembro do ano de dois mil e vinte e quatro, de 08h:00min às 11h:15min, o estudante Victor de Torres Bersan Lage, matrícula 2023662260 defendeu o Trabalho intitulado **“Rejeitos de minério de ferro: uma avaliação de sua aplicação na construção civil”**.

Participaram da banca examinadora os professores abaixo indicados, que, por nada mais terem a declarar, assinam eletronicamente a presente ata.

**Nota:** 95

**Situação:** Aprovado

**Orientadora:** Professora Geriane Macedo Rocha

**Examinador:** Professor Guilherme de Souza Papini

**Examinador:** Professor Hugo César Coelho Michel



Documento assinado eletronicamente por **Geriane Macedo Rocha, Professora do Magistério Superior**, em 29/01/2025, às 21:42, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Guilherme de Souza Papini, Usuário Externo**, em 07/02/2025, às 16:52, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de](#)

[novembro de 2020.](#)



Documento assinado eletronicamente por **Hugo Cesar Coelho Michel, Professor do Magistério Superior**, em 07/02/2025, às 21:40, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543,](#)

[de 13 de novembro de 2020.](#)



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.ufmg.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **3919811** e o código CRC **09A8EAC8**.

---

### **INSTRUÇÕES**

Este documento deve ser editado apenas pelo Orientador e deve ser assinado eletronicamente por todos os membros da banca.

---

Referência: Processo nº 23072.201794/2023-83

SEI nº 391981

## **Agradecimentos**

Gostaria de agradecer primeiramente e imensamente a Deus por me dar capacidade para desenvolver este trabalho.

Agradeço aos meus pais pelos ensinamentos ao longo da vida, que me permitiram ser uma pessoa melhor, mais íntegra, ética, honesta e humilde.

Agradeço a minha companheira Adriana Lopes por me apoiar ao longo deste trabalho, pela paciência nos dias que não pude dar tanta atenção.

Agradeço aos meus colegas de trabalho que de alguma forma, no dia a dia, puderam agregar nas discussões e que me fizeram enxergar oportunidades de melhorar o trabalho.

Agradeço aos colegas da especialização pelo tempo juntos. Foi um período muito bacana em nossas vidas.

Agradeço a direção do CEERMIN e da UFMG pelo excelente programa de especialização.

À Áurea, agradeço todo o suporte dado.

Aos professores, agradeço todo conhecimento compartilhado.

À Geriane Rocha, minha orientadora, meu eterno obrigado pela grande contribuição, pelas dicas, correções, pelo grande interesse em ajudar a desenvolver um bom trabalho.

E não poderia deixar de dar meu obrigado ao grande Paulo Brandão, que aceitou ser meu orientador inicialmente. Que Deus o guarde em um lugar maravilhoso.

## Resumo

O ramo da indústria de minério de ferro movimenta milhões de toneladas de materiais anualmente. Além dos produtos com alto teor metálico, há geração de grandes massas de resíduos: estéreis e rejeitos. Os rejeitos são oriundos da etapa de beneficiamento mineral, e demandam grandes áreas para sua destinação, seja em barragens ou em pilhas de rejeitos. Desta forma, a busca por reaproveitar estes rejeitos em mercados alternativos tem sido um tema bastante pertinente para os dias atuais, objetivando a redução dos impactos socioambientais no setor e proporcionando a geração de receitas através da comercialização destes coprodutos. Neste trabalho foi realizada uma pesquisa bibliográfica aprofundada que demonstrou o reaproveitamento de rejeitos de minério de ferro em outros setores como uma alternativa com grande potencial para a redução de impactos socioambientais e fomento à economia circular neste setor. Além disto, foi feita uma conexão entre as principais características destes rejeitos e as normas do ramo de construção civil, permitindo uma correlação entre estes setores.

**Palavras-chave:** rejeitos de minério de ferro; reaproveitamento; normas de construção civil; economia circular.

## **Abstract**

*The iron ore industry moves millions of tons of materials annually. In addition to products with high metallic content, large masses of waste are generated: waste rock and tailings. The tailings come from the mineral processing stage and require large areas for their disposal, whether in dams or tailings piles. Thus, the search for reusing these tailings in alternative markets has been a very relevant topic for today, aiming at reducing the socio-environmental impacts in the sector and generating revenue through the commercialization of these by-products. This work carried out in-depth bibliographic research that demonstrated the reuse of iron ore tailings in other sectors as an alternative with great potential for reducing socio-environmental impacts and promoting the circular economy in this sector. In addition, a connection was made between the main characteristics of these tailings and the standards of the civil construction sector, allowing a correlation between these sectors.*

**Key words:** *iron ore tailings; reuse; civil construction standards; circular economy.*

## Lista de figuras

Figura 1 - Rejeito Arenoso Fonte: Nova93fm (2021) .....	16
Figura 2 - Rejeito total Fonte: Anselmo Santana (2020).....	17
Figura 3 - Separador Magnético de alta intensidade (WHIMS) Fonte: Gaustec (2021) .....	21
Figura 4 - Flotação convencional, FLSmidth Fonte: FLSmidth (2024) .....	21
Figura 5 – Separador magnético separador magnético vertical pulsante de alto gradiente Fonte: Metso (2024).....	23
Figura 6 - Reflux concentrating classifier, FLSmidth Fonte: FLSmidth (2024).....	24
Figura 7 - Crossflow Classifier, Eriez Fonte: Eriez (2024) .....	25
Figura 8 - Allflux, Allmineral Fonte: Kuttner (2024) .....	25
Figura 9 - Distribuição das aplicações de rejeitos nos trabalhos analisados Fonte: Autoria própria .....	31
Figura 10 - Análise química das amostras dos trabalhos analisados Fonte: Autoria própria .....	34
Figura 11 - Teor médio de Fe, SiO <sub>2</sub> e Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> dos trabalhos analisados (com desvio padrão) Fonte: Autoria própria .....	34
Figura 12 - Distribuição do teor de Ferro das amostras dos trabalhos analisados Fonte: Autoria própria .....	35
Figura 13 - d <sub>50</sub> (mm) das amostras dos trabalhos analisados Fonte: Autoria própria .....	36
Figura 14 - Top size (mm) dos rejeitos dos trabalhos analisados Fonte: Autoria própria.....	36
Figura 15 - Produção de materiais para construção civil (10 <sup>3</sup> ). Fonte: ANM (2019) – Sumário Mineral 2020 .....	39
Figura 16 - Quantidade de requerimentos de pesquisa em 2022. Fonte: ANM (2022) – Sumário Mineral 2022 .....	39
Figura 17 - Processo produtivo genérico do minério de Ferro Fonte: Autoria própria.....	50

## **Lista de tabelas**

Tabela 1 - Minerais associados ao rejeito de minério de ferro Fonte: Autoria própria .....	17
Tabela 2 - Produção beneficiada de ferro (10 <sup>3</sup> t) Fonte: adaptado de ANM (2021, 2022) – Sumário Mineral 2022 .....	18
Tabela 3 - Resumo de trabalhos sobre reaproveitamento de rejeito Fonte: Autoria própria .....	28
Tabela 4 - Possíveis aplicações dos rejeitos no mercado de construção civil conforme NBR7225 Fonte: Autoria própria .....	37
Tabela 5 - Resumo de normas - Materiais de construção civil Fonte: Autoria própria .....	44

## **Siglas, abreviações e símbolos**

Al – Alumínio

CAPEX – Capital Expenditure

CETEM – Centro de Tecnologia Mineral

CP – Cimento Portland

D50 – abertura que 50% da amostra é passante

F – Flúor

Fe – Ferro

g/cm<sup>3</sup> - gramas por centímetro cúbico

H - Hidrogênio

IBRAM – Instituto Brasileiro de Mineração

IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas

K – Potássio

kg – quilograma

Mg - Magnésio

mm - milímetro

µm – micrômetro

MPa – Mega Pascall

NBR -

O – Oxigênio

RCC – Reflux concentrating classifier

RMF – Rejeito de minério de ferro

ROM – *run of mine*

Si - Silício

t – Tonelada

UFMG – Universidade Federal do Estado de Minas Gerais

VED15 – Classe de vedação de 1,5MPa

WHIMS – *Wet high intensity magnetic separator*

% - Porcentagem

< - Menor

> - Maior

## Sumário

1. Introdução .....	11
2. Objetivo Geral .....	13
2.1. Objetivos Específicos .....	13
3. Metodologia .....	14
4. Pesquisa bibliográfica .....	15
4.1. Rejeito de minério de ferro.....	15
4.2. Processamento de rejeitos de minério de ferro.....	19
4.3. Potenciais aplicações dos rejeitos de minério de ferro .....	26
4.4. Mercado de matérias primas para construção civil.....	38
4.5. Normas do mercado de construção civil .....	41
4.6. Considerações gerais .....	45
4.7. Desafios do setor .....	47
5. Conclusão .....	52
6. Sugestões para trabalhos futuros .....	53
Referências.....	54

## 1. Introdução

Na atividade de mineração, grandes volumes e massas de materiais são extraídos e movimentados. A quantidade de resíduos gerada pela atividade depende do processo utilizado para extração do minério, da concentração da substância mineral estocada na rocha matriz e da localização da jazida em relação à superfície. Na atividade de mineração, existem dois tipos principais de resíduos sólidos: os estéreis e os rejeitos. Os estéreis são os materiais escavados, gerados pelas atividades de extração (ou lavra) no decapeamento da mina, não têm valor econômico e ficam geralmente dispostos em pilhas. Os rejeitos são resíduos resultantes dos processos de beneficiamento a que são submetidas as substâncias minerais. Estes processos têm a finalidade de padronizar o tamanho dos fragmentos, remover minerais associados sem valor econômico e aumentar a qualidade, pureza ou teor do produto final (Silva *et al.*, 2012).

Com o aumento da demanda por insumos minerais ao longo dos anos, as atividades mineiras se encontram em um elevado patamar de toneladas movimentadas. O resultado tem sido o crescimento exponencial na geração de rejeitos provenientes do beneficiamento. Com isso, a disposição final e o gerenciamento deste material vêm se tornando, cada vez mais, um tema de grande importância no cenário mundial da mineração.

De forma geral, estéreis e rejeitos são empilhados em estruturas geotécnicas e, especificamente os rejeitos, são comumente dispostos em forma de polpa ou pasta em barragens (principal técnica utilizada até a ocorrência de rompimentos em Minas Gerais, em 2015 e 2019) ou cavas exauridas. Os rejeitos também podem ser desaguados e serem destinados para pilhas de rejeito. Tanto o método de pilhas quanto barragens exigem grandes áreas para a disposição, grandes volumes de supressão vegetal, grandes alterações na fauna e flora local, além de trazer impactos visuais para a sociedade, riscos com o potencial de rompimento, geração de particulados, movimentações de equipamentos excessivas, etc. Principalmente as barragens de contenção de rejeitos são reconhecidas por gerarem um impacto ambiental significativo.

Neste sentido, a gestão dos resíduos está se tornando um dos critérios pelos quais o desempenho ambiental das empresas é julgado. Além disso, apesar dos

avanços consideráveis da legislação de pilhas e barragens e da evolução da mão de obra técnica e de tecnologias relacionadas ao tema, as barragens de contenção de rejeitos continuam, ainda, sinônimos de estruturas com grande potencial de causar prejuízos econômicos, sociais e ambientais. As pilhas de estéril e rejeito também podem ser incluídas nesta visão, obviamente com índices de rompimentos bem menores do que as barragens, pois são métodos ainda em fase de estudos, já que são mais recentes que as barragens.

É importante então, que as empresas assumam um papel mais atuante no que diz respeito à redução do volume destes resíduos a serem estocados. Uma das maneiras seria a inserção destes resíduos em mercados que utilizam matérias primas semelhantes em seus processos.

Neste contexto, um tema que vem ganhando relevância nos últimos tempos é a economia circular. A circularidade tem como base o desenho de produtos, compartilhamento, manutenção, reutilização, remanufatura e reciclagem de materiais e aparece como alternativa ao modelo tradicional linear, que envolve produção, consumo e descarte, uma vez que defende o uso dos recursos naturais com menos desperdício. Representa uma mudança sistêmica que constrói resiliência em longo-prazo e gera oportunidades econômicas e de negócios, além de proporcionar benefícios ambientais e sociais (IBRAM, 2022).

Portanto, esta pesquisa traz uma avaliação geral de alguns trabalhos já realizados sobre reaproveitamento de rejeitos de minério de ferro, fazendo uma conexão com as normas de um dos mercados que estes resíduos têm sido majoritariamente aplicados até então: o mercado de construção civil. Este *link* entre normas e as características gerais dos rejeitos gerados nas usinas de tratamentos de minério de ferro gera grande aprendizado no que diz respeito a quais aspectos devem ser avaliados nesta busca pela inserção destes resíduos em diversos mercados produtivos.

## **2. Objetivo Geral**

O objetivo deste trabalho foi realizar uma análise detalhada de estudos publicados sobre o reaproveitamento de rejeito de minério de ferro no Brasil, fazendo uma correlação entre as características dos rejeitos utilizados e a possibilidade de suas aplicações como coprodutos na construção civil.

### **2.1. Objetivos Específicos**

- Demonstrar alternativas de reaproveitamento de rejeitos do beneficiamento de minério de ferro já estudadas;
- Demonstrar as principais exigências das normas do ramo de construção civil;
- Demonstrar de forma sucinta as principais características necessárias para que os rejeitos sejam inseridos no mercado de construção civil;
- Demonstrar pontos positivos da busca pela aplicação dos rejeitos em mercados alternativos, especificamente na construção civil.

### **3. Metodologia**

A metodologia principal adotada neste trabalho foi a busca aprofundada por fontes bibliográficas que discorressem sobre o aproveitamento de rejeitos oriundos da indústria do minério de ferro, trazendo exemplos práticos relacionados ao tema em questão.

Este trabalho apresenta uma abordagem qualitativa que tem como objetivos demonstrar os processos praticados ou estudados para aproveitamento de rejeitos do minério de ferro, bem como apresentar as principais características destes materiais que os capacitam a serem usados em mercados alternativos.

O levantamento bibliográfico fundamentou-se principalmente na busca por estudos já realizados com rejeitos de minério de ferro e as características necessárias para serem incorporados no ramo de construção civil, fomentando a economia circular, a menor geração de resíduos, a redução de impactos socioambientais e a geração de valor na cadeia produtiva do minério de ferro.

A pesquisa bibliográfica baseou-se na consulta em diversas teses relacionadas ao tema, livros pertinentes ao assunto, publicações de órgãos relevantes da área e artigos científicos.

A pesquisa digital foi realizada utilizando as palavras-chave como referência, através de termos como “Reaproveitamento de rejeitos de minério de ferro”, “Rejeitos de minério de ferro na construção civil”, “Especificações de matérias primas da construção civil” e outros que se correlacionem com o tema.

## 4. Pesquisa bibliográfica

### 4.1. Rejeito de minério de ferro

Soares (2010) afirma que as atividades relacionadas à produção mineral geram elevada massa de material que é rejeitada nos processos de lavra e beneficiamento.

Coelho (2008) afirma que “o minério é submetido a processos de tratamento ou beneficiamento, caracterizados por operações de cominuição, separação por tamanho e concentração destinadas a modificar os bens minerais em termos de forma e/ou composição, visando adequá-los às aplicações industriais pertinentes. Os resíduos correspondentes ao processo de beneficiamento industrial do minério são denominados como rejeitos (*tailings*).”

Em se tratando de minério de ferro, tecnicamente são gerados dois tipos de rejeitos: rejeito arenoso e rejeito ultrafino (lamas). Em geral, a maioria das usinas geram estes rejeitos de forma separada ao longo do processo, no entanto, ambos são destinados de forma conjunta, seja para barragens ou pilhas.

Com relação às definições de classes e faixas granulométricas, este é um tema bastante amplo, que não possui unanimidade entre pesquisadores quanto a sua conceituação.

A NBR 6502 (1995) define que o material classificado como arenoso possui granulometria inferior a 2,0mm e superior a 0,06mm. Já o conceito para o rejeito ultrafino se torna mais abstrato. Por possuir grande parcela de material bastante fino, com presença de argilominerais, pode-se considerar o conceito de argila para entendimento da classe granulométrica deste material. Portanto, a mesma NBR 6502 (1995) traz que argila é um material que apresenta partículas abaixo de 0,002mm.

Trazendo um conceito que já é mais usual na indústria de minério de ferro, Torquato *et. al* (2019) define estas duas classes de rejeitos da seguinte forma:

“Em função de suas características os rejeitos são classificados em dois tipos:

- Rejeito arenoso, com aproximadamente 90% de partículas acima de 10  $\mu\text{m}$  e de fácil permeabilidade. Na maior parte das instalações esse rejeito é gerado na operação unitária de concentração

por flotação, mas também pode ser obtido em outros processos de concentração, como exemplo concentração magnética;

- Rejeito ultrafino, normalmente com 60% ou mais de partículas abaixo de 10  $\mu\text{m}$  e com maior dificuldade de permeabilidade. Esse rejeito é gerado na operação unitária de deslamagem, que prepara a polpa para a etapa de concentração por flotação.”

Em relação as frações finas de minério, Lins (2020) estabelece uma série de subgrupos, a saber: > 500 $\mu\text{m}$  – grossos; <500 $\mu\text{m}$  – médio; <100  $\mu\text{m}$  – finos; <20  $\mu\text{m}$  – superfinos/pré-coloidais; <10  $\mu\text{m}$  – ultrafinos/quase-coloidais; <1  $\mu\text{m}$  – coloidais; <0,2  $\mu\text{m}$  – supercoloidais.

A Figura 1 ilustra uma pilha de rejeito arenoso. É possível identificar que se trata deste material pela coloração, granulometria e também pelo conhecimento já adquirido a respeito do tema.



Figura 1 - Rejeito Arenoso  
Fonte: Nova93fm (2021)

Já na Figura 2 observa-se uma pilha com semelhanças do chamado rejeito total, ou seja, rejeitos arenosos e ultrafinos misturados. A coloração escura, aparentemente com granulometria fina indica presença de rejeito ultrafino, composto pelas lamas, que de maneira geral apresentam elevado teor de Fe.



Figura 2 - Rejeito total  
Fonte: Anselmo Santana (2020)

Em relação às características do rejeito, Bastos *et al.* (2016), Fontes *et al.* (2016) e Galvão *et al.* (2018) apud Pedroso (2020) afirmam que o RMF é um material fino, denso e cristalino e sua composição é formada principalmente por óxidos de ferro, sílica e alumina, e não apresentam características perigosas.

De acordo com o estudo de Wolff (2009) sobre rejeitos, normalmente os minerais associados aos rejeitos da mineração de ferro são caulinita, gibbsita, goethita, hematita, magnetita, quartzo, talco e moscovita. A Tabela 1 mostra a fórmula química destes minerais:

<b>Mineral</b>	<b>Fórmula Química</b>
Caulinita	$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$
Gibbsita	$\text{Al}(\text{OH})_3$
Goethita	$\text{FeO}(\text{OH})$
Hematita	$\text{Fe}_2\text{O}_3$
Magnetita	$\text{Fe}_3\text{O}_4$
Quartzo	$\text{SiO}_2$
Talco	$\text{Mg}_3(\text{SiO}_5)_2$
Moscovita	$\text{KAl}_2\text{Si}_3\text{AlO}_{10}(\text{OH},\text{F})_2$

Tabela 1 - Minerais associados ao rejeito de minério de ferro  
Fonte: Autoria própria

Para Borges *et al.* (2008) conhecer os rejeitos favorece a viabilização de seu aproveitamento como subproduto na própria usina, ou em outro segmento industrial. Viabilizando-se seu reuso, minimiza-se o impacto ambiental e cria-se receita, onde antes havia despesas.

De acordo com suas características físico-químicas, os rejeitos arenosos vêm ganhando espaço no que tange a sua utilização no mercado de construção civil, em geral sendo adicionado em misturas substituindo o agregado miúdo (areia). Os rejeitos ultrafinos, por sua vez, vêm sendo estudados para a utilização em tijolos, cerâmicas, devido sua similaridade com a matéria prima que produzem estes elementos. Além disso, deve ser destacado o mercado dos geopolímeros, que também tem ganhado importância no cenário de aproveitamento de rejeitos. Os geopolímeros são materiais com possibilidade de aplicações semelhantes às do cimento Portland.

A indústria do minério de ferro no Brasil movimenta anualmente milhões de toneladas de matéria prima (*Run of mine - ROM*). Deste total, boa parte torna-se rejeito após passar pelas etapas de tratamento de minérios. O boletim do setor mineral de 2022 cita que a produção beneficiada de minério de ferro no ano de 2021 superou 430 milhões de toneladas, como pode ser observado na Tabela 2. Portanto, estimando a geração de rejeito oriunda destas operações, espera-se uma massa em ordem de grandeza permeando metade deste valor, tendo em vista as recuperações mássicas praticadas neste ramo industrial. Para minério de ferro comumente tem-se recuperações mássicas oscilando entre 40 a 100%, considerando usinas a umidade natural e usinas com processamento a úmido, a depender das características do mineral, os processos de tratamento utilizados e diversos outros fatores.

Produção beneficiada nacional de bens minerais (10 <sup>3</sup> t)				
Substância	2019	2020	2021	Var.20/21
Ferro	396.944	388.732	430.797	+11%

Tabela 2 - Produção beneficiada de ferro (10<sup>3</sup>t)  
 Fonte: adaptado de ANM (2021, 2022) – Sumário Mineral 2022

#### 4.2. Processamento de rejeitos de minério de ferro

Com o cenário de redução dos teores de Fe e aumento de complexidade mineralógica nos minérios que alimentam as usinas é necessário desenvolver processos adequados ao beneficiamento desses minérios e/ou capazes de recuperar o ferro contido nos rejeitos.

Além de um processamento eficiente, é importante almejar o máximo aproveitamento do recurso mineral, em consonância com o que é preconizado nas normas regulamentadoras de mineração. Portanto, no tratamento de minérios deve ser buscada a máxima recuperação mássica e metalúrgica do bem mineral, a fim de otimizar a utilização deste recurso finito.

Peres *et al.* (2007) apud Alves (2018) afirma que a concentração de minerais é fundamentada sobre três aspectos: liberabilidade, diferenciabilidade e separabilidade dinâmica. A liberabilidade ocorre através da combinação das etapas de cominuição (britagem e moagem) e separação por tamanho. A diferenciabilidade está relacionada às diferenças de comportamento dos minerais-minério e mineral de ganga frente a um processo de concentração; enquanto a separabilidade dinâmica refere-se aos equipamentos empregados no método.

De certa forma, tanto para o beneficiamento de minérios que ainda não foram processados quanto para a recuperação de ferro nos rejeitos são utilizados equipamentos, em geral, semelhantes, podendo distinguir-se nas variáveis de processo.

Em relação aos métodos de concentração aplicados industrialmente para minérios de ferro, tem-se: concentração gravítica (jigues e espirais de *Humphreys*), concentração magnética (baixa e alta intensidade) e flotação. A escolha do método de concentração depende principalmente das propriedades físicas, químicas, mineralógicas e granulometria de liberação dos minerais-minério em relação aos minerais de ganga (Araújo *et al.*, 2003 apud Dauce *et al.* 2019).

A aplicação dos processos de separação magnética e flotação tem mostrado grandes resultados no que diz respeito à redução do teor final de ferro nos rejeitos produzidos nas usinas e aumento de recuperação metálica. Cada uma

destas operações atua de forma totalmente distintas em relação às interações físico-químicas com as partículas minerais.

A propriedade diferenciadora da separação magnética é a susceptibilidade magnética do bem mineral. Já a flotação explora as propriedades de superfície dos minerais.

De acordo com a obra de Luz *et al.* (2010), a separação magnética é um método consagrado na área de processamento de minérios para concentração e/ou purificação de muitas substâncias minerais. Ele ainda complementa que: “o campo de aplicação da separação magnética é muito amplo. É usada na concentração de vários minerais ferrosos e não ferrosos, na remoção de impurezas magnéticas contidas nos minerais industriais...”.

Nesse contexto surge a oportunidade de aplicação de separadores magnéticos de alta intensidade para a recuperação de partículas finas. Existe potencial para aplicar separadores magnéticos de alta intensidade, a exemplo do ilustrado na Figura 3, tanto na recuperação de minerais de ferro contido nos rejeitos de flotação quanto na recuperação de partículas ultrafinas (100% <30 $\mu$ m) (Oberteuffer e Wechsler, 1980 apud Silva, 2014).

A Gaustec, empresa fabricante de separadores magnéticos, desenvolveu um novo modelo de matriz magnética, chamada de *HighMAG*, para aumentar a intensidade do campo magnético e com isso aumentar a atração de partículas finas. Essa matriz apresenta o dobro da altura da matriz convencional e segundo Soares *et al.* (2024) o maior tempo de exposição do material aumenta a recuperação de lamas, e o maior tempo de lavagem garante a seletividade.

Outra tecnologia desenvolvida também pela Gaustec foi o *SuperWHIMS®*, que consiste em um calço magnético de aço, montado ao lado da matriz magnética. De acordo com Rocha *et al.* (2019) seu objetivo é aumentar a intensidade de campo magnético, já que para a concentração de material fino e menos susceptível é necessário aumentar o campo magnético no interior da matriz.



Figura 3 - Separador Magnético de alta intensidade (WHIMS)  
Fonte: Gaustec (2021)

Em relação a flotação, Massi *et. al* (2008) cita que esta é uma técnica de separação de misturas que consiste na introdução de bolhas de ar a uma suspensão de partículas. Com isso, verifica-se que uma ou mais espécies minerais aderem às bolhas, formando uma espuma que pode ser removida da suspensão e separando seus componentes de maneira efetiva. A seguir na Figura 4 um exemplo de célula de flotação convencional.

A diferenciação entre as espécies minerais é dada pela capacidade de suas partículas se aderirem às bolhas de gás (geralmente ar). As partículas se aderem às bolhas e, devido a menor densidade do conjunto partícula-bolha em relação a polpa, o conjunto se desloca verticalmente para a superfície, onde fica retido e é separado numa espuma, enquanto as partículas das demais espécies minerais permanecem na polpa mineral (Chaves *et al.*, 2010).



Figura 4 - Flotação convencional, FLSmidth  
Fonte: FLSmidth (2024)

O método de flotação mais utilizado na concentração de minério de ferro é a flotação catiônica reversa. O termo “reversa” nesta situação indica que o mineral a ser coletado não é o mineral de interesse, mas sim o mineral de ganga, que no caso do minério de ferro é principalmente o quartzo.

Em complemento, Yang (1979) apud Santos (2018) diz que as operações de cominuição podem gerar partículas de granulometria abaixo de 38  $\mu\text{m}$  (lamas), que quando presentes na flotação, afetam o desempenho da operação. As propriedades superficiais das lamaz proporcionam a ocorrência de recobrimentos das partículas maiores por estas (*slimes coating*), alteram a rigidez da espuma, interferem no contato bolha-mineral e tornam pouco efetiva a atuação dos reagentes, devido às interações destes com as lamaz que possuem grandes áreas superficiais específicas quando comparadas com as das partículas de maior granulometria. Nesse cenário, a deslamagem se faz necessária visto a necessidade de retirada das lamaz antes da operação de flotação.

Apesar da flotação catiônica reversa ser o método mais utilizado para minério de ferro no Brasil, o estudo realizado por Campos *et al.* (2024) utilizou o método de flotação direta para a recuperação de ferro em um rejeito de minério de ferro (-150  $\mu\text{m}$ ) com teor de Fe por volta de 11,0%. Neste trabalho o silicato de sódio foi utilizado como depressor da ganga (quartzo) e um reagente misto composto por dodecilamina e ácido graxo foi utilizado como coletor do mineral minério (hematita). A obtenção de teor de Fe de 54,06% no concentrado e recuperação metalúrgica de 32,60% mostraram que os testes foram bastante interessantes. Portanto, para usinas que pretendem tratar o rejeito por meio de flotação, a utilização do método direto de flotação pode ser uma alternativa viável, tendo em vista que para rejeitos a quantidade de mineral minério tende a ser menor do que do mineral de ganga. Neste estudo, o rejeito ficou com teor de 7,78% de Fe.

Além destes equipamentos mais usuais para concentração de minérios e rejeitos contendo ferro, separadores magnéticos de alta intensidade – tipo carrossel e as células de flotação, o mercado já disponibiliza outros equipamentos que podem desempenhar funções semelhantes. No entanto, para confirmar suas aplicabilidades em determinado processo de beneficiamento é muito importante a realização de testes laboratoriais.

A Figura 5 mostra um separador magnético vertical pulsante de alto gradiente. Este equipamento difere-se dos modelos convencionais do tipo carrossel na posição do rotor que gira no eixo vertical, no design das matrizes e pela ocorrência de um leito pulsante para limpeza das matrizes. De acordo com informações disponibilizadas no site da Metso, uma das fabricantes, este equipamento pode ser aplicado na concentração de minério de ferro, na purificação de minerais não metálicos (areias de sílica), na recuperação de partículas finas, menores que  $20\mu\text{m}$ . Portanto, sua vasta aplicação vai de encontro ao propósito do presente estudo.



Figura 5 – Separador magnético separador magnético vertical pulsante de alto gradiente  
Fonte: Metso (2024)

Equipamentos que utilizam o processo gravítico para realizar a separação/concentração das misturas também vem sendo desenvolvidos. Estes equipamentos trabalham com o princípio de leito fluidizado, onde o material é alimentado em forma de polpa, e sofre ações da gravidade e outras impostas pelo próprio equipamento. Desta forma, ocorre o processo de concentração devido a diferença de densidade entre as partículas de minerais de ferro e as não ferrosas.

Alguns destes equipamentos seguem descritos a seguir:

- REFLUX™ *Concentrating Classifier* (RCC™), da FLSmidth (Figura 6): O RCC é altamente eficaz na concentração de minerais valiosos em amostras de alimentação de baixo teor. Ele permite que minerais pesados se acomodem em uma região diferente dos minerais de ganga, induzidos pelo comportamento diferente entre as partículas no

leito fluidizado. Comparado aos métodos tradicionais de recuperação de minerais, como espirais e mesas vibratórias, o classificador de concentração REFLUX não necessita de grandes estruturas e espaços, tornando-o uma solução mais eficiente e econômica.



Figura 6 - Reflux concentrating classifier, FLSmidth  
Fonte: FLSmidth (2024)

- CrossFlow® Classifier, da Eriez (Figura 7): O Eriez *CrossFlow Separator* é um classificador hidráulico, eficiente para a separação de materiais com base na granulometria, formato e/ou densidade das partículas. O *CrossFlow* separa partículas com base em princípios de sedimentação retardada. Este equipamento é indicado para amostras contendo partículas com grande variação na densidade, pois estas possuem diferentes comportamentos sob ação da gravidade. Exemplos incluem minério de ferro e minerais pesados com contaminação por sílica.



Figura 7 - Crossflow Classifier, Eriez  
Fonte: Eriez (2024)

- Allflux®, da Allmineral (Figura 8): O separador allflux® usa tecnologia de leito fluidizado para a separação e classificação hidráulica de finos em suspensão. O processo de duas etapas permite o manuseio de suspensões sem pré-espessamento. As partículas grossas e pesadas são separadas na seção grossa. A descarga de material grosso para fora do funil central é controlada automaticamente por um sistema analógico que utiliza uma sonda de densidade e uma válvula de aperto. Material fino e partículas de baixa densidade transbordam a seção de separação grossa. No anel periférico, chamado de seção fina, ocorre a separação de partículas leves dos finos e a deslamagem. Partículas de densidade específica menor do que o leito fluidizado permanecerão acima do leito e transbordarão com a maior parte da água do processo para a calha de transbordamento.

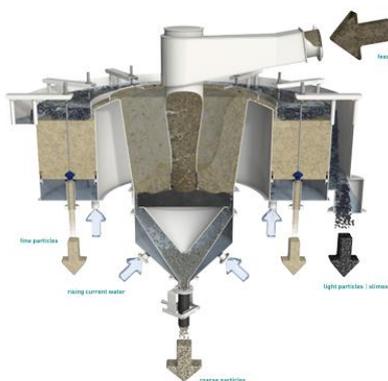


Figura 8 - Allflux, Allmineral  
Fonte: Kuttner (2024)

É factível concluir que as tecnologias disponíveis atualmente no ramo da mineração possuem elevada capacidade de auxiliar esta indústria na redução da geração de rejeitos para descarte, através da produção de materiais com potencial de serem comercializados. Com os devidos estudos previamente realizados é possível entender qual a melhor rota de processo para cada rejeito, bem como qual deve ser sua especificação para atendimento ao mercado da construção civil.

#### **4.3. Potenciais aplicações dos rejeitos de minério de ferro**

De acordo com Pedroso (2020) o RMF pode ser aproveitado na produção de blocos cerâmicos, base e sub-base de pavimentos, telhas, ladrilhos hidráulicos, madeiras plásticas, concretos, argamassas, pigmento para tintas entre outras aplicações, e há muitas outras pesquisas sendo desenvolvidas para o aproveitamento deste rejeito como material de construção. Coelho (2008), analisando a utilização de rejeito de uma mina de ferro do Quadrilátero Ferrífero, também afirma que os rejeitos de mineração “constituem materiais potencialmente interessantes para a construção civil...”.

Outra aplicação de rejeitos na construção civil que vem sendo bastante estudada é a utilização como geopolímero. Os geopolímeros são classificados como polímeros inorgânicos de baixo teor de cálcio que podem ser produzidos pela combinação de um precursor (material fonte de aluminossilicatos) e um material de alta alcalinidade. Eles são reconhecidos como opções viáveis para algumas aplicações de cimento Portland (CP) (Lukkonen *et al.*, 2018; Amin SK *et al.*, 2017 apud Figueiredo, 2021).

Os geopolímeros são ligantes alternativos e podem ser considerados mais avançados entre os compósitos alternativos ao cimento Portland. Esse compósito inovador pode ser proveniente de subprodutos industriais, o que reduz a sua pegada de carbono e proporciona um ambiente livre de poluição quando comparado aos demais ligantes conhecidos pelo mercado. Ademais, os geopolímeros apresentam alta resistência à compressão, alta estabilidade térmica, baixa permeabilidade e resistência satisfatória aos ataques químicos

(Reddy *et al.* (2016) apud Carvalho (2023); Kuri *et al.* (2021) apud Carvalho (2023)).

Atualmente já existem diversos trabalhos publicados relacionados ao reaproveitamento de rejeito de minério de ferro. A Tabela 3 demonstra um resumo detalhado de quatorze trabalhos que serviram de subsídio de informações para o presente estudo e que utilizaram o rejeito do minério de ferro em aplicações alternativas ao descarte. Na tabela pode-se encontrar informações como características do rejeito utilizado, a porcentagem de rejeito nas misturas realizadas e a aplicação para a qual foi destinado.

Trabalho	Aplicação	Composição			Caracterização		Legenda:	Resultados ↑ Aumento ↓ Redução ≈ Estável
		Qualitativa	% Rejeito	Melhor Resultado c/ Rejeito	Química (média)	Granulometria (mm)		
1 Silva (2010)	Misturas asfálticas com resíduos industriais de minério de Ferro	Rejeito como material de enchimento alternativo (filler) em pavimentos rodoviários.	0-6%	6%	Fe: 33,17% SiO <sub>2</sub> : 38,83% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> : 8,86%	d <sub>50</sub> ≈ 0,035	↓ Volume de vazios ↓ Módulo de resiliência ↑ Resistência à tração ↓ Deformação Permanente	
2 Silva (2014)	Produção de Pavers e cerâmica	Concreto: Rejeito fino (C) conc. Magnética → agregado miúdo; Rejeito grosso (B) conc. Magnético → agregado graúdo. Cerâmica: Rejeito flotação (A), (B) e (C) → argila.	Concreto: 0-100% (agregados); Cerâmica: 0-5% (argila).	Concreto: 50% Argila: 5%	Fe: 10,90%/ 6,07%/ 29,80% SiO <sub>2</sub> : 84,40%/ 90,40%/ 47,90% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> : 6,07%/ 0,43%/ 5,61%	d <sub>50</sub> A ≈ 0,076 d <sub>50</sub> B ≈ 0,115 d <sub>70</sub> * C ≈ 0,0059	Bloco: ↑ Resistência Mecânica ↓ Facilidade de desmoldagem ↑ Porosidade Cerâmica: ↑ Resistência à flexão ↓ Absorção de Água ↑ Porosidade	
3 Dantas (2015)	Uso em pavimentação	Rejeito de minério de Ferro com solo granular.	0-50%	50%	Fe: 56,00% SiO <sub>2</sub> : 10,77% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> : 8,26%	d <sub>50</sub> ≈ 0,048	↑ Massa específica ↑ Umidade ótima ↑ CBR para energia modificada	
4 Barbosa (2017)	Produção de cerâmica vermelha	Rej. Min. Ferro com solo	0-10%	10%	Fe: 7,40% SiO <sub>2</sub> : 89,41% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> : NA	d <sub>50</sub> = 0,060	≈ Retração Linear de secagem e queima ↑ Perda de massa secagem e queima ↑ massa específica após queima ≈ Absorção de água ↓ Resistência à compressão	
5 Galéry et. al (2019)	Uso como agregado no desenvolvimento de cimento sustentável	Rejeito Arenoso e Lama para composição da amostra.	0-50%	50%	Fe: 15,77% SiO <sub>2</sub> : 76,28% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> : 0,23%	d <sub>50</sub> = 0,056	↓ Resistência à compressão ↑ Volume de vazios	
6 Severo (2019)	Fabricação de Tijolos cerâmicos	Rej. Min. Ferro com Solo	0-15%	15%	Fe: 13,20% SiO <sub>2</sub> : 78,68% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> : NA	d <sub>50</sub> ≈ 0,080	↑ Facilidade de desmoldagem ↑ Aspecto visual de coloração ↓ Retração Linear ↓ Perda ao fogo ↑ Dureza ↓ Absorção de água	
7 Pedroso (2020)	Compósitos para construção civil	Rej. Min. Ferro + Lodo de Anodização de Alumínio + Resíduo de Concreto + Resíduo de produção de Cal	10-40%	40%	Fe: 33,64% SiO <sub>2</sub> : 41,90% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> : 6,30%	d <sub>50</sub> ≈ 0,538	↑ Resistência à compressão axial ↓ Absorção de água ↓ Variação diametral ↑ Massa específica aparente	
8 Santos et. al (2021)	Camada de sub-base de pavimentação rodoviária	Rej. Min. Ferro com solo da rodovia ES-124	30-40%	40%	Fe: NA SiO <sub>2</sub> : NA Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> : NA	d <sub>50</sub> ≈ 0,110	↑ Massa específica aparente ↓ Umidade ótima ↑ Expansão ↑ CBR	

Tabela 3 - Resumo de trabalhos sobre reaproveitamento de rejeito  
Fonte: Autoria própria

Trabalho	Aplicação	Composição			Caracterização		Legenda:	Resultados ↑ Aumento ↓ Redução ≈ Estável
		Qualitativa	% Rejeito	Melhor Resultado c/ Rejeito	Química (média)	Granulometria (mm)		
9 Figueiredo (2021)	Produção de Geopolímeros one-part	Rej. Min. Ferro como filler e pastas de cimento de geopolímero one-part.	50-60%	60%	Fe: 10,74% SiO <sub>2</sub> : 83,09% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> : 0,60%	d <sub>50</sub> ≈ 0,072	↑ Resistência à compressão ↓ Quantidade de água adicionada ↓ Porosidade	
10 Bessa et. al (2022)	Fabricação de componentes construtivos	Re. Min. Ferro na produção de microconcreto.	0-100%	100%	Fe: 34,06% SiO <sub>2</sub> : 48,92% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> : 2,18%	d <sub>56</sub> * ≈ 0,100	≈ Resistência à compressão ↑ Absorção de água ↑ Volume de vazios ↑ Massa específica ↑ Carbonatação acelerada ≈ Carbonatação natural ↓ Perda de massa após ataque ácido	
11 Júnior et. al (2022)	Utilização para formulação de argamassas	Rejeito de Brucutu com agregado miúdo e cimento Portland.	0-100%	25%	Fe: NA SiO <sub>2</sub> : NA Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> : NA	d <sub>60</sub> * ≈ 0,157	↑ Índice de consistência da argamassa ↑ Densidade amostra 25% rejeito ↓ Densidade amostra >25% rejeito ↑ Absorção de água ↑ Volume de vazios ≈ Massa específica real ↓ Resistência à tração na flexão ↓ Resistência à compressão	
12 Silva et. al (2023)	Confecção de blocos intertravados	Rej. Min. Ferro com cimento e agregados	0-100%	50%	Fe: 18,31% SiO <sub>2</sub> : 64,93% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> : 2,32%	d <sub>50</sub> ≈ 0,165	↓ Resistência à compressão ≈ Absorção de água	
13 Carvalho (2023)	Proposição de geopolímeros	Rejeito utilizado como precursor geopolimérico ativado com o ácido fosfórico 85%.	≈ 70%	≈ 70%	Fe: 16,79% SiO <sub>2</sub> : 57,10% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> : 16,70%	d <sub>50</sub> ≈ 0,0505	≈ Resistência à compressão ≈ Absorção de água	
14 Costa et. al (2023)	Produção de tijolos de cimento	Rejeito de minério de Ferro misturado com argila e areia.	0-50%	25%	Fe: NA SiO <sub>2</sub> : NA Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> : NA	d <sub>50</sub> ≈ 0,028	↑ Resistência mecânica ↑ Resistência à compressão 25% rejeito ↓ Resistência à compressão 50% rejeito ≈ Absorção de água ≈ Redução por secagem ≈ Durabilidade por molhagem e secagem ≈ Transferência de calor ≈ Estanqueidade à água ≈ Incombustibilidade	

Tabela 3 - Resumo de trabalhos sobre reaproveitamento de rejeito  
Fonte: Autoria própria

Em geral, boa parte dos trabalhos mostraram bons resultados para a utilização de rejeitos de minério de ferro em substituição a agregados ou argila em produtos da construção civil. Outro ponto interessante foi que nos trabalhos realizados variando as porcentagens de rejeito em sua composição, houve uma tendência de melhores resultados para as amostras com maior percentual de rejeito (cerca de 10 trabalhos). Isto mostra que a utilização deste resíduo tem grande potencial.

No entanto, vale destacar três trabalhos em que a maior proporção de rejeito não obteve o melhor resultado: trabalhos de Júnior *et al.* (2022), Silva *et al.* (2023) e Costa *et al.* (2023). No caso do estudo de Júnior *et al.* (2022), o aumento da proporção de rejeito de 25% para 50% e 100% ocasionou aumento de porosidade na argamassa. Já em Silva *et al.* (2023) a mistura com 50% de rejeito obteve maior resistência à compressão (5MPa) em relação à mistura com 100% de rejeito (2MPa) e, além disto, obteve menor absorção de água. Isto também deve estar ligado ao fato de que a maior quantidade deste rejeito implica em maior porosidade e índice de vazios nas misturas. Por fim, no estudo de Costa *et al.* (2023), provavelmente pelos mesmos motivos já citados, a mistura com 25% de rejeito se saiu melhor do que a mistura com 50%, pois obteve maior resistência à compressão (10,84MPa).

É importante frisar que a porcentagem de rejeito com melhores resultados nos trabalhos utilizados podem representar tanto a proporção do resíduo em relação a massa total da mistura que foi aplicado quanto a proporção de rejeito em substituição ao insumo de características similares, como areia, argila, materiais de preenchimento etc. A depender da utilização, estes rejeitos podem ser misturados com areia natural, agregados graúdos, solos entre outros materiais.

Na Figura 9 pode-se observar a distribuição bastante variada do modo que os rejeitos foram aplicados nos trabalhos analisados neste estudo.

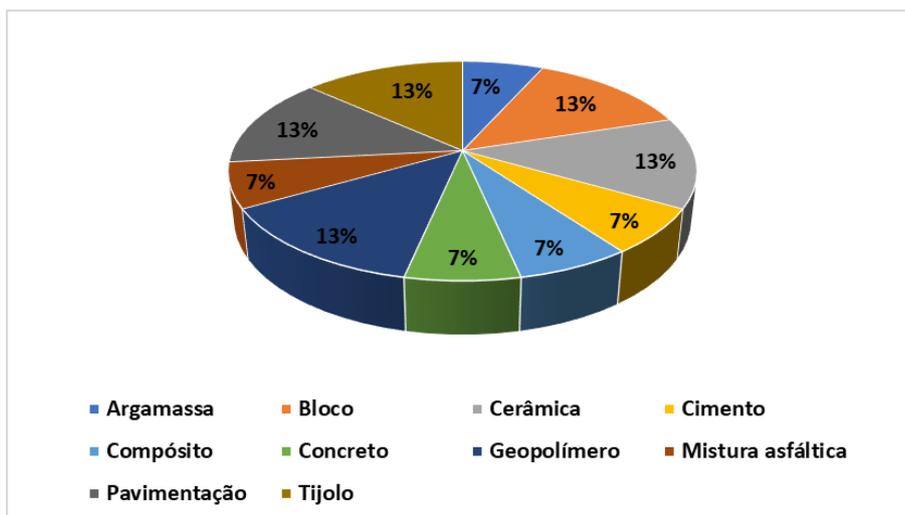


Figura 9 - Distribuição das aplicações de rejeitos nos trabalhos analisados  
Fonte: Autoria própria

No trabalho desenvolvido por Pedrosa (2020) vários corpos de prova obtiveram resultados favoráveis para sua utilização como blocos vazados simples de alvenaria (resistência a compressão > 3,0MPa), blocos de vedação classe VED15 (resistência a compressão > 1,5MPa) e blocos estruturais (resistência a compressão > 6,0Mpa). Foi possível observar que com o aumento da proporção de rejeito, houve aumento na resistência a compressão axial e diminuição na absorção de água. O valor exigido de absorção de água depende da aplicação. Para blocos simples de alvenaria deve estar abaixo de 10%. Para blocos de vedação deve estar entre 8% e 25% e para blocos estruturais deve estar entre 8% e 21%. Nos estudos, algumas amostras com 30%, 35% e 40% de rejeitos se enquadraram nestes critérios.

Barbosa (2017) concluiu que os parâmetros analisados mostraram que a confecção de cerâmica vermelha utilizando a mistura solo/rejeito da concentração de minério de ferro se mostrou viável, uma vez que os valores dos parâmetros analisados se mostraram dentro dos limites aceitáveis para a confecção de alguns tipos de materiais cerâmicos. Utilizando 10% de rejeito na mistura, os resultados dos ensaios de retração linear pós-secagem e pós-queima foram de 0,0% e 1,96%, respectivamente. O trabalho cita que estes valores atendem para sua utilização como telhas, tijolos furados e tijolos de alvenaria. A massa específica da amostra com 10% de rejeito (1,70g/cm<sup>3</sup>) foi superior à da amostra sem rejeito (1,50g/cm<sup>3</sup>), o que contribuiu para a menor retração e menor

porosidade. Vale destacar que neste trabalho o rejeito possuía 7,40% de Fe, o que é um excelente valor. É um rejeito com alto teor de sílica, provavelmente bem limpo e certamente muito eficiente quanto ao uso em construção civil.

Dos Santos *et. al* (2021) afirmam a respeito de seu estudo que a mistura com 40% de rejeito de minério de ferro forneceu os melhores resultados para substituição ao agregado natural na execução da camada de sub-base de um pavimento. Isto deve-se justificar pelo fato de que com esta proporção foi obtido o maior valor de massa específica aparente (1,743g/cm<sup>3</sup>) e o menor valor de umidade ótima (20,1%) se comparado à amostra sem rejeito. Outros pontos de destaques foram os valores do ensaio de expansão de 0,53% e 0,41% para 40% e 30% de rejeitos, respectivamente. Dentro do estudo é afirmado que amostras com valor elevado de massa específica são bastante interessantes para uso em pavimentação e que amostras com valor abaixo de 1% no ensaio de expansão são adequadas para uso em sub-bases de rodovias.

Junior *et. al* (2022) afirmam em sua conclusão que, com os resultados encontrados em seu estudo, o rejeito de minério de ferro que normalmente é descartado no meio ambiente sinaliza um potencial de torná-lo um recurso utilizável para a produção de argamassas, possuindo um destino ambientalmente correto e tecnicamente viável. No entanto seu estudo deixa claro que em termos de granulometria o rejeito ficou fora da faixa exigida pela NBR 7211. Isto implica em uma utilização deste rejeito de forma bastante controlada, não sendo possível substituir o agregado de forma total. A maior parte da amostra concentrou-se entre as peneiras 0,300 mm e 0,150 mm, o que sinaliza que a utilização deste na produção de argamassa certamente demandará em acréscimos da quantidade de água nas misturas.

Severo (2019) concluiu em seu estudo que utilizar o rejeito de minério de ferro na fabricação de tijolos cerâmicos se mostrou um tema bastante pertinente para estudos e testes. De forma geral os tijolos com 15% de substituição apresentaram maior facilidade de desmoldagem se comparado com tijolos com 5% e 0% de substituição. Em relação aos testes de retração linear, os resultados deste estudo mostraram que quanto maior foi a quantidade de rejeito, menor foi o valor de retração linear.

Já Bessa *et. al* (2022) afirmaram ser viável produzir microconcretos utilizando rejeito de minério de ferro como substituto ao agregado miúdo, tendo em vista

os seguintes aspectos: sua incorporação não afetou os valores de resistência à compressão aos 28 dias (30Mpa); o índice de vazios e a absorção (19,02% e 7,53%) ficaram acima dos encontrados no traço de referência sem uso de rejeito (15,84% e 6,53%); a incorporação de 100% de rejeito não afetou de forma significativa os valores para a carbonatação natural (3% acima) e implicou em menores valores de perda de massa em relação ao traço de referência (22% abaixo). Portanto, é possível que componentes construtivos sejam produzidos com microconcretos com RMF em substituição ao agregado miúdo e que tenham durabilidade compatível com os exemplares convencionais.

No trabalho de Dantas (2015) o rejeito possuía teor de Fe de 56%. É um valor extremamente elevado para rejeito, provavelmente oriundo de uma operação de beneficiamento muito ineficaz ou coletado em um momento de contaminação do produto.

O estudo de Silva (2014) obteve resultado nos testes de resistência mecânica com uma tendência diferente de outros estudos. A presença de rejeitos finos e de rejeitos grossos de concentração de minério de ferro provocou a redução da resistência mecânica dos corpos de prova de concreto (7MPa), com relação a misturas padrão (sem rejeito) considerando tempo de cura de 7 dias (21MPa). Provavelmente isto se deu em função da granulometria mais fina dos rejeitos, comparada à dos agregados tradicionais. No entanto, considerando o tempo de cura de 28 dias, as amostras com rejeito já possuíam resistência superior (43MPa) comparada a amostra com agregado convencional (30MPa).

Galéry *et al.* (2019) concluíram que ao analisar o teste de resistência a compressão uniaxial com 28 dias de cura é possível observar que a amostra de rejeito/lama e a amostra de areia apresentam resistências próximas, em torno de 36,0 e 37,3 MPa, respectivamente, o que obedece a norma da NBR 16697 para cimentos Portland - requisitos para construções civis.

Com base no estudo de Figueiredo (2021), o incremento de rejeito na mistura de cimento geopolimérico de 50% para 60% resultou em um aumento de aproximadamente 20% na resistência à compressão, o que pode estar associado a um melhor empacotamento das partículas. Considerando cura de 3 dias, as amostras com 50% de rejeito chegaram a 33,3Mpa de resistência à compressão e com 60% de rejeito chegou a 43,6Mpa.

A Figura 10 expõe a distribuição dos teores de Fe, sílica e alumina dos trabalhos analisados (ver Tabela 3). Observa-se que os teores de Fe e sílica estão bastante variados, o que externa a imensa variabilidade química que os rejeitos produzidos nas diversas empresas e processos possuem.

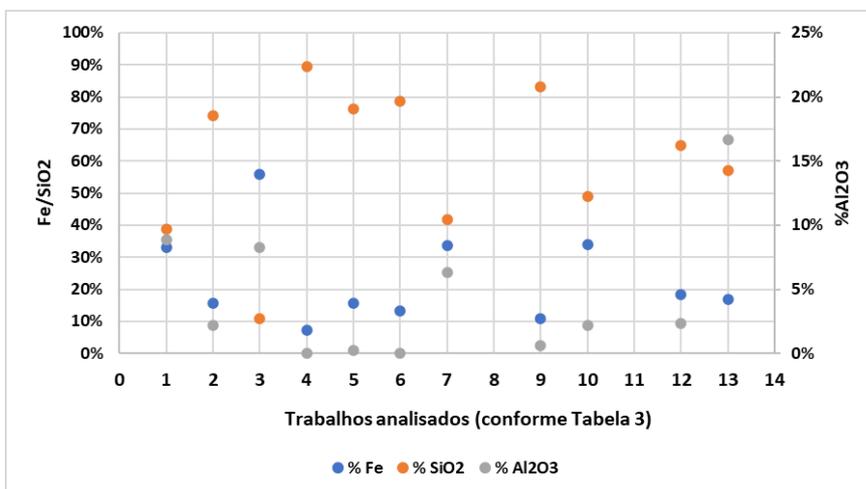


Figura 10 - Análise química das amostras dos trabalhos analisados  
Fonte: Autoria própria

Em relação aos teores médios de ferro, sílica e alumina dos materiais utilizados nos trabalhos avaliados neste estudo, têm-se uma visão geral a partir da Figura 11 a seguir.

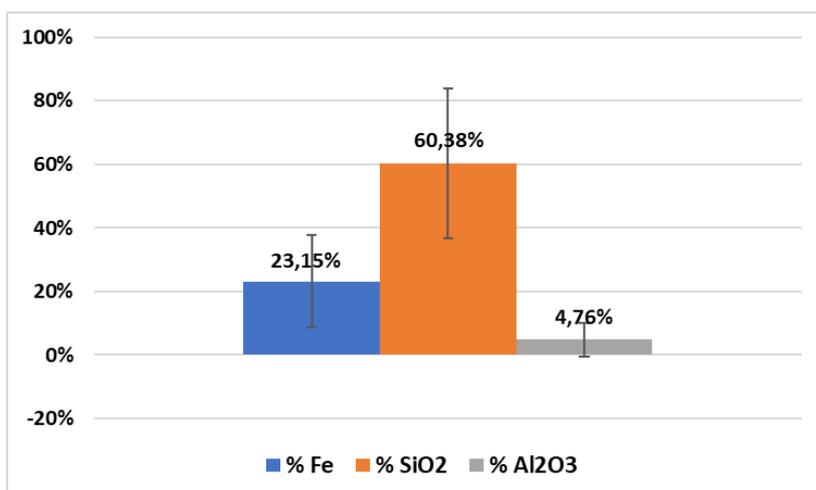


Figura 11 - Teor médio de Fe, SiO<sub>2</sub> e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dos trabalhos analisados (com desvio padrão)  
Fonte: Autoria própria

Vale destacar o teor médio de ferro ultrapassando 20%. Este número mostra o grande potencial de recuperação metalúrgica frente aos teores de ferro nos rejeitos produzidos.

Na Figura 12 pode-se observar outro comparativo dos trabalhos em relação ao teor de ferro. A maior parte dos trabalhos (63,6%) foram desenvolvidos com rejeitos com teor de ferro abaixo de 20%. No entanto, há uma parcela considerável acima deste valor, o que demonstra o potencial de recuperação do mineral minério presente nos rejeitos antes de seu uso como co-produto, através dos processos de beneficiamento mencionados no Capítulo 4.2, de processamento de rejeitos. Vale ressaltar que os valores consideram onze dos quatorze trabalhos, uma vez que três não trouxeram informações sobre teores das amostras.

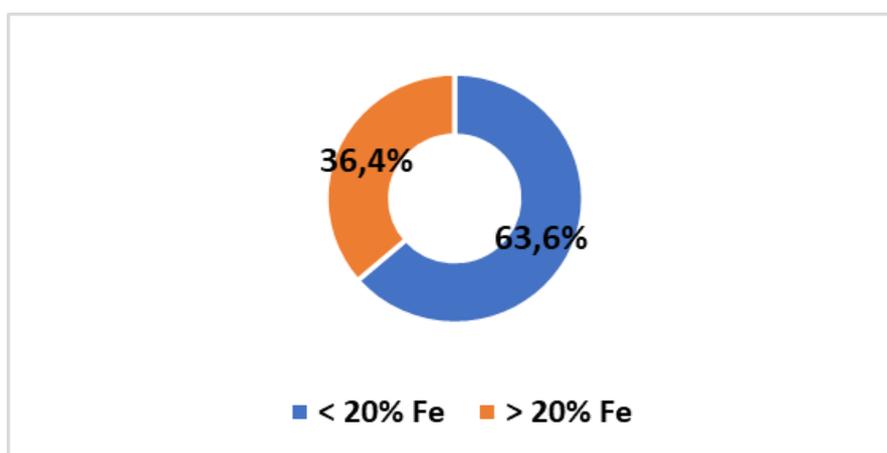


Figura 12 - Distribuição do teor de Ferro das amostras dos trabalhos analisados  
Fonte: Autoria própria

Em relação a distribuição granulométrica dos rejeitos estudados observa-se uma grande proporção abaixo de 0,150mm (Figura 13). A NBR 07225, que define a classe de matérias-primas quanto a sua granulometria, traz que os agregados miúdos, areia média, areia fina e pedriscos se enquadram neste range granulométrico.

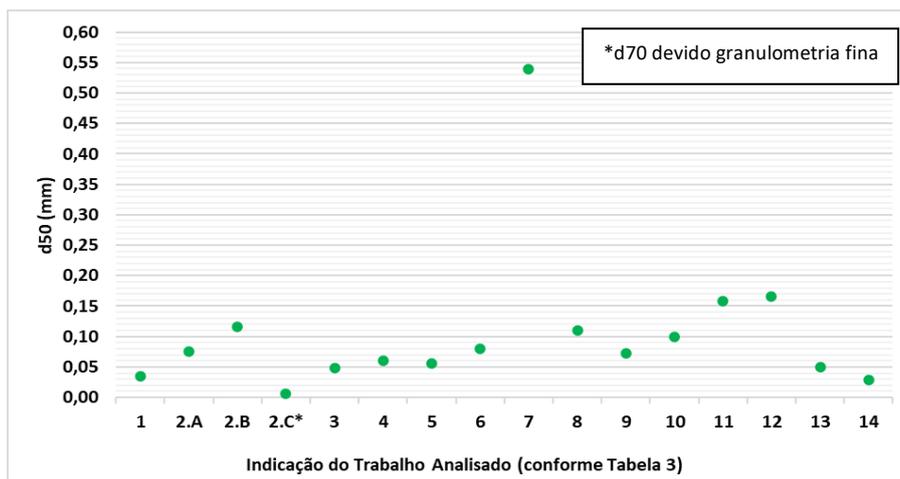


Figura 13 - d50 (mm) das amostras dos trabalhos analisados  
Fonte: Autoria própria

Destaca-se a granulometria do rejeito utilizado no estudo de Da Silva e Fabiane (2014), representado pelo índice 2C na figura acima, aplicado como argila na produção de cerâmica, um rejeito bastante fino, que se enquadra no conceito de argila ou superfinos/pré-coloidais ( $< 0,0200\text{mm}$ ).

Outra análise interessante a se fazer é com relação ao *top size* dos materiais dos trabalhos analisados. Vale destacar o rejeito do trabalho de Pedroso (2020), indicado pelo número 7 na Figura 14, que possui *top size* elevado em comparação aos demais trabalhos. Isto se deve provavelmente por ter sido coletado em um local onde houve deposição de material e conseqüentemente ocorreu segregação entre as faixas granulométricas.

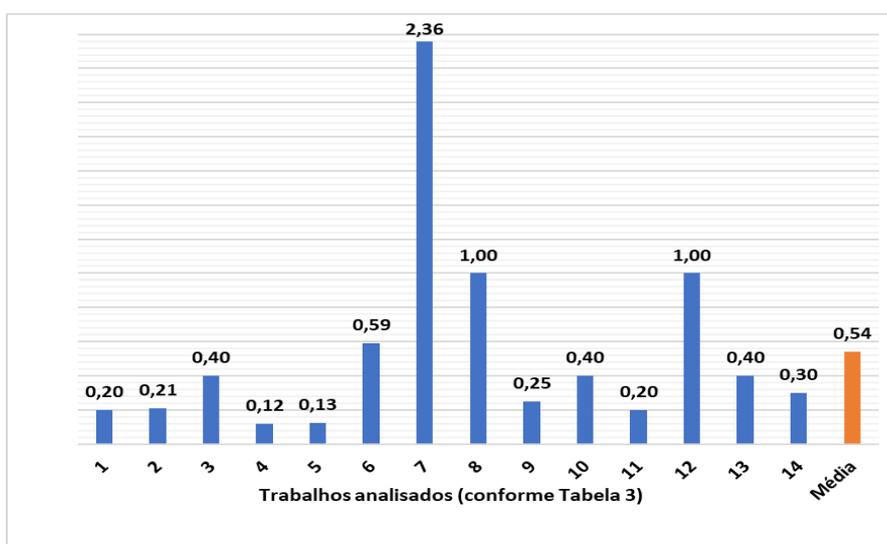


Figura 14 - Top size (mm) dos rejeitos dos trabalhos analisados  
Fonte: Autoria própria

Por fim, tomando como referência as definições da NBR 07225 citada no capítulo 4.5 e as análises referentes ao *top size* e *d50* dos estudos utilizados neste trabalho, pode-se criar uma relação entre as faixas granulométricas dos rejeitos e suas possíveis aplicações no mercado de construção civil, reforçado pelos estudos demonstrados na Tabela 3.

A Tabela 4 sintetiza esta correlação entre as granulometrias dos trabalhos analisados e suas possíveis aplicações, de acordo com as definições da NBR 07225, que é detalhada no capítulo 4.4:

Trabalho	Top size (mm)	d50 (mm)	Faixa de Possíveis aplicações
1	0,20	0,04	Areia fina; Pedrisco fino; Pó de pedra
2*	0,21	0,07	Areia fina; Pedrisco fino; Pó de pedra
3	0,40	0,05	Areia fina; Pedrisco fino; Pó de pedra
4	0,12	0,06	Areia fina; Pedrisco fino; Pó de pedra
5	0,13	0,06	Areia fina; Pedrisco fino; Pó de pedra
6	0,59	0,08	Areia média; Pedrisco médio; Areia fina; Pedrisco fino; Pó de pedra
7	2,36	0,54	Pedregulho fino; Areia grossa; Areia Média; Pedrisco médio; Areia fina; Pedrisco fino; Pó de pedra
8	1,00	0,11	Areia média; Pedrisco médio; Areia fina; Pedrisco fino; Pó de pedra
9	0,25	0,07	Areia fina; Pedrisco fino; Pó de pedra
10	0,40	0,10	Areia fina; Pedrisco fino; Pó de pedra
11	0,20	0,16	Areia fina; Pedrisco fino; Pó de pedra
12	1,00	0,17	Areia média; Pedrisco médio; Areia fina; Pedrisco fino; Pó de pedra
13	0,40	0,05	Areia fina; Pedrisco fino; Pó de pedra
14	0,30	0,03	Areia fina; Pedrisco fino; Pó de pedra
<b>Média</b>	<b>0,54</b>	<b>0,11</b>	<b>Areia média; Pedrisco médio; Areia fina; Pedrisco fino; Pó de pedra</b>

\* Feito média no d50 dos 3 rejeitos para esta análise

Tabela 4 - Possíveis aplicações dos rejeitos no mercado de construção civil conforme NBR7225  
Fonte: Autoria própria

É importante destacar que as possíveis aplicações não se limitam somente a estas citadas na tabela anterior. A norma utilizada como referência serviu como orientação para a análise.

Vale ressaltar mais alguns pontos referentes aos trabalhos analisados:

- Grande parte dos trabalhos foram realizados com rejeitos finos, na faixa de 0,150mm ou menor, se enquadrando na classe de agregados miúdos e argila.

- A quantidade de rejeito a ser utilizado depende do tipo de aplicação. Cada aplicação exige testes específicos relacionados ao seu uso.
- Em geral testes de resistência, densidade, absorção de água, variação diametral, retração linear, perda mássica, umidade ótima são bastante exigidos nas mais diversas aplicações.
- As características físicas, químicas e mineralógicas dos rejeitos possuem influência nos resultados dos parâmetros que são analisados (massa específica, absorção de água, porosidade, número de vazios etc.), assim como as matérias primas utilizadas em conjunto com o rejeito.
- A utilização controlada de rejeitos como coprodutos na construção civil possui potencial devido as similaridades físicas, químicas (em partes) e estruturais com os agregados comumente utilizados neste setor.
- Observa-se que os rejeitos de uma maneira geral tendem a: aumentar a densidade específica das amostras, provavelmente pela presença de Ferro; aumentar a porosidade das amostras, quando mais grossos e reduzir, quando mais finos; aumentar a resistência, devido presença de elementos mais densos. Contudo, estas conclusões não são regras, já que os outros insumos também influenciam nos resultados.

#### **4.4. Mercado de matérias primas para construção civil**

Em relação ao mercado das matérias primas para a construção civil, a Figura 15 demonstra quão significativa é a produção destes materiais. A areia supera a escala de 300 milhões de toneladas produzidas ao ano, enquanto brita e cascalho superam a casa dos 200 milhões de toneladas, considerando os anos de 2015 a 2018.

Substância	2015	2016	2017 <sup>(p)</sup>	2018 <sup>(p)</sup>
Areia para Construção	349.087	312.044	294.000	n.d.
Brita e Cascalho	261.022	236.387	203.000	n.d.
Cal	n.d.	8.300	8.300	8.400
Cimento	64.874	57.630	53.703	53.458
Rochas Ornamentais	9.500	9.300	9.240	9.000

Figura 15 - Produção de materiais para construção civil (10<sup>3</sup>).  
Fonte: ANM (2019) – Sumário Mineral 2020

Os valores de produção anual de areia e brita demonstram quão grandiosa é a demanda deste produto, chegando próximo dos valores do minério de ferro (ver Tabela 2). Dados do boletim do setor mineral de 2022 mostram que a areia é uma das substâncias que mais demandam solicitações de direito minerário e alvará de pesquisa. A Figura 16 ilustra a forte demanda que existe para a areia, elemento essencial na composição das diversas matérias primas que compõem os materiais utilizados na construção civil. Vale ressaltar, também, a presença da argila neste ranking, elemento importante para alguns compostos, como tijolos, cerâmicas e tintas.



Figura 16 - Quantidade de requerimentos de pesquisa em 2022.  
Fonte: ANM (2022) – Sumário Mineral 2022

Dito isto, há a certeza de que a busca da mineração de ferro pelo aproveitamento de seus rejeitos é uma realidade necessária (devido aos diversos pontos positivos para a sociedade e meio ambiente) e factível do ponto de vista de demanda e similaridade entre os produtos usados, por exemplo, na indústria da construção civil.

A caracterização tecnológica e ensaios de alterabilidade das rochas para aplicação na construção civil envolvem uma variada gama de ensaios e testes com objetivo de se obter parâmetros químicos, físicos, mecânicos e petrográficos (Frasca & Frazão, 2002 apud Almeida *et al.* 2009). Esses procedimentos são normatizados pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

De acordo com Albuquerque (2012) apud Santos *et al.* (2019), os agregados miúdos são sedimentos clásticos inconsolidados, de grãos em geral quartzosos, que são utilizados para os seguintes fins:

- Argamassas, de assentamento e revestimento, misturadas com cimento, com cal ou com cal e cimento em granulometria fina ou muito fina;
- Concretos asfálticos, já que juntamente com o filler, tem importante propriedade de impedir o amolecimento do concreto nos pavimentos em dias de calor;
- Concreto de cimento; e
- Pavimentos rodoviários.

Para atender aos requisitos da indústria de construção civil, os agregados devem ser previamente submetidos a uma caracterização tecnológica, de forma a avaliar as suas principais propriedades físicas, mecânicas, petrográficas/mineralógicas, químicas, visando as suas diferentes aplicações: concreto hidráulico, lastro de ferrovia, pavimentos betuminosos, enrocamento, argamassa, meio filtrante, drenagem, controle de erosão etc. (Smith & Collis, 2001; Loemco, 2003 apud Luz *et al.* 2012).

As propriedades e o comportamento de muitos materiais (concreto, argamassa, cimento etc.) preparados com agregados, dependem da natureza da rocha (mineralogia, propriedades mecânicas e físicas), das condições de lavra e processamento (características geométricas e distribuição granulométrica) e das proporções que entra cada um dos agregados. A caracterização tecnológica dos agregados para determinar as suas propriedades

visando ao seu uso na construção civil, é de vital importância, visto que os ensaios de laboratório têm dupla finalidade – quantificar as propriedades físicas, mecânicas e químicas, de forma a orientar a dosagem correta do concreto e de outros materiais e antecipar seu comportamento futuro, quando em serviço (Tourenq & Denis, 2000; Loemco, 2003; Frazão, 2002; Frazão, 2007 apud Luz *et al.* 2012).

#### **4.5. Normas do mercado de construção civil**

Atualmente existem dezenas de normas que determinam as características dos materiais utilizados na construção civil. Normas que estabelecem quais testes são necessários realizar nestes materiais, o modo de realizar estes testes, além de outras exigências que também regulamentam este mercado.

No entanto, a literatura é escassa de estudos que correlacionam as características dos rejeitos gerados nas usinas e suas semelhanças com as matérias primas que são utilizadas como insumos na indústria de construção civil. Para compreender como o RMF pode ser incorporado nesse mercado é necessário, na maioria das vezes, realizar estudos práticos a fim de se conhecer o comportamento deste resíduo em sua aplicação desejada, uma vez que as especificidades de cada produto são muito relativas a todo o processo de formação, manuseio e tratamento que o bem mineral sofreu ao longo de sua utilização até se transformar em rejeito final.

A norma NBR 07225, fonte importante no presente estudo, conceitua de forma clara as classes granulométricas de alguns insumos da construção civil, a saber:

- Fíler: material constituído por pó de pedra ou outros materiais inertes, de dimensão inferior a 0,075mm;
- Agregado miúdo: material que se encontra entre as faixas granulométricas de 4,80mm a 0,075mm;
- Areia: material natural que se encontra entre as faixas granulométricas de 2,00mm e 0,075mm;
- Areia grossa: material natural que se encontra entre as faixas granulométricas de 2,00mm e 1,20mm;

- Areia média: material natural que se encontra entre as faixas granulométricas de 1,20mm e 0,42mm;
- Areia fina: material natural que se encontra entre as faixas granulométricas de 0,42mm e 0,075mm;
- Pedrisco médio: material de britamento que se encontra entre as faixas granulométricas de 2,00mm e 0,42mm;
- Pedrisco fino: material de britamento que se encontra entre as faixas granulométricas de 0,42mm e 0,075mm;
- Pó de pedra: material de britamento abaixo de 0,075mm;

As matérias-primas utilizadas na construção civil são diversas e cada uma possui especificações técnicas específicas que garantem a qualidade, a durabilidade e a segurança das construções. A seguir estão algumas das principais matérias-primas e suas especificações técnicas:

- Cimento: NBR 5732 - Cimento Portland Comum, NBR 16697 - Cimento Portland - Requisitos. Portland comum (CP I), Portland com adições (CP II), Portland de alto forno (CP III), Portland pozolânico (CP IV), Portland de alta resistência inicial (CP V). Especificações técnicas: Deve ter alta resistência à compressão, finura adequada, baixo calor de hidratação, tempo de pega, expansão, e teor de aglomerantes.
- Areia: NBR 7211 (Agregados para concreto - Especificação). Areia grossa, média e fina. Especificações técnicas: Deve ser limpa, isenta de materiais orgânicos e substâncias nocivas, e apresentar granulometria adequada para uso em concretos e argamassas.
- Brita (Agregado graúdo): NBR 7211 (Agregados para concreto - Especificação). Brita 0 (pó de pedra), brita 1, brita 2, brita 3, Pedrisco. Especificações técnicas: Deve ser constituída de fragmentos de rocha dura e densa, com granulometria específica para cada tipo de concreto, deve estar limpa e livre de impurezas.
- Concreto: NBR 6118 (Projeto de Estruturas de Concreto - Procedimento). Concreto simples, concreto armado, concreto protendido. Especificações técnicas: Deve ter composição adequada de cimento, água, areia e brita,

com proporções que garantam valores adequados de resistência a compressão, módulo de elasticidade, durabilidade, trabalhabilidade entre outros.

- Blocos de concreto: NBR 6136 (Blocos vazados de concreto simples para alvenaria - Requisitos). Especificações técnicas: Devem ter dimensões precisas, resistência adequada à compressão e baixa absorção de água.
- Tijolos cerâmicos: NBR 15270-1 (Componentes cerâmicos - Blocos e tijolos para alvenaria - Parte 1: Requisitos). Especificações técnicas: Devem ser fabricados com argila de qualidade, queimados a alta temperatura para garantir parâmetros adequados com resistência à compressão, absorção de água e durabilidade.
- Argamassa: NBR 13281 (Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Requisitos). Argamassas de assentamento, revestimento e reboco. Especificações técnicas: Deve ter boa trabalhabilidade, aderência e resistência mecânica. A composição varia conforme o uso (assentamento ou revestimento).
- Telhas cerâmicas: NBR 15310 (Telhas cerâmicas - Terminologia e requisitos gerais). Especificações técnicas: Devem ter resistência à flexão, boa impermeabilidade e baixa absorção de água.
- Argila: NBR 6502 (Rochas e Solos – Terminologia). Especificações técnicas: Granulometria abaixo de 0,002mm, deve ter boa coesão e plasticidade.

Conforme já citado durante este presente estudo, pode-se observar claramente que os rejeitos da mineração de ferro se enquadram, em sua maioria, nas especificações granulométricas aplicadas à indústria de construção civil, tendo em vista que eles se encontram em faixas abaixo de 2,00mm, que os condicionam como fíler, pedrisco, areia, pó de pedra e argila. Sendo assim, observada a similaridade granulométrica dos rejeitos e os agregados, têm-se a primeira correlação que suporta a busca pelo reaproveitamento de rejeitos oriundos do minério de ferro.

Para entender melhor as características necessárias para que os rejeitos se enquadrem como produtos da construção civil ou outro mercado, precisa-se conhecer as especificações técnicas destes mercados, seja em termos

granulométricos, químicos, visuais, estruturais etc. Pode-se destacar a granulometria, já citada anteriormente; a composição química, que interfere diretamente no comportamento estrutural do material; a coloração, que impacta diretamente em mercados voltados para o aspecto visual do produto também.

Vale ressaltar que, praticamente, todos os insumos utilizados no ramo da construção civil possuem em sua composição agregados graúdos, agregados miúdos, argila e outros materiais. Concreto, argamassa, tijolo, bloco, cerâmica e outros produtos se enquadram neste contexto, possuindo matérias primas em suas bases que se relacionam com as características que normalmente o rejeito de minério de ferro possui.

A Tabela 5 resume algumas das principais normas do mercado de construção civil, trazendo informações referentes à composição dos produtos e testes relacionados para a produção dos mesmos:

<b>Norma</b>	<b>Descrição</b>	<b>Composição</b>	<b>Testes associados</b>
NBR 7170	Tijolo maciço cerâmico para alvenaria	Argila, Areia, Silte, Água, Aditivos, Fundentes	Resistência à compressão mínima Medidas geométricas
NBR 7171	Bloco cerâmico para alvenaria	Argila, Areia, Silte, Água, Aditivos, Fundentes	Absorção de água Resistência à compressão Medidas geométricas
NBR 7211	Agregados para concreto - especificação	Cimento, Água, Areia, Brita, Aditivos	Limites máximos de expansão Ensaio específicos para agregados miúdos Ensaio específicos para agregados graúdos Medidas geométricas
NBR 15270-1	Parte 01: Blocos cerâmicos para alvenaria de vedação	Argila, Silte, Areia, Água, Aditivos	Massa seca Absorção de água Resistência à compressão Medidas geométricas
NBR 15270-2	Parte 02: Blocos cerâmicos para alvenaria estrutural	Argila, Silte, Areia, Água, Aditivos	Massa seca Absorção de água Resistência à compressão Medidas geométricas
NBR 16697	Cimento Portland - Requisitos	Calcário, Argila, Óxido de Ferro, Sílica, Materiais Pozolânicos, Gesso	Requisitos físicos e mecânicos Classe de resistência Requisitos de resistência a sulfatos Requisito de baixo calor de hidratação
NBR 13749	Revestimentos de paredes e tetos de argamassas inorgânicas - Especificação	Cimento, Areia, Água, Cal	Espessura definida Prumo, Nivelamento, Planeza Aderência

Tabela 5 - Resumo de normas - Materiais de construção civil  
Fonte: Autoria própria

Tendo em vista os pontos abordados neste capítulo, é aceitável interpretar que a utilização do rejeito de minério de ferro como matéria-prima na indústria de construção civil possui enorme potencial de aplicação, mas, também, exige grande conhecimento de suas características para entender a finalidade que o mesmo pode ser utilizado. As normas aqui exemplificadas são somente algumas em um universo com diversas outras. Elas servem como referência técnica, trazendo informações relacionadas aos testes necessários, especificações dos materiais entre outras.

Portanto, é importante conhecer quais são os insumos que alimentam o mercado de construção civil, conhecer as normas e exigências deste ramo, bem como estudar as características dos rejeitos, para que assim seja possível compreender o seu range de potencial utilização.

#### **4.6. Considerações gerais**

Diante de todo o exposto ao longo do presente estudo, das análises de diversos trabalhos envolvendo o reaproveitamento de rejeitos de minério de ferro, das interpretações de algumas normas do mercado de construção civil e de certa experiência pessoal adquirida ao longo de anos no ramo da mineração é possível enxergar uma relação crescente entre as indústrias da mineração e da construção civil, ainda que em fase embrionária, por uma série de fatores, como: a ausência de políticas públicas que gerenciem e legislem esta ascensão e integração entre estes mercados; a falta de estímulos e normas que obriguem as empresas a buscarem soluções mais definitivas para a geração de rejeitos e a utilização de grandes áreas para estocagem/empilhamento dos mesmos, que geram custos elevados para as empresas.

Algumas análises podem ser feitas a partir da pesquisa apresentada, a partir de considerações diretas dos autores dos trabalhos analisados e oriundas da análise, conhecimento e interpretação do autor deste estudo:

- Grande parte dos trabalhos demonstraram bom potencial de aplicação de rejeitos de minério de ferro sendo utilizados como matéria prima na construção civil, incluindo aplicações como geopolímeros;

- Com base nos trabalhos analisados, foi possível constatar a grande variabilidade físico-química destes resíduos, isto é, distribuição granulométrica e composição química variadas: d50 variando entre 0,54mm e 0,03mm; *top size* variando entre 2,36mm e 0,12mm; teor de ferro variando entre 56,0% e 7,40%. Tal constatação reforça a dificuldade do setor em normatizar e estabelecer padrões técnicos, uma vez que estas características estão relacionadas à natureza dos minerais e a forma de processamento.
- A grande variação mineralógica dos rejeitos impacta em parâmetros de qualidade avaliados pela indústria de construção civil em suas matérias-primas, como resistência à compressão, absorção de água, massa específica aparente, retração linear, perda ao fogo, variação diametral e até mesmo aspectos visuais.
- Os rejeitos podem ser utilizados tanto de forma total quanto parcial em relação à substituição da matéria-prima, sendo que esta quantidade está ligada aos resultados dos testes realizados e também aos requisitos técnicos específicos de cada aplicação.
- Com base nas normas analisadas, os rejeitos possuem a tendência de serem aplicados como agregados miúdos, devido às suas semelhanças granulométricas, a saber: fíler, areia, pedrisco, pó de pedra, argila. Estes insumos são a base de diversos produtos da construção civil, como concreto, cimento, argamassa, pavimentos, bases e sub-bases, tijolo, telhas, cerâmicas etc.
- O mercado de matérias-primas para a construção movimenta milhões de toneladas anualmente no Brasil, portanto, é importante que políticas públicas sejam criadas para normatizar a aplicação de rejeito de minério de ferro sem que ocorram concorrências desleais com os atuais fornecedores destes insumos e não gerem monopólios causando desordem e conflitos neste mercado;
- É perceptível que as usinas atuais possuem dificuldades em gerar rejeitos com qualidade para aplicações diretas nestes mercados. É importante que novos projetos sejam conceituados já pensando em geração de produtos nos rejeitos.;

- A disposição de rejeitos em pilhas e barragens geram custos elevados para as empresas, custos com licenciamentos ambientais, compensações de grandes áreas, gastos com equipamentos, diesel entre outros. É importante fazer uma avaliação profunda em novos projetos já pensando em trocar estes custos de CAPEX investindo em tecnologias que tratam estes rejeitos e geram produtos que, por consequência, geram receitas;
- A geometurgia pode ser um grande aliado no desenvolvimento de estudos das características dos rejeitos. A criação de banco de dados correlacionando os resultados dos testes especificados nas normas e as características físicas, químicas, geológicas, mineralógicas dos rejeitos é o primeiro passo para que as empresas do setor mineral comecem a ter maior domínio sobre as aplicações dos rejeitos de uma forma mais comercial, conhecendo as possibilidades de utilização de acordo com suas características.
- Observando os grandes volumes de matérias-primas de construção civil que são comercializados anualmente, oriundas de recursos finitos (bem minerais), e a demanda por estes insumos que tende a aumentar devido à expansão da sociedade ano após ano, é de grande relevância pensar em reaproveitar rejeito e conseqüentemente, pensar no futuro de todos.

#### **4.7. Desafios do setor**

A Figura 17 busca resumir de forma bastante objetiva toda a cadeia produtiva analisada: desde a lavra do recurso mineral até a geração de rejeito final nas usinas de beneficiamento de minérios e, conseqüentemente, suas possíveis destinações. Além disto, são destacados os grandes problemas que o empilhamento de rejeitos ou o uso de barragens trazem na dinâmica operacional deste setor. Por fim, pode-se observar alguns dos muitos desafios que as empresas enfrentam para reinserir os rejeitos do minério de ferro em mercados alternativos.

Dito isto, é possível conectar as informações dispostas no diagrama abaixo com o contexto de todo o trabalho aqui desenvolvido, mostrando o ponto onde a

problemática surge: grande geração de rejeitos na indústria da mineração de ferro e ainda, o pouco aproveitamento dos mesmos.

A partir da etapa de lavra em uma mina, há a extração do material que irá alimentar a usina de tratamentos de minérios, o minério propriamente dito, e do estéril, que pode ser um material de descarte por não possuir valor agregado (estéril franco) ou um material que possui baixo teor do elemento de interesse e será estocado para um possível reaproveitamento futuro (estéril mineralizado). Vale ressaltar que o estéril franco é, normalmente, empilhado nas pilhas de estéril.

Após alimentar o minério na usina ocorre a geração de dois materiais diferentes: o produto, com teor elevado do elemento de interesse e o rejeito, que possui ou deve possuir baixo teor do elemento de interesse. É nesta etapa que surge o foco do presente estudo. O rejeito é de maneira geral um material que gera custos para as empresas devido a necessidade de grandes áreas para sua estocagem e de movimentações intensas com equipamentos (elevados custos operacionais). Além de outros impactos negativos, como o impacto visual no entorno de onde ele é destinado.

Portanto, é de extrema importância que as empresas busquem minimizar esta geração, buscando aumentar as recuperações mássicas e metalúrgicas dentro das usinas e buscando adequar os rejeitos que de fato serão gerados de acordo as características que as normas especificam, para os casos de suas aplicações no ramo da construção civil, por exemplo. Diversas destas normas e especificações podem ser vistas neste trabalho, o que auxilia no entendimento deste cenário.

Vale salientar que não é uma tarefa simples produzir toda a massa de rejeito dentro de uma determinada especificação, uma vez que as variáveis que influenciam em suas características são diversas e nem sempre totalmente controladas, a saber: grande variabilidade mineralógica, que influencia nos teores, na granulometria, na estrutura física etc.; a falta de normatização, que dificulta no direcionamento de quais especificações buscar, sendo necessário recorrer à legislações de outros setores como o da construção civil; os novos projetos, que normalmente possuem o foco voltado para o produto deixando a qualidade do rejeito em um plano secundário, não contemplando, na maioria dos casos, equipamentos voltados para o tratamento do rejeito final de forma

satisfatória (em geral teor de Fe em torno de 10% e granulometria dentro das faixas dos produtos já citados neste trabalho da construção civil).

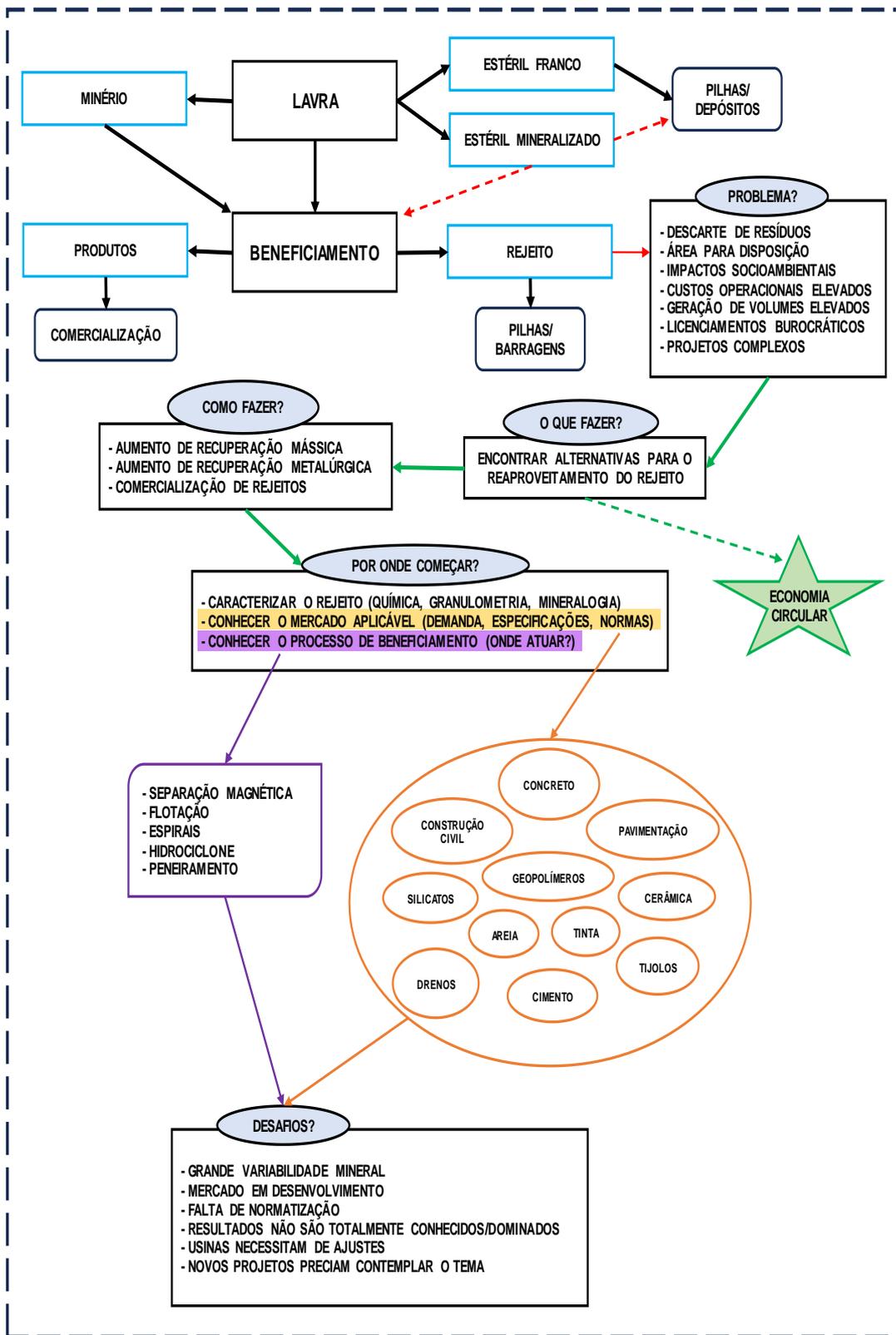


Figura 17 - Processo produtivo genérico do minério de Ferro  
 Fonte: Autoria própria

Portanto, para o avanço sustentável da mineração no Brasil e no mundo alguns requisitos se mostram essenciais: conhecer as normas e especificações

que os mercados alternativos exigem em relação às suas matérias-primas, dominar a técnica de beneficiamento de minérios, buscando o maior aproveitamento possível do recurso mineral e buscar incessantemente a redução dos impactos socioambientais no nosso planeta.

Mineração é essencial para a vida humana, mas não é qualquer mineração. Essencial é a mineração sustentável, preocupada com o amanhã, com os animais, com a natureza, com a boa convivência com a sociedade.

## 5. Conclusão

Sintetizando os pontos abordados na presente pesquisa bibliográfica, conclui-se que existe uma forte interação entre a mineração e o mercado de construção civil.

É sabido que os rejeitos oriundos da indústria de minério de ferro possuem vasta aplicação na construção civil, desde que atenda aos critérios exigidos pelas normas, que depende da aplicação desejada. É sabido, também, que a normatização entre estes setores é algo que ainda carece de avanços, mas principalmente carece de leis que exijam que a busca pelo reaproveitamento dos rejeitos seja algo trivial, assim como a geração de produtos de elevado valor agregado.

É importante que os projetos de mineração tenham esta mentalidade no seu nascimento, onde barragens e pilhas não sejam o fim da linha produtiva e, assim, sejam incorporados nas usinas de tratamentos de minérios operações subsequentes que visem a obtenção de produtos provenientes dos rejeitos.

## **6. Sugestões para trabalhos futuros**

- Realizar testes com rejeitos de minério de ferro utilizando os equipamentos citados neste trabalho, buscando aumentar a recuperação de minerais-minério ainda presentes;
- Desenvolver pesquisa bibliográfica que busque correlacionar as características do rejeito de minério de ferro com resultados de testes de ensaios mecânicos solicitados nas normas, a fim de estabelecer uma tendência de comportamento dos mesmos, quando usados em substituição de outras matérias primas;
- Expandir a pesquisa bibliográfica para o contexto internacional.

## Referências

Allmineral. <https://www.kuttner.com.br/allflux.pdf> , acesso 14/09/2024.

Alves, M. O (2018). **Estudo da viabilidade de concentração de itabirito semi-compacto por flotação catiônica reversa**. Monografia (Graduação). Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.

**Anselmo**

**Santana.**

<https://www.anselmosantana.com.br/2020/01/05/elementos-filtrantes-ajudam-a-eliminar-a-utilizacao-de-barragens-de-rejeito-em-mineracoes/>, acesso em 12/10/2024.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 13281**. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Requisitos. Rio de Janeiro, 2005.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 13749**. Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas — Especificação. Rio de Janeiro, 2013.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15270-1**. Componentes cerâmicos Parte 1: Blocos cerâmicos para alvenaria de vedação — Terminologia e requisitos. Rio de Janeiro, 2005.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15270-2**. Componentes cerâmicos Parte 2: Blocos cerâmicos para alvenaria estrutural – Terminologia e requisitos. Rio de Janeiro, 2005.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15310**. Componentes cerâmicos — Telhas — Terminologia, requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2005.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 16697**. Cimento Portland – requisitos. Rio de Janeiro, 2018.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 5732**. Cimento Portland comum: especificação. Rio de Janeiro, 1991.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6118**. Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2003.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6136**. Blocos vazados de concreto simples para alvenaria — Requisitos. Rio de Janeiro, 2016.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6502**. Rochas e solos: terminologia. Rio de Janeiro, 1995.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 7170**. Tijolo maciço cerâmico para alvenaria: especificação. Rio de Janeiro, 1983.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 7171**. Bloco cerâmico para alvenaria: especificação. Rio de Janeiro, 1992.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 7211**. Agregados para concreto - especificação. Rio de Janeiro, 2005.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 7225**. Materiais de pedra e agregados naturais: terminologia. Rio de Janeiro, 1993.

Barbosa, P. C (2017). **Aproveitamento de rejeito da concentração de minério de ferro na produção de cerâmica vermelha**. Monografia (Graduação). Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.

Bessa, S. A. L.; Miranda, M. A.; Arruda, E. A. M.; Bezerra, A. C. S.; Sacht, H. M. (2021). **Produção e avaliação de microconcretos com rejeito de minério de ferro para a fabricação de componentes construtivos**. Revista Matéria, v.27, nº 02, 2022.

Borges, A. A.; da Luz, J. A. M.; Ferreira, E. E. (2008). **Caracterização da parcela magnética de minério fosfático de carbonatito**. (2008). REM: Revista Escola de Minas, Ouro Preto.

Carvalho, A. R. (2023). **Proposição de geopolímeros obtidos por meio da ativação ácida do rejeito de barragem de minério de ferro com uso de ácido fosfórico**. Escola de Minas, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, PROPEC, Ouro Preto.

Chave, A. P.; Filho, L. S. L.; Braga, P. F. A. Em: Luz, A. B.; Sampaio, J. A.; França, S. C. A. **Tratamento de Minérios – 5ª Edição**. Capítulo: Flotação. Rio de Janeiro, 2010.

Coelho, E. F. F. **Estudo do comportamento mecânico de rejeitos de minério de ferro reforçados com fibras sintéticas**. Dissertação de mestrado da UFOP. Ouro Preto, 2008.

Costa, A. O.; Bernardo, D. C.; Lemos, D. A. Q.; Silva, N. S. **O uso de rejeitos de minério de ferro como matéria-prima alternativa na produção de tijolos de cimento**. Altus Ciência. Revista acadêmica multidisciplinar da faculdade cidade de João Pinheiro 2023.

Da Silva, A. P.; Viana, J.; Cavalcante, A. (2012). Diagnóstico dos **Resíduos Sólidos da atividade de mineração de substâncias não energéticas**. Relatório de Pesquisa, Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. Brasília, 2012.

Da Silva, F. L. (2014). **Aproveitamento de reciclagem de resíduos de concentração de minério de ferro na produção de pavers e cerâmica**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.

Da Silva, R. G. O. (2010). **Estudo laboratorial do desempenho mecânico de misturas asfálticas com resíduos industriais de minério de ferro**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.

Da Silva, R. M. R.; Nunes, R. M.; Nogueira, F. C.; Da Silva, F. L. (2021). **Aproveitamento do rejeito de minério de ferro da mina do Andrade para a confecção de blocos intertravados**. ABM, Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração, 2023.

Dantas, A. A. N. (2015). **Caracterização de resíduos oriundos do beneficiamento do minério de ferro para uso em pavimentação**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.

Dauce, P. D.; Rocha, G. M.; Lima, M. M. F.; Lima, R. M. F. **Concentração de rejeito de circuito de jigagem de minério de ferro por espiral de Humphreys**. XXVIII Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa. Belo Horizonte, 2019.

Dos Santos, B. M.; Tosta, M. C. R.; Rodrigues, F. N. **Formas de reaproveitamento de resíduos provenientes da mineração, com foco em construção civil**. XXXIX Encontro Nacional de Engenharia de Produção. Enegep, Santos, 2019.

Dos Santos, J. R.; Meneguelli, M. R. S.; Sartório, E. A. **Estudo da viabilidade técnica da utilização do rejeito de minério de ferro na camada de sub-base de pavimentação rodoviária**. Curso da Pós-Graduação lato sensu em Engenharia de Infraestrutura Urbana do Ifes, 2021.

Eriez. <https://www.eriez.com/NA/EN/Flotation/CrossFlow-Classifier.htm>, acesso 14/09/2024.

Figueiredo, R. A. M. **Rejeitos de minério de ferro na produção de geopolímeros *one-part*: utilização como filler e na produção de silicato de sódio alternativo**. Tese de doutorado, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2021.

FLSmidth. <https://www.flsmidth.com/en-gb/products/mixedrow-flotation-cell>, acesso em 12/10/2024.

FLSmidth. <https://www.flsmidth.com/en-gb/products/reflux-concentrating-classifier>, acesso 14/09/2024.

Frasca, M. H. B. e Frazão, E. B. (2002) em Almeida, S. L. M.; Luz, A. B. **Manual de agregados para a construção civil**. Centro de Tecnologia Mineral – CETEM, Ministério da Ciência e Tecnologia – MCT. Rio de Janeiro, 2009.

**Gaustec.** <https://gaustec.com/produtos/separador-magnetico-gaustec-gx-600/>, acesso em 12/10/2024.

Junior, W. R. P.; Oliveira, C. A. S. **Avaliação da utilização do rejeito de minério de ferro na formulação de argamassas.** Research, Society and Development, v. 11, n. 4. 2022.

Lins, F. F.; Adamian, R. **Minerais coloidais, teoria DLVO estendida e forças estruturais.** Série Tecnologia Mineral, CETEM. Rio de Janeiro, 2020.

Liu, Q.; Friedlaender, J. F. **Fine particle processing by magnetic carrier methods.** School of electrical engineering. West Lafayette, U.S.A. 1993.

Luz, A. B.; Sampaio, J. A.; França, S. C. A. **Tratamento de Minérios – 5ª Edição/Ed.** Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010.

Massi, L.; de Souza, S. R.; Laluce, C.; Junior, M. J. **Fundamentos e aplicação da flotação como técnica de separação de misturas.** Conceitos Científicos em Destaque. Química Nova Escola, nº 28. Maio, 2008.

**Metso.** <https://www.metso.com/globalassets/portfolio/brochure-SLon-EN/>, acesso 14/09/2024.

**Nova93FM.** <https://nova93fm.com.br/vale-lanca-programa-de-infraestrutura-viaria-com-doacao-de-areia-proveniente-da-mineracao-de-ferro/>, acesso em 12/10/2024.

Pedroso, D. **Aproveitamento do rejeito de minério de ferro (RMF) em materiais de construção civil.** XII Simpósio de Práticas de Engenharia Geotécnica da Região Sul – GEOSUL, 2019. ABMS, Joinville.

Pedroso, D. E. **Aproveitamento do rejeito de minério de ferro em compósitos para construção civil.** Tese de Doutorado, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2020.

Pinto, T. C.; Silva, L. F.; Morales, C. R.; Francisco, F. G. O.; Gonçalves, J. L. N.; Galéry, R. **Uso do rejeito de minério de ferro como agregado no**

**desenvolvimento de um cimento sustentável.** XXVIII Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa. Belo Horizonte, 2019.

Rocha, R. B.; Ribeiro, J. P.; Ribeiro, C. H. **4 soluções para separação magnética de alta intensidade (WHIMS): recuperação de rejeitos e finos.** 20º Simpósio de Mineração, ABM Week. São Paulo, 2019.

Said, A. B.; Frances, F.; Grandjean A.; Latrille, C.; Faure, S. **Study of a foam flotation process assisted by cationic surfactant for the separation of soil clay particles: processing parameters and scaling-up sensitivity.** Chemical Engineering and Processing - Process Intensification, 2019.

Santos, B. C. **Avaliação da eficiência da deslamagem de minério de ferro via decantação e hidrociclonagem.** Monografia (Graduação), Curso de Engenharia de Minas, CEFET/MG. Araxá, 2018.

Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação mineral. **Boletim do setor mineral 2022.** Ministério de Minas e Energia. Brasília, 2022.

Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação mineral. **Boletim do setor mineral 2020 (julho).** Ministério de Minas e Energia. Brasília, 2020.

Severo, C. B. **Aproveitamento de rejeito de minério de ferro para fabricação de tijolos cerâmicos.** Monografia (Graduação), Curso de Engenharia de Minas, CEFET/MG. Araxá, 2019.

Silva, J. P. M. **Aplicação de separação magnética de alta intensidade (WHIMS) no beneficiamento de itabiritos pobres.** Dissertação de mestrado na UFMG. Belo Horizonte, 2014.

Soares, A. A.; Silva, K. C.; Silva, M. B.; Silva, B. B.; Hoffman, F.; Ribeiro, C. H. T. **Aplicação de matriz estendida para aumento na recuperação de rejeito e lamas de minérios de ferro.** 23º Seminário de Mineração, ABM Week. São Paulo, 2024.

Soares, L. **Barragem de Rejeitos, CETEM**. Comunicação Técnica elaborada para o Livro Tratamento de Minérios, 5ª Edição – Capítulo 19 – pág. 831–896. Rio de Janeiro, 2010, p.831.

Torquato, N. C.; da Silva, W. P.; Ferreira, M. T. S. **Métodos Alternativos para disposição de rejeitos**. 20º Simpósio de Mineração, ABM Week 2019. São Paulo, 2019.

Wolff, A. P. **Caracterização de rejeitos de minério de ferro de minas da Vale**. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2009.