

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Escola de Engenharia Curso de Especialização: Produção
e Gestão do Ambiente Construído

Abner Araujo Fajardo

LEVANTAMENTO DAS CARACTERÍSTICAS E
FORMAS DE REAPROVEITAMENTO DE RESÍDUOS
DE MINÉRIO DE FERRO NA CONSTRUÇÃO CIVIL

Belo Horizonte
2020

ABNER ARAUJO FAJARDO

**LEVANTAMENTO DAS CARACTERÍSTICAS E
FORMAS DE REAPROVEITAMENTO DE RESÍDUOS
MINÉRIO DE FERRO NA CONSTRUÇÃO CIVIL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Especialização: Produção e Gestão do Ambiente Construído do Departamento de Engenharia de Materiais e Construção, da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de Especialista.

Orientador(a): White José dos Santos

**Belo Horizonte,
2020.**

F175l Fajardo, Abner Araujo.
Levantamento das características e formas de reaproveitamento de resíduos de minério de ferro na construção civil [recurso eletrônico] / Abner Araujo Fajardo. – 2020.
1 recurso online (53 f. : il., color.) : pdf.
Orientador: White José dos Santos.
“Monografia apresentada ao Curso de Especialização em Produção e Gestão do Ambiente Construído da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais” .
Inclui bibliografia.
Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.
1. Construção civil. 2. Materiais de construção. 3. Resíduos.
4. Minérios de ferro - Reaproveitamento. I. Santos, White José dos.
II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia.
III. Título.

CDU: 691

ATA DE DEFESA DE MONOGRAFIA

ALUNO: ABNER ARAÚJO FAJARDO

MATRÍCULA: 2018717841

RESULTADO

Aos 13 dias do mês de novembro de 2020 realizou-se a defesa da MONOGRAFIA de autoria do aluno acima mencionado sob o título:

“LEVANTAMENTO DAS CARACTERÍSTICAS E FORMAS DE REAPROVEITAMENTO RESÍDUOS DE MINÉRIO DE FERRO NA CONSTRUÇÃO CIVIL”

Após análise, concluiu-se pela alternativa assinalada abaixo:

APROVADO

APROVADO COM CORREÇÕES

REPROVADO

NOTA: 95

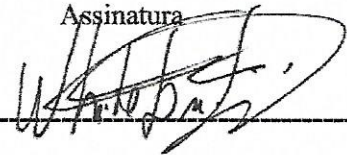
CONCEITO: A

BANCA EXAMINADORA:

Nome

Prof. Dr. White José dos Santos

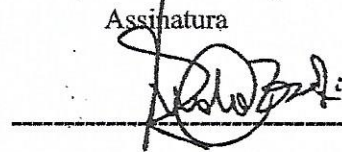
Assinatura



Nome

Prof. Dr. Fernando do Couto Rosa Almeida

Assinatura



O candidato faz jus ao grau de "ESPECIALISTA NA ÁREA DE "SUSTENTABILIDADE E GESTÃO DO AMBIENTE CONSTRUÍDO"

Belo Horizonte, 13 de novembro de 2020

Coordenador do Curso

Prof. Antonio Neves
de Carvalho Júnior

Coordenador do Curso

DEDICATÓRIA

Dedico a Deus primeiramente, o grande Criador do Universo, por me dar forças e sabedoria, para conseguir elaborar essa monografia. Devido às turbulências, como: a crise econômica que assola o mundo, pandemia e em meio a essas crises, ter me sustentado e me dar a oportunidade de estudar e adquirir novos aprendizados. Agradeço aos meus pais que sempre estiveram presentes, me apoiando e incentivando a estudar para adquirir novos conhecimentos, para que a cada dia eu torne uma pessoa melhor. Agradeço aos meus irmãos por sempre me apoiarem e também estarem presentes durante a minha vida. Agradeço aos meus amigos que me incentivaram a buscar por novos conhecimentos e para contribuir com a sociedade. Agradeço aos meus tios e tias que sempre me apoiaram nos estudos e também na carreira profissional. Agradeço a minha avó por sempre me incentivar a ser um engenheiro. “Se o SENHOR não edificar a casa, em vão trabalham os que a edificam”.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Dr White, por ser um brilhante professor e uma excelente pessoa. Por ser um professor humilde, que busca sempre orientar, informar os alunos da melhor forma possível. Sempre busca compartilhar os seus conhecimentos com os alunos, está sempre buscando ajudá-los. Pode-se observar que é um docente comprometido e muito responsável, sempre pontual e atencioso durante as reuniões e em suas aulas. Sempre buscando novos métodos e por meios dinâmicos para lecionar na sala de aula.

Gostaria de agradecer também a mestranda Bruna, por me ajudar e me mostrar como ser um aluno cientista e pesquisador. Dar conselhos e orientações sobre como ser um bom aluno acadêmico e também em me tornar uma pessoa melhor. Aprendendo a ser mais crítico na sociedade.

RESUMO

O Brasil é um dos maiores produtores de minério de ferro, tendo como consequência grande produção de rejeitos. Esses rejeitos são depositados em barragens ou estocados por empilhamento, contudo em ambos os casos são prejudiciais ao meio ambiente. Os rejeitos prejudicam os solos, lençóis freáticos, rios, ar e no caso mais grave, quando ocorre o rompimento de barragens, como foram os casos de Mariana e Brumadinho, matando centenas de pessoas. Diversos estudos tem sido elaborados para introduzir os rejeitos de minérios de ferro em materiais da construção civil, para poderem reduzir os impactos negativos ambientais. Portanto, o presente trabalho tem como objetivo realizar um levantamento bibliográfico referente as características e formas de reaproveitamento de resíduos de minérios de ferro na construção civil. Pode-se observar que existem diversos tipos e beneficiamentos, e que podem contribuir para que as características dos rejeitos de minério de ferro sejam tão distintas. A caracterização do rejeito de minério de ferro é bem diversificada, mostrando que o rejeito tem propriedades bem diferentes para cada autor analisado. Os principais materiais da construção civil analisados, foram: pavimentos; tintas, compostos cerâmicos, cimentos álcali-ativados e compósitos cimentícios. Pode observar-se que ao incorporar o rejeito de minério de ferro nesses materiais, apresentaram vantagens, melhorando algumas propriedades, como: resistência mecânica, trabalhabilidade, durabilidade e dentre outras. Contudo algumas propriedades e usos ainda necessitam de um maior aprofundamento e explorando outras propriedades e novos contextos.

Palavras-chaves: resíduo de minério de ferro, materiais da construção civil, caracterização do minério de ferro;

ABSTRACT

Brazil is one of the largest producers of iron ore, resulting in a large production of tailings. These tailings are deposited in dams or stored by stacking, but in both cases they are harmful to the environment. The tailings damage the soils, groundwater, rivers, and no more serious cases, when dams rupture, as were the cases of Mariana and Brumadinho, killing the statistics of people. Several studies have been carried out to modify iron ore tailings in construction materials, to reduce the environmental impact. Therefore, the present work aims to carry out a bibliographic survey regarding resources and ways of reusing iron ore residues in civil construction. You can see that there are several types and benefits, and that can contribute to iron ore tailings resources being so different. A characterization of rejection of iron ore is very diversified, shown or rejected has very different characteristics for each author analyzed. The main civil construction materials analyzed were: pavements; paints, ceramic compounds, alkali-activated cement and cementitious composites. It can be seen that when incorporating or rejecting iron ore from these materials, the advantages, better some characteristics, such as: mechanical resistance, workability, wear and other things. However, some properties and uses are still one of the biggest developments and explore other properties and new contexts.

Keywords: iron ore tailings, building materials, iron ore characterization

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 - Organograma dos principais pontos sobre o RMF para a elaboração deste trabalho.....	4
Figura 4.1 - Fluxograma do beneficiamento do minério de ferro.	6
Figura 4.2 - Barragem de rejeitos, Brumadinho antes do rompimento	8
Figura 4.3 - Estocagem de rejeitos a seco	8
Figura 4.4 - Rejeito de minério de ferro – Granulado (50mm – 6,3mm)	9
Figura 4.5 - Pilhas de Rejeito de minério de ferro – (a) Sinter Feed e (b) pilhas de pelotas de minério de ferro - Pellet Feed	10
Figura 4.6 - Concentração de Fe_2O_3 e SiO_2 . por autor	12
Figura 4.7 - Concentração de Fe_2O_3 e SiO_2 . por autor	14
Figura 4.8 - Composição mineralógica do RMF	15
Figura 4.9 - Composição mineralógica do RMF - Não magnético WHIMS	16
Figura 4.10 - Densidade do RMF de diversos autores	17
Figura 4.11 – Poros e partículas inertes embutidas no geopolímero (a) e poros e partículas inertes (b).....	19
Figura 5.1 - Paviers com rejeito de minério de ferro.....	23
Figura 5.2 - Tons de pintura ecoeficientes produzidas pelo RMF.....	27
Figura 5.3 - MEV do geopolímero com 20% de RMF	32
Figura 5.4 - Tijolos produzidos com RMF, argilas amarelas e cinzas, antes da queima	36

LISTA DE QUADROS

Quadro 4.1 - Pilhas de Pelotas de minério de ferro - Pellet Feed.....	10
--	-----------

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 - Composição química do RMF de beneficiamentos diferentes	11
Tabela 4.2 - Composição química do RMF de diversos autores.....	13
Tabela 4.3 - Composição Mineralógica do RMF por autor e beneficiamento	15
Tabela 4.4 - Diversidade da densidade do RMF de diversos autores.....	16
Tabela 4.5 - Diversidade da granulometria do RMF de diversos autores	18
Tabela 5.1 - Levantamento sobre RMF em pavimentos	20
Tabela 5.2 – Principais resultados sobre RMF em pavimentos	24
Tabela 5.3 - Levantamento sobre RMF em aplicação em tintas.....	25
Tabela 5.4 - Principais resultados sobre RMF em aplicação em tintas.....	27
Tabela 5.5 - Levantamento sobre RMF em aplicação em cimentos álcalis-ativados	28
Tabela 5.6 - Principais resultados sobre RMF em aplicação em cimentos álcalis- ativados.....	33
Tabela 5.7 - Levantamento sobre RMF em aplicação em materiais cerâmicos.....	33
Tabela 5.8 – Principais resultados sobre RMF em aplicação em materiais cerâmicos	36
Tabela 5.9 - Levantamento sobre RMF em aplicação em compósitos cimentícios...37	
Tabela 5.10 - Principais resultados sobre RMF em aplicação em compósitos cimentícios	43

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

DRX - Difração de raio-x

LIMS - Separador magnético de baixa intensidade

LWT - Teste de adesão de areia

MEV - Microscópio eletrônico de varredura

PVA – Acetato de polivinil

RMF- Rejeito de Minério de Ferro

SNIC - Sindicato Nacional da Indústria do Cimento

USGS - Pesquisa Geológica dos Estados Unidos

WHIMS - Separador magnético de alta intensidade

WTAT - Teste de abrasão úmida

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVO	2
2.1 OBJETIVO GERAL	2
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	2
3. METODOLOGIA	3
4. RESÍDUO DE MINÉRIO DE FERRO	5
4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	5
4.2 BENEFICIAMENTO E DISPOSIÇÃO DO RESÍDUO DE MINÉRIO DE FERRO	6
4.3 CARACTERIZAÇÃO DO RESÍDUO DE MINÉRIO DE FERRO	10
4.3.1 Composição química do RMF	10
4.3.2 Mineralogia do RMF	14
4.3.3 Densidade do RMF	16
4.3.4 Granulometria do RMF	17
4.3.5 MEV do rejeito de minério de ferro	18
4.3.6 Dureza do RMF	19
5. UTILIZAÇÃO DO RMF EM MATERIAIS DA CONSTRUÇÃO CIVIL	20
5.1 UTILIZAÇÃO DO RESÍDUO DE MINÉRIO DE FERRO EM PAVIMENTOS	20
5.2 UTILIZAÇÃO DO RESÍDUO DE MINÉRIO DE FERRO EM TINTAS	24
5.3 UTILIZAÇÃO DO RESÍDUO DE MINÉRIO DE FERRO EM CIMENTOS ÁLCALIS-ATIVADOS	28
5.4 UTILIZAÇÃO DO RESÍDUO DE MINÉRIO DE FERRO EM MATERIAIS CERÂMICOS	33
5.5 UTILIZAÇÃO DO RESÍDUO DE MINÉRIO DE FERRO EM COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS	37
6. POTENCIAIS ESTUDOS	44
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS	46
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	47

1 INTRODUÇÃO

O Brasil é o segundo maior produtor de minério de ferro do mundo, sendo 490 milhões de toneladas no ano de 2018 e 480 milhões de toneladas no ano de 2019 (USGS, 2020; USGS, 2019). O resíduo de minério de ferro (RMF) é gerado na extração de minério em grande quantidade no mundo (2.500 bilhões de toneladas) em diversos países, principalmente: Austrália, Brasil, China (USGS, 2020). No Brasil, sua geração é de aproximadamente 278 milhões de toneladas, representando 68% do total de exportações de todos os minerais (IBRAM,2019). O RMF representa um valor bem superior à produção de cimento no Brasil por ano e também por ser o segundo maior produtor do mundo, gera uma grande importância para a economia brasileira (USGS, 2020; IBRAM,2019). Contudo também gera um grande impacto ambiental e social, devido à grande quantidade de rejeitos que são gerados durante o processo de extração do minério de ferro. Toneladas de rejeitos são depositados em barragens, são empilhadas, causando assim impactos ambientais e sociais apenas para disposição. Quando ocorre algo mais grave, como no caso do rompimento das barragens de Mariana e Brumadinho (CANCIO *et al.*, 2018).

Busca-se ao avaliar a adição do rejeito de minério de ferro em materiais da construção civil reduzir o impacto que possa causar no meio ambiente. O resíduo de minério de ferro tem sido estudado para ser utilizado em diversos materiais na construção civil. Aplicações como: utilização em asfalto ou pavers para asfalto (APAZA *et al.*, 2018; BASTOS, 2013; SANT'ANA FILHO, 2013), substituição da areia, compósitos cimentícios (ALMADA *et al.*, 2019; SILVA, 2014a; ZHAO, 2014). Os últimos estudos buscam alternativas para substituir parcialmente ou completamente, o cimento convencional por algum tipo de resíduo de minério de ferro (CANCIO *et al.*, 2018; BEZERRA, 2017). Essas substituições continuam sendo estudadas para saber como alteram as suas propriedades, sendo utilizadas para a fabricação de concretos, argamassas ou etc. Com a adição ou substituição dos resíduos de minério de ferro podem favorecer a sociedade, ambientalmente, pois o cimento emite uma grande quantidade de CO₂ (ANDRADE, 2019; SUPINO *et al.*,2016; BORGES, 2014).

2 OBJETIVO

Este capítulo apresenta o objetivo geral e os objetivos específicos deste trabalho

2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral é realizar um levantamento bibliográfico acerca das características e formas de reaproveitamento de resíduo de minério de ferro na construção civil.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para alcançar o objetivo geral, segue os seguintes objetivos específicos a serem cumpridos:

- Levantar as principais características (físicas, químicas e mineralógicas) dos resíduos de mineração de ferro;
- Identificar o atual estado da arte a respeito dos principais usos dos resíduos na construção civil;
- Pontuar questões a serem aprofundadas e possíveis estudos promissores.

3 METODOLOGIA

Buscou-se neste trabalho: conhecer o rejeito de minério de ferro; seus processos de beneficiamentos; suas propriedades e características; identificar os tipos de resíduos que têm sido inseridos como materiais de construção. Buscou-se também entender como é o comportamento dos materiais que foram adicionados os RMF.

Para a realização deste trabalho, foi feita uma revisão bibliográfica, na qual foi baseada em levantamentos de estudos técnico-científicos nacionais e internacionais como: artigos, monografias, teses e dissertações a respeito de resíduos de minério de ferro e as principais aplicações em construção civil. As principais fontes a serem consultadas foram os portais: CAPES, SCIELO, Science Direct, e Google Acadêmico. As principais palavras chaves utilizadas nestes portais foram: resíduo de minério de ferro; *iron ore tailings*; materiais da construção civil; beneficiamento de minério de ferro; composição química; composição mineralógica; pavimentos; tintas; cimentos álcali-ativados; cerâmica e compósitos cimentícios.

Os dados foram organizados depois de uma pesquisa preliminar em teses e dissertações nacionais. Depois organizou, pensando de acordo com a logística de todo o processo do rejeito de minério de ferro. Desde o ponto inicial, a extração do minério de ferro na natureza, os tipos beneficiamento utilizados, as caracterizações do rejeito e por último a aplicação nos materiais da construção civil. Depois de ter levantado alguns estudos preliminares, começou a pesquisar em artigos nacionais e internacionais sobre materiais da construção civil em que o rejeito de minério de ferro era incorporado. Os materiais encontrados foram: pavimentos; tintas; compostos cerâmicos; cimento álcali-ativados e compósitos cimentícios.

No tópico de utilização do RMF em materiais da construção civil, separou por cada material e se levantou o máximo de estudos possíveis. Analisou o que cada autor estudou sobre o rejeito de minério de ferro, para poder pesquisar quais os assuntos não foram pesquisados, quais não foram consolidados e quais os estudos promissores. Foram identificados os principais assuntos que precisam ser aprofundados e possíveis estudos promissores, para poder depois realizar uma linha de pesquisa sobre a aplicação de rejeito de minério de ferro na construção civil.

Criou-se um organograma com os principais pontos levantados para a elaboração deste trabalho, sendo possível visualizar na Figura 3.1, o organograma.

Figura 3.1 - Organograma dos principais pontos sobre o RMF para a elaboração deste trabalho



Fonte: O Autor

4 RESÍDUO DE MINÉRIO DE FERRO

4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

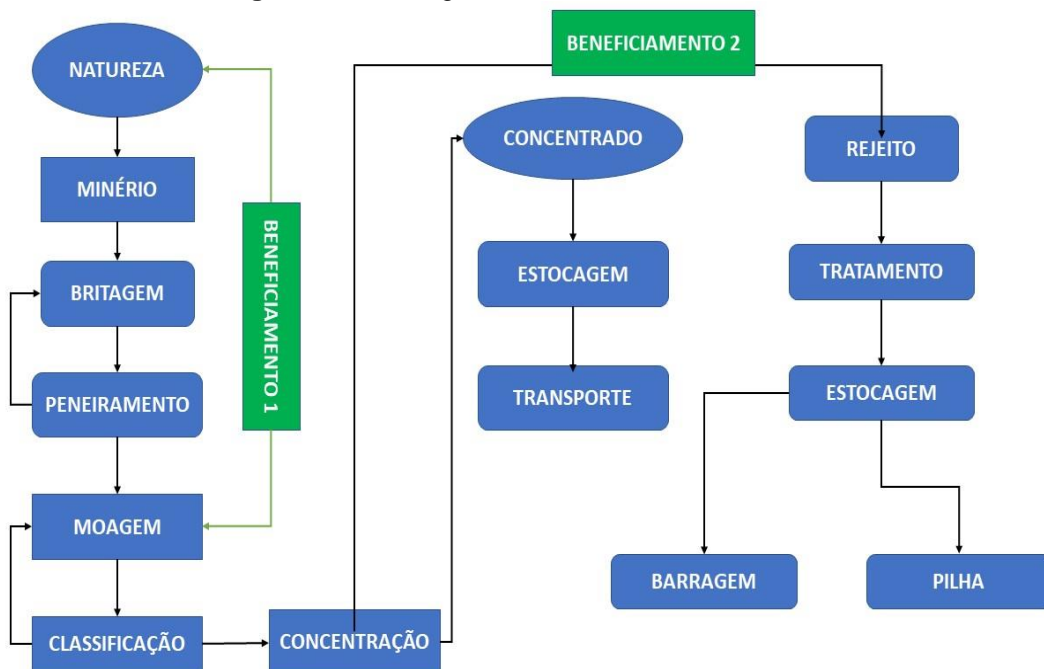
O ferro obtido são óxidos, encontrados na natureza, como magnetita e hematita (CORDEIRO, 2014). Para produção deste bem, tem-se a geração e descarte do resíduo de minério de ferro causando grandes impactos ambientais e a segurança da população regional (CORDEIRO, 2014). Uma das soluções é utilizar esses rejeitos em materiais no ramo da construção civil, pois esse ramo tem uma grande capacidade de absorver esses subprodutos, e deles serem aplicados em diversas áreas da construção. As barragens de rejeitos têm provocado um grande impacto ambiental, apenas para armazenar milhares de toneladas, porque os metais pesados resultam em um processo de lixiviação, causando a poluição das águas superficiais, subterrâneas e do solo (LUO *et al.*, 2020; CANCIO *et al.*, 2018). Nos casos em que ocorreram os rompimentos das barragens, como no caso Mariana, foram aproximadamente 35 milhões de metros cúbicos que vazaram, causando impactos sociais e ambientais (MENDES *et al.*, 2019). O outro acidente que ocorreu em Brumadinho, há indícios de que as poluições ambientais tiveram grandes proporções, as mortes que ocorreram no rompimento dessas duas barragens, também o alto impacto econômico e social (CANCIO *et al.*, 2018).

As estruturas dos minérios são bem heterogêneas, pois existem diversos fatores que causam essa diversificação, como: tectonismo; diferentes condições de metamorfismo; virtude de sua gênese e a intemperismo diversos (CORDEIRO, 2014). Portanto com essa diversificação, os minérios apresentam: tamanhos e morfologias dos cristais; a morfologia dos poros, porosidade, forma e superfícies das partículas completamente distintos, assim sendo, o minério não é homogêneo (CORDEIRO, 2014). Portanto essa heterogeneidade sendo um dos motivos que possam ocasionar em divergências de resultados obtidos em experimentos. Um fator que também favorece a heterogeneidade dos minérios de ferro, são o teor de ferro, por exemplo: Magnetita; Hematita e Goethita (CORDEIRO, 2014)

4.2 BENEFICIAMENTO E DISPOSIÇÃO DO RESÍDUO DE MINÉRIO DE FERRO

O beneficiamento do minério de ferro é um conjunto de atividades relacionadas ao tratamento desse minério. Dependendo da logística da empresa na qual está executando essa tarefa e além de qual objetivo e destino final tem para esse minério (BOCCAMINO, 2017). Pois existem diversos tipos de tratamento e para cada fase do beneficiamento (Figura 4.1), gera um tipo de rejeito com características distintas (APAZA *et al.*, 2018; SILVA, 2017). Uma das principais empresas mineradoras do Brasil, por exemplo, faz a separação de pelotas de minério de ferro (SAMARCO, 2020).

Figura 4.1 - Fluxograma do beneficiamento do minério de ferro.



Fonte: Adaptado de (BOCCAMINO, 2017)

Ao extrair da natureza o minério de ferro, vem com impurezas e por isso passa pelo processo de Beneficiamento 1 que corresponde a britagem e moagem para que as partículas estejam no tamanho correto para serem utilizadas (BOCCAMINO, 2017). Nesta fase se consome uma grande quantidade de energia para a fragmentação do material que deve ser apenas o necessário para a etapa seguinte do processo (LUZ *et al.*, 2010). Em alguns casos, são feitas diversas moagens, até que se atinja o material adequado para as etapas: concentração, pelletização, calcinação, lixiviação, combustão (FIGUEIRA *et al.*, 2010).

Em seguida passam pelos processos de peneiramento e classificação, que é o Beneficiamento 2. Nesta etapa são selecionadas quais tamanhos que serão utilizados. Na fase de concentração, verifica os teores dos elementos úteis e ocorre a eliminação dos elementos que não são utilizados. (BOCCAMINO, 2017). Na fase de concentração é que os produtos são classificados de acordo com as suas respectivas granulometrias. Os produtos granulados (*lump* e hematitinha) e os finos (*sinter feed* e *pellet feed*) (GUIMARÃES, 2011)

Na próxima etapa são divididos em duas fases o minério de ferro: a fase do concentrado, no qual passará pela estocagem, transporte e o produto final (aço, e dentre outros produtos), e a fase do rejeito (BOCCAMINO, 2017). A fase do rejeito, também passa por um tratamento e estocagem, o que vai definir se esse rejeito vai para barragem ou para as pilhas, é o fator da granulometria, pois será classificado como rejeito fino ou rejeito arenoso (BOCCAMINO, 2017). Os rejeitos finos são descartados na etapa de classificação, os rejeitos arenosos são descartados na fase de flotação (etapa de concentração). Vale ressaltar que esses rejeitos (finos e arenosos) apresentam comportamentos e características geotécnicas bem diferentes. (BOCCAMINO, 2017)

O importante é ressaltar que independentemente do processo de beneficiamento que é utilizado o rejeito de minério de ferro será gerado, e com isso será prejudicial ao meio ambiente e a sociedade. O rejeito será armazenado em barragem ou em pilhas, o que trará consequências, seja contaminando o solo ou no caso mais grave o rompimento de barragem (FIGUEIREDO, 2007). O empreendedor é o responsável legal pela segurança da barragem. Portanto não importa o tempo em que esses rejeitos vão ficar armazenados, a responsabilidade irá continuar sobre quem tem a posse delas, seja uma empresa ou um único empreendedor (BRASIL, 2010). A integridade e a estabilidade dessas barragens, são essenciais para que o processo das atividades de extração mineral continue (FERRANTE, 2014). A sociedade não pode perder a confiança nas principais empresas responsáveis pela atividade de mineração. Um exemplo são os acidentes devido aos rompimentos das barragens de Mariana e Brumadinho, na qual em cidades próximas tem gerado insegurança.

No Brasil, os rejeitos de minério de ferro são organizados em forma de polpa e por isso são armazenados em grandes barragens (rejeitos grossos) ou grandes estruturas de terra, para que esses rejeitos com características finas sejam contidos.

Os rejeitos geralmente são descartados de duas formas, sendo essas: líquidas (polpa de água com sólidos ou lama) ou de forma sólida (pasta ou granel), conforme mostra a Figura 4.2 (FERRANTE, 2014).

Figura 4.2 - Barragem de rejeitos, Brumadinho antes do rompimento



Fonte: (Vale, 2020)

O outro método utilizado para a disposição dos rejeitos de minério de ferro é o empilhamento, conforme a Figura 4.3, onde os rejeitos são granulares, que foram originados durante o processo de beneficiamento que não passaram pela fase de tratamento dos rejeitos finos. Atualmente cerca de 60% da produção de minério de ferro da empresa Vale é o processamento a seco. Esse tipo de processo apresenta algumas vantagens, como: redução de 93% do consumo de água, dispensando utilização de água e de barragens; maior economia e produtividade, porque tem uma redução de: consumo de energia, etapas e equipamentos; e tem o aproveitamento de 100% do minério de ferro e podendo ser comercializado (VALE, 2020a; FERRANTE, 2014)

Figura 4.3 - Estocagem de rejeitos a seco



Fonte: Vale (2020b)

O resíduo quando não tem valor econômico, é chamado de estéril, e geralmente ocorre na etapa de lavra (SILVA, 2017). A concentração, atividade na qual separa de forma seletiva dos minerais, gerando dois tipos de resíduos: rejeito granular

e rejeito fino (SILVA, 2017). Nessas etapas de tratamento do minério, tanto físicas como químicas, não alteram as constituições químicas dos minerais (WOLFF, 2009).

O granulado apresenta a granulometria maior do que 6,3mm (SILVA, 2017; LUZ *et al.*, 2010). Na fase de britagem, os rejeitos menores que 6,3mm vão para a próxima etapa e os maiores geram: granulado fino e granulado grosso (SILVA, 2017). Pode-se visualizar um dos tipos de granulado na figura 4.4.

Figura 4.4 - Rejeito de minério de ferro – Granulado (50mm – 6,3mm)



Fonte: CSN MINERAÇÃO S.A., 2020

O *sinter feed* gerado pelo processo de sinterização (CAMPOS, 2018) apresenta a granulometria entre 6,3mm e 0,15mm (GUIMARÃES, 2011). No geral, tem uma significativa quantidade de ferro (COSTA, 2009). Pode ser visualizado na Figura 4.5. Já o *pellet feed* é um produto fino gerado no processo de flotação, que apresenta uma granulometria menor que 0,15mm (GUIMARÃES, 2011; LUZ *et al.*, 2010). Também pode ser gerado nos processos de concentração magnética e/ou flotação em espuma (GUIMARÃES, 2011). Pode passar pelo processo de pelletização e transformar-se em pelotas (VALE, 2017), conforme visualizado na Figura 4.5.

No Quadro 4.1, é possível visualizar, as respectivas frações dos minérios, os métodos de concentração, os produtos gerados durante o processo de moagem e peneiramento, os rejeitos gerados no processo de beneficiamento e a destinação de cada rejeito.

Figura 4.5 - Pilhas de Rejeito de minério de ferro – (a) *Sinter Feed* e (b) pilhas de pelotas de minério de ferro - *Pellet Feed*



(a)

(b)

Fonte: Costa, (2009) e Samarco (2020)

Quadro 4.1 - Pilhas de Pelotas de minério de ferro - *Pellet Feed*

FRAÇÃO	MÉTODO DE CONCENTRAÇÃO	PRODUTO	REJEITO	DESTINAÇÃO DO REJEITO
(-31,5+6,3) mm	-	granulado	-	-
(-6,3+1) mm	jigagem	SINTER FEED	rejeito da jigagem	pilhas de rejeitos ou moagem e incorporação ao circuito
(-1+0,15) mm	concentração magnética ou espirais		produto não magnético ou rejeito de espirais	pilhas de rejeitos ou barragens
(-0,15) mm	concentração magnética e/ou flotação	PELLET FEED	produto não magnético e/ou rejeito de flotação	barragens
(-0,010) mm	-	-	lamas	barragens

Fonte: (GUIMARÃES, 2011)

4.3 CARACTERIZAÇÃO DO RESÍDUO DE MINÉRIO DE FERRO

4.3.1 Composição química do RMF

A composição química do RMF também é bastante divergente, podendo variar da mesma matriz e dos tipos de beneficiamentos. Geralmente para o processo de análise da composição química, utiliza-se o método por fluorescência de raios X (XRF) (ALMADA, 2019; SANT'ANA FILHO *et al.*, 2017; FONTES *et al.*, 2016; BASTOS *et al.*, 2016; KURANCHIE *et al.*, 2015; LIU *et al.*, 2015; GUERRA, 2014). Um outro método

também utilizado é Espectrofotômetro de Emissão Atômica com Fonte de Plasma (ICP-OES) (SILVA, 2014a).

Ao levantar os dados da composição química dos RMF, e que cada autor da Tabela 4.1, coletou de uma mesma fonte o rejeito, porém realizou beneficiamentos distintos:

Tabela 4.1 - Composição química do RMF de beneficiamentos diferentes

AUTOR	GUERRA, 2014	GUERRA, 2014	GUERRA, 2014	GUERRA, 2014	SILVA, 2014a	SILVA, 2014a	SILVA, 2014a	CARRASCO et al., 2017	CARRASCO et al., 2017
BENEFICIAMENTO	rejeito bruto	não magnético do LIMS	não magnético do WHIMS	magnético do WHIMS	FLOTAÇÃO	FINO-MAGNETICA	GROSSO-MAGNETICA	FINO	GROSSO
COMP. QUÍMICA	PORCENTAGEM								
Fe ₂ O ₃	26,51	26,51	9,34	89,91	15,1	42,4	8,36	34,26	21,99
SiO ₂	67,85	68,28	84,66	6,44	84,4	47,9	90,4	45,72	67,97
Al ₂ O ₃	2,62	2,24	2,57	0,93	0,45	5,61	0,43	02,06	0,15
P	0,01	0,01	0,02	0,02	0,024	0,0214	0,035	0,051	0,140
Mn	0,02	0,02	0,01	0,03	0,02	0,33	0,06	-	-
CaO	0,04	0,05	0,07	0,03	0,07	0,13	0,06	-	-
MgO	0,09	0,09	0,11	0,04	<0,1	<0,1	<0,1	-	-
TiO ₂	0,04	0,04	0,02	0,17	0,02	0,07	<0,01	-	-
K ₂ O	0,25	0,24	0,3	0,08	0,03	0,22	0,01	-	-
Na ₂ O	0,04	0,04	0,05	0,01	-	-	-	-	-
Perda ao Fogo	1,00	0,9	1	0,5	-	-	-	-	-
Fe	-	-	-	-	10,9	29,8	6,07	-	-
MnO ₂	-	-	-	-	-	-	-	3,030	0,010

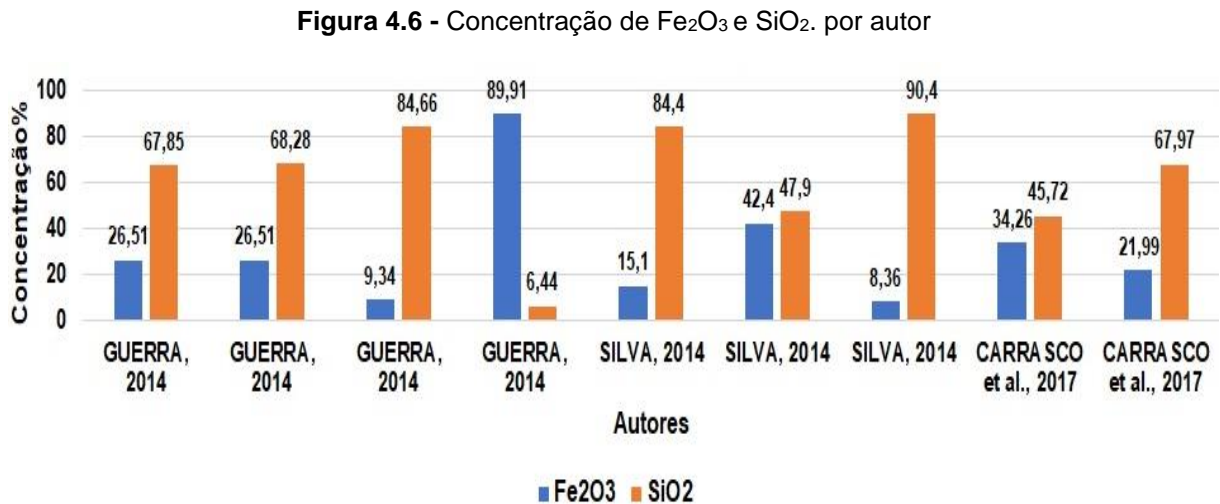
Fonte: (CARRASCO *et al.*, 2017; GUERRA, 2014; SILVA, 2014a)

Para o RMF de Guerra (2014), foi coletado da planta que está localizada no município de Conceição do Mato Dentro, MG. Utilizou-se o RMF bruto; o RMF pelo beneficiamento de remoção magnética (Separador magnético via úmida de baixa intensidade) e (Separador magnético via úmida de alta intensidade).

O RMF de Silva (2014a), foi obtido em uma empresa e depois, passaram por beneficiamentos diferentes. Os beneficiamentos foram: flotação, separação magnética dos grossos e separação magnética dos finos e deslamagem.

Os RMF de Carrasco et al., (2017) foram obtidos pela empresa Samarco Mineração S.A. em Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil. Os rejeitos foram utilizados em duas frações distintas: finas e granulares.

Como é possível visualizar na Tabela 4.1, que mesmo sendo coletado da mesma fonte, apresentou composições químicas distintas, a Figura 4.6 ajuda a visualizar as concentrações de Fe_2O_3 e SiO_2 . Esses compostos químicos que apresentaram as maiores taxas de concentração.



Fonte: elaborado a partir de (CARRASCO *et al.*, 2018; GUERRA, 2014; SILVA, 2014a)

Pela Figura 4.6, considerando formas de beneficiamento distintos e da mesma jazida (GUERRA, 2014; SILVA, 2014; CARRASCO *et al.*, 2017), pode-se inferir:

Os RMF obtidos por Guerra (2014), pellet feed, como rejeito bruto e utilizando o processo de beneficiamento não magnético do LIMS, não apresentou uma grande divergência em sua composição química. Sendo a mesma concentração de Fe_2O_3 26,51% e para o SiO_2 valores próximos, sendo 67,85% para o rejeito bruto e 68,28% para o não magnético de LIMS. Para os rejeitos magnético do WHIMS, apresentaram um valor bem discrepante. O rejeito não magnético do WHIMS, apresentou a concentração de 9,34% para Fe_2O_3 e o magnético do WHIMS apresentou a concentração de 89,1% para Fe_2O_3 . Para as concentrações de SiO_2 , O rejeito não magnético do WHIMS teve a concentração de 84,66% e o magnético do WHIMS apresentou 6,44%.

Os RMF obtidos por Silva (2014a), apresentaram as concentrações de Fe_2O_3 : de 15,1% para flotação; 42,4% para separação magnética fina e 8,36% para a separação magnética grossa. Sendo valores com bastante variação. Para as concentrações de SiO_2 : de 84,4% para flotação; 47,9% para separação magnética fina e 90,4% para a separação magnética grossa.

Os RMF obtidos por Carrasco et al., (2018) apresentaram as concentrações de Fe₂O₃: 34.26% para a separação fina e 21.99% para separação granular. Para as concentrações de SiO₂: 45.72% para a separação fina e 67.97% para separação granular. Analisando os RMF, onde cada autor realizou beneficiamentos diferentes, é possível visualizar que apresentam composições químicas distintas, contudo apenas nas concentrações de cada composto. Não apresentou nenhum composto novo, quando teve um beneficiamento diferente.

Analisando oito autores diferentes e que cada um coletou de uma jazida distinta, é possível visualizar que as composições químicas também são divergentes. Visualizando a Tabela 4.2 é possível observar os compostos químicos.

Tabela 4.2 - Composição química do RMF de diversos autores

AUTOR	LIU, 2010	ALMADA, 2019	FONTES, 2016	BASTOS, 2016	SANT'ANA FILHO, 2013	YI et al., 2009	KURANCHI E et al., 2015	SHETTIMA et al., 2016
BENEFICIAMENTO	LAMA	BARRAGEM -	margens de uma barragem	costa da barragem	planta de processamento	-	-	-
COMP. QUÍMICA	PORCENTAGEM							
Fe ₂ O ₃	17.31	59,1	45.92	68.05	35 5	13.82	25.13	8.3
SiO ₂	79.77	25,6	24.19	20.4	63 9	63.07	57.31	56
Al ₂ O ₃	1.34	3,13	4.82	11.2	0,9	5.6	9.58	10
P	-	-	0.096	-	-	-	-	-
Mn	0.04	-	0.025	-	-	-	-	-
CaO	0.34	3,85	-	-	-	8.18	0.03	4.3
MgO	0.68	0,23	-	-	-	0.23	0.08	-
TiO ₂	-	0,14	-	-	-	-	0.61	-
K ₂ O	0.16	0,38	-	0.195	-	-	0.04	1.5
Na ₂ O	0.13	<0,1	-	-	-	-	0.04	-
CR ₂ O ₃	0.14	-	-	-	-	-	-	-
SO ₃	0.08	-	-	-	-	-	-	-
P ₂ O ₅	-	0,16	-	-	-	-	-	-
MnO	-	0,23	-	0.127	-	-	-	1.7
FeO	-	-	-	-	-	-	-	-
MnO ₂	-	-	-	-	-	-	-	-
ZrO ₂	-	-	-	0.018	-	-	-	-
SO ₃	-	-	-	-	-	-	0.16	-
ZnO	-	-	-	-	-	-	-	0.1
CuO	-	-	-	-	-	-	-	0.2
PbO	-	-	-	-	-	-	-	0.4

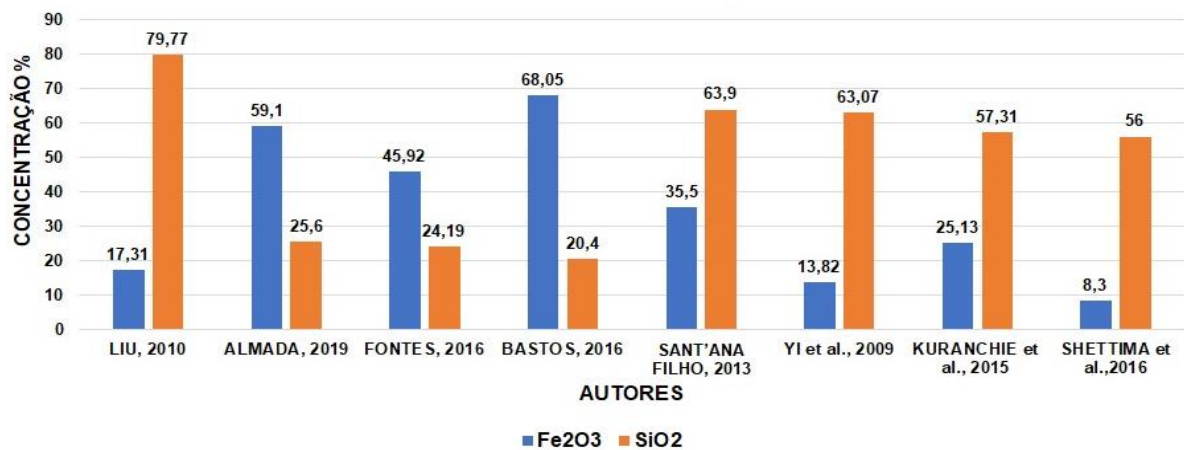
Fonte: (ALMADA, 2019; BASTOS, 2016; FONTES, 2016; SHETTIMA *et al.*, 2016; KURANCHIE *et al.*, 2015; SANT'ANA FILHO, 2013; LIU, 2010; YI *et al.*, 2009

As concentrações de Fe_2O_3 e SiO_2 também foram as maiores nestes autores, conforme mostra na Figura 4.7:

- Os RMF obtidos por Bastos (2016), apresentou a maior concentração de Fe_2O_3 , sendo 68,05.
- Os RMF obtidos por Shettima *et al.*, (2016), apresentou a menor concentração de Fe_2O_3 , sendo 8,30.
- Os RMF obtidos por Liu (2010), apresentou a maior concentração de SiO_2 , sendo 79,77.
- Os RMF obtidos por Bastos (2016), apresentou a menor concentração de SiO_2 , sendo 20,04.

Portanto há indícios que o RMF apresenta comportamento heterogêneo em sua composição química.

Figura 4.7- Concentração de Fe_2O_3 e SiO_2 . por autor



Fonte: elaborado a partir de (ALMADA, 2019; BASTOS, 2016; FONTES, 2016; SHETTIMA *et al.*, 2016; KURANCHIE *et al.*, 2015; SANT'ANA FILHO, 2013; LIU, 2010; YI *et al.*, 2009)

4.3.2 Mineralogia do RMF

A mineralogia do RMF apresenta características distintas. Os ensaios mais comuns para a caracterização da mineralogia do RMF, é o ensaio de difração de raio - X (DRX) (ALMADA, 2019; BASTOS, 2016; FONTES, 2016; SHETTIMA *et al.*, 2016; GUERRA, 2014; LIU, 2010). O ensaio de difração de raio-X pelo método do pó e

utilizando o microscópio óptico também é utilizado para a mineralogia (SILVA, 2014a). Pode-se visualizar as mineralógicas de cada um dos RMF dos respectivos autores na Tabela 4.3.

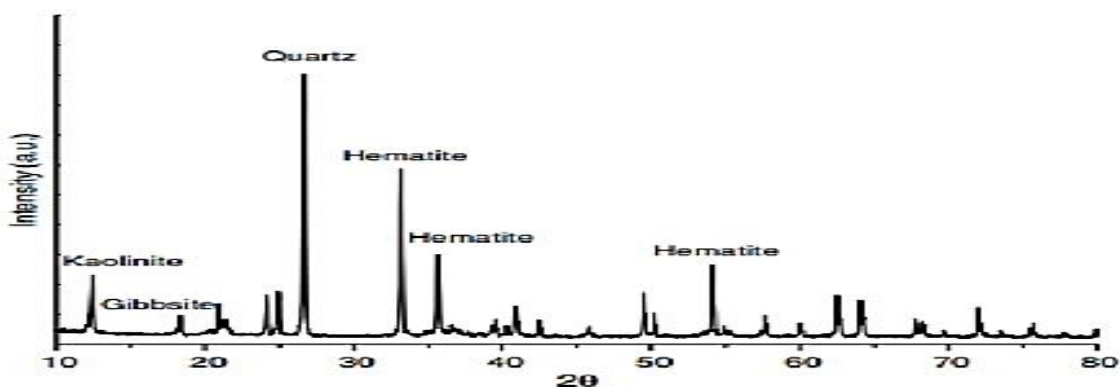
Tabela 4.3 - Composição Mineralógica do RMF por autor e beneficiamento

AUTOR	TIPO DE REJEITO E/OU BENEFICIAMENTO	MINERALOGIA
ALMADA, 2019	Barragem de rejeitos	Quartzo, hematita
BASTOS, 2016	costa de barragem	Quartzo, hematita
FONTES, 2016	margem de uma barragem	Quartzo, hematita
SHETTIMA et al., 2016	-	Quartzo, gibbsita
GUERRA, 2014	rejeito bruto	Quartzo, hematita
GUERRA, 2014	LIMS	Quartzo, hematita
GUERRA, 2014	MAGNÉTICO- WHIMS	Quartzo, hematita
GUERRA, 2014	NÃO MAGNÉTICO- WHIMS	Hematita, quartzo
SILVA, 2014a	FLOTAÇÃO	Quartzo, hematita
SILVA, 2014a	MAGNÉTICA - FINA	Quartzo, hematita
SILVA, 2014a	MAGNÉTICA - GROSSO	Quartzo, hematita
LIU, 2010	Tanque de Rejeitos	Quartzo, hematita

Fonte: (ALMADA, 2019; BASTOS, 2016; FONTES, 2016; SHETTIMA *et al.*, 2016; GUERRA, 2014; SILVA, 2014a; LIU, 2010)

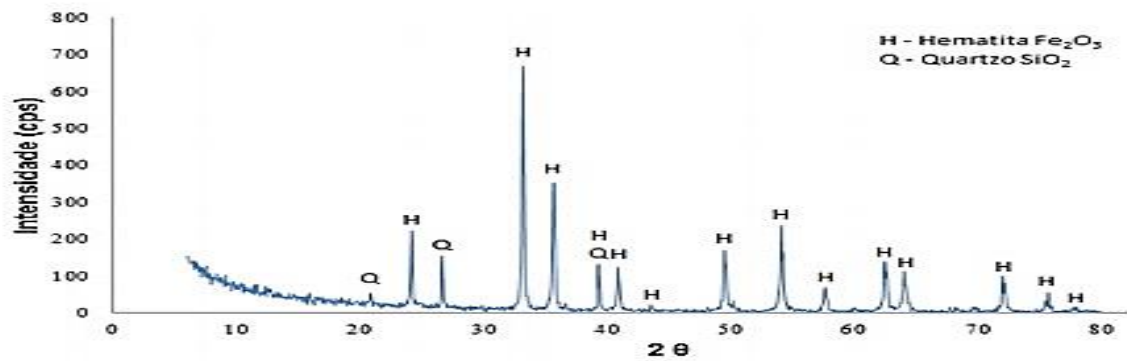
A Tabela 4.3 mostra que os RMF de sete autores diferentes, sendo que dois deles, tiveram mais de um tipo de beneficiamento. A ordem dos minerais, segue de acordo com a maior concentração de cada tipo de mineral. Nos sete autores citados, a grande maioria teve o quartzo como mineral predominante, na Figura 4.8 é possível visualizar um dos autores que teve o mineral Quartzo com maior concentração.

Figura 4.8 - Composição mineralógica do RMF



Fonte: Bastos (2016)

No caso de Guerra, (2014) apenas no beneficiamento não magnético WHIMS, que apresentou uma maior concentração de hematita, conforme é possível visualizar na Figura 4.9.

Figura 4.9 - Composição mineralógica do RMF - Não magnético WHIMS

Fonte: Guerra (2014)

4.3.3 Densidade do RMF

A densidade do RMF é variável, pois ao analisar a densidade do RMF de 9 (nove) autores diferentes e também analisar 12 (doze) densidades diferentes. É possível visualizar na Tabela 4.4, que a menor densidade encontrada 1,86 g/cm³ (KURANCHIE *et al.*, 2015) e a maior encontrada 4,359 g/cm³ (ALMADA, 2019). Ocorreu variações até no mesmo autor, sendo 3,47 g/cm³ para o rejeito fino e 3,14 g/cm³ para o rejeito grosso, utilizando duas frações do rejeito (CARRASCO *et al.*, 2017). Os RMF também obtidos em beneficiamentos diferentes, apresentaram densidades distintas, sendo 2,875 g/cm³ para flotação, 3,325 g/cm³ para separação magnética fina e 2,757 g/cm³ para separação magnética grossa (SILVA, 2014a).

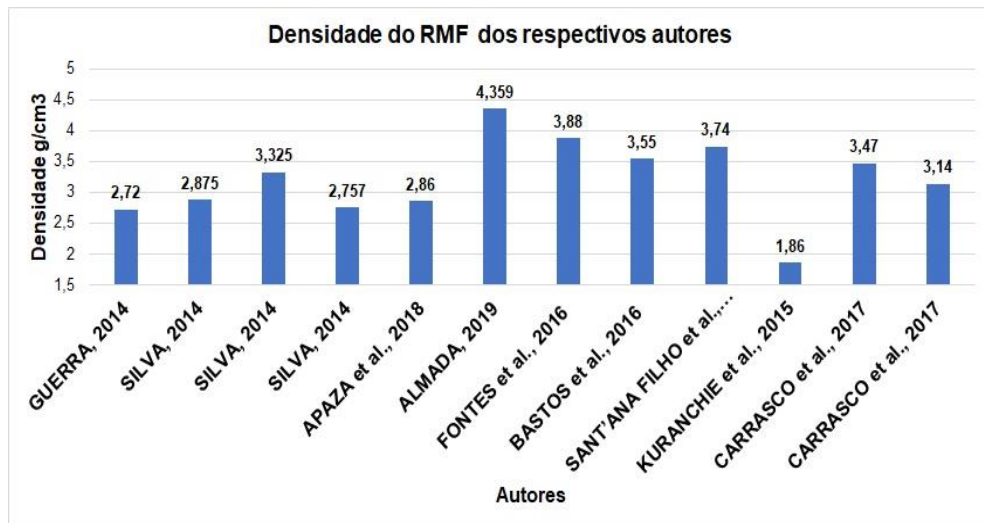
Tabela 4.4 - Diversidade da densidade do RMF de diversos autores

AUTOR	TIPO DE REJEITO	DENSIDADE (g/cm ³)
ALMADA, 2019	-	4,359
APAZA <i>et al.</i> , 2018	Flotação	2,86
CARRASCO <i>et al.</i> , 2017	FINO	3,47
CARRASCO <i>et al.</i> , 2017	GROSSO	3,14
SANT'ANA FILHO <i>et al.</i> , 2017	-	3,74
BASTOS <i>et al.</i> , 2016	costa de barragem	3,55
FONTES <i>et al.</i> , 2016	margem de uma barragem	3,88
KURANCHIE <i>et al.</i> , 2015	-	1,86
GUERRA, 2014	Pellet Feed	2,72
SILVA, 2014a	FLOTAÇÃO	2,875
SILVA, 2014a	MAGNÉTICA - FINA	3,325
SILVA, 2014a	MAGNÉTICA - GROSSO	2,757

Fonte: (ALMADA, 2019; APAZA *et al.*, 2018; CARRASCO *et al.*, 2017; SANT'ANA FILHO *et al.*, 2017; BASTOS *et al.*, 2016; FONTES *et al.*, 2016; KURANCHIE *et al.*, 2015; GUERRA, 2014; SILVA, 2014a)

Na Figura 4.10 é possível visualizar estas densidades, e como são bastante de divergentes. As densidades com valores mais próximos foram a de 2,86 g/cm³ (APAZA *et al.*, 2018) e 2,875 g/cm³ (SILVA, 2014a) e em ambos os casos passaram pelo o tratamento de flotação. Nas densidades apresentadas por Silva (2014a), foram coletados de uma mesma planta piloto, contudo as três amostras passaram por beneficiamentos diferentes e apresentaram densidades bem distintas.

Figura 4.10 - Densidade do RMF de diversos autores



Fonte: elaborado a partir de (ALMADA, 2019; APAZA *et al.*, 2018; CARRASCO *et al.*, 2017; SANT'ANA FILHO *et al.*, 2017; BASTOS *et al.*, 2016; FONTES *et al.*, 2016; KURANCHIE *et al.*, 2015; GUERRA, 2014; SILVA, 2014a)

4.3.4 Granulometria do RMF

A granulometria do RMF também é variável, pois ao analisar 9 (nove) autores diferentes e também analisar 11 (onze) granulometrias diferentes. É possível visualizar na Tabela 4.5.

Analisando as granulometrias de diferentes autores, sendo nove autores no total e onze RMF analisados. Percebe que existem diferentes granulometrias também para a mesma fonte de rejeito, contudo com beneficiamentos diferentes, o caso da Silva (2014). Cinco autores tiveram a granulometria abaixo de <75µm (ALMADA, 2019; BASTOS *et al.*, 2016; FONTES *et al.*, 2016; KURANCHIE *et al.*, 2015; GUERRA, 2014).

Tabela 4.5 - Diversidade da granulometria do RMF de diversos autores

AUTOR	TIPO DE REJEITO E/OU BENEFICIAMENTO	GRANULOMETRIA
ALMADA, 2019	Barragem de rejeitos	<75µm
APAZA et al., 2018	Flotação	<#4mm)
SANT'ANA FILHO et al., 2017	-	150 µm
BASTOS et al., 2016	costa de barragem	<75µm
FONTES et al., 2016	margem de uma barragem	<75µm
KURANCHIE et al., 2015	-	75µm
GUERRA, 2014	Pellet Feed	75 µm
SILVA,2014a	FLOTAÇÃO	105µm e 53µm.
SILVA,2014a	MAGNÉTICA - FINA	<5µm
SILVA,2014a	MAGNÉTICA - GROSSO	149µm e 53µm
LIU, 2010	Tanque de Rejeitos	150µm

Fonte: (ALMADA, 2019; APAZA et al., 2018; SANT'ANA FILHO et al., 2017; BASTOS et al., 2016; FONTES et al., 2016; KURANCHIE et al., 2015; SILVA, 2014a; LIU, 2010)

Contudo o tipo de beneficiamento pode alterar a granulometria dos RMF. Os tipos de rejeitos, a localização da fonte e o tipo de beneficiamento pode apresentar granulometrias diferentes (PRESOTTI, 2002). Essa diversificação de granulometrias, podem apresentar indícios de que os RMF são heterogêneos

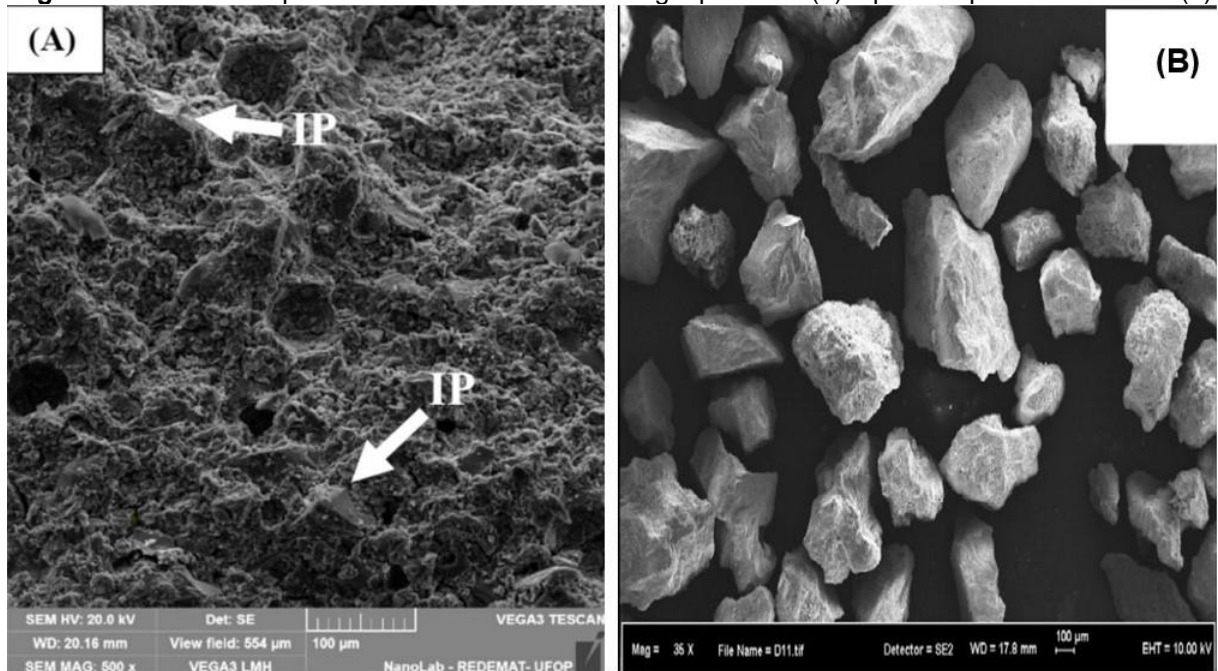
4.3.5 MEV do rejeito de minério de ferro

As morfologias superficiais dos materiais, em escalas micrométricas, são analisadas por meio do microscópio eletrônico de varredura (MEV), no qual são verificadas as informações sobre os minerais. O MEV utiliza um feixe de elétrons, no qual varre as superfícies das amostras, e em seguida são espalhados sobre essas superfícies, gerando assim uma taxa de varredura. Essas taxas são coletadas por tubos de raios catódicos, gerando uma imagem (FIGUEIREDO, 2018). As imagens que são produzidas pelo MEV, são virtuais e apresentam características tridimensionais. A espectroscopia de energia dispersiva (EDS), que é acoplado ao MEV, também mede as energias de transição e os espectros que são gerados pela amostra, assim sendo, permitindo identificar quais elementos químicos estão presentes em cada região da amostra que está sendo analisada (ZINATO, 2016).

Defáveri et al. (2019), por meio do MEV, foi possível visualizar: poros e partículas inertes. Pelo MEV também visualizou superfícies rugosas e o gel do geopolímeros cobrindo toda a superfície da amostra. Mendes et al. (2019) utilizando o MEV, visualizou a redução da porosidade e da rugosidade da amostra contendo rejeito de minério de ferro. Yao et al. (2015) ao utilizar o MEV, observou nas amostras

com RMF, a presença de contraste entre os grãos brilhantes e a fase vítrea (escura). Shettima *et al.* (2016) analisado as amostras por meio do MEV, observou a presença de poros e partículas irregulares, que estavam bastante dispersas as amostras. Na Figura 4.11 é possível visualizar as imagens obtidas pela utilização do MEV.

Figura 4.11 – Poros e particular inertes embutidas no geopolímero (a) e poros e partículas inertes (b)



(a) (b)
Fonte: Defáveri *et al.* (2019) e Shettima *et al.* (2016)

4.3.6 Dureza do RMF

Das *et al.*, (2000) a dureza, é uma propriedade que mede a resistência à penetração ou endentação, é medida nos minerais pela a escala de Mohs. A hematita apresenta a dureza em torno de 5,5 e 6,5, a magnetita apresenta a dureza em torno de 6,0, a goethita apresenta a dureza em torno de 5,0 e 5,5 e o quartzo apresenta a dureza em torno de 7,0 (FIGUEIREDO, 2018; GOMES, 2017). O rejeito de minério de ferro coletado de uma barragem, encontrou a dureza de 6,0 e podendo ser considerado como hematita, pois apresentou a segunda maior concentração de minerais (DAS *et al.*, 2000). A dureza dos rejeitos de minério de ferro, pode influenciar na eficácia do processo de moagem (CANCIO *et al.*, 2018)

5 UTILIZAÇÃO DO RMF EM MATERIAIS DA CONSTRUÇÃO CIVIL

Este capítulo reúne as principais formas de reaproveitamento dos RMF na construção civil. Foi estruturado de acordo com os principais materiais encontrados, nos quais o RMF foi incorporado.

5.1 UTILIZAÇÃO DO RESÍDUO DE MINÉRIO DE FERRO EM PAVIMENTOS

Os pavimentos têm como uma função essencial de distribuir as cargas concentradas, de forma que preservem o subleito (GODINHO, 2009). Pesquisas vêm sendo feitas para desenvolvimento e aplicações de novos materiais, para serem aplicados nos pavimentos. Com o objetivo de garantir a estabilidade do subleito, resistindo a cargas ambientais e de veículos (SI *et al.*, 2020). Levantou-se pesquisas sobre adição de rejeito de minério de ferro em pavimentos ou PAVERS (pavimentos intertravados). Encontrou-se seis autores e montou-se a Tabela 5.1, onde mostra os autores, os tipos de rejeitos utilizado por cada autor e os tipos de análises que cada autor realizou.

Tabela 5.1 - Levantamento sobre RMF em pavimentos

Autor	Tipo de Rejeito	Tipos de análises
APAZA <i>et al.</i> , 2018	RMF (escuro e fino) de flotação	-WTAT -LWT
MANTILLA <i>et al.</i> , 2017	-SiO ₂ - 45.72% -Fe ₂ O ₃ - 34.26 %	- Compressão - Módulo elasticidade
SANT'ANA FILHO, 2017	- Costa da barragem (fino) - SiO ₂ - 63 9% -Fe ₂ O ₃ - 35 5%	-Compressão -Porosidade
BASTOS, 2016	- Rejeito de barragem -Fe ₂ O ₃ - 68.05% - SiO ₂ - 20.4%	- Compressão -Absorção de água
COSTA <i>et al.</i> 2014	-Rejeitos de sinter feed -Fe - 55.85% -SiO ₂ - 14.78%	- Compressão -Absorção de água -Desgaste abrasivo
SILVA <i>et al.</i> 2014b	-Flotação - Separação magnética grossa -Separação magnética fina	- Compressão -Porosidade -Coloração

Fonte: APAZA *et al.*, 2018; MANTILLA *et al.*, 2017; SANT'ANA FILHO, 2017; BASTOS, 2016; COSTA *et al.* 2014; SILVA *et al.* 2014b

Apaza *et al* (2018) utilizou o RMF de origem de flotação, apresentando característica: de cor escura e granulometria fina. O seu objetivo era aplicar o rejeito em microrrevestimento asfáltico. As amostras continham 10%,15% e 20% de rejeito de minério de ferro, e restante era composto por 1% de cimento e pó de pedra. Na análise de determinação de abrasão úmida (WTAT), quanto maior a porcentagem de adição de RMF na mistura, maior a perda a abrasão. Para a análise de determinação de adesão de areia (LWT) todas as amostras atingiram os valores requeridos.

Mantilla *et al.* (2017) utilizou o RMF com a concentração de 45.72% de SiO_2 e 34.26 % Fe_2O_3 . Substituindo as amostras das seguintes formas: 50% da areia natural, 50% da areia industrial e 100% da areia industrial. Com o objetivo de aplicar em pavimentos intertravados. No teste de compressão, todos atingiram a resistência mínima de 35 MPa. No caso da amostra com substituição de 50% da areia industrial por rejeito de minério de ferro, atingiu a resistência de 50 MPa. No módulo de elasticidade, a amostra com substituição de 50% da areia industrial por rejeito de minério de ferro, também obteve os melhores resultados. Apresentou o valor do módulo de elasticidade de 33.41 MPa.

Sant'ana Filho (2017) utilizou um RMF de origem de costa de barragem, com granulometria fina, menor que 0,04 mm. As concentrações de 63.9% de SiO_2 e 35.5 % de Fe_2O_3 . Adicionando 10, 20 e 80% em relação à massa de agregado natural. O objetivo é em aplicações de pavimentos intertravados de concreto. As amostras com 20% e 80% necessitou uma maior quantidade de água, para manter a trabalhabilidade semelhante da amostra de 10%, devido a finura do rejeito. Na análise de compressão, a amostra com adição de 80% atingiu a resistência de acima de 35 MPa. Nas amostras com 10% e 20% atingiram resistências superiores a 50 MPa. As amostras de 10% e 20% apresentaram menor absorção de água e uma porosidade menor, em relação a amostra de 80%.

Bastos (2016) utilizou o RMF de origem de barragem, com as concentrações de 68.05% de Fe_2O_3 e 20.4% de SiO_2 . Adicionaram ligantes químicos, como cimento, cal ou escória ao rejeito de minério de ferro, para ser utilizado como agregado na pavimentação de estradas. As porcentagens adicionadas de cada ligante, foram 1,2,5 e 10%. Na análise de compressão, as amostras com menores teores de cimento, apresentaram melhores resultados. Na análise de absorção de água, as amostras com adição de cimento, apresentaram menor taxa de absorção de água.

Costa *et al.* (2014) utilizou o rejeito de *sinter feed* e com as concentrações de 55.85% de Fe_2O_3 e 14.78% de SiO_2 , para ser utilizado em piso intertravado. Substituíram parte da concentração das misturas, sendo a mistura 1:75% de *sinter feed* mais 25% de areia; mistura 2: 50% de *sinter feed* mais 50% de areia e a mistura 3: 50% de *sinter feed* mais 25% de areia e 25% de pó de rocha. Para a análise de compressão, a mistura 1, foi a que apresentou melhores resultados, reduzindo em 2,5% em relação a amostra de referência. Para a análise de absorção de água, a mistura 3 apresentou o melhor resultado, em relação às outras amostras, uma redução de 14% de absorção de água. A análise de desgaste abrasivo, a mistura 2 que apresentou um melhor desempenho, sendo 80% menor o desgaste em relação a amostra de referência.

Silva *et al.* (2014b) utilizou o rejeito de minério de ferro, obtido através de três formas de beneficiamentos diferentes. Os rejeitos passaram pelos seguintes beneficiamentos: flotação; separação magnética grossa e separação magnética fina. Para a análise de compressão, a amostra com 100% de areia com 100% de rejeitos grossos, apresentaram a melhor resistência entre as outras amostras. Na análise de porosidade, as amostras que tiveram adição de rejeitos, apresentaram uma menor hermeticidade, resultando em uma capacidade de drenagem melhor. Para a análise de coloração, as diversidades de cores apresentadas, ao adicionar os rejeitos, pode favorecer o mercado.

Ao utilizar o resíduo de minério de ferro como agregado em misturas asfálticas, apresentou a mesma caracterização física dos agregados convencionais. Os resultados mostraram que ao substituir parcialmente o agregado convencional pelo o rejeito de minério de ferro, aumentou os valores de densidade aparente e quanto maior a porcentagem de resíduo de minério de ferro, maiores os valores dessa densidade. (APAZA *et al.*, 2018; SILVA, 2017).

O rejeito de minério de ferro utilizado em misturas asfálticas, apresentam uma vantagem no aspecto econômico e ambiental, pois reduzem a necessidade em utilizar os agregados convencionais, reduzem a degradação ambiental, e também contribuindo para uma redução de novas áreas onde poderiam ser despejados os rejeitos de minério de ferro (APAZA *et al.*, 2018; SILVA, 2017; BASTOS, 2013).

Os blocos intertravados, que são geralmente de concreto e utilizados para pavimentação, são conhecidos como Pavers. Os blocos com 8 cm de espessura apresentaram uma moldagem ideal, e apresentaram o mesmo desempenho do que

os blocos convencionais, nos quesitos como: absorção de água e resistência a abrasividade e também índices de vazios relativamente menor, 25% a menos em relação aos convencionais (SANT'ANA FILHO, 2013). Apresentaram resistência à compressão média próxima a 50 MPAs dosagens com rejeito de minério de ferro, apresentaram um desempenho melhor em relação a resistência à compressão simples. (BASTOS, 2013; SANT'ANA FILHO, 2013)

Figura 5.1 - Pavers com rejeito de minério de ferro



Fonte: SAMARCO, 2020

Os estudos e as análises químicas, mostraram que ao utilizar resíduo de minério de ferro em misturas asfálticas, não apresentou altas porcentagens de metais pesados e nem a presença de componentes expansivos ou radioativos. Desde que sejam estabilizados quimicamente e granulometricamente (APAZA *et al.*, 2018).

Portanto ao analisar o levantamento realizado na Tabela 5.1, pode-se observar que ao adicionar as concentrações de rejeito de minério de ferro de 10% a 20% aumentaram as propriedades mecânicas. Propriedades como resistência a compressão, elasticidade e abrasão. As concentrações maiores do que 20% começaram a demandar uma maior quantidade de água e com isso a afetar a trabalhabilidade do material. Pois em ambos os estudos o rejeito de minério de ferro foi utilizado com uma granulometria fina, e que adsorve devido a sua maior superfície específica, uma maior quantidade de água. A medida também que se aumenta a concentração de rejeito de minério de ferro nas amostras, ocorre um aumento nas suas densidades.

Na Tabela 5.2, mostra os principais resultados, positivos e negativos, sobre o que cada autor encontrou em suas análises ao utilizarem o RMF.

Tabela 5.2 – Principais resultados sobre RMF em pavimentos

AUTOR	TIPOS DE ANÁLISES	RESULTADOS
APAZA <i>et al.</i> , 2018	-WTAT -LWT	-Adesão de areia satisfatório -Maior perda a abrasão
MANTILLA <i>et al.</i> , 2017	- Compressão - Módulo elasticidade	- Compressão 35 MPa - Elasticidade satisfatório
SANT'ANA FILHO, 2017	-Compressão -Porosidade	-Compressão 50 MPa -↑Aumento na demanda de água
BASTOS, 2016	- Compressão -Absorção de água	- ↑Compressão --↑Aumento na demanda de água
COSTA <i>et al.</i> 2014	- Compressão -Absorção de água -Desgaste abrasivo	- ↑Compressão -↑Aumento na demanda de água
SILVA <i>et al.</i> 2014b	- Compressão -Porosidade -Coloração	-↑Compressão

Fonte: APAZA *et al.*, 2018; MANTILLA *et al.*, 2017; SANT'ANA FILHO, 2017; BASTOS, 2016; COSTA *et al.* 2014; SILVA *et al.* 2014b

5.2 UTILIZAÇÃO DO RESÍDUO DE MINÉRIO DE FERRO EM TINTAS

As tintas para Cardoso *et al.*, (2016) são compostas basicamente por solvente (podendo ser água), resina e o pigmento. Entretanto para Wan, (2013) as tintas são compostas basicamente por: pigmento; resina; aditivos e solventes. As tintas cujo o solvente é formado por água, são conhecidas como tinta látex (WAN, 2013). As tintas ecoeficientes, produzidas por meio de resíduo de minério de ferro apresentam diversas cores e texturas, e não existe a necessidade de utilizar equipamentos especiais para a sua preparação e uso (GALVÃO *et al.*, 2018). Encontrou-se dois autores que utilizaram RMF em tintas e montou-se a tabela 5.3, onde mostra os autores, os tipos de rejeitos utilizado por cada autor e os tipos de análises que cada autor realizou.

Tabela 5.3- Levantamento sobre RMF em aplicação em tintas

Autor	Tipo de Rejeito	Tipos de análises
GALVÃO <i>et al.</i> , 2018	- Fe ₂ O ₃ - 47.8% - SiO ₂ - 30.0%	- Custo -Cor -Resistência à abrasão -Durabilidade à exposição externa
PEREIRA; BERNARDIN, 2012	-Proveniente de lama - Fe ₂ O ₃ - 71.7% - SiO ₂ - 20.1%	- Coloração -Comportamento térmico

Fonte: GALVÃO *et al.*, 2018; PEREIRA; BERNARDIN, 2012

Galvão *et al.* (2018), utilizou o RMF de origem de barragem de rejeito, com a granulometria de 149 µm, com as concentrações de 47.8% de Fe₂O₃ e 30.0% de SiO₂. O seu principal objetivo é utilizar o rejeito de minério de ferro como pigmento para produção de tintas sustentáveis. Para as misturas, utilizou os seguintes aglutinantes: cimento portland de alta resistência; cal hidratada; resina acrílica incolor a base de água e polímero de cola branca (PVA). No total foram 14 misturas diferentes e com concentrações distintas de RMF, e usando como referência: uma tinta comercial, acrílica fosca e uma tinta látex comercial, de PVA fosco. As misturas eram compostas como base: 400g de água e 400g de RMF, eram adicionados os aglutinantes e uma porcentagem de 0% a 50% de uma pasta ligante de RMF. As análises realizadas foram: custo; cor; homogeneidade; resistência a abrasão e durabilidade a exposição externa. Na análise de custo, calculou o rendimento por custo/m², as amostras de cimento e cal, apresentaram os melhores resultados, um custo baixo. Para as tintas de referência tiveram um custo/m² bem superior às tintas ecológicas

Galvão *et al.* (2018), na análise de cor, diversas tonalidades de cores foram alcançadas, como tons de vermelho e marrom, também podendo apresentar texturas distintas. As tintas que apresentaram resultados mais homogêneos, foram as misturas com cal e cimento. Na análise de resistência a abrasão, utilizou uma escova de nylon para realizar ciclos, esfregando a superfície da tinta. As tintas ecológicas apresentaram resultados, demonstrando que elas sejam aplicadas em ambientes internos e que não estejam sujeitos a intempéries. Na análise de durabilidade, colocou-se as amostras, durante 12 meses, em um local aberto, exposto a intempéries e outras dentro de um local fechado. As amostras que apresentaram melhores resultados foram: as com PVA e as com PVA mais cal.

Pereira; Bernardin, (2012), utilizou o RMF proveniente de lama, com as concentrações de 71.7% de Fe_2O_3 e 20.1% de SiO_2 . O objetivo de desenvolver um corante para esmaltes cerâmicos, que fossem derivados de beneficiamento de minério de ferro e também estudar a variação da cor do corante, em relação a variação de temperatura.. O RMF foi utilizado como corante em três esmaltes distintos, sendo: um branco, um transparente e outro frita fosca. As análises realizadas foram: coloração e variação da cor em relação ao aumento da temperatura. Em temperaturas entre 500°C a 1100°C , o rejeito de minério de ferro apresentou-se termicamente estável. Para atingir a cor avermelhada, do tipo pião, que seria importante para as indústrias de cerâmica, a temperatura ideal é de 1050°C para esmaltes brancos e foscos, e 1100°C para esmalte transparente. As mudanças de cores dos esmaltes, está relacionada ao processo de queima, quando ocorre o aumento da temperatura, faz com que o RMF reage com os componentes dos esmaltes. Ao adicionar o rejeito de minério de ferro como corante em fritas transparentes, não ocorreu mudança aparente na cor, ao aumentar a temperatura., portanto podendo apenas ser utilizado em temperaturas moderada de queima.

As tintas ecoeficientes, fabricadas com o rejeito de minério de ferro, apresentam diversas vantagens. Os rejeitos só precisam passar pelo processo de secagem, é necessário apenas o rolo convencional para a sua aplicação, descartando equipamentos diferenciais para sua preparação e utilização (GALVÃO *et al.* 2018). As cores obtidas por meio do rejeito de minério de ferro, sem tratamento, foram possíveis obter uma cor avermelhada, tipo pinhão, o que seria favorável para as indústrias cerâmicas e também para o mercado da construção civil PEREIRA; BERNARDIN, 2012). A utilização do RMF como pigmentos, tem benefícios econômicos e estéticos, mas também tem o fator de reduzir o impacto ambiental. Porque não é necessária uma grande demanda de energia para produzir as tintas ecoeficientes, podem reduzir a quantidade de despejo do RMF em barragens, assim sendo, contribuindo para a preservação do meio ambiente. Portanto o RMF é tecnicamente viável para produzir pigmentos para tintas, para serem utilizadas no setor da construção civil, e podendo ser produzidas *in loco* (GALVÃO *et al.* 2018).

Na Figura 5.2, é possível visualizar as tonalidades das cores, das tintas produzidas pelo RMF com os aglutinantes, mencionados na figura. Pode-se observar que a coloração é próxima das cerâmicas encontradas no mercado da construção civil.

Figura 5.2 - Tons de pintura ecoeficientes produzidas pelo RMF



Fonte: GALVÃO *et al.*, 2018

Após o levantamento realizado na Tabela 5.3 e os estudos descritos por esta tabela, pode-se observar que a incorporação do RMF em tintas, tendem a ser para cores: vermelhas, marrons e cores parecidas com a cores da terra. Apresentou vantagens em sua produção, pois não demandam grande quantidade de energia e nem aparelhos sofisticados e apresentaram um custo baixo para a sua produção.

Na Tabela 5.4, mostra os principais resultados, positivos e negativos, sobre o que cada autor encontrou em suas análises ao utilizarem o RMF.

Tabela 5.4 - Principais resultados sobre RMF em aplicação em tintas

AUTOR	TIPOS DE ANÁLISES	RESULTADOS
GALVÃO <i>et al.</i> , 2018	<ul style="list-style-type: none"> - Custo -Cor -Resistência à abrasão -Durabilidade à exposição externa 	<ul style="list-style-type: none"> -Amostras internas tiveram bons resultados e maior durabilidade - Amostras externas não apresentaram uma boa durabilidade
PEREIRA; BERNARDIN, 2012	<ul style="list-style-type: none"> - Coloração -Comportamento térmico 	<ul style="list-style-type: none"> - Coloração favorável a indústria cerâmica -Altas temperaturas

Fonte: GALVÃO *et al.*, 2018; PEREIRA; BERNARDIN, 2012

5.3 UTILIZAÇÃO DO RESÍDUO DE MINÉRIO DE FERRO EM CIMENTOS ÁLCALIS-ATIVADOS

Os rejeitos de minério de ferro podem contribuir para os geopolímeros, uma vez que podem conter minerais aluminossilicatos e que são necessários para a ativação dos álcalis (OBENAUS-EMLER *et al.*, 2020). Os aluminossilicatos álcalis-ativados são conhecidos como cimentos geopoliméricos e são formados por um ou mais materiais, compostos por SiO₂ e Al₂O₃ em proporções suficientes (CAI *et al.*, 2020; ZAWRAH *et al.*, 2020). Sobre a parte ecológica, a vantagem do polímero inorgânico do tipo cerâmico, e que esse pode ser produzido a uma temperatura ambiente ou até 100°C (ZAWRAH *et al.*, 2020; DAVIDOVITS, 2017; BORGES *et al.*, 2014). Realizados de forma reativa (como cinzas volantes, argilas ativas, pozolana, metacaulim, casca de arroz, escórias) e passam por um processo de mistura em uma solução alcalina aquosa ativadora (RASHAD, 2020). Essa solução, podendo ser de KOH, NaOH, Na₂SiO₃(CAI *et al.*, 2020; ZAWRAH *et al.*, 2020).

Encontrou-se três autores que utilizaram RMF em cimentos álcalis-ativados e montou-se a Tabela 5.5, onde mostra os autores, os tipos de rejeitos utilizado por cada autor e os tipos de análises que cada autor realizou.

Tabela 5.5 - Levantamento sobre RMF em aplicação em cimentos álcalis-ativados

Autor	Tipo de Rejeito	Tipos de análises
DEFÁVERI <i>et al.</i> , 2019	-Barragem - Fe ₂ O ₃ - 48.9% - SiO ₂ - 40.0%	-Compressão -Flexão -Propriedades microestruturais -Térmica
DUAN <i>et al.</i> , 2016	- Barragem -SiO ₂ - 34.72% - Fe ₂ O ₃ - 12.31%	-Trabalhabilidade -Compressão -Perda de massa -Microestrutura -Dureza (Vickers)
Li <i>et al.</i> , 2015	- Pó de RMF - SiO ₂ - 63.75 % -Fe ₂ O ₃ - 14.46%	-Compressão (densidade) -Compressão - Influência da superfície especial do RMF na compressão

Fonte: DEFÁVERI *et al.*, 2019; DUAN *et al.*, 2016; Li *et al.*, 2015

Defáveri *et al.*, (2019), utilizou o RMF de origem de barragem, no qual apresentava as concentrações de 48.9% de Fe₂O₃ e 40.0% de SiO₂. O seu principal

objetivo é analisar a viabilidade de utilizar o RMF como material principal para a produção de geopolímeros e as análises realizadas foram a compressão, flexão, térmica e as propriedades microestruturais. Os cimentos álcalis-ativados, foi utilizado a base de NaOH com concentrações diferentes, como 8 M, 10 M e 12 M (mol / L). Os RMF como também os resíduos de vidro, passaram pelo processo de moagem, sendo que cada amostra, ficou por um determinado tempo, sendo eles: 1 hora, 2 horas e 3 horas. Um tipo de amostra de geopolímeros foi preparada com base o resíduo de minério de ferro e o outro tipo foi baseado também com RMF e adicionado porcentagens diferentes de resíduo de vidro.

Para a análise de flexão, a solução alcalina com concentração de 12M, que teve o processo de moagem de 3H, e não teve adição de resíduo de vidro, apresentou o melhor resultado, sendo 21,3 MPa. Na análise de compressão, a mesma amostra, foi a que apresentou melhores resultados, após 7 dias, atingiu a resistência de 112,8 MPa. Portanto pode-se observar que o aumento da concentração da solução, somado com um maior tempo de moagem, contribuem para aumentar a resistência à flexão e à compressão (DEFÁVERI *et al.*, 2019).

A análise de propriedades microestruturais, com DRX mostrou que o RMF nas fases de quartzo, hematita e goethita, tem característica de inerte para materiais geopoliméricos. Para a análise térmica, todas as amostras apresentaram um aumento na perda de massa. Essa perda de massa pode ser devido a evaporação de água, que está quimicamente ligada aos compósitos geopoliméricos (DEFÁVERI *et al.*, 2019).

Duan *et al.*, 2016, utilizou o rejeito de minério de ferro de origem de barragem, que apresentava as concentrações de 34.72% de SiO₂ e 12.31% de Fe₂O₃. O objetivo da seu estudo, é analisar as novas propriedades do geopolímeros, que foi composto por cinzas volantes e RMF, e foi ativado alcalinamente por um líquido, com diferentes ciclos térmicos e temperaturas. A pasta de geopolímero sofreu substituição em sua composição, o rejeito de minério de ferro variou as suas concentrações entre 10%, 20% e 30%. O ativador alcalino utilizado neste estudo, foi a combinação de Na₂SiO₃ (solução de silicato de sódio) e NaOH (hidróxido de sódio).

Na análise de trabalhabilidade, foi utilizado o ensaio de teste de penetração de Vicat. Pode observar que à medida que as concentrações de RMF foram aumentando, a trabalhabilidade reduziu do geopolímero, na amostra de 30% o resultado obtido foi de 125 mm e na amostra sem rejeito o valor foi de 181 mm de diâmetro. Essa redução

da trabalhabilidade do geopolímeros, pode ser devido a maior adsorção de água do RMF, por apresentar maior superfície específica (DUAN *et al.*, 2016).

Para a análise de resistência a compressão, ela foi analisada de duas formas: antes dos ciclos térmicos e após os ciclos térmicos. O ciclo térmico utilizado, foi que após 28 dias de cura, as amostras foram submetidas a temperaturas de 200°C, 400°C e 800°C e em seguida deixou resfriar lentamente a temperatura ambiente. Na análise antes dos ciclos térmicos, a amostra com 20% de RMF apresentou os melhores resultados de resistência à compressão, sendo 16,2% maior do que a amostra de referência. A amostra com 30% de RMF apresentou valores inferiores à da referência (DUAN *et al.*, 2016).

O aumento dessa resistência, pode ser devido ao RMF se comporta como micro-agregado e preencher os espaços vazios, microestruturas, da pasta de geopolímeros. O RMF como atividade pozolânica reage com $(Ca(OH)_2, CH)$ e forma C-S-H, géis responsáveis pelo o aumento da força da pasta de geopolímeros. O gel aluminossilicato é responsável pela fase de ligação de interpartículas, que causa o aumento da força da pasta geopolimérica. (DUAN *et al.*, 2016).

Na análise de resistência a compressão depois dos ciclos térmicos, quando ocorre a substituição por RMF, a resistência aumenta. Contudo ao substituir a 30% a resistência começa a reduzir. A resistência à compressão, em ambas as temperaturas, mostrou que as amostras apresentaram uma maior resistência até ao 3º ciclo, mas começa a reduzir bastante até ao 7º ciclo. As temperaturas mais elevadas, também mostrou uma redução na resistência nas amostras. Esse fenômeno é devido ao fato de ocorrer desenvolvimento de defeitos microestruturais internos e ocasionando surgimento de trincas devido às elevadas temperaturas. Para a análise de perda de massa, a adição de RMF impede uma maior perda de massa, com a concentração inferior a 30% do rejeito (DUAN *et al.*, 2016).

Na análise de microestrutura, ao substituir a cinza volante por 20% de RMF, resulta em uma redução da porosidade aparente e das microfissuras, portanto causando uma microestrutura mais densa. Resultou também em uma melhor resistência térmica, devido a uma estrutura mais densa e uma microestrutura mais homogênea. Pois a alta resistência está relacionada com uma microestrutura compacta, e o aumento da temperatura causa a formação de tensões e rachaduras, resultando na redução das propriedades mecânicas (DUAN *et al.*, 2016).

Para a análise de dureza de Vickers, mostrou que as amostras que substituíram parcialmente a cinza volante pelo rejeito de minério de ferro, apresentaram um melhor desempenho mecânico. Os resultados obtidos pela resistência à compressão, microestruturas e dureza de Vickers, mostra que a substituição de cinzas volantes por RMF, apresentou um melhor desempenho. E todas essas análises são compatíveis com os resultados, pois em todas mostraram que a incorporação de RMF melhora o desempenho (DUAN *et al.*, 2016).

LI *et al.*, (2015) utilizou pó de rejeito de minério de ferro, que apresentava as concentrações de 63.75% de SiO_2 e 14.46% de Fe_2O_3 . O objetivo é descobrir se o pó do RMF pode melhorar a resistência à compressão do concreto espumante de escória, ativado alcalinamente. Os materiais utilizados foram: pó de escória (com área superficial de $400 \text{ m}^2/\text{g}$), pó de rejeito de minério de ferro e cimento portland (o ativador foi produzido pelo próprio autor). As análises realizadas foram: resistência à compressão e a influência de diferentes densidades aparente na resistência à compressão.

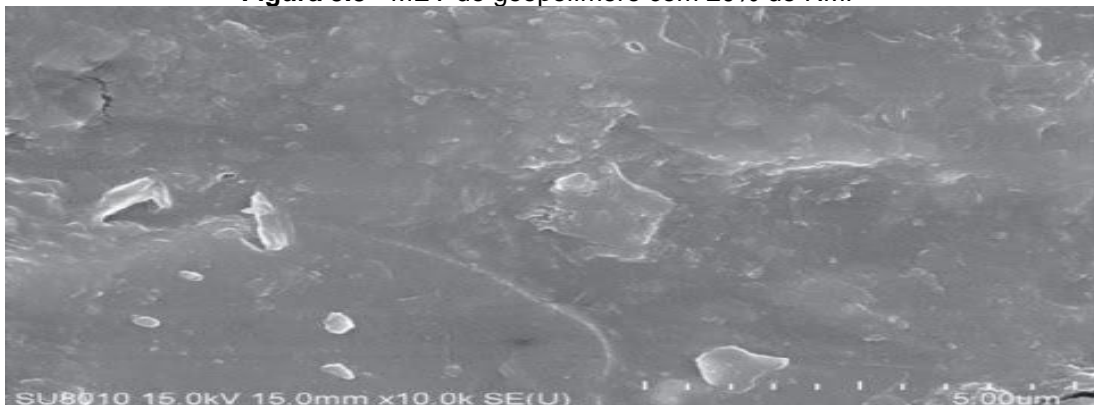
Para a análise de influência da densidade na compressão, à medida que aumenta a densidade, aumenta gradativamente a resistência à compressão. As composições das amostras foram: 45% de pó de escória; 35% de rejeito de minério de ferro e 15% de cimento portland e a densidade aparente variou de $250 \text{ Kg}/\text{m}^3$ a $500 \text{ m}^2/\text{g}$. A amostra que apresentou melhor resultado, foi a que tinha a densidade aparente de $500 \text{ Kg}/\text{m}^3$, pois apresentou a resistência a compressão de 2.59 Mpa em 8 dias (LI *et al.*, 2015).

Na outra análise, a influência do rejeito de minério de ferro na resistência à compressão, preparou diversas amostras, com concentrações diferentes de RMF e pó de escória, porém manteve a concentração de 15% de cimento portland. Manteve também a densidade aparente do concreto de espuma em $500 \text{ Kg}/\text{m}^3$, justamente para observar a influência do RMF. A amostra que apresentou melhor resultado, foi a amostra que tinha as seguintes concentrações: 35% de RMF; 45% de pó de escória e 15% de cimento portland. O resultado alcançado pela esta amostra no teste de resistência à compressão foi de 2,59 MPa em 28 dias. Pode-se observar que a medida que aumentou a concentração de minério de ferro, até 35%, aumentou a resistência, todavia a partir de 35%, a resistência começou a reduzir. Pode ser atribuído ao fato da dispersão das partículas de RMF (LI *et al.*, 2015).

Na análise de influência da superfície especial do rejeito de minério de ferro na resistência à compressão, manteve a densidade aparente do concreto de espuma em 500Kg/m^3 e a concentração de RMF em 15% para as amostras. Alterou apenas a finura do rejeito, variando entre a malha de 50 a 200. A amostra que apresentou maior resistência à compressão em 28 dias, foi a amostra da malha 200, que atingiu a resistência de 2,56 MPa. Portanto mostrou que à medida que aumentava a finura do RMF, aumentava a resistência à compressão. O RMF por ser muito fino, as suas partículas se distribuem de forma mais homogênea no concreto de espuma (LI *et al.*, 2015).

É possível visualizar que nos três estudos apontados, mostrou que ao adicionar uma porcentagem de RMF ao geopolímeros, ocorre um aumento das propriedades mecânicas. Podendo ser ao fato de que o RMF se apresenta como material muito fino e preenchendo os poros dos geopolímeros resultando em uma microestrutura mais densa, como pode ser visualizada na Figura 5.3.

Figura 5.3 - MEV do geopolímero com 20% de RMF



Fonte: DEFÁVERI *et al.*, 2019

Por meio do levantamento realizado na tabela 5.5 e os estudos posteriores e relacionados a esta tabela, pode-se observar que o RMF pode ser incorporado em cimentos álcalis-ativados. Os RMF que passaram por maior tempo de moagem e com as concentrações molares maiores de NaOH, apresentaram maiores resistências mecânicas. As concentrações de RMF que apresentaram maiores vantagens, foram de até 35%, contudo também afeta a trabalhabilidade das amostras, pois o RMF são finos e com isso demandam mais água.

Na Tabela 5.6, mostra os principais resultados, positivos e negativos, sobre o que cada autor encontrou em suas análises ao utilizarem o RMF.

Tabela 5.6 - Principais resultados sobre RMF em aplicação em cimentos álcalis-ativados

AUTOR	TIPOS DE ANÁLISES	RESULTADOS
DEFÁVERI <i>et al.</i> , 2019	-Compressão -Flexão -Propriedades microestruturais -Térmica	- ↑Compressão (maior Mol/L e maior tempo de moagem) -↑Perda de massa
DUAN <i>et al.</i> , 2016	-Trabalhabilidade -Compressão -Perda de massa -Microestrutura -Dureza (Vickers)	- ↑ Aumento na compressão -↓ Trabalhabilidade
Li <i>et al.</i> , 2015	-Compressão (densidade) -Compressão - Influência da superfície especial do RMF na compressão	- ↑ Aumento na compressão (até 35% de RMF) -↓ Redução na compressão (acima de 35% de RMF)

Fonte: DEFÁVERI *et al.*, 2019; DUAN *et al.*, 2016; Li *et al.*, 2015

5.4 UTILIZAÇÃO DO RESÍDUO DE MINÉRIO DE FERRO EM MATERIAIS CERÂMICOS

Os materiais cerâmicos, como: blocos e ladrilhos, são compostos praticamente por argila para a sua fabricação. Uma das etapas de sua fabricação é o processo de queima. Após passar pelo processo de elevadas temperaturas, esses materiais cerâmicos apresentam uma maior resistência (RACANELLI *et al.*, 2020). Encontrou-se dois autores que utilizaram RMF em materiais cerâmicos e montou-se a Tabela 5.7, onde mostra os tipos de rejeitos, análises que cada autor realizou.

Tabela 5.7 - Levantamento sobre RMF em aplicação em materiais cerâmicos

Autor	Tipo de Rejeito	Tipos de análises
MENDES <i>et al.</i> , 2019	- Barragem -SiO ₂ - 63.09% - Fe ₂ O ₃ - 12.31%	-Porosidade -Absorção de água -Compressão -Retração linear
Silva <i>et al.</i> , 2014a	-Flotação - Separação magnética fina - Separação magnética grossa	-Resistência à flexão -Absorção de água -Porosidade

Fonte: MENDES *et al.*, 2019; Silva *et al.*, 2014a;

Mendes *et al.*, (2019) utilizou rejeitos de minério de ferro de origem de barragem, o qual apresentava as concentrações de 63.09% de SiO₂ e 12.31% de Fe₂O₃. Tinha como objetivo estudar uma fórmula, de composição de RMF com argila, para produzir blocos cerâmicos. Para a montagem das amostras foram utilizados a variação de RMF entre 0% a 40% e de 30% a 70% para as argilas.

A adição de RMF aumentaram os valores da densidade aparente seca, esse fator pode ser devido ao fato da alta massa específica e presença de partículas grossas. Na análise de porosidade, a temperatura de 850°C apresentou maior porosidade, devido a interação entre o RMF e a argila amarela, pois ambos apresentam alto teor de areia. Para a análise de absorção de água, ao adicionar o RMF, ocorre o aumento da absorção de água, principalmente nas temperaturas de 850°C e 950°C. Na interação entre a argila cinza e o RMF, causa uma redução de absorção de água, nas temperaturas 850°C e 950°C. Ao analisar as misturas na temperatura de 1050°C, tanto com a argila amarela e a cinza, ocorreu um aumento da absorção de água (MENDES *et al.*, 2019).

Na análise de resistência a compressão, na temperatura de 850°C, a argila cinza é a responsável pela resistência. O aumento da resistência a compressão aumentou à medida que a temperatura, foi aumentando. As concentrações das amostras foram: 29,1% de RMF, 40,9% de argila cinza e 30% de argila amarela, e conseguiu atingir a resistência a compressão de 17,56 MPa em uma temperatura de 950°C (MENDES *et al.*, 2019).

Silva *et al.*, (2014) utilizou rejeitos de minério de ferro de origem de barragem, contudo utilizou de três diferentes tipos de beneficiamento. Os beneficiamentos utilizados foram: flotação; separação magnética fina e separação magnética grossa. Foram preparadas amostras, cada amostra tinha como matéria prima argila e foram adicionadas as concentrações de 0% e 5% do RMF, sendo que para cada amostra foi adicionado apenas um tipo de rejeito. As amostras passaram pelo processo de queima no qual passaram por uma temperatura de 950°C. Todos os rejeitos apresentaram a concentração predominante de Quartzo. Analisou a resistência a flexão das amostras após o processo de queima.

Na análise de resistência a flexão, analisou tanto a amostra de referência, com 100% de argila, como as amostras com adição de 0% a 5% de RMF. Nas amostras com RMF, a resistência aumentou em até 30% em relação a amostra referência. O valor para a amostra que tinha apenas argila foi de 5,08 MPa e para as amostras com

RMF, a resistência encontrada foram entre os valores de 6,53 MPa e 6,73 MPa. Para a análise de absorção de água, as amostras com adição de RMF tiveram uma menor absorção, sendo 25,5% e para a amostra com apenas argila, teve o valor de 31% (SILVA *et al.*, 2014).

Para a análise de massa específica aparente, a do RMF, $1,49 \text{ g/cm}^3$, foi menor do que a da argila, $1,57 \text{ g/cm}^3$. Na análise de porosidade, as amostras que continham rejeito, apresentaram uma porosidade maior, sendo 42,5% e as amostras que continham apenas argila, apresentaram 25,6% (SILVA *et al.*, 2014).

No caso ocorreu um aumento da porosidade, o que pode ser devido ao fato do comportamento hidrofóbico dos componentes dos rejeitos (SILVA, 2014). Entretanto à medida que aumentava a temperatura, a porosidade reduziu, devido a formação do vítreo, pois a tensão na superfície do líquido e a capilaridade faz com que as partículas se aproximem, reduzindo a porosidade (MENDES *et al.*, 2019).

Na análise de absorção de água, a adição de RMF reduziu a absorção, que pode ser devido a diferença de sinterabilidade (através da fase vítrea) das massas cerâmicas (SILVA, 2014). A redução da porosidade, devido ao processo de sinterabilidade, faz com que ocorra a redução da absorção de água (MENDES, 2019). Portanto quanto maior a incorporação de rejeito de minério de ferro na amostra, maior a absorção de água, devido ao aumento da porosidade. (MENDES *et al.*, 2019).

Para a análise de resistência à compressão, quanto maior o número de poros, menor será a resistência. A alta concentração de quartzo no rejeito, também influencia na perda de resistência (MENDES *et al.*, 2019). Entretanto a adição de RMF nas amostras, aumentaram a resistência à flexão e também aumentou a porosidade (SILVA, 2014).

Na figura 5.4 é possível visualizar, os blocos cerâmicos preparados com rejeito de minério de ferro, argila amarela e argila cinza, contudo antes de passar pelo processo de queima.

Figura 5.4 - Tijolos produzidos com RMF, argilas amarelas e cinzas, antes da queima

Fonte: MENDES *et al.*, 2019

Por meio do levantamento realizado na Tabela 5.7 e os estudos posteriores e relacionados a esta tabela, pode-se observar que o RMF pode ser incorporado em compostos cerâmicos. Concentrações de RMF até 30% apresentam um desempenho mecânico melhor, e altas temperaturas tendem a aumentar as propriedades mecânicas. As amostras com RMF absorveram mais água e também apresentaram maiores porosidades. O processo de queima, faz com que os blocos cerâmicos com RMF apresentem cores avermelhadas.

Na Tabela 5.8, mostra os principais resultados, positivos e negativos, sobre o que cada autor encontrou em suas análises ao utilizarem o RMF.

Tabela 5.8 – Principais resultados sobre RMF em aplicação em materiais cerâmicos

AUTOR	TIPOS DE ANÁLISES	RESULTADOS
MENDES <i>et al.</i> , 2019	-Porosidade -Absorção de água -Compressão -Retração linear	-↑Aumento compressão -↑Aumento na demanda de água
Silva <i>et al.</i> , 2014a	-Resistência à flexão -Absorção de água -Porosidade	-↑Aumento compressão -↑Aumento na porosidade

Fonte: MENDES *et al.*, 2019; Silva *et al.*, 2014a

5.5 UTILIZAÇÃO DO RESÍDUO DE MINÉRIO DE FERRO EM COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS

A definição de compósitos, é a combinação de dois ou mais materiais, e que cada material contenha propriedades distintas em suas composições (FARIA, 2017; MARQUES, 2015). Um material que é composto por uma pasta de cimento e um agregado, são chamados de compósitos cimentícios (TAVARES JUNIOR, 2018; FARIA, 2017).

Encontrou-se sete autores que utilizaram RMF em compósitos cimentícios e montou-se a Tabela 5.9, onde mostra os autores, os tipos de rejeitos utilizado por cada autor e os tipos de análises que cada autor realizou.

Tabela 5.9 - Levantamento sobre RMF em aplicação em compósitos cimentícios

AUTOR	TIPO DE REJEITO	TIPO DE COMPÓSITO CIMENTÍCIO	TIPOS DE ANÁLISES
ALMADA <i>et al.</i> , 2019	Barragem de rejeitos	Argamassa	-Compressão -Porosidade -Absorção de Água -Elasticidade
CANCIO <i>et al.</i> , 2018	Barragem de Lama	Cimento	-Consistência -Compressão -Porosidade
SHETTIMA <i>et al.</i> , 2016	-	Agregado	- Compressão -Durabilidade -Tração -Elasticidade
KURANCHIE <i>et al.</i> , 2015	-	Agregado	-Trabalhabilidade -Tração Durabilidade
ZHAO <i>et al.</i> , 2014	costa de barragem	Agregado	-Compressão -Flexão -Porosidade -Microestrutura
YI <i>et al.</i> , 2009	-	cimento	- Ativação Térmica

Fonte: ALMADA *et al.*, 2019; CANCIO *et al.*, 2018; SHETTIMA *et al.*, 2016; KURANCHIE *et al.*, 2015; ZHAO *et al.*, 2014; YI *et al.*, 2009

Almada *et al.*, (2019) utilizou o rejeito de origem de barragem, com a concentração de 59,1 % Fe_2O_3 e 25,6% de SiO_2 . Tinha como objetivo adicionar 40% de rejeito de minério de ferro à matriz, de pastas e argamassas, para analisar aspectos de resistência e durabilidade. Sendo que essas avaliações seriam no estado fresco e no estado endurecido. A granulometria do RMF utilizada foi menor que 75 μm . O cimento Portland CPI foi utilizado, por não apresentar adições, e dois tipos de

amostras foram preparados, uma contendo apenas cimento e a outra com a adição de 40% de RMF.

As análises no estado fresco da pasta, para consistência, observaram um aumento de 20,5% na quantidade de água, no fator água/cimento, que é devido ao aumento da área superficial das partículas. As pastas com RMF tiveram um menor índice de consistência, em relação a pasta de referência, que pode ser devido ao rejeito de minério de ferro ser mais fino e mais denso, em relação ao cimento (ALMADA *et al.*, 2019).

Realizou análises também após o estado endurecido das pastas e argamassas. A amostra que tinha RMF, ocorreu um aumento do coeficiente de capilaridade em 15,47%. A porosidade em ambas as argamassas, ficaram em 39% aproximadamente, contudo nas argamassas com RMF, os poros apresentaram menores dimensões, contribuindo com a absorção por capilaridade. A permeabilidade das amostras aumentou e pode observar uma queda na resistividade elétrica, sendo 15,47%, (ALMADA *et al.*, 2019).

Na análise de resistência a compressão, a argamassa com RMF apresentou um aumento de 22,8%, podendo ser devido a porosidade e também ao efeito filler. O módulo de elasticidade dinâmico, também apresentou um aumento de 21,41% com a adição de RMF (ALMADA *et al.*, 2019).

Cancio *et al.*, (2018), utilizou o rejeito de origem de barragem de lama, com a concentração de 59,1 % Fe_2O_3 e 25,6% de SiO_2 . Para a preparação das amostras, utilizou os materiais como: RMF e cimento Portland CP-V ARI. O RMF passou pelo processo de moagem, para obter uma granulometria de 74 μm . Preparou amostras de referência, com apenas cimento e preparou amostras com a proporção de cimento e RMF, de 1:1, variando apenas o fator água, sendo 31% e 22,08%.

Na análise de índice de consistência, foi possível avaliar o consumo mínimo de cimento e a trabalhabilidade das pastas. As pastas com substituição de RMF e com fator de água com 31%, apresentou uma dispersão de 22,19% maior do que as outras pastas (CANCIO *et al.*, 2018).

Para a análise de resistência a compressão, ao adicionar o RMF na pasta, ocorre um aumento na resistência de 22%, para a amostra com fator de água, com 22.08%. Esse aumento da resistência pode ser devido: as reações químicas entre o cimento e o RMF e a granulometria fina do rejeito, preenchendo os poros e tornando uma pasta mais compacta. Para a amostra com fator de água de 22,08%, apresentou

uma maior porosidade, que pode ser devido à dificuldade de moldar (CANCIO *et al.*, 2018).

Shettima *et al.*, 2016 utilizou o rejeito de minério de ferro, com a concentração de 56,0% de SiO₂ e de 8,3 % Fe₂O₃, e as principais fases de seus minerais, foram: quartzo; gibbsite e hematita. Tinha como objetivo estudar as propriedades de resistência e durabilidade do concreto, quando incorporando o RMF no lugar da areia, assim sendo utilizar o rejeito como agregado. Para a preparação das misturas, utilizou os seguintes materiais: agregado grosso de 10mm; fator água/cimento de 0,5; cimento de 100mm e 150mm; superplastificante de éter policarboxílico de 0,5% e RMF em diferentes concentrações. As concentrações utilizadas de RMF para substituir a areia, foram: 25%; 50; 75% e 100%.

Na análise de trabalhabilidade, ao substituir a areia pelo RMF, resultou em redução na trabalhabilidade, sendo que ao substituir a areia por 100%, reduziu em 38% a trabalhabilidade. Essa redução da trabalhabilidade, pode ser associada a alta absorção de água, superfície angular e granulometria fina do RMF. A trabalhabilidade do concreto está diretamente relacionada a granulometria fina do agregado que será utilizado para a sua produção (SHETTIMA *et al.*, 2016).

Para a análise de resistência a compressão, no tempo de cura de 7 dias, a maior resistência das amostras com RMF, foi a com 75%, apresentando o valor de 32,8 Mpa e a de referência foi de 32,0 Mpa. Para o tempo de cura de 14 dias, a maior resistência das amostras com RMF, foi a de 25%, que apresentou o valor de 35,7 Mpa e a de referência foi de 34,3 Mpa. Para o tempo de cura de 28 dias, todas as amostras com RMF, foram superiores a amostra de referência, sendo que a amostra com 25% de RMF, apresentou o valor de 42,9 Mpa. Os motivos que podem ter contribuído com o aumento da resistência, são: granulometria fina do rejeito preenchendo os poros e uma concentração mais elevada de ferro no rejeito. A textura áspera e angular do RMF, facilita a reação entre o cimento e a interface agregada do concreto. A reação secundária, que tem em excesso a Ca (OH)₂, no processo de hidratação entre o cimento e o RMF, produz o C-S-H, que é responsável por aumentar a resistência do concreto (SHETTIMA *et al.*, 2016).

Para a análise de resistência a tração, em todos os tempos de cura, as amostras com RMF foram superiores as amostras de referência. Para o tempo de cura de 28 dias, a amostra com 25% de RMF, apresentou o maior valor, de 4,7 Mpa, e o de referência apresentou 3,9 Mpa. Um fator que pode ter aumentado a resistência a

tração, para as amostras com RMF, é as partículas finas do rejeito melhorar a ligação entre os agregados e a pasta de cimento (SHETTIMA *et al.*, 2016).

Na análise de módulo de elasticidade, a amostra que apresentou o maior valor após 28 dias de cura, foi a com 100% de RMF, o valor encontrado foi 35,8 GPa. Para a amostra de referência o valor foi de 21,6 GPa, sendo 41,3% inferior ao maior valor encontrado. O aumento dessa resistência pode ser associado a resistência a compressão, a porosidade e também a ligação entre agregados e a pasta cimento (SHETTIMA *et al.*, 2016).

Para as análises de durabilidade, foram verificados os seguintes assuntos: retração por secagem; absorção de água; teste de ataque rápido de cloretos; profundidade de carbonatação e teste de resistência ácida. Na análise de retração por secagem aos 90 dias, a amostra de referência foi a que teve a maior retração, e para a amostra com RMF, com menor retração foi a de 25% de RMF, que apresentou uma retração de 24%. Os fatores que podem ter levado a uma menor retração ao adicionar o RMF, são as suas partículas finas que reduziram a porosidade. Outro fator que pode ter contribuído com a menor retração é o RMF absorver mais água e perder mais lentamente essa água. (SHETTIMA *et al.*, 2016).

A análise de absorção de água, mostrou que com o passar do tempo, a permeabilidade do concreto reduziu e que as amostras com RMF absorveram maior volume de água, que pode ser devido aos finos grãos do rejeito. A taxa de penetração de cloretos aumenta, quando substitui a areia por RMF, que pode ser devido à aos grãos finos do rejeito, que podem não resistir a penetração dos cloretos. A carbonatação diminuiu em amostras com o RMF, que pode ser devido a quantidade de poros compactados e a umidade do material que não permite a entrada do CO₂ no concreto. As amostras com RMF apresentaram maiores taxas de redução de massa, que pode ser devido as partículas finas do rejeito (SHETTIMA *et al.*, 2016).

Kuranchie *et al.*, (2015) utilizou o rejeito de minério de ferro, com a concentração de 57,31% de SiO₂ e de 25,13 % Fe₂O₃, a granulometria foram: 75 µm (fino) e 32 µm (grosso). Tinha como objetivo estudar a viabilidade de utilizar o rejeito de minério de ferro, como agregado, fino ou grosso, para a fabricação de concreto. Os materiais que foram utilizados para a preparação das amostras, foram: cimento Portland; areia de tijolo; brita como agregados grosso; RMF finos e grossos. As amostras foram preparadas com o fator de 0,5 água/cimento, e com o traço de 1:2:3,

sendo: cimento; agregados finos e agregados grossos. Para as amostras de concretos com rejeito, substituiu 100% da areia pelo RMF.

Na análise de Slump, o valor encontrado para o concreto com o RMF, apresentou o valor de 20 mm, sendo que é considerado como baixa trabalhabilidade. A análise de resistência a compressão, mostrou que foi maior a resistência em todos os tempos de cura, para os concretos que tinham o RMF. Aos 28 dias de cura, o concreto com RMF atingiu o valor de 36,95 Mpa, sendo 11,56% maior do que o concreto de referência. O fator que pode ter contribuído para esse aumento, é a composição química do RMF, que apresentou uma concentração alta de ferro, e que pode acelerar a hidratação do cimento. Para a análise de resistência a tração, as amostras com RMF apresentaram valores inferiores a amostra de referência. A amostra de referência teve um valor de 3,36 MPa e a amostra com RMF, obteve o valor de 2,82 Mpa. Uma possibilidade que pode ter causado a um valor inferior de resistência a tração, é os rejeitos serem finos e demandar uma maior quantidade de água e reduzindo a ligação da pasta de cimento aos agregados. Os concretos com RMF apresentaram um alto teor alcalino, que pode reduzir a corrosão por ataque químico e com isso aumentando a durabilidade (KURANCHIE *et al.*, 2015).

Zhao *et al.*, (2014) utilizou o rejeito de minério de ferro, com a concentração de 63,07% de SiO₂ e de 13,82 % Fe₂O₃. Tinha como objetivo estudar a utilização do RMF como agregado fino e analisar as propriedades do concreto de alto desempenho. Os materiais utilizados para a preparação das amostras foram: cimento Portland; cinzas volantes; sílica do tipo F; fibra de aço de 13mm; superplastificante; areia natural e rejeito de minério de ferro. As amostras foram compostas com diferentes concentrações de RMF, contudo a composição cimentícia das amostras ficaram fixadas em: 50% de cimento; 35% de escoria; 15% de sílica e 0.98% de superplastificante. As variações foram nas concentrações dos agregados, sendo substituindo a areia pelo RMF, essas concentrações foram: 0%;20%;30%;40%;50% e 100%.

Na análise de resistência a compressão, no tempo de cura de 28 dias, a amostra de referência apresentou uma resistência superior as amostras com RMF. No tempo de cura com 90 dias as amostras com 20%,30% e 40% foram as suas resistências foram superiores do que a amostra controle, sendo que a amostra de 20% atingiu o valor de 118,2 Mpa. Com a cura a vapor, a amostra de controle apresentou valores superiores a todas as amostras com RMF. As amostras que tiveram adição

de 2% de fibra de aço, tiveram valores semelhantes na cura normal. Para a cura a vapor, em 28 dias, que apresentaram uma maior diferença, a amostra com 20% apresentou uma resistência de 139,2 MPa. No período de cura de 90 dias, as amostras com 30% e 40% de RMF, apresentaram os maiores valores, sendo 149, MPa e 148,9 Mpa. O aumento da resistência na cura padrão, pode estar relacionada a reação pozolânica dos aditivos minerais. As amostras com tratamento térmico, pode ser ao processo de aceleração da hidratação do cimento (ZHAO *et al.*, 2014).

A cura padrão não mostrou alteração na resistência a flexão, todavia para a cura a vapor, apresentou resistências maiores ao período de 28 dias. Ao introduzir as fibras de aço nas amostras, aumentaram as resistências em até 70% para as curas padrão e após 90 dias. Esse fator pode ser devido a dispersão das fibras de aço e pela interação entre as fibras e a matriz. A interação entre a microestrutura da zona interfacial da matriz da fibra e a homogeneidade da matriz que afeta o comportamento da descolagem da fibra. Uma granulometria que fosse mais fina do rejeito, poderia proporcionar uma matriz mais homogênea e apresentar resultados melhores para a resistência a flexão. Os resultados foram melhores com a concentração de 20% a 40% para as propriedades mecânicas (ZHAO *et al.*, 2014).

Na análise de porosidade A mostra analisada foi a com concentração de 30% de RMF. As bolhas de ar são formadas durante a etapa de mistura da pasta, e onde ocorre a maior probabilidade de serem formadas em um fluxo baixo e alta viscosidade. As bolhas de ar aprisionadas provocam os macro-poros e os poros de gel formados durante a hidratação causam os mirco-poros. Com o passar do tempo de cura, os produtos de hidratação preenchem os poros, e fez com que após 28 dias, a porosidade total passou 100 nm para 20 nm. A porosidade aumentou à medida que aumentava a concentração de RMF, que pode ser devido a uma maior demanda de água. Mas a adição de RMF não altera de forma significativa a durabilidade e a propriedade de transporte do material. A adição de RMF nas amostras, aumentaram a porosidade total e a resistência dos materiais cimentícios está relacionada a sua porosidade (ZHAO *et al.*, 2014).

Para a análise de microestrutura o RMF por apresentar partículas finas, pode absorver mais água e com isso aparecer espaços para o surgimento do CH cristalino, durante a etapa de hidratação e, portanto, formar o ITZ poroso. Essa formação do ITZ pode ser prejudicial as propriedades do material (ZHAO *et al.*, 2014).

Yi *et al.*, (2009) utilizou o rejeito de minério de ferro, com a concentração de 63,07% de SiO₂ e de 13,82 % Fe₂O₃. Tinha como objetivo estudar a possibilidade de utilizar o RMF como matéria prima para o cimento, utilizando a ativação térmica para promover as propriedades cimentícias no RMF. As amostras foram preparadas de forma proporcional, sendo: rejeito de minério de ferro, cal e gesso. Passaram pelo processo de moagem, e em seguida pelo processo de calcinação nas temperaturas de 500, 700 e 900°C e depois passaram pelo processo de moagem novamente. A amostra com 30% de RMF, após a calcinação de 900°C, apresentou a resistência a compressão de 48,5 Mpa.

Por meio do levantamento realizado na tabela 5.9 e os estudos posteriores e relacionados a esta tabela, pode-se observar que o RMF pode ser incorporado em compósitos cimentícios. Para a sua utilização em argamassas, ao incorporar o RMF melhorou o desempenho mecânico, contudo aumentou a demanda de água. Na utilização do RMF em cimento, apresentou um aumento na resistência a compressão e aumento da porosidade. Em sua utilização como agregado, observou-se que ocorreu um aumento das propriedades mecânicas, contudo a trabalhabilidade foi reduzida. Na Tabela 5.10, mostra os principais resultados, positivos e negativos.

Tabela 5.10 - Principais resultados sobre RMF em aplicação em compósitos cimentícios

AUTOR	ANÁLISES	RESULTADOS
ALMADA <i>et al.</i> , 2019	-Compressão -Porosidade -Absorção de Água -Elasticidade	-↑Aumento na compressão -↓Baixa consistência
CANCIO <i>et al.</i> , 2018	-Consistência -Compressão -Porosidade	-↑Aumento compressão -↑Aumento na porosidade
SHETTIMA <i>et al.</i> , 2016	- Compressão -Durabilidade -Tração -Elasticidade	-↑Aumento na tração -↑Maior demanda de água
KURANCHIE <i>et al.</i> , 2015	-Trabalhabilidade -Tração Durabilidade	-↑Aumento na tração -↓Trabalhabilidade
ZHAO <i>et al.</i> , 2014	-Compressão -Flexão -Porosidade -Microestrutura	-↑Aumento compressão -↑Aumento na porosidade
YI <i>et al.</i> , 2009	- Ativação Térmica	-↑Aumento na compressão

Fonte: (ALMADA *et al.*, 2019; CANCIO *et al.*, 2018; SHETTIMA *et al.*, 2016; KURANCHIE *et al.*, 2015; ZHAO *et al.*, 2014; YI *et al.*, 2009)

6 POTENCIAIS ESTUDOS

No estudo de utilização de RMF em pavimentos, após estudar os seis autores mencionados na Tabela 5.2, pode-se concluir que é possível incorporar o RMF em pavimentos. Contudo é necessário ainda analisar qual seria a proporção ideal, até que ponto pode ser a concentração de RMF, para aumentar propriedades mecânicas e a trabalhabilidade não ser afetada.

Para o estudo de utilização e RMF em tintas, após levantar dados sobre os dois autores mencionados na Tabela 5.4, pode-se observar que ainda existem poucos estudos sobre esse assunto. Contudo alguns estudos são necessários, como na parte de desempenho lumínico e analisar também se após um incêndio ocorre a liberação de alguns gases tóxicos.

No estudo de utilização de RMF em cimentos álcali-ativados, e analisando os três autores mencionados na tabela 5.6, pode-se observar que apresenta vantagens. Contudo falta um maior aprofundamento, sobre até que ponto a granulometria fina do RMF aumenta a propriedades mecânicas e começa a afetar a trabalhabilidade. Se o tipo de ativador alcalino pode interferir nas propriedades mecânicas, se o RMF pode ser utilizado como ativador alcalino. Realizar um estudo mais aprofundado, como o RMF atua na microestrutura dos cimentos álcali-ativados e como ocorre a formação de C-S-H na incorporação do RMF. Se a área superficial pode interferir na porosidade e absorção de água.

Para o estudo de utilização de RMF em compostos cerâmicos, é possível incorporar o RMF e apresentar resultados satisfatórios. Entretanto precisa aprofundar mais sobre a formação da fase vítrea, se pode estar relacionada ao aumento da temperatura, que causa uma redução da porosidade. Outro assunto a ser estudado, e qual seria o RMF ideal para compostos cerâmicos, qual seria o beneficiamento mais adequado para se utilizar o RMF em compostos cerâmicos.

Para o estudo de utilização de RMF em compósitos cimentícios, é possível incorporar o RMF e apresentar bons resultados. Como argamassa, aprofundar mais sobre como melhorar a trabalhabilidade e como a área superficial das partículas do RMF interferem em suas propriedades. Em sua utilização como cimento, estudar como são as reações químicas entre o RMF e o cimento e a sua trabalhabilidade. Estudar também o processo de hidratação que ocorre com o cimento quando tem

adição de RMF. Para a utilização do RMF como agregado, é necessário aprofundar mais os estudos relacionados ao motivo do RMF perder água mais lentamente, se a composição química do rejeito pode contribuir para o aumento das propriedades mecânicas. A reação pozolânica dos minerais podem interferir nas propriedades dos compósitos cimentícios

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Por meio dos levantamentos analisados e dos estudos abordados, é possível observar que o rejeito de minério de ferro é complexo, mas devem ser feitos estudos contínuos, para descobrir a melhor maneira de reaproveitá-los. A sua caracterização não tem um padrão pré-definido, apresenta diversidades químicas, físicas, granulométricas, mineralógicas e de dureza. O tipo de jazida pode ser um influenciador dessas propriedades distintas, mas também o tipo de beneficiamento no qual o rejeito de minério de ferro é tratado pode influenciar esses comportamentos divergentes. Portanto ao assunto relacionado as propriedades dos rejeitos de minério de ferro são necessários estudos mais aprofundados, para então começar a compreender o que cada beneficiamento influência nas suas propriedades.

Ao analisar as utilizações dos rejeitos de minério de ferro em materiais da construção civil, pode-se observar que ele apresentou vantagens nos materiais ao quais foram incorporados, contudo também mostrou algumas desvantagens. As principais vantagens apresentadas foram os aumentos nas resistências mecânicas, flexão, tração e elasticidade mecânicas. Apresentou também aumento na durabilidade dos materiais, a coloração ser favorável as cores cerâmicas. As desvantagens em sua grande maioria foram relacionadas a uma maior absorção de água, aumento da porosidade e uma redução na trabalhabilidade. Contudo em todos os tipos de materiais, os resultados foram satisfatórios, atingindo os valores semelhantes as amostras de referências. Mostraram resultados promissores que podem ser viáveis economicamente e ambientalmente, pois podem reduzir o número de rejeitos que são armazenados em barragens e em pilhas.

Um estudo que pode ser promissor é analisar vários tipos de jazidas diferentes, contudo com o mesmo tipo de beneficiamento para a incorporação do RMF em um determinado tipo de material da construção civil. Outro tipo de estudo promissor, é pegar o RMF de uma única jazida e realizar diversos tipos de beneficiamento e depois incorporar em um material da construção civil. Após esses estudos poderá ter um maior entendimento sobre o comportamento do RMF. Como o RMF pode minimizar os impactos negativos ambientais e os cimentos álcali-ativados tem potencial para serem ecologicamente viáveis, podem ser os estudos que serão mais pesquisados futuramente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMADA, B, S.; CANCIO, A, S.; DUARTE, M, S. et al. Reuso de rejeito de minério de ferro em compósitos cimentícios. In: VI CONGRESSO DE ENGENHARIA CIVIL, 2019, Juiz de Fora. **Anais [...]**. Juiz de Fora: Templo, 2019. v. 1, p. 136-149, mai. 2019. Disponível em: <https://www.ufjf.br/congressodeengenharia/anais-vi-conenge-2019/>. Acesso em: 12 abr. 2020.
- ANDRADE, Bruna Dias de. **Estudo da obtenção de geopolímero a partir de aluminossilicato sintetizado via sol-gel**. 75 f. 2019. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Demc, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2019.
- APAZA, F, R.; GUIMARAES, A, C, R.; SOUSA, M, A, D, S. et al. Estudo sobre a utilização de Resíduo de Minério de Ferro em microrrevestimento asfáltico. **Transportes**. v. 26, n. 2, p. 118–138, ago. 2018.
- BASTOS, Lucas Augusto de Castro. **Utilização de rejeito de barragem de minério de ferro como matéria prima para infraestrutura rodoviária**. 2013. 112 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2013.
- BASTOS, L, A, D, C.; SILVA, G, C.; MENDES, J, C. et al. Using Iron Ore Tailings from Tailing Dams as Road Material. **Journal Of Materials In Civil Engineering**. v. 28, n. 10, p. 04016102-9, out. 2016.
- BEZERRA, C. G. **Caracterização Do Rejeito De Minério De Ferro (lot) E Avaliação Da Sua Influência No Comportamento Físico-Químico E Mecânico De Pastas De Cimento**. 140 f. Dissertação de mestrado (Pós-Graduação em Engenharia Civil, COPPE) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.
- BOCCAMINO, Guilherme Denardi. **Desenvolvimento de geometria para empilhamento de rejeito desaguados de minério de ferro: estudo de caso para os rejeitos gerados na instalação de tratamento de minérios itabiríticos (ITM-I) em operação na Mina do Pico**. 2017. 110 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2017.
- BORGES, P, H, R. LOURENCO, T, M, D, F.; FOUREAUX, A, F, S. et al. Estudo comparativo da análise de ciclo de vida de concretos geopoliméricos e de concretos à base de cimento Portland composto (CP II). **Ambiente Construído**., Porto Alegre. v. 14, n. 2, p. 153-168, jun 2014.
- BRASIL. Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010. Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais, cria o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/ato2007-2010/2010/lei/l12334.htm. Acesso em: 17 mar. 2020.

- CAI, J.; LI, X.; TAN, J. et al. Thermal and compressive behaviors of fly ash and metakaolin-based geopolymer. **Journal Of Building Engineering**. v. 30, p. 101307, jul. 2020.
- CANCIO, A, S.; COELHO, J, R, C.; DUARTE, M. et al. Study of the Reuse of Iron Ore Tailing in Cementitious Compounds. **International Journal of Science and Engineering Investigations**. v. 7, n. 77, p. 77, jun. 2018.
- CAMPOS Junior, Fernando Luiz Câmara. **Caracterização tecnológica de misturas de “sinter-feed” e “pellet-feed” empregando diferentes rotas de sinterização em escala piloto**. 2018. 103 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2018.
- CARDOSO, Fernando de Paula et al. Processos de produção e avaliação de requisitos de desempenho de tintas para a construção civil com pigmentos de solos. **Ambiente Construído.**, Porto Alegre, v. 16, n. 4, p. 167-183, Dec. 2016.
- CARRASCO, E, V, M.; MAGALHAES, M, D, C.; SANTOS, W, J, D. *et al.* Characterization of mortars with iron ore tailings using destructive and nondestructive tests. **Construction and Building Materials**. v. 131, p. 31–38, jan. 2017.
- CORDEIRO, L. C. A. **Caracterização de rejeito de beneficiamento de minério de ferro em faixas ultrafinas antes e após tratamento térmico**. 2014. 117 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2014.
- COSTA, Ayrton Vianna. **Utilização do rejeito de sinter feed como agregado na produção de peças de concreto para pavimentação**. 2009. 156 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Demc, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.
- COSTA, A, V.; GUMIERI, A, G.; BRANDAO, P, R, G. Piso intertravado produzido com rejeito de sinter feed. **Rev. IBRACON Estrut. Mater.**, São Paulo, v. 7, n. 2, p. 244-259, Abr. 2014.
- CSN MINERAÇÃO S.A. (Brasil). Companhia Siderúrgica Nacional. MINÉRIO DE FERRO. 2020. Disponível em: http://www.csn.com.br/conteudo_pti.asp?idioma=0&tipo=61062&conta=45. Acesso em: 12 abr 2020.
- DAVIDOVITS, Joseph. Geopolymers: Ceramic-like inorganic polymers *Journal of Ceramic Science and Technology*, Saint-Quentin. v. 8, n. 3, p. 335-350, ago. 2017.
- DAS, S, Kumar.; KUMAR, S.; RAMACHANDRARAO. et al. Exploitation of iron ore tailing for the development of ceramic tiles. **Waste Management**. v. 20, n. 8, p. 725-729, dez. 2000.
- DEFÁVERI, K, C, S.; SANTOS, L, F.; CARVALHO, J, M, F. et al. Iron ore tailing-based geopolymer containing glass wool residue: a study of mechanical and

microstructural properties: A study of mechanical and microstructural properties. **Construction And Building Materials**. v. 220, p. 375-385, set. 2019.

DUAN, P.; YAN, C.; ZHOU, W. et al. Fresh Properties, Compressive Strength and Microstructure of Fly Ash Geopolymer Paste Blended With Iron Ore Tailing Under Thermal Cycle. **Construction and Building Materials**. v. 118, p. 76-88, ago. 2016

FARIA, Thalles Morais. **Estudo numérico em concreto reforçado com fibras de aço utilizando o método dos elementos finitos e modelos constitutivos**. 2017. 95 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2017.

FERRANTE, Fernanda. **Estudo de viabilidade para recuperação de minério de ferro em rejeitos contidos em barragens**. 2014. 85 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2014.

FIGUEIRA, H, V.; LUZ, A, B.; ALMEIDA, S, L, M. et al. Britagem e moagem. In: Tratamento de minérios. 5. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010. cap. 4, p. 143-210.

FIGUEIREDO, Vinícius Costa. **Estudo da adição de lama de minério de ferro no processo de pelotização**. 2018. 100 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2018.

FIGUEIREDO, Marcelo Marques. **Estudo de metodologias alternativas de disposição de rejeitos para a mineração casa de pedra – congonghas/mg**. 2007. 147 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Geotécnica, Nugeo, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2007.

FONTES, W, C.; MENDES, J, C.; SILVA, S, N, da. et al. Mortars for laying and coating produced with iron ore tailings from tailing dams. **Construction And Building Materials**. v. 112, p. 988-995, jun. 2016.

GALVÃO, J, L, B.; ANDRADE, H, D.; BRIGOLINI, G, J. et al. Reuse of iron ore tailings from tailings dams as pigment for sustainable paints. **Journal Of Cleaner Production**. v. 200, p. 412-422, nov. 2018

GODINHO, Dalter Pacheco. **Pavimento intertravado: uma reflexão sob a ótica da durabilidade e sustentabilidade**. 2009. 158 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Arquitetura, Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.

GOMES, Ana Cláudia Franca. **Estudo de aproveitamento de rejeito de mineração**. 2017. 98 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017.

GUERRA, André Nillo Lopes Pires. **Caracterização e utilização de rejeito de minério de ferro pellet feed em pavimentos de blocos intertravados de concreto**. 2014. 127 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Demc, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.

GUIMARÃES, N. C. **Filtragem de rejeitos de minério de ferro visando a sua disposição em pilhas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.

IBRAM: Instituto Brasileiro de Mineração. Relatório Anual de Atividades Julho de 2018 – Junho de 2019.

KURANCHIE, F, A.; SHUKLA, S, K.; HABIBI, D. et al. Utilisation of iron ore tailings as aggregates in concrete. **Cogent Engineering**. v. 2, n. 1, p. 327- 345. dez. 2015.

LI, J.; TIAN, Y.; SUN, Q. et al. Research on iron ore tailing improving Compressive Strength of Alkali-activated Slag Foamed concrete. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON CIVIL ENGINEERING AND TRANSPORTATION 2015, 5., 2015, Paris. **Proceedings [...]**. Paris: Atlantis Press, 2015. v. 1, p. 1371-1375. dez. 2014

LIU, Y.; DU, F.; YUAN, L. et al. Production of lightweight ceramisite from iron ore tailings and its performance investigation in a biological aerated filter (BAF) reactor. **Journal Of Hazardous Materials**. v. 178, n. 1-3, p. 999-1006, jun. 2010.

LUO, L.; LI, K.; FU, W. et al. Preparation, characteristics and mechanisms of the composite sintered bricks produced from shale, sewage sludge, coal gangue powder and iron ore tailings. **Construction And Building Materials**. v. 232, p. 117250, jan. 2020.

LUZ, A, B da.; SAMPAIO, J, A.; FRANÇA, S, C, A. **Introdução ao Tratamento de Minérios**. 5. ed. Rio de Janeiro: Cetem/mct, 2010. 21 p.

MANTILLA, J, N, R.; MIRANDA, D, N.; FUINA, J, S. et al. Mechanical Characteristics of Pavers with Iron Ore Tailings. **Applied Mechanics And Materials**. v. 864, p. 330-335, abr. 2017.

MARQUES, Maria Gorett dos Santos. **Estudo das Propriedades Físicas e Mecânicas e da Durabilidade de Compósitos Cimentícios Reforçados com Fibra Amazônica**. 2015. 243 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia de Estruturas, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

MENDES, B, C.; PEDROTI, L, G.; FONTES, M, P, F. et al. Technical and environmental assessment of the incorporation of iron ore tailings in construction clay bricks. **Construction And Building Materials**. v. 227, p. 116669, dez. 2019

OBENAU-EMLER, R.; FALAH, M.; ILLIKAINEN, M. Assessment of mine tailings as precursors for alkali-activated materials for on-site applications. **Construction and Building Materials**. v. 246, p. 118470, jun. 2020.

PEREIRA, O. C.; BERNARDIN, A. M. Ceramic colorant from untreated iron ore residue. **Journal of Hazardous Materials**. v. 233–234, p. 103–111, 30 set. 2012.

PRESOTTI, Ednelson da Silva. **Influência do teor de ferro nos parâmetros de resistência de um rejeito de minério de ferro**. 2002. 153 f. Dissertação (Mestrado

em Geotecnia) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2002.

RACANELLI, L, de A.; CÂNDIDO, V, S.; SOUZA, J, A, da S. et al. Caracterização e Estudo das Propriedades Físicas, Químicas e Mecânicas das Argilas Cauliníticas da Região Nordeste do Estado do Pará. **Revista Matéria**, Rio de Janeiro. v. 25, n. 1, e-12593, abr. 2020

RASHAD, Alaa. M. Effect of steel fibers on geopolymer properties – The best synopsis for civil engineer. **Construction and Building Materials**, v. 246, p. 118534, jun. 2020.

SAMARCO (org.). Aproveitamento de Rejeitos. Disponível em: <<https://www.samarco.com/aproveitamento-de-rejeitos/>>. Acesso em: 18 mar. 2020.

SAMARCO (org.). PRODUTO. Disponível em: <https://www.samarco.com/produto/>. Acesso em: 17 mar. 2020.

SANT'ANA FILHO, Joaquim Nery de. **Estudos de reaproveitamento dos resíduos das barragens de minério de ferro para uso na pavimentação de rodovias e fabricação de blocos intertravados**. 2013. 131 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Materiais, Posmat, Cefet-mg, Belo Horizonte, 2013.

SANT'ANA FILHO, J, N.; SILVA, S, N, da.; SILVA, G, C. et al. Technical and Environmental Feasibility of Interlocking Concrete Pavers with Iron Ore Tailings from Tailings Dams. **Journal Of Materials In Civil Engineering**. v. 29, n. 9, p. 04017104, set. 2017

SHETTIMA, A, U.; HUSSIN, M, W.; AHMAD, Y. et al. Evaluation of iron ore tailings as replacement for fine aggregate in concrete. **Construction And Building Materials**. v. 120, p. 72-79, set. 2016

SI, Wei.; MA, B.; REM, J. et al. Temperature responses of asphalt pavement structure constructed with phase change material by applying finite element method. **Construction And Building Materials**. v. 244, p. 118088, maio 2020.

SILVA, Rodolfo Gonçalves Oliveira da. **Caracterização de concreto asfáltico elaborado com rejeitos de minério de ferro do quadrilátero ferrífero**. 2017. 270 f. Tese (Doutorado) - Curso de Geotecnia, Nugeo, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2017.

SILVA, F, L, da.; ARAUJO, F, G, S.; TEIXEIRA, M, P. et al. Study of the recovery and recycling of tailings from the concentration of iron ore for the production of ceramic. **Ceramics International**. v. 40, n. 10, p. 16085-16089, dez. 2014a

SILVA, F, L, da.; ARAUJO, F, G, S.; CASTRO, C, G. et al. Recycling of Concentration Tailings of Iron Ore for the Production of Concrete Block (Pavers). **Materials Science Forum**. v. 775-776, p. 631-634, jan. 2014b

SUPINO, S.; MALANDRINO, O.; TESTA, M. et al. Sustainability in the EU cement industry: the Italian and German experiences: the Italian and German experiences. **Journal Of Cleaner Production.**, v. 112, p. 430-442, jan. 2016

TAVARES Junior, Joaquim Francisco. **Influência do empacotamento da areia no desempenho dos compósitos cimentícios.** 2018. 68 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Materiais de Construção Civil, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018.

UNITED STATES OF AMERICA. United States Department of the Interior: Geological Survey. **Mineral Commodity Summaries 2019.** Virginia, p. 89. fev. 2019.

UNITED STATES OF AMERICA. United States Department of the Interior: Geological Survey. **Mineral Commodity Summaries 2019.** Virginia, 204. jan. 2020.

VALE. **Vale:**entenda as barragens da vale. Disponível em:<http://www.vale.com/brasil/PT/aboutvale/servicos-para-comunidade/minas-gerais/atualizacoes_brumadinho/Paginas/Entenda-as-barragens-da-Vale.aspx>.Acesso em: 17 de mar de 2020a.

VALE. **Vale:**processamento a seco. Disponível em:<http://www.vale.com/brasil/pt/aboutvale/servicos-para-comunidade/minas-gerais/atualizacoes_brumadinho/paginas/processamento-a-seco.aspx>.Acesso em: 17 de mar de 2020b.

VALE (Brasil). Você sabe o que é pelotização? 2017. Disponível em: <<http://www.vale.com/brasil/PT/aboutvale/news/Paginas/voce-sabe-o-que-e-pelotizacao.aspx>>. Acesso em: 12 abr. 2020.

WAN, W. S. **Avaliação da utilização de nanocarbonato de cálcio em tintas imobiliárias.** 2013. 99 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2013.

WOLFF, A. P. **Caracterização de rejeitos de minério de ferro de minas da Vale.** 2009. 107 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2009.

YAO, R.; LIAO, S.; DAI, C. et al. Preparation and characterization of novel glass–ceramic tile with microwave absorption properties from iron ore tailings. **Journal Of Magnetism And Magnetic Materials**, v. 378, p. 367-375, mar. 2015.

YI, Z.; SUN, H.; WEI, X. et al. Iron ore tailings used for the preparation of cementitious material by compound thermal activation. **International Journal Of Minerals, Metallurgy And Materials.** v. 16, n. 3, p. 355-358, jun. 2009.

ZAWRAH, M, F.; SAWAN, S, E, A.; KHATTAB, R, M. et al. Effect of nano sand on the properties of metakaolin-based geopolymer: study on its low rate sintering: Study on its low rate sintering. **Construction And Building Materials.** v. 246, p. 118486, jun. 2020.

ZHAO, S.; FAN, J.; SUN, W. Utilization of iron ore tailings as fine aggregate in ultra-high performance concrete. **Construction And Building Materials**. v. 50, p. 540-548, jan. 2014.

ZINATO, Natália Lopes. **Comparação entre as características estruturais e mineralógicas de rejeito de minério de ferro em faixas ultrafinas provenientes de diferentes depósitos e rotas de beneficiamento**. 2016. 106 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2016