



# Avaliação do Estado da Arte do Reaproveitamento de Rejeitos de Barragens de Processos de Extração e Beneficiamento de Minério de Ferro

Daniel Silva Barbutti

Monografia em Química Industrial

Orientador

Prof. Armando Lucas Cherem da Cunha, D.Sc

Outubro de 2021

**AVALIAÇÃO DO ESTADO DA ARTE DO  
REAPROVEITAMENTO DE REJEITOS DE BARRAGENS DE  
PROCESSOS DE EXTRAÇÃO E BENEFICIAMENTO DE  
MINÉRIO DE FERRO**

*Daniel Silva Barbutti*

Monografia em Química Industrial submetida ao Corpo Docente da Escola de Química, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Químico Industrial.

Aprovado por:

Marcelo Mendes Viana, D.Sc

Everton Grippa Marques, D.Sc

Orientado por:

---

Armando Lucas Cherem da Cunha, D.Sc

Rio de Janeiro, RJ – Brasil

Outubro de 2021

Barbutti, Daniel Silva.

Avaliação do estado da arte do reaproveitamento de rejeitos de barragens de processos de extração e beneficiamento de minério de ferro/ Daniel Silva Barbutti. Rio de Janeiro, UFRJ/EQ, 2021.

V, 89p.; il.

Monografia – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, 2021.

Orientador: Armando Lucas Cherem da Cunha.

1. Rejeito de Barragem de Minério de Ferro. 2. Valorização de resíduos. 3. Mineração. 4. Monografia. (Graduação – UFRJ/EQ). 5. Armando Lucas Cherem da Cunha. I. Avaliação do estado da arte do reaproveitamento de rejeitos de barragens de processos de extração e beneficiamento de minério de ferro

*“We all make choices, but in the end our choices make us.” – Andrew Ryan.*

## AGRADECIMENTOS

Confesso que eu nunca consegui estar preparado para escrever esta página. Foram muitos anos, foram muitas batalhas, internas e externas. Foram muitos momentos de quase desistência ao longo desta trajetória de quase 10 anos, e também foram muitos obstáculos superados. É esperado que aconteçam desafios. Apenas não esperava que fossem tantos em um grande redemoinho onde cada desafio, de algum modo, se interligasse a outras áreas da minha vida durante o período de graduação, a ponto de me desequilibrar tantas e tantas vezes. Porém, o mais importante, foi perceber que sempre alguém estava por trás de mim, me auxiliando a não cair, e mais importante que isso, a aprender como levantar caso acontecesse uma queda.

Por isso, eu não consigo agradecer a poucas pessoas. Nós somos fruto do meio em que vivemos, e por conta disso, também somos importantes no processo de desenvolvimento desse meio. Minha família sempre foi meu maior alicerce, a fundação de tudo que sou. Eu não seria absolutamente nada sem eles. Mãe, pai, irmã, tios, tias, avós, primos. Por isso, alguns nomes precisam estar nestes agradecimentos, mas não posso deixar de lado todo o resto dessa grande bagunça que chamo de família. Assim, obrigado imensamente aos meus pais e minha irmã, que batalharam comigo até o fim e me transformaram na pessoa que sou hoje.

Um nome essencial neste trabalho é o de José Joaquim Vinge, meu tio, meu mentor, meu segundo pai. Sem essa referência brilhante no campo acadêmico e profissional, com sua trajetória de vida inenarrável e sua inteligência e conhecimentos que foram constantemente passados para mim ao longo dos anos, eu não teria conseguido me manter são durante a graduação. Obrigado, tio, por tantas conversas sobre derivadas, integrais, eletrodinâmica e outros assuntos tão adequados para serem discutidos nos almoços de família e comemorações de aniversário!

Há tantas pessoas que gostaria de agradecer que daria uma nova monografia só de nomes. Por isso, obrigado por tudo: Cristal, minha gata de 18 anos que faleceu há poucas semanas; Fernando Ernani; Esther; Priscila; Thaís; Verônica; toda a equipe de colaboradores do Centro de Tecnologia Mineral (CETEM), onde vivi por cinco anos e mantive a força de permanecer lutando pelo meu diploma; e tantos outros. Obrigado por cada segundo, por cada momento de alegria e de resistência. Amo vocês, para sempre, independentemente de qualquer coisa. Contem comigo até o fim da vida.

Resumo da Monografia apresentada à Escola de Química como parte dos requisitos necessários para conclusão do curso de Química Industrial.

AVALIAÇÃO DO ESTADO DA ARTE DO REAPROVEITAMENTO DE REJEITOS DE BARRAGENS DE PROCESSOS DE EXTRAÇÃO E BENEFICIAMENTO DE MINÉRIO DE FERRO

Daniel Silva Barbutti

(danielbarbutti@eq.ufrj.br)

Outubro, 2021

Orientador: Prof. Armando Lucas Cherem da Cunha, D.Sc.

O minério de ferro tem papel fundamental na economia brasileira, sendo o Brasil o segundo maior produtor mundial do mesmo. A sua demanda, principalmente no comércio asiático, é contínua e necessária para a produção dos mais diversos produtos. A região do Quadrilátero Ferrífero, no Estado de Minas Gerais, é conhecida como uma das estruturas geológicas mais relevantes na mineração de minério de ferro no planeta. O processo extrativo e de beneficiação do minério de ferro gera uma quantidade de resíduos significativa, e quando líquidos, estes resíduos são armazenados em barragens construídas para conter o grande volume gerado, ocasionando em custos adicionais de logística para as empresas mineradoras e potenciais problemas ambientais em casos de acidente. O Brasil sofreu com diversos acidentes de rompimento de barragens ao longo dos anos, com dois acidentes recentes cobertos pela mídia nacional: o rompimento de uma barragem de minério de ferro localizada em Mariana, em 2015, e outra localizada em Brumadinho, em 2019, ambos municípios do Estado de Minas Gerais. O grande volume de rejeitos contidos nestas barragens atingiu milhares de hectares de florestas de vegetação de mata atlântica, cidades e rios, estes últimos levando os rejeitos a lugares ainda mais distantes da origem do acidente. Os danos ambientais tiveram uma extensão expressiva, causando também a perda de centenas de vidas humanas. Levando em conta a quantidade de barragens existentes no país, principalmente de rejeitos de minério de ferro, e a gravidade dos acidentes já ocorridos, o presente trabalho tem por objetivo mapear as últimas inovações tecnológicas presentes em artigos científicos que ilustrem métodos de reutilização dos rejeitos de barragens de minério de ferro localizadas no Brasil. Iniciou-se o estudo com uma revisão bibliográfica, de modo a haver uma melhor compreensão de sua composição e a necessidade do reuso destes rejeitos. Em seguida, realizou-se uma análise de artigos científicos em bases de artigos de alta relevância mundial, de modo a entender o nível de conhecimento atual de rotas tecnológicas alternativas que possam vir a ser viáveis economicamente para a reutilização dos rejeitos a médio e longo prazo. Com isso, foi possível perceber que há diversas oportunidades distintas de reutilização dos rejeitos de barragens de minério de ferro brasileiros, como aplicação dos mesmos na produção de tintas sustentáveis, ladrilhos cerâmicos, pavimentação urbana, preparação de argamassas, cimentos e concretos, além da síntese de catalisadores para tratamentos de efluentes, dentre outros. Por fim, foi possível apresentar a potencial capacidade de exploração destes rejeitos em diversas áreas distintas, com ênfase principalmente na indústria civil como agregado para cimentos, argamassas e concretos.

# SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1</b>	<b>5</b>
1. INTRODUÇÃO	5
1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA	5
1.2. OBJETIVOS	6
<b>CAPÍTULO 2</b>	<b>7</b>
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	7
2.1. O MINÉRIO DE FERRO E O QUADRILÁTERO FERRÍFERO	7
2.2. REJEITOS DE MINERAÇÃO	10
2.3. CARACTERIZAÇÃO DOS REJEITOS DE BARRAGENS DE MINÉRIO DE FERRO NO QUADRILÁTERO FERRÍFERO, MG	12
2.4. CENÁRIO AMBIENTAL E ACIDENTES DE MARIANA E BRUMADINHO	15
<b>CAPÍTULO 3</b>	<b>19</b>
3. METODOLOGIA DE PESQUISA	19
3.1. REFERENCIAL TEÓRICO: ARTIGOS CIENTÍFICOS COMO FERRAMENTA DE PROSPECÇÃO TECNOLÓGICA	19
3.2. METODOLOGIA UTILIZADA	20
3.2.1. METODOLOGIA DE PESQUISA	20
3.2.2. ETAPA PROSPECTIVA DE ANÁLISE DE ARTIGOS	20
3.2.3. ESTRATÉGIA DE BUSCA UTILIZADA	21
<b>CAPÍTULO 4</b>	<b>22</b>
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	22
4.1. ESTUDO PROSPECTIVO	26
4.1.1. ANÁLISE MACRO	26
4.1.2. ANÁLISE MESO	30
4.1.3. ANÁLISE MICRO	39
4.2. PUBLICAÇÕES DE ENGENHARIA CIVIL	40
4.2.1. COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS: CONCRETOS E ARGAMASSAS	42
4.2.1.1. O CONCRETO	42
4.2.1.2. CONCRETOS ECO-EFICIENTES CONTENDO RBMF NA COMPOSIÇÃO	43
4.2.1.3. USO DE RBMF NA PRODUÇÃO DE CIMENTO E CONCRETO SUSTENTÁVEIS	44
4.2.1.4. A ARGAMASSA	46
4.2.1.5. ARGAMASSAS CONTENDO RBMF COMO AGREGADO RECICLÁVEL	47

4.2.1.6.	ARGAMASSAS CONTENDO RBMF E SUA REDUÇÃO NA CONDUTIVIDADE TÉRMICA DA ARGAMASSA CONVENCIONAL	51
4.2.2.	COMPÓSITOS GEOPOLIMÉRICOS	53
4.2.2.1.	COMPÓSITO GEOPOLIMÉRICO CONTENDO RBMF E RESÍDUO DE LÃ DE VIDRO	55
4.2.3.	PAVIMENTAÇÃO URBANA	57
4.2.3.1.	UTILIZAÇÃO DE RBMF EM INFRAESTRUTURA RODOVIÁRIA	58
4.2.4.	TIJOLOS	59
4.2.4.1.	INCORPORAÇÃO DE RBMF EM TIJOLOS DE CONSTRUÇÃO	61
4.2.5.	TINTAS	65
4.2.5.1.	RBMF COMO PIGMENTO PARA TINTAS SUSTENTÁVEIS	66
4.3.	PUBLICAÇÕES DE TRATAMENTO DE EFLUENTES	69
4.3.1.	RBMF COMO CATALISADOR E SUPORTE NA SÍNTESE DE NANOTUBOS DE CARBONO	70
4.4.	PUBLICAÇÕES DE AGRICULTURA	73
4.4.1.	USO DO RBMF PARA CULTIVO DE ARROZ	73
<b>CAPÍTULO 5</b>		<b>77</b>
5.	CONCLUSÃO	77
6.	REFERÊNCIAS	78
7.	APÊNDICE A1 – Imagens de Satélite das Regiões Afetadas pelos Desastres de Mariana e Brumadinho	85

## Lista de figuras

Figura 1: Fluxograma típico de tratamento de minérios. Fonte: LUZ et al, 2010. ....	9
Figura 2: Tipos de destinação de rejeito. Fonte: FEAM, 2018. ....	11
Figura 3: Principais destinos de rejeitos Dentro da Mineração (DM). Fonte: FEAM, 2018. ....	12
Figura 4: Metodologia aplicada para a obtenção de dados para o estudo prospectivo. ....	23
Figura 5: Quantidade de publicações de artigos por ano e base de dados. ....	26
Figura 6: Distribuição de publicações em relação aos países de origem na base ScienceDirect no período entre 2010-2021. ....	27
Figura 7: Distribuição de publicações em relação aos países de origem somando as bases ScienceDirect e Grupo RECICLOS-CNPq, no período entre 2010-2021. ....	28
Figura 8: Distribuição percentual dos principais periódicos entre os anos de 2000 e 2021. ....	29
Figura 9: Distribuição percentual de publicações por área de conhecimento, entre os anos de 2000 e 2021. ....	29
Figura 10: Número de publicações que possuem ou não aplicação de RBMF. ....	30
Figura 11: Distribuição percentual das publicações que apresentam métodos de reutilização de resíduo de barragem de minério de ferro brasileiro por bancos de dados pesquisados. ....	31
Figura 12: Distribuição temporal das publicações que apresentam reutilização de rejeitos de barragem de minério de ferro brasileiro. ....	32
Figura 13: Distribuição temporal das publicações que apresentam reutilização de rejeitos de barragem de minério de ferro brasileiro. ....	32
Figura 14: Distribuição de publicações que apresentam métodos de reutilização de RBMF brasileiro em relação aos países de origem. ....	34
Figura 15: Distribuição percentual dos principais periódicos contendo publicações com a proposta de reutilização do RBMF brasileiro. ....	34
Figura 16: Distribuição de publicações por área de conhecimento. ....	35
Figura 17: Distribuição percentual de publicações por parcerias inteiramente públicas e parcerias público-privadas. ....	36
Figura 18: Distribuição percentual de artigos publicados pelas principais universidades públicas. ....	37
Figura 19: Principais parcerias e entidades que receberam agradecimentos pelas publicações analisadas. ....	37
Figura 20: Origens industriais do rejeito de barragem de minério de ferro de cada publicação analisada. ....	38
Figura 21: Imagem obtida em MEV do RBMF a 1000x de magnificação. Fonte: FONTES et al, 2016. ....	48
Figura 22: Imagem obtida em MEV do RBMF a 2400x de magnificação. Fonte: FONTES et al, 2016. ....	48
Figura 23: Argamassa com substituição total do agregado natural por RBMF e argamassa contendo 50% da cal substituída por RBMF, respectivamente. Fonte: FONTES et al, 2016. ....	50
Figura 24: Imagens de MEV das argamassas referência (a), contendo quartzito friável (b) e contendo RBMF (c) com magnificação de 5000x para as proporções de 1:0:3, 1:1:6 e 1:2:9, respectivamente, em cada linha. Adaptado de Mendes et al (2019). ....	52
Figura 25: Estrutura molecular esquemática de um geopolímero. Fonte: CHO, 2015. ....	54
Figura 26: Tijolos de construção em pequena escala antes da queima. Fonte: MENDES et al, 2019. ....	62
Figura 27: Regiões que atingem os critérios de resistência definidos pela ASTM C62, onde IOT = Iron Ore Tailing; GC = Gray Clay; YC = Yellow Clay. Fonte: MENDES et al, 2019. ....	64
Figura 28: Camadas de tintas sustentáveis aplicadas em placas de PVC, onde IOT significa Iron Ore Tailings (Resíduos de Minério de Ferro). Fonte: GALVAO et al, 2018. ....	67

Figura 29: Resultado de teste de durabilidade após 12 meses em placas de cimento com tintas sustentáveis de PVA. Fonte: GALVAO et al, 2018.....	68
Figura 30: Variação colorimétrica das placas sujeitas ao teste de durabilidade após 12 meses de exposição a ambiente externo. Fonte: GALVAO et al, 2018.....	69
Figura 31: Micrografias de transmissão eletrônica para os materiais sintetizados. Fonte: SILVA et al, 2020. ....	72

# CAPÍTULO 1

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA

As atividades do setor mineral brasileiro são de grande importância para a economia nacional. De acordo com o Boletim do Setor Mineral de Outubro de 2020 (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2020), a produção mineral tem sido crescente de 2016 a 2020, atingindo no último ano a marca de U\$40 bilhões, enquanto sua participação no Produto Interno Bruto em 2018 foi de 2,44%, com R\$6,8 bilhões. Além disso, quase metade da balança comercial brasileira é devida ao setor mineral, onde em 2020, os dados entre janeiro e setembro apresentaram um total de U\$42,2 bilhões, com o setor mineral contribuindo com U\$19,8 bilhões deste valor.

No entanto, os processos extrativos geram uma grande quantidade de resíduos, que podem ser armazenados por meio de diversas técnicas distintas, tais como disposição em pilhas, quando sólidos, ou barragens, quando líquidos, dentre outras como métodos subterrâneos, embora sejam menos usados (DE SOUZA, 2018). Tais operações geram custos logísticos e se tornam potenciais problemas ambientais.

O Brasil sofreu com diversos acidentes relacionados à rompimento de barragens minerais ao longo dos anos, com dois de grande porte ocorridos recentemente. Em Mariana, em 2015, e em Brumadinho em 2019, ambos municípios do Estado de Minas Gerais, duas barragens de minério de ferro se romperam e os rejeitos presentes nas mesmas se espalharam por milhares de hectares de florestas de vegetação de mata atlântica, além de cidades e rios, que promoveram um espalhamento ainda maior na extensão dos desastres. Florestas, vida aquática e centenas de vidas humanas foram perdidas, sem contar no patrimônio histórico perdido nas cidades que foram inundadas pelos rejeitos.

Nesse contexto, há a necessidade de se buscar novas tecnologias que possam apresentar técnicas e/ou processos que permitam a reutilização dos rejeitos presentes nestas barragens, uma vez que seu conteúdo apresenta metais tóxicos ao meio ambiente e que podem causar novos impactos ambientais de grande porte como os já ocorridos anteriormente, além de reduzir o número de barragens em vigor e, conseqüentemente, o potencial de danos ambientais provenientes de possíveis novos acidentes. Estes rejeitos apresentam grande potencial de

reciclagem, pois suas características podem ser apropriadas a diversas aplicações, principalmente da indústria da construção civil (MORAIS et al, 2021; DE CARVALHO et al, 2021; PROTASIO et al, 2021) e tratamento de efluentes (ALMEIDA e SCHNEIDER, 2020; SILVA et al, 2020; IZIDORO et al, 2019).

Tendo em vista os impactos ambientais tanto do processo de produção dos materiais utilizados na indústria civil quanto da geração e armazenamento dos rejeitos de mineração, este trabalho busca avaliar a situação atual da pesquisa e desenvolvimento nacional de novos produtos e processos que possam vir a trazer formas economicamente viáveis de se reutilizar os rejeitos de barragens de minério de ferro (RBMF), reduzindo assim seu risco ambiental enquanto armazenado, bem como o custo operacional de manutenção para garantir a segurança das barragens, da população e dos ecossistemas ao redor.

## 1.2. OBJETIVOS

Tendo em vista os últimos acidentes de grande porte relacionados à armazenagem de rejeitos minerais em barragens no Brasil, a crescente demanda de minério de ferro mundial e consequente necessidade de construção de barragens adicionais constantemente para a armazenagem dos rejeitos produzidos pela indústria de mineração, o presente trabalho tem por objetivo mapear as oportunidades e inovações apresentadas por estudos científicos que valorizem os rejeitos de barragem de minério de ferro do Brasil.

Para isso, o trabalho busca especificamente identificar os mais relevantes resultados provenientes de uma análise de artigos científicos e estudos correlatos em escalas macro, meso e micro, a fim de compreender o estado da arte atual na reutilização dos rejeitos de barragem de minério de ferro brasileiros, e expor de forma abrangente as propostas existentes, propondo assim alternativas economicamente viáveis a serem desenvolvidas para a redução do armazenamento dos rejeitos e consequente mitigação dos potenciais impactos ambientais atrelados a técnica de armazenamento em barragens.

# CAPÍTULO 2

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. O MINÉRIO DE FERRO E O QUADRILÁTERO FERRÍFERO

O minério de ferro é um dos principais minérios extraídos no Brasil e o principal produto de exportação mineral brasileira, com 65,8% da pauta mineral de exportações, de acordo com o Boletim do Setor Mineral de outubro de 2020. O país é o segundo maior produtor de minério de ferro do mundo, atrás apenas da Austrália, apresentando uma produção de 387 milhões de toneladas (17% do total global), contra 909 milhões de toneladas do minério (39% do total global) para o ano de 2020. De todo o minério de ferro comercializado no mundo, 80% da demanda é para suprir a necessidade do continente asiático (GOVERNO DA AUSTRÁLIA OCIDENTAL, 2021).

O Brasil é um país extremamente rico sob o ponto de vista de recursos minerais. Cada minério apresenta uma composição mineralógica distinta, e este aspecto deve ser avaliado ao se estudar as melhores rotas de extração e beneficiamento. Identificar e quantificar os tipos de minerais presentes no minério, bem como nas faixas granulométricas avaliadas durante as etapas de concentração, é fundamental para que se obtenha melhores resultados (FERNANDES, 2008).

Fernandes (2008), define o chamado Quadrilátero Ferrífero, estrutura geológica regional do Estado de Minas Gerais, como uma das mais relevantes na mineração de ferro do planeta. Sua extensão é de aproximadamente 7.000 km<sup>2</sup> e lá encontram-se minérios de Itabiritos, rochas metamórficas, de formações ferríferas bandadas, onde o óxido de ferro (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) é encontrado em quantidades significativas como o mineral hematita ( $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), ocorrendo em variadas formas resultantes de processos evolutivos de grande complexidade no Quadrilátero Ferrífero, tais como martita, hematita granular, especularita e kenomagnetita, esta última sendo uma variedade deficiente em Fe<sup>2+</sup>. Na mesma região, encontramos depósitos de bauxita, rocha extraída como matéria-prima para a produção de alumínio, contendo teor acima de 40% em alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) (SAMPAIO et al, 2008), e que apresenta uma composição mineralógica contendo dois óxidos de ferro: goethita ( $\alpha$ -FeOOH) e a hematita (FONSECA, s/ ano). Nas gangas (parte do minério sem interesse econômico) dos itabiritos, encontramos como mineral

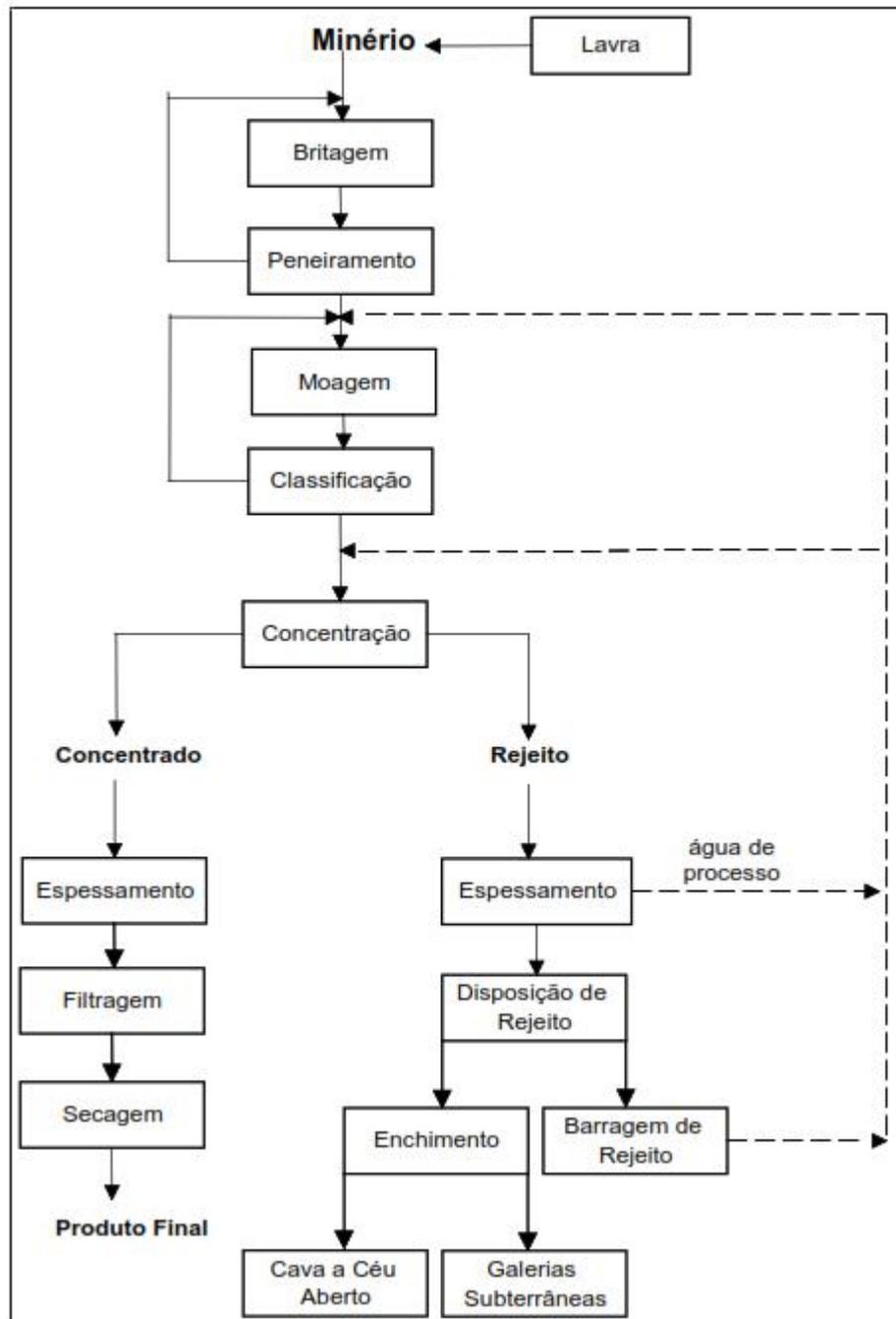
mais comum o quartzo ( $\text{SiO}_2$ ), seguido de dolomita ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ) e anfibólio (grupo de minerais silicáticos) (FERNANDES, 2008).

No Quadrilátero Ferrífero, os itabiritos apresentam teor de ferro de aproximadamente 50%; o Estado do Pará também é um grande produtor de minério de ferro, em forma de hematita, com teor de ferro médio de 60% (ANDRADE, 2014).

O beneficiamento do minério de ferro é necessário para que haja redução e homogeneização da granulometria do minério, além de remover a ganga. Neste processo, também ocorrem etapas de concentração ou purificação do minério de interesse, por meio de métodos físicos ou químicos que não alterem a composição dos minerais. Um fluxograma típico de tratamento de minérios que apresente recirculação de água pode ser visto na Figura 1 e apresenta as seguintes operações unitárias, de acordo com LUZ et al, 2010:

- Cominuição: britagem e moagem;
- Peneiramento (separação por tamanhos) e classificação (ciclonação, classificação em espiral);
- Concentração: gravítica, magnética, eletrostática, flotação, etc
- Desaguamento: espessamento e filtração
- Secagem: secador rotativo, *spray dryer*, secador de leito fluidizado;
- Disposição de rejeito.

Figura 1: Fluxograma típico de tratamento de minérios. Fonte: LUZ et al, 2010.



## 2.2. REJEITOS DE MINERAÇÃO

Como visto no fluxograma da Figura 1, uma das etapas de tratamento de minérios é a disposição de rejeito. Algumas operações durante o processo de beneficiamento do minério necessitam de um maior controle de faixas granulométricas dos materiais particulados obtidos após as etapas de britagem anteriores. Para o tratamento posterior, ainda de acordo com a Figura 1, é comum que haja adição de água e/ou produtos químicos adicionais na planta de beneficiamento, levando a um rejeito final em forma de polpa que pode ser transportado com maior facilidade para sua disposição final. O local mais utilizado para disposição da polpa é a barragem.

As barragens de rejeito são, de acordo com a Vale (2021), estruturas de engenharia que possuem o propósito de conter e acumular substâncias líquidas ou uma mistura de líquidos e sólidos proveniente do processo de beneficiamento de minérios. As obras de barragens de rejeitos são de grande porte, ocupando uma vasta área para que seja possível comportar grandes volumes, formando, assim, grandes lagos artificiais de rejeitos a céu aberto. Por conta disso, a segurança necessária desde a etapa de projeto da barragem até sua manutenção deve ser essencialmente elevada para evitar possíveis acidentes na contenção dos rejeitos, uma vez que as atividades de mineração são capazes de gerar quantidades significativas de rejeitos continuamente, ainda mais levando-se em conta que a concentração de metal encontrada nos minerais brutos é geralmente pequena. Além disso, ao longo dos anos de atividade e exaustão de jazidas e outras áreas de extração mineral, é esperado que uma nova área seja buscada, com a tendência natural de que os minérios presentes tenham um teor ainda menor do metal de interesse, gerando assim uma quantidade cada vez maior de rejeitos de mineração para serem dispostos.

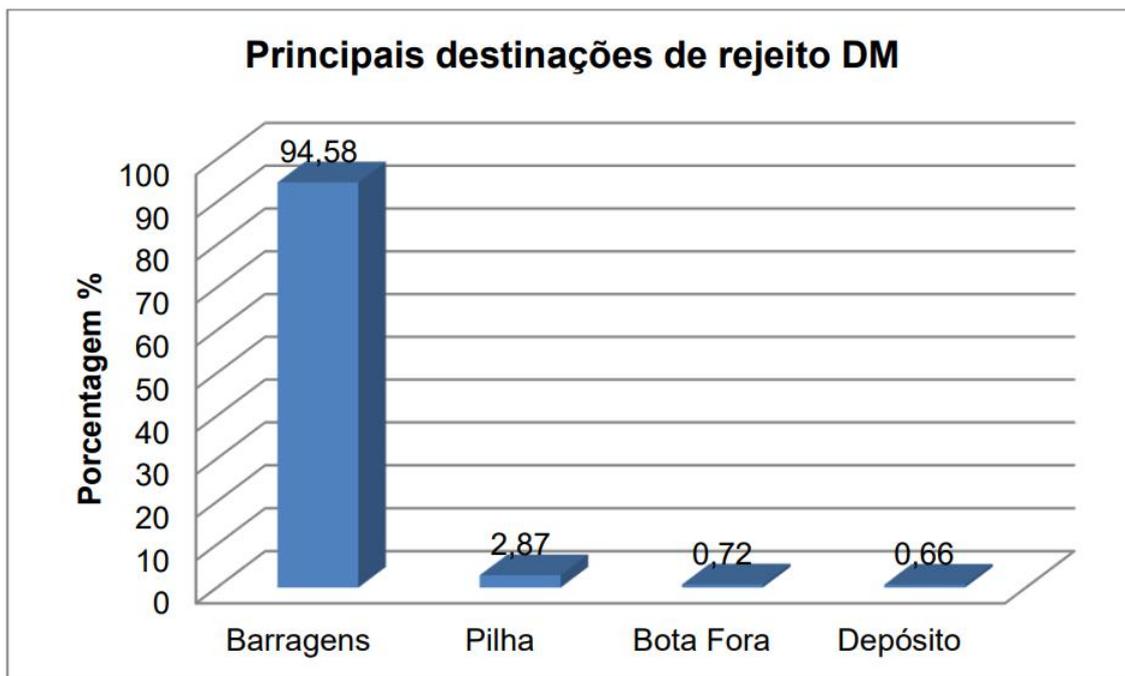
O método mais utilizado para a disposição de rejeitos minerais na mineração é o uso de barragens. O Cadastro Nacional de Barragens de Mineração (CNBM), gerenciado pela Agência Nacional de Mineração (ANM, antigo Departamento Nacional de Produção Mineral, DNPM), apresentou para o início do ano de 2020, 803 barragens de mineração cadastradas no país, das quais 425 já estavam inseridas na Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), e ao fim do mesmo ano este número saltou para 871, com 435 inseridas na PNSB. A PNSB categoriza as barragens em duas classificações: categoria de risco (CRI, dividido em baixo, médio e alto) e dano potencial associado (DPA, dividido em baixo, médio e alto).

De todo o rejeito gerado pelas atividades de mineração, de acordo com o Inventário Estadual de Resíduos Sólidos Industriais de 2018 da Fundação Estadual do Meio Ambiente de Minas Gerais (FEAM, 2018), 99,995% é destinado dentro da mineração (DM), onde a destinação principal é em barragens, com 94,58%, como pode ser visto nas Figura 2 e Figura 3. Na Figura 3, podemos definir a disposição em pilhas como a disposição de rejeitos em estado insaturado, ou seja, com um teor de umidade baixo o suficiente para que haja a possibilidade de depositar os rejeitos e uma situação estrutura autoportante (LEÃO, 2021); a disposição em “bota fora” envolvem rejeitos colocados em áreas como encostas, corpos d’água, lotes vagos e em áreas protegidas por lei (BRASIL, 2012); e por fim, a disposição em depósitos envolve armazenamento dos rejeitos em ambiente externo ou interno, levando-se em conta aspectos básicos de segurança e estabilidade com o mínimo de impacto ambiental possível (NETO, 2013).

Figura 2: Tipos de destinação de rejeito. Fonte: FEAM, 2018.



Figura 3: Principais destinos de rejeitos Dentro da Mineração (DM). Fonte: FEAM, 2018.



### 2.3. CARACTERIZAÇÃO DOS REJEITOS DE BARRAGENS DE MINÉRIO DE FERRO NO QUADRILÁTERO FERRÍFERO, MG

De acordo com Carmignano et al (2021), há diversos métodos diferentes de beneficiamento do minério de ferro no Brasil, a depender do teor de ferro presente no minério a ser processado. Os processos de beneficiamento mais comuns são a separação magnética, flotação, flotação reversa, separação eletrostática, concentração gravítica e floculação. Os processos geralmente envolvem operações que modificam a distribuição o tamanho de partícula para aumentar o teor de ferro, sem que afete diretamente a identidade física ou química dos minerais presentes. Um exemplo de CARMIGNANO et al, 2021, de processo simples de beneficiamento é o minério de ferro presente em Carajás, conhecida como a maior mina de minério de ferro a céu aberto do mundo. Nela, o teor de ferro é elevado o suficiente para que apenas seja necessário realizar o processo de moagem simples e separação por tamanho para que o produto esteja pronto para venda.

Para o caso do Quadrilátero Ferrífero e em especial os itabiritos, após a extração do minério em uma mina a céu aberto, ele é enviado para plantas industriais, onde passa por processos de trituração, moagem, peneiramento e separação, de onde é removida uma fase rica em sílica por meio do processo de flotação reversa. A flotação é muito conhecida no setor mineral, e se utiliza do fato de haver minerais com características hidrofóbicas e hidrofílicas

para que eles possam ser separados com a adição de reagentes específicos. Esta última etapa remove o quartzo em uma fase espumosa no topo, enquanto os óxidos de ferro permanecem no fundo, em fase de polpa, após adição de um grande volume de água durante o processo. Os rejeitos de minério de ferro gerados por este processo apresentam, no Brasil, um teor variável entre 20% e 40% em peso do total de minério de ferro extraído, e dependendo da classificação granulométrica do rejeito, ele pode ser dividido em rejeitos finos e granulares. Minérios de ferro com alto teor de argila apresentam mais partículas finas, por exemplo (CARMIGNANO et al, 2021).

Enquanto os rejeitos finos apresentam frações correspondentes à argila, os rejeitos granulares possuem a fração de  $\text{SiO}_2$ , com pequenas quantidades de óxido de ferro, hidróxido e caulinita, um argilo-mineral de alumínio. Para estes rejeitos granulares, o teor de umidade não é superior a 15%, enquanto o teor para os rejeitos finos geralmente é superior a 20% (CARMIGNANO et al, 2021).

A Tabela 1 abaixo, uma compilação de diversos artigos, apresenta a composição química principal obtida para diferentes rejeitos de barragens de minério de ferro no Estado de Minas Gerais.

**Tabela 1.** Exibição da composição química em proporção percentual (%) dos 3 principais componentes de diversos resíduos de barragens de minério de ferro brasileiros encontrados no Estado de Minas Gerais, obtida por análises de fluorescência de Raios-X.

RMBF	SiO <sub>2</sub> (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	Referência
1	15,1	51,4	3,39	CARMIGNANO et al, 2021
2	20,1	71,7	2,30	CARMIGNANO et al, 2021
3	20,4	68,1	11,2	BASTOS et al, 2016
4	23,5	59,0	15,7	MENDES et al, 2019
5	24,2	45,9	4,82	FONTES et al, 2016
6	30,0	47,8	21,2	CARMIGNANO et al, 2021
7	35,5	56,9	5,80	DE CARVALHO et al, 2021
8	41,9	48,1	6,30	MYMRIN et al, 2021
9	46,7	32,0	3,89	CARMIGNANO et al, 2021
10	47,9	42,4	5,61	CARMIGNANO et al, 2021
11	49,2	29,4	1,46	CARMIGNANO et al, 2021
12	63,0	35,0	1,20	CARMIGNANO et al, 2021
13	65,7	21,4	0,80	CARMIGNANO et al, 2021
14	71,4	21,5	-	CARMIGNANO et al, 2021
15	84,2	11,6	1,60	CARMIGNANO et al, 2021
16	84,4	15,1	0,45	CARMIGNANO et al, 2021
17	90,4	8,38	0,43	CARMIGNANO et al, 2021
18	90,7	9,30	-	PROTASIO et al, 2021

É possível observar que há uma grande heterogeneidade nas amostras apresentadas na Tabela 1, mas nota-se que ainda há a presença de grandes teores de minério de ferro em muitos dos rejeitos. A depender do teor e da faixa granulométrica de cada rejeito, é possível explorar suas possibilidades para diversas aplicações.

#### 2.4. CENÁRIO AMBIENTAL E ACIDENTES DE MARIANA E BRUMADINHO

De acordo com Soares (2010), entre os anos de 1970 e 1998 ocorreram 25 grandes acidentes envolvendo barragens de rejeitos no mundo, a maioria deles tendo origem em causas geológicas ou geotécnicas, como sismos, liquefação ou entubamento. Os números até 2021 se expandem para o valor aproximado de 142 para os mais diversos tipos de minérios, segundo o WISE Uranium Project, com dados atualizados até dia 29 de agosto de 2021 (por conta da falta de disponibilidade de dados, este valor pode ser ainda maior oficialmente). 10 destes acidentes ocorreram no Brasil.

Recentemente, o Brasil testemunhou dois desastres ambientais de grande porte relacionados a disposição de rejeitos minerais em barragens de minério de ferro. No dia 05 de novembro de 2015, a barragem de Fundão sofreu um colapso liberando mais de 50 milhões de metros cúbicos de rejeitos minerais e água que inundaram a cidade de Bento Rodrigues, a 5km do local (PARENTE et al, 2021), localizada no município de Mariana, Minas Gerais. O acidente levou a 19 mortes, impactando 1469 hectares de vegetação natural e 90% dos habitantes ribeirinhos de Fundão, Gualaxo do Norte e Rio do Carmo (COUTO et al, 2021). Os rejeitos atingiram habitats essenciais à vida, eliminando grande parte da capacidade regenerativa de ecossistemas terrestres e aquáticos, percorrendo 663,2 km de cursos d'água até o litoral do Espírito Santo (IBAMA, 2020). Quatro imagens de satélite da região de Bento Rodrigues foram extraídas por meio do *software* Google Earth Pro para as seguintes datas: 07/2015, 12/2015, 03/2017 e 06/2020. Elas encontram-se no Apêndice A1 deste trabalho.

O segundo desastre ocorreu no dia 25 de janeiro de 2019, na barragem de Córrego do Feijão, no município de Brumadinho, Minas Gerais. O rompimento da barragem levou 270 vidas humanas (com 11 ainda desaparecidos), liberando um volume aproximado de 12 milhões de metros cúbicos de rejeitos, destruindo áreas de proteção ambiental e cursos de rios, além de múltiplas construções e patrimônios históricos ao longo de 2,7 km<sup>2</sup>. Os rejeitos ainda atingiram a margem direita do Rio Paraopeba, despejando materiais particulados suspensos contendo altas concentrações de alumínio, ferro, manganês, chumbo e mercúrio, afetando diretamente o

sistema de suprimento de água na região (PARENTE et al, 2021). Quatro imagens de satélite da região de Brumadinho foram extraídas por meio do *software* Google Earth Pro para as seguintes datas: 07/2018, 01/2019, 03/2019 e 04/2019. Elas encontram-se no Apêndice A1 deste trabalho.

Por conta dos recentes eventos, a Agência Nacional de Mineração, ANM (antigo Departamento Nacional de Produção Mineral, DNPM), atualizou a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) em 2020. Até setembro de 2021, segundo o Sistema de Gestão de Segurança de Barragem de Mineração (SIGBM), gerenciado também pela ANM, o Brasil possuía 881 barragens, onde 350 destas se localizavam no Estado de Minas Gerais. 41 destas 350 apresentavam CRI alto e 145 delas possuíam DPA alto, e 208 delas apresentam algum nível de CRI e de DPA. 310 das barragens de MG não apresentavam níveis de emergência, mas 3 delas estavam categorizadas como Nível 3, o mais elevado. Por fim, apenas 18 barragens do Estado apresentaram declaração de condição de estabilidade (DCE). Este documento é obrigatório para todas as barragens que estão inseridas na PNSB, sendo que os responsáveis precisam entrega-lo à ANM duas vezes ao ano, onde na segunda entrega é obrigatório que o documento seja feito por meio de uma consultoria externa contratada pela empresa de mineração (ANM, 2021).

Ainda até setembro de 2021, 199 barragens de rejeitos são de minério de ferro no Brasil, com 171 delas situadas no Estado de Minas Gerais e apenas 34 destas inseridas na PNSB. 34 destas barragens apresentam CRI alto e 82 apresentam DPA alto, além de 3 apresentarem Nível 3 de emergência e, por fim, 15 delas apresentaram declaração de condição de estabilidade (SIGBM, 2021, dados para 11/09/2021).

A consciência ambiental é indispensável em um mundo como o que vivemos. É importante que haja responsabilidade ética, social e ambiental para que futuras gerações possam usufruir dos mesmos recursos naturais que podemos usufruir hoje. Medidas de mitigação dos impactos ambientais das barragens de rejeitos minerais se tornam essenciais para que se reduzam os riscos associados à técnica. A Lei 12.305, que institui a Política Nacional dos Resíduos Sólidos (PNRS), entrou em vigor no ano de 2010 para buscar adoções de premissas que envolvam projetos de inovação com o intuito de auxiliar no gerenciamento de resíduos sólidos no Brasil. Ainda no mesmo ano, foi instituída a Lei 12.334/2010, que estabeleceu a Política Nacional de Segurança de Barragens, já atualizada no ano de 2020, conforme supracitado.

No Artigo 3º da PNRS, há uma diferenciação importante entre os termos “rejeitos” e “resíduos sólidos”, bem como também encontramos a diferença entre os termos “reutilização” e “reciclagem”:

- **Resíduos sólidos:** material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d’água, ou exijam para isso soluções técnica ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível;

- **Rejeitos:** resíduos sólidos que, depois de esgotadas todas as possibilidades de tratamento e recuperação por processos tecnológicos disponíveis e economicamente viáveis, não apresentem outra possibilidade que não a disposição final ambientalmente adequada;

- **Reciclagem:** processo de transformação dos resíduos sólidos que envolve a alteração de suas propriedades físicas, físico-químicas ou biológicas, com vistas à transformação em insumos ou novos produtos, observadas as condições e os padrões estabelecidos pelos órgãos competentes do Sistema Nacional do Meio Ambiente (Sisnama) e, se couber, do Sistema Nacional de Vigilância Sanitária (SNVS) e do Sistema Unificado de Atenção à Sanidade Agropecuária (Suasa).

- **Reutilização:** processo de aproveitamento dos resíduos sólidos sem sua transformação biológica, física ou físico-química, observadas as condições e os padrões estabelecidos pelos órgãos competentes do Sisnama e, se couber, do SNVS e do Suasa.

Além disso, temos a NBR 10.004/04, que trata sobre a classificação de resíduos sólidos. Nela, podemos classificá-los de acordo com sua periculosidade, a saber:

- **Classe I (Perigosos):** aqueles que apresentam periculosidade de acordo com suas propriedades físicas, químicas ou infecto-contagiosas, ou que apresentem alguma das seguintes características: inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade ou patogenicidade.

- **Classe II-A (Não Perigosos e Não Inertes):** aqueles que não se enquadram na Classe I ou II-B. Eles podem ter propriedades como combustibilidade, biodegradabilidade ou solubilidade em água.

- **Classe II-B (Não Perigosos e Inertes):** quaisquer resíduos que quando amostrados dentro da norma NBR 10.007/04 (Amostragem de Resíduos), e submetidos a testes

de solubilização dentro da norma NBR 10.006/04 (Solubilização de Resíduos), não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados apresentando concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, excetuando-se aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor.

É sabido que os rejeitos de mineração, portanto, provocam impactos paisagísticos e ambientais quando dispostos de forma inadequada, como já visto anteriormente. As definições da PNRS nos permitem ampliar nossos horizontes de modo a indagar se não é possível, com nossa capacidade tecnológica atual e pesquisas em inovação, encontrarmos técnicas para que o rejeito de barragens se torne, na realidade, resíduos sólidos de barragem, por meio de processos economicamente viáveis que os levem a ser reutilizados ou reciclados, de acordo com o propósito final.

Como fora visto na Tabela 1, a presença de quantidades de quartzo, alumina e a grande quantidade percentual de óxido de ferro ainda presente nos rejeitos os tornam promissores para aplicação em múltiplas áreas, devido às propriedades mecânicas que o rejeito final apresenta, de modo geral. A indústria da construção civil apresenta uma grande quantidade de possíveis aplicações, como desenvolvimento de tintas sustentáveis (GALVÃO et al, 2018), ladrilhos cerâmicos (FONTES, 2018), pavimentação urbana (APAZA et al, 2021), além de poder também servir de agregado reciclável para preparação de argamassas (MORAIS et al, 2021), cimentos (DE CARVALHO et al, 2021) e concretos (PROTASIO et al, 2021). O rejeito de barragem de minério de ferro também pode ser usado na síntese de catalisadores e outros insumos químicos para tratamento de efluentes (ALMEIDA e SCHNEIDER, 2020; SILVA et al, 2020; IZIDORO et al, 2019), dentre outros empregos diversos que serão tratados neste trabalho.

# CAPÍTULO 3

## 3. METODOLOGIA DE PESQUISA

### 3.1. REFERENCIAL TEÓRICO: ARTIGOS CIENTÍFICOS COMO FERRAMENTA DE PROSPECÇÃO TECNOLÓGICA

Os métodos de prospecção tecnológica podem ser caracterizados por um conjunto de atividades de pesquisa que permitem visualizar mudanças tecnológicas, funcionais e/ou relacionadas ao tempo e significado de uma inovação. Com as informações obtidas, é possível avaliar o estado da arte de tal tecnologia, prever possíveis estados futuros da mesma, ou identificar condições que possam, por ventura, afetar o seu desenvolvimento. Assim, é possível ampliar a visão sobre um determinado tema e suas diversas visões, que poderão ser testadas em busca de uma rota que seja significativa não apenas para que a ferramenta possa ser evoluída, mas também para que seja possível entender todo o seu entorno, facilitando assim a construção e expansão do conhecimento naquela área. Isto faz com que haja uma redução do tempo entre a invenção e os produtos do mercado que possam efetivamente embarcá-la (AMPARO, 2012).

Quintella (2011), define a prospecção tecnológica como uma ferramenta de levantamento de dados acerca de uma tecnologia existente, identificando seu estágio de maturidade, oportunidades a serem desenvolvidas e possíveis competidores que podem vir a ser incorporados em uma possível parceria tecnológica. Para casos de patentes, pode ser valioso realizar levantamentos dos inventores por trás das tecnologias, países de origem destas patentes e países onde foram realizados depósitos, entre outras classificações.

Os artigos científicos são recursos valiosos durante a prospecção tecnológica de uma pesquisa acadêmica. Eles apresentam qualidade e ineditismo, passando por etapas de avaliação antes de suas respectivas publicações, garantindo certo grau de qualidade aos mesmos, servindo assim para divulgar novos conhecimentos, corroborar estudos pré-existentes ou instigar pesquisas futuras com base nas conclusões encontradas. Um dos maiores bancos de dados conhecido no Brasil é o Portal de periódicos CAPES, possuindo mais de 48.000 títulos de periódicos em texto completo, dezenas de bases de dados de referência, resumo, dados estatísticos, teses e dissertações, além de conteúdos audiovisuais, patentes e dados de normas técnicas (CAPES, 2019).

## 3.2. METODOLOGIA UTILIZADA

### 3.2.1. METODOLOGIA DE PESQUISA

A metodologia a ser utilizada neste trabalho foi definida após avaliação do objetivo do mesmo e da pesquisa que deveria ser realizada para atingir tais objetivos. Deste modo, foi realizada uma revisão bibliográfica em publicações acadêmicas nacionais e internacionais, que abrangessem aplicações do RBMF presente no Brasil. Após este levantamento de dados, foi elaborada a estrutura da metodologia para a prospecção tecnológica, de modo a classificar as publicações encontradas como relevantes ou pouco relevantes.

Os levantamentos realizados são direcionados por meio de um conjunto de critérios a serem definidos, de acordo com o que Borschiver e Lemos (2016), como a chamada “Fase 1” ou “Fase Pré-prospectiva”, e que será adaptada como segue:

- Escolha das bases de dados a serem adotadas para a busca de artigos;
- Limitação do período de busca;
- Descrição da estratégia aplicada no mecanismo de busca;
- Levantamento das principais instituições detentoras de artigos científicos acerca do tema escolhido;
- Identificação dos principais aspectos abordados pelas publicações avaliadas.

### 3.2.2. ETAPA PROSPECTIVA DE ANÁLISE DE ARTIGOS

A metodologia utilizada para o presente estudo, dentre diversas estratégias distintas de prospecção tecnológica existentes na literatura, foi desenvolvida pelo Núcleo de Estudos Industriais e Tecnológicos (NEITEC), e de acordo com Borschiver e Lemos (2016), ela é definida como “Fase 2” ou “Fase de Prospecção Tecnológica”, e é segmentada em três níveis de otimização, chamados de Macro, Meso e Micro, onde cada uma destas etapas apresenta uma abordagem de visualização dos dados obtidos durante o estudo distinta, iniciando-se na avaliação mais ampla dos mesmos e aprofundando para auxiliar tanto na exposição do tema abordado quanto para concluir as possíveis tendências tecnológicas. Os três segmentos são descritos a seguir:

- a) **Nível Macro:** análise mais superficial e ampla dos documentos, avaliando sua distribuição histórica, países envolvidos, universidades, centros de pesquisa e empresas atuantes no mercado que possam estar presentes na pesquisa e desenvolvimento do que se é buscado;

- b) **Nível Meso:** inicia-se o detalhamento em relação às características mais relevantes do objetivo da pesquisa. Aqui, é realizada uma análise individual dos documentos que possam possuir maior relevância, e por meio destes, serão definidas taxonomias para separá-los em categorias de acordo com os temas mais proeminentes em torno do objetivo da pesquisa.
- c) **Nível Micro:** o detalhamento executado no nível anterior sofre um segundo detalhamento, dando mais ênfase em particularidades das publicações analisadas que possibilitam uma melhor compreensão e caracterização das taxonomias definidas anteriormente.

De posse de todas as análises realizadas nos três níveis, é então possível apresentar resultados para a prospecção, sendo estes resultados discutidos com base nas informações presentes em cada publicação que for considerada relevante para a pesquisa de interesse. De acordo com Borschiver e Lemos (2016), a finalidade da Fase 2 é se utilizar de elementos gráficos para que os resultados possam ser avaliados de forma simples e breve.

Como não há abrangência de busca por patentes neste trabalho, a denominada “Fase 3”, ou “Fase Pós-Prospectiva”, de acordo com Borschiver e Lemos (2016), não será abordada.

### 3.2.3. ESTRATÉGIA DE BUSCA UTILIZADA

Com os critérios da fase pré-prospectiva definidos, o mapeamento das publicações foi realizado por meio de bases de dados de artigos científicos para a coleta de informações e elaboração do mapeamento tecnológico supracitado.

As bases de dados inicialmente definidas foram Periódico CAPES, Scopus, Web of Science e ScienceDirect. A escolha das mesmas foi dada pela importância destas bases na área de conhecimento de interesse, às suas popularidades e grandes acervos de publicações de relevância que são constantemente e consistentemente atualizados com novos artigos científicos, lhes garantindo um maior respeito dentro da comunidade acadêmica. A escolha inicial de múltiplas bases de dados foi dada para que fosse avaliada a quantidade de resultados encontrados em cada uma delas inicialmente, descartando eventuais bases que pudessem conter poucas informações relevantes.

Além disso, uma vez que o objetivo deste trabalho foi buscar aplicações de RBMF brasileiro, também foi utilizado no levantamento de publicações o site do Grupo de Pesquisa em Resíduos Sólidos (RECICLOS-CNPq, <https://reciclos.ufop.br>). De acordo com o site oficial

do Grupo, sua fundação ocorreu no ano de 2011 na Universidade Federal de Ouro Preto, com o objetivo de viabilizar e buscar inovações na área de reutilização de resíduos sólidos na área de Engenharia Civil, já buscando aplicar os resultados obtidos nas pesquisas em obras de engenharia atuais. Com isso, o Grupo RECICLOS-CNPq auxilia, ainda, na interação entre acadêmicos e profissionais do setor público e privado. Por conta da sua vantagem geográfica, próxima à região conhecida como Quadrilátero Ferrífero, em Minas Gerais, o Grupo RECICLOS-CNPq possui um acervo de publicações na área de conhecimento deste trabalho abrangendo desde monografias, dissertações e teses, até publicações de artigos científicos em bases de dados com alta relevância, sendo, portanto, uma importante adição ao levantamento de dados.

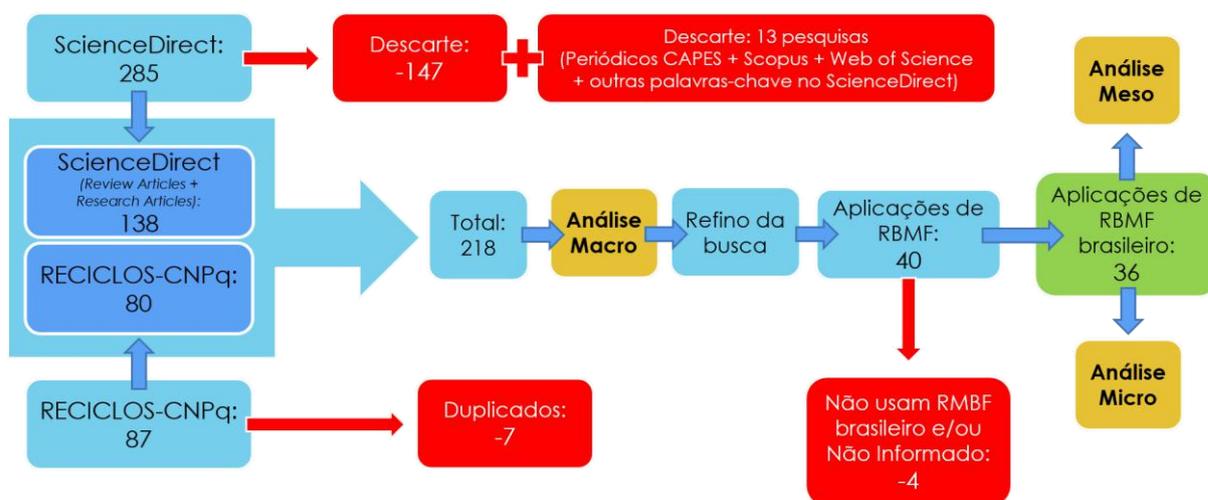
As primeiras pesquisas foram na base de dados ScienceDirect e no site do Grupo RECICLOS-CNPq, nos dias 06/06/2021 e 19/06/2021, respectivamente. Os termos utilizados para a busca foram *“Iron ore” + Brazil + tailing + residue + waste*, de modo a tentar encontrar o máximo de documentos possíveis que possuíssem relação com o tema de interesse: artigos e outras publicações acadêmicas que pudessem demonstrar viabilidades técnica e/ou econômica para a reutilização do RBMF brasileiro em quaisquer áreas de aplicação. Para verificar a eficácia e relevância das palavras chaves utilizadas na pesquisa, foram feitas alterações nas palavras-chave, e nas bases, resultando em 13 pesquisas adicionais.

## CAPÍTULO 4

### 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados completos encontrados com as duas primeiras pesquisas foram avaliados na Análise Macro, enquanto um refinamento foi realizado nos mesmos para que pudessem contemplar apenas publicações que efetivamente possuíssem relação com o tema central deste trabalho, ou seja, que apresentassem propostas de reutilização de RBMF brasileiro em algum produto ou processo. O resultado deste refinamento foi avaliado nas Análises Meso e Micro, onde, partindo de 218 publicações encontradas inicialmente, foram analisadas 36 que atendiam aos critérios procurados. Um resumo do fluxo da metodologia encontra-se na Figura 04.

Figura 4: Metodologia aplicada para a obtenção de dados para o estudo prospectivo.



O banco de dados ScienceDirect resultou em 285 documentos, onde, após um filtro adicional de busca apenas nas categorias *Review Articles* e *Research Articles*, o número foi reduzido a 138, uma vez que as outras categorias de publicações envolvem documentos de menor relevância ou com pouca informação, como trechos de enciclopédias, resumos de congressos, entre outros.

Para o Grupo RECICLOS-CNPq, foram avaliados todos os documentos, sem palavras chave, uma vez que a quantidade total presente era pequena o suficiente para tornar possível a análise manual dos mesmos durante todo o processo. Foram encontrados 87 documentos presentes no site, incluindo teses e dissertações, onde 7 artigos científicos já haviam sido encontrados na pesquisa da base anterior, o que retornou ao fim 80 documentos que, somados aos 138 da base ScienceDirect, garantiram um total de 218 publicações de possível relevância para este trabalho.

A Tabela 2 mostra as duas pesquisas feitas anteriormente (localizadas nas linhas 1 e 2 da tabela) e as variações feitas para comprovação da relevância da mesma. É possível notar na coluna “Total Encontrado” que houve uma recuperação de publicações e/ou documentos bem baixo em quase todas as pesquisas adicionais.

Foi realizada brevemente uma análise de quais artigos encontrados apresentavam concretamente uma proposta de reutilização de RBMF de origem brasileira em todas as 15 pesquisas realizadas, com o resultado também presente na Tabela 2, na coluna “Aplicações de RBMF do Brasil”. Aqui, foi possível identificar que as duas pesquisas iniciais não apenas resultaram em um número bruto maior de resultados, mas também retornaram mais resultados

expressivos se comparados às outras 13 pesquisas seguintes, que foram, portanto, descartadas desta prospecção.

**Tabela 2.** Exibição das informações referentes às pesquisas realizadas para o mapeamento tecnológico.

Pesquisa	Data da Pesquisa	Banco de Dados	Palavras-Chave	Total Encontrado	Aplicações de RBMF do Brasil
1	06/06/2021	ScienceDirect	“Iron ore”; Brazil; tailing; residue; waste	138	22
2	19/06/2021	Grupo RECICLOS-CNPq	-	87	20
3	06/07/2021	ScienceDirect	“Iron ore”; mariana; brumadinho; tailing; residue; waste	11	0
4	06/07/2021	ScienceDirect	“Iron ore tailing”; Brazil; mariana; brumadinho	17	1
5	06/07/2021	ScienceDirect	“Iron ore tailing”; mariana; brumadinho	17	1
6	06/07/2021	ScienceDirect	“Iron ore tailing”; mariana	46	1

7	06/07/2021	ScienceDirect	“Iron ore tailing”; brumadinho	27	1
8	06/07/2021	Periódicos CAPES	“Iron ore tailing”; Brazil; mariana; brumadinho	1	0
9	06/07/2021	Periódicos CAPES	“Iron ore tailing”; mariana; brumadinho	1	0
10	06/07/2021	Periódicos CAPES	“Iron ore tailing”; mariana	10	2
11	06/07/2021	Periódicos CAPES	“Iron ore tailing”; brumadinho	0	0
12	18/07/2021	Web of Science	“Iron ore tailing”; Brazil	19	2
13	18/07/2021	Web of Science	“Iron ore”; Brazil; tailing; residue; waste	10	2
14	18/07/2021	Scopus	“Iron ore tailing”; Brazil	42	1

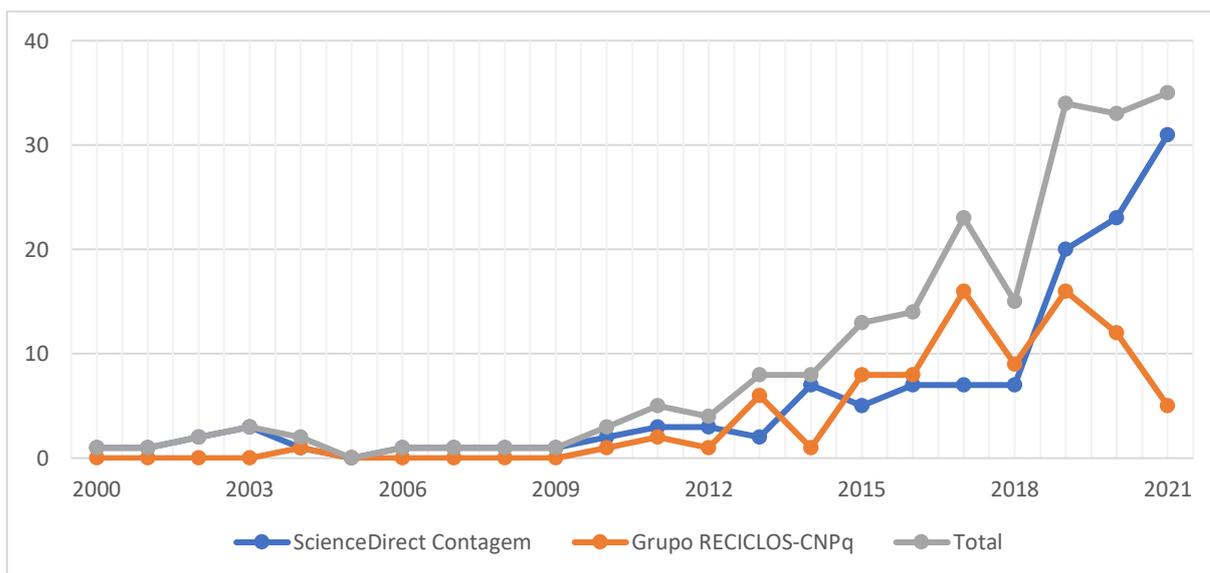
15	18/07/2021	Scopus	“Iron ore”; Brazil; tailing; residue; waste	5	1
----	------------	--------	---	---	---

#### 4.1. ESTUDO PROSPECTIVO

##### 4.1.1. ANÁLISE MACRO

As análises preliminares foram iniciadas com uma análise temporal, com base nos anos de publicação e temas abordados em cada artigo. Foram encontradas publicações de 1975 a 2021, e para garantir que a tecnologia pudesse estar bem desenvolvida ou demonstrando alguma inovação para os dias atuais, a primeira restrição introduzida foi de visualizar apenas as publicações entre os anos de 2000 e 2021 para as duas bases de dados. Estas informações são exibidas no Figura 5.

Figura 5: Quantidade de publicações de artigos por ano e base de dados.



A partir da Figura 5, é possível notar que não houve uma quantidade considerável de publicações entre os anos 2000 e 2010. Entretanto, após este período, há um aumento no número de publicações total até 2017, quando ocorre um decréscimo no ano de 2018, e após o aumento em 2019 o número se mantém relativamente estável. É importante lembrar que os números de 2021 estão com informações até o mês de julho de 2021, o que pode implicar em um possível aumento do número de publicações até o fim do ano especificado, uma vez que os artigos

publicados após esta data não foram considerados na análise. Ainda é possível constatar que o Grupo RECICLOS-CNPq apresentou uma consistência em publicações de suas monografias e outras defesas acadêmicas, somadas às suas publicações de artigos científicos, de modo equivalente ao número publicado na base ScienceDirect, por quase todo o período analisado. Isto mostra o quão relevante o Grupo é dentro da área. Entretanto, de 2019 a 2021, há uma redução do número de defesas e publicações, indo de encontro ao aumento mais acelerado na base ScienceDirect, que manteve o aumento no número total de publicações sozinho. Esta redução pode ter diversos fatores envolvidos, como planejamentos de novos estudos finalizados, redução nos investimentos em pesquisa, dificuldades na obtenção de materiais para novos estudos, e até mesmo o período de pandemia global, iniciado no Brasil em torno do início do ano de 2020, este último podendo ter acarretado na continuidade da redução de publicações e defesas para os anos de 2020 e 2021.

Em um levantamento regional, foi possível determinar os países que se destacaram na quantidade de publicações envolvidas ao redor do tema estudado. Foram encontrados, de 2000 a 2021, um total de 43 países, podendo estes estarem colaborando entre si. No Figura 06, podemos ver os 10 países que mais tiveram publicações na base de dados ScienceDirect, enquanto no Figura 07 podemos ver os 10 países que mais tiveram publicações ao somarmos os resultados com o Grupo RECICLOS-CNPq.

Figura 6: Distribuição de publicações em relação aos países de origem na base ScienceDirect no período entre 2010-2021.

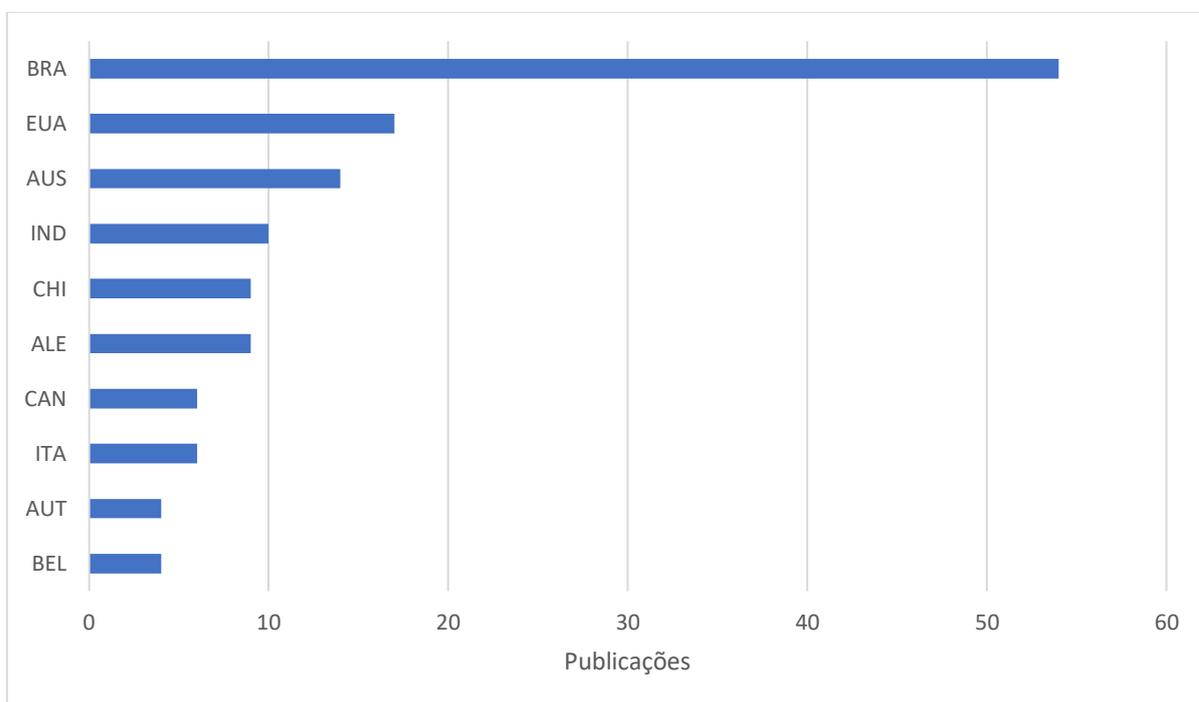
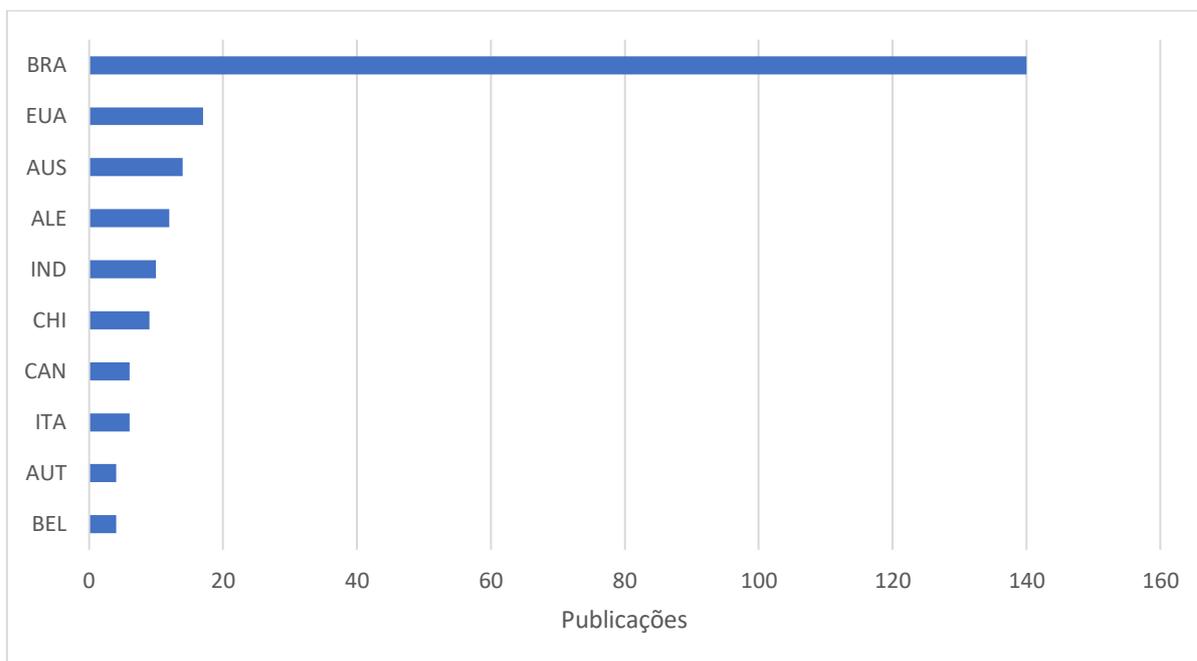


Figura 7: Distribuição de publicações em relação aos países de origem somando as bases ScienceDirect e Grupo RECICLOS-CNPq, no período entre 2010-2021.



Com relação a Figura 6, é possível notar que dentre os 10 países com mais publicações relacionadas ao tema deste estudo, 6 fazem parte dos 10 maiores produtores de minério de ferro do mundo (AUSTRÁLIA, 2021). Uma vez que a busca teve intenção de procurar por publicações que envolvessem Brasil e as cidades de Mariana e Brumadinho, era esperado que a maioria das publicações encontradas fossem brasileiras. Se levarmos em conta a adição do Grupo RECICLOS-CNPq ao total de publicações encontradas no intervalo de tempo selecionado, o Brasil aumenta ainda mais sua margem de publicações comparado aos outros países, como visto na Figura 7. Isto se deve ao fato de que o Grupo RECICLOS-CNPq é um grupo de pesquisa brasileiro e tem a maioria de seus trabalhos apenas com autores em organizações do país. Entretanto, é possível notar uma mudança na ordem de alguns países, como a Alemanha, que apresentou um pequeno aumento na quantidade de publicações, por conta de colaborações o Grupo RECICLOS-CNPq.

Ainda com relação ao total de publicações obtidos, foi possível obter informações acerca dos principais periódicos encontrados, ilustrado na Figura 8, e das principais áreas de conhecimento, como visto na Figura 9.

Figura 8: Distribuição percentual dos principais periódicos entre os anos de 2000 e 2021.

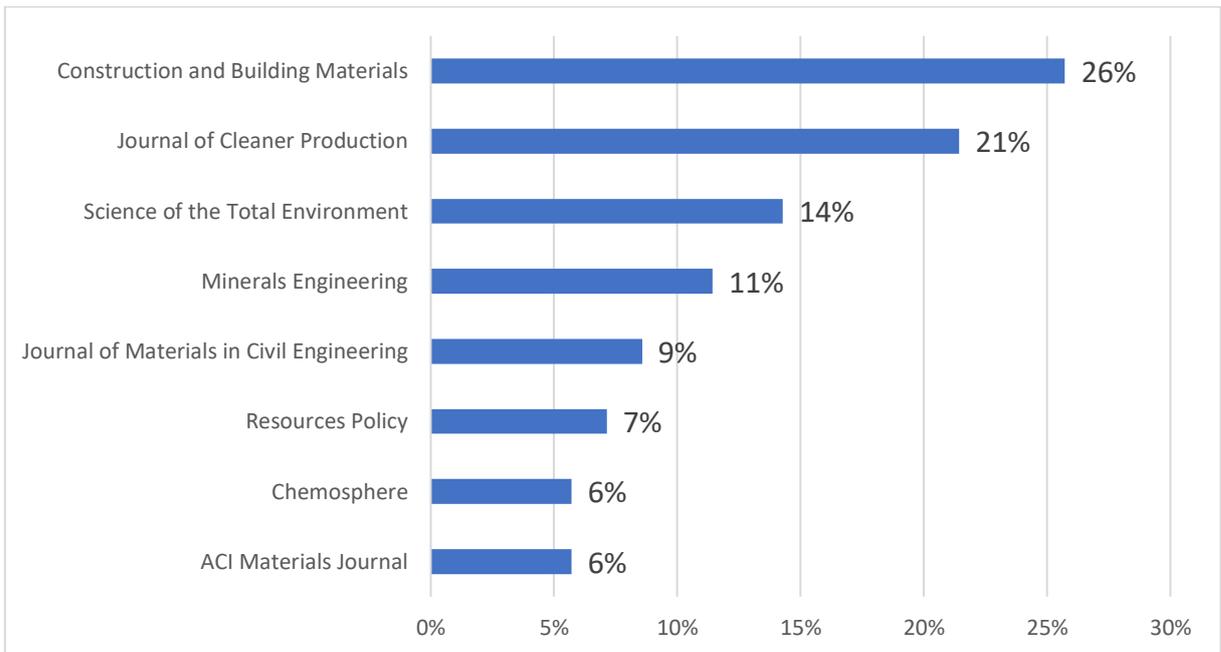
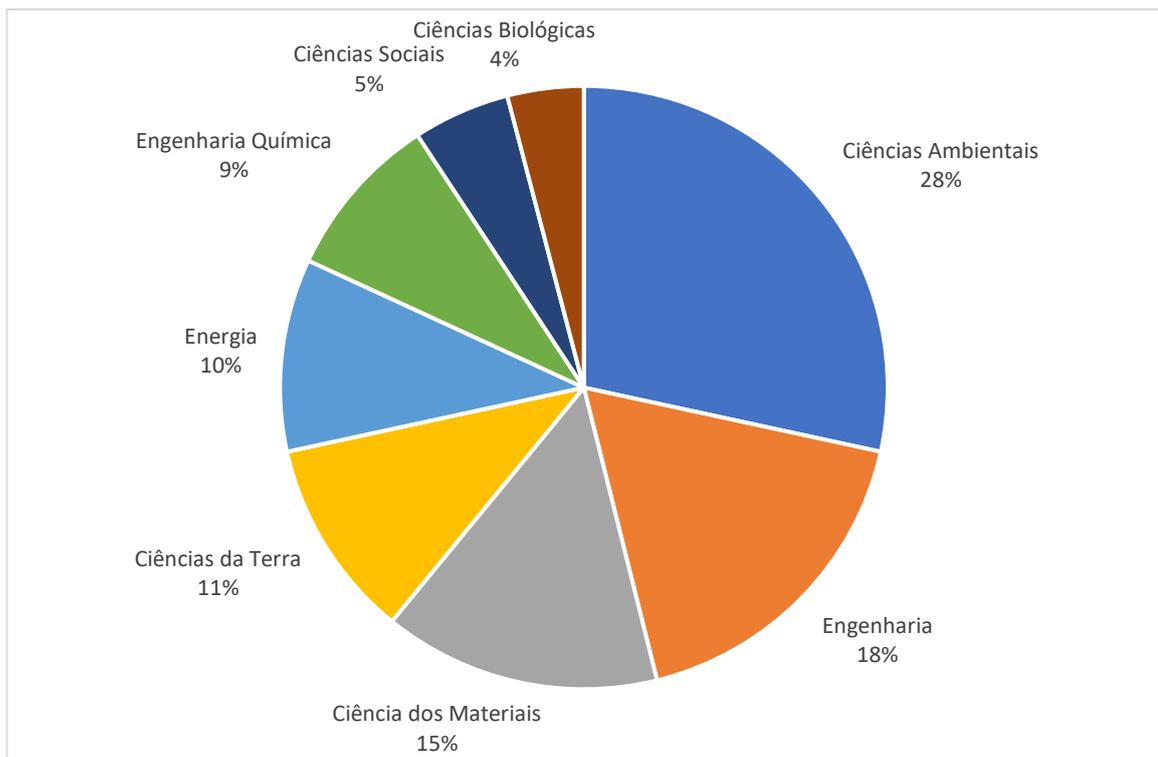


Figura 9: Distribuição percentual de publicações por área de conhecimento, entre os anos de 2000 e 2021.

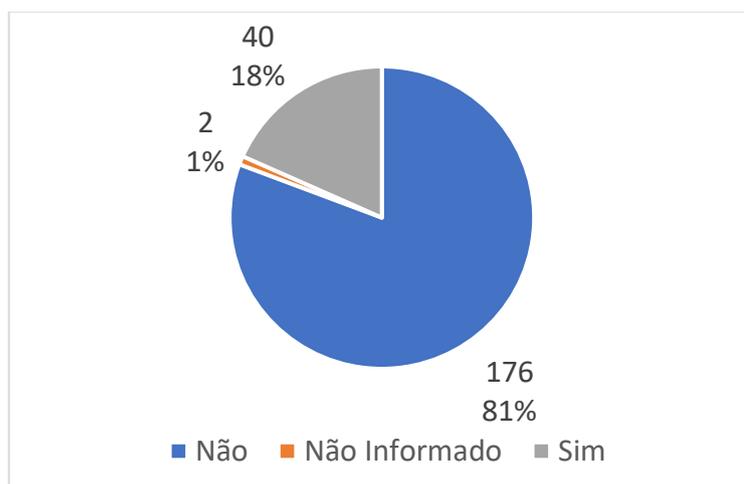


A Figura 8 mostra uma predominância de periódicos de áreas ambientais e de engenharia civil, que corrobora a Figura 9. Nota-se que há um certo equilíbrio entre algumas áreas de conhecimento. Como o tema é multidisciplinar, é possível perceber que Ciências Ambientais e Engenharia correspondem a quase metade do total, com 28% e 18%, respectivamente, mas Ciências dos Materiais, Ciências da Terra, Energia e Engenharia Química também apresentam fatias consideráveis, com 15%, 11%, 10% e 9%, respectivamente. Dentre os artigos que se destacam na área de Ciências Ambientais, há uma análise da estrutura da barragem do Fundão, rompida em 2015 em Bento Rodrigues, próximo ao município de Mariana, Minas Gerais. A publicação avalia a estrutura da barragem, bem como possíveis falhas na mesma que possam ter levado ao rompimento e consequente derramamento dos rejeitos de minério de ferro. O artigo também aborda os danos e prejuízos causados a ecossistemas, áreas de proteção, construções e patrimônio histórico, além de comparar o acontecimento com outros rompimentos ao redor do mundo (DO CARMO et al, 2017).

#### 4.1.2. ANÁLISE MESO

De modo análogo ao da análise Macro, foi possível realizar uma análise dos resultados obtidos após um refinamento nas publicações da etapa anterior. Foram avaliadas as metodologias de todas as publicações, de modo a avaliar quais apresentavam a utilização do RBMF em algum produto ou processo, e com ênfase nas publicações que utilizassem RBMF brasileiro. A Figura 10 ilustra a relação entre publicações que apresentam aplicações de RBMF a processos ou produtos (40) e o total de publicações encontradas inicialmente (218).

Figura 10: Número de publicações que possuem ou não aplicação de RBMF.



Das 40 publicações que apresentaram dentro de suas metodologias a aplicação do RBMF, foi possível destrinchar ainda mais a origem do rejeito, com base na sua origem. Destas 40 publicações, 2 não informavam a origem e 2 não utilizavam RBMF do Brasil, o que totaliza 36 artigos científicos ou defesas que aplicam diretamente o RBMF brasileiro.

Com base neste número, foi possível estabelecer novas observações, ilustrada na Figura 11, Figura 12 e Figura 13. Na Figura 11 podemos ver a distribuição percentual de publicações que propõem a reutilização do RBMF brasileiro entre os dois bancos de dados utilizados na análise; na Figura 12 vemos a distribuição completa dos 36 artigos por ano, enquanto na Figura 13 temos esta distribuição subdividida entre as bases de dados utilizadas (ScienceDirect e Grupo RECICLOS-CNPq).

Figura 11: Distribuição percentual das publicações que apresentam métodos de reutilização de resíduo de barragem de minério de ferro brasileiro por bancos de dados pesquisados.

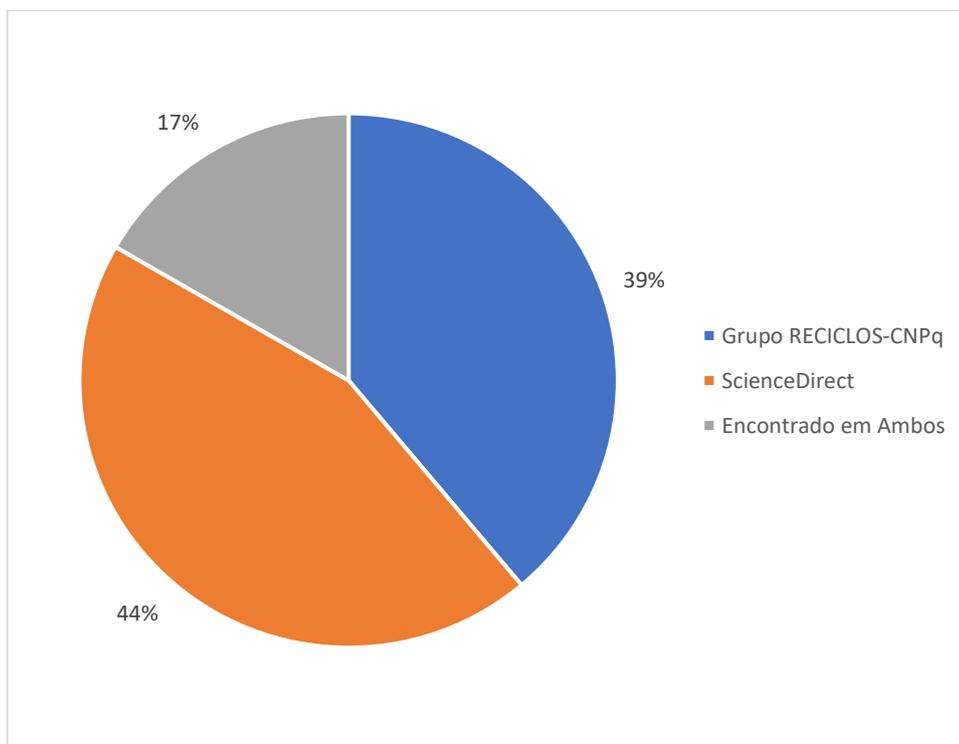


Figura 12: Distribuição temporal das publicações que apresentam reutilização de rejeitos de barragem de minério de ferro brasileiro.

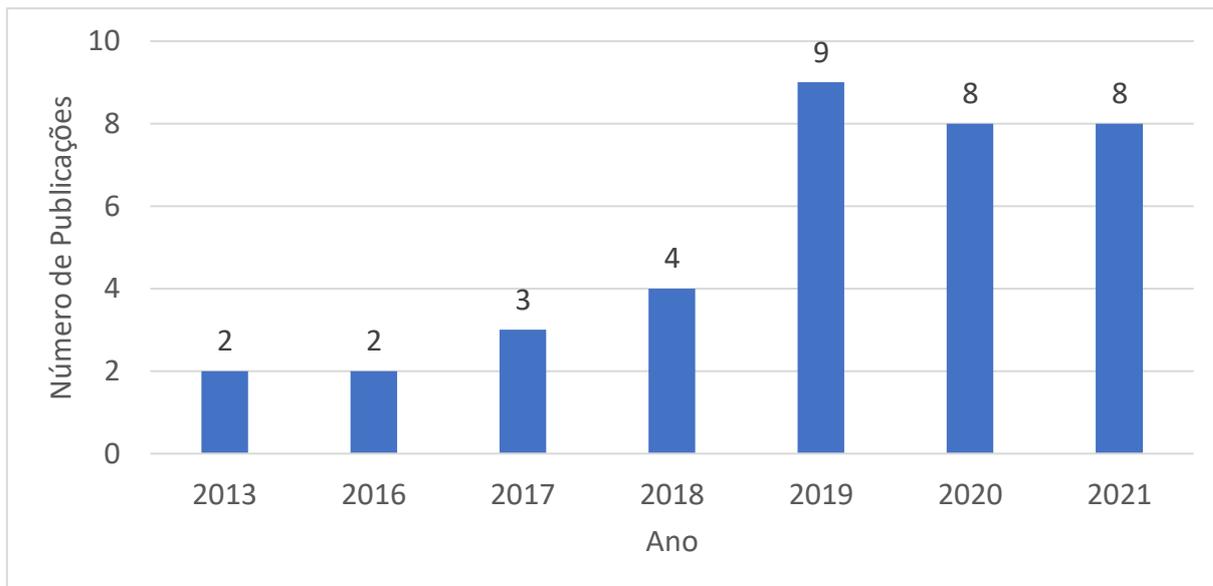
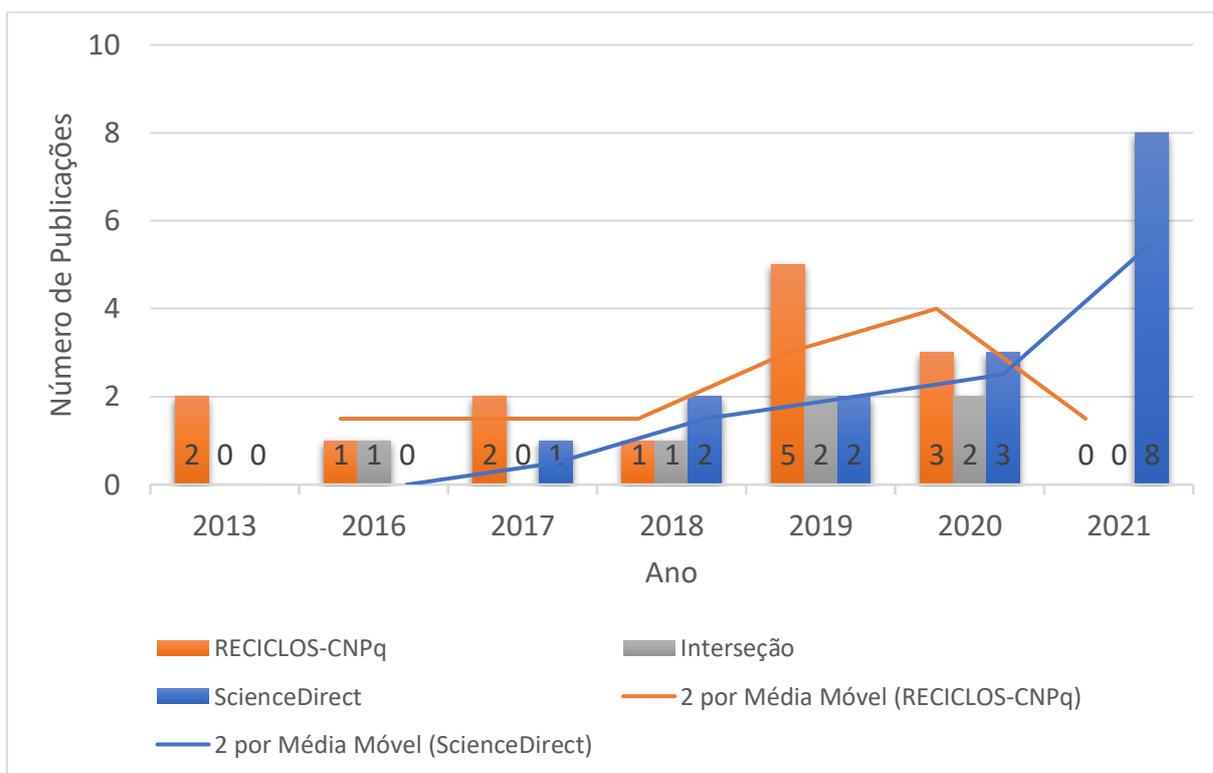


Figura 13: Distribuição temporal das publicações que apresentam reutilização de rejeitos de barragem de minério de ferro brasileiro.



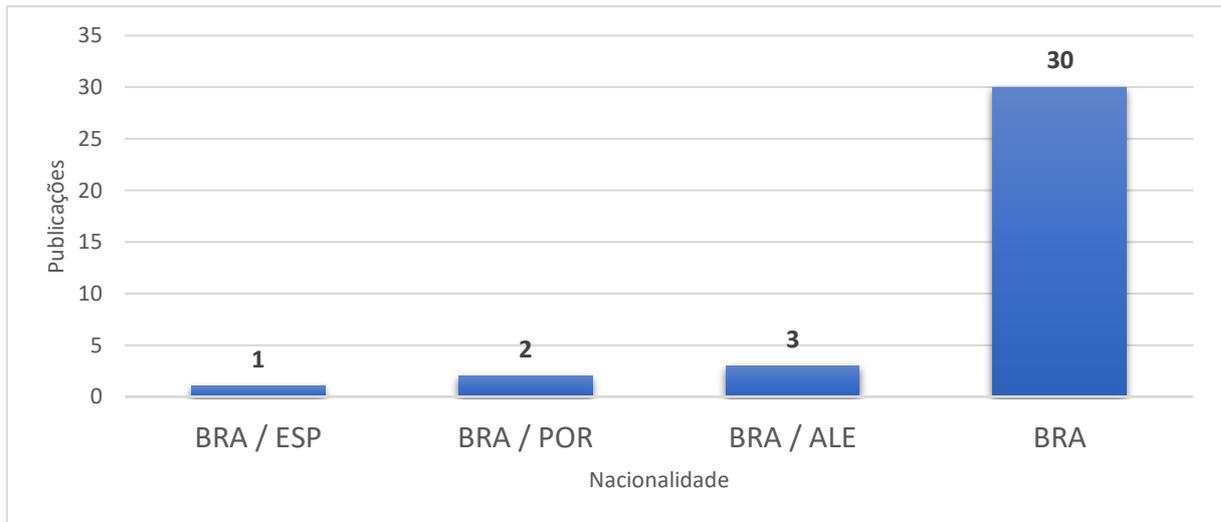
É possível notar que todas as publicações foram após o ano de 2010, fazendo com que não fosse necessário realizar um recorte temporal. Na Figura 12, vemos que há duas áreas bem definidas e estáveis no total de publicações, uma de 2013 a 2017 e outra de 2019 até 2021.

Podemos aqui lembrarmos as datas de acontecimentos das duas principais tragédias da mineração brasileira novamente: o rompimento da barragem de Bento Rodrigues (Mariana, MG) foi no dia 05 de novembro de 2015, enquanto o rompimento da barragem em Brumadinho, MG, 25 de janeiro de 2019. Ao avaliarmos as datas, podemos perceber que há uma relação entre os primeiros anos de aumento do número total de publicações que reutilizam RBMF brasileiros com o acidente de 2015. Embora não haja, ainda no ano de 2015, um aumento claro, é importante levarmos em conta que o acidente ocorreu no fim do ano, e que se leva um período de tempo para que pesquisas tenham um planejamento, aprovação, finalização e aceite em bancos de artigos científicos de relevância. De 2016 a 2019, o aumento é contínuo, e os valores formam um patamar de estabilidade entre 2019 e 2021, tendo seu máximo no ano de 2019 (lembrando aqui, novamente, que os dados colhidos para este trabalho foram até o mês de julho de 2021). Ao avaliarmos estas informações, é de se esperar que as datas próximas entre os dois rompimentos tenham acelerado o processo de produção de pesquisas acadêmicas sobre o assunto no Brasil, justificando este aumento nos últimos anos.

Para a Figura 13, esta análise temporal é dividida nas duas bases de pesquisa, e aqui podemos avaliar melhor como cada base se saiu para contribuir no total de publicações ano após ano. Vemos, portanto, que o Grupo RECICLOS-CNPq apresenta valores equivalentes aos do ScienceDirect em todos os anos, com exceção de 2019, onde ocorre um aumento considerável no número de publicações do mesmo, e no ano de 2021, onde não houve nenhuma publicação até o período avaliado. Percebe-se, também, que o Grupo RECICLOS-CNPq, além de seus trabalhos acadêmicos, demonstra certa consistência na quantidade e qualidade de artigos científicos publicados em grandes bases de dados, onde vemos que na própria ScienceDirect encontramos artigos do Grupo RECICLOS-CNPq nos anos de 2016, 2018, 2019 e 2020, enquanto outras bases de artigos científicos estão englobadas ao lado dos trabalhos acadêmicos.

A Figura 14 exhibe os 36 artigos distribuídos por nacionalidade das instituições autorais. Aqui, é possível visualizar a soberania do Brasil na publicação dos mesmos, que pode ser justificada novamente pela presença de uma base de publicações nacional, aliada ao fato do país ser um dos maiores produtores de minério de ferro e, conseqüentemente, RBMF, no mundo. Além disso, percebe-se que tanto Portugal, Espanha e Alemanha estão presentes em parceria com o Brasil, fazendo com que o país seja unânime nas publicações obtidas com foco na reutilização de RBMF nacional.

Figura 14: Distribuição de publicações que apresentam métodos de reutilização de RBMF brasileiro em relação aos países de origem.



Outras avaliações realizadas foram a distribuição percentual de publicações por periódico, ilustrada na Figura 15, e a distribuição percentual de publicações por área de conhecimento, exibida na Figura 16.

Figura 15: Distribuição percentual dos principais periódicos contendo publicações com a proposta de reutilização do RBMF brasileiro.

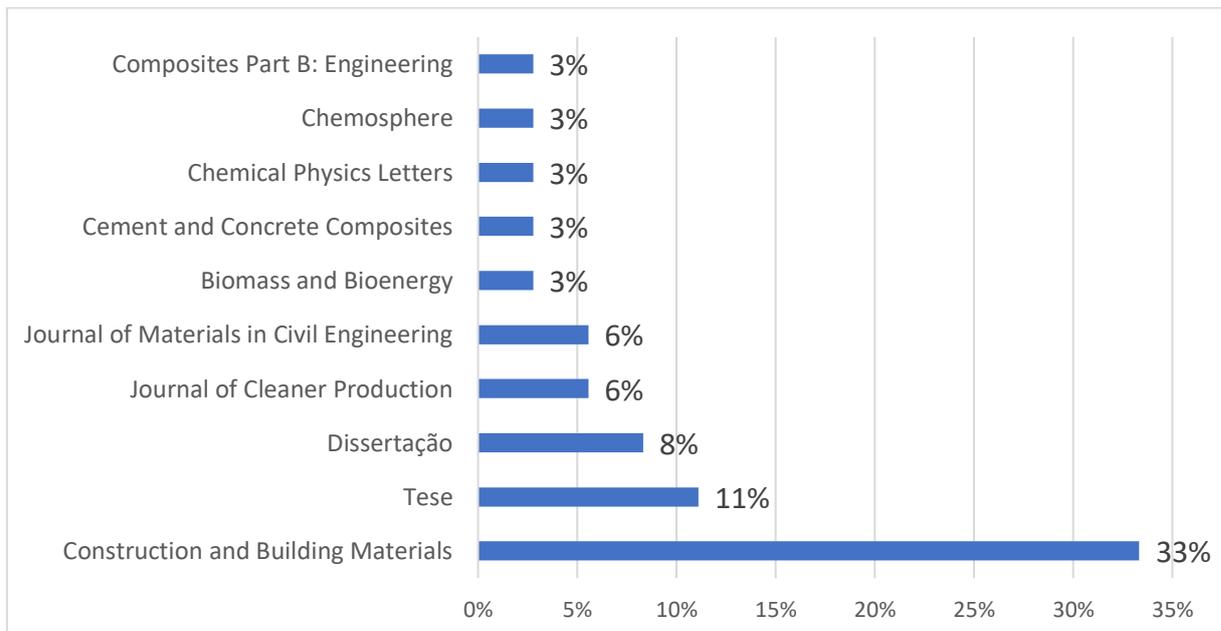
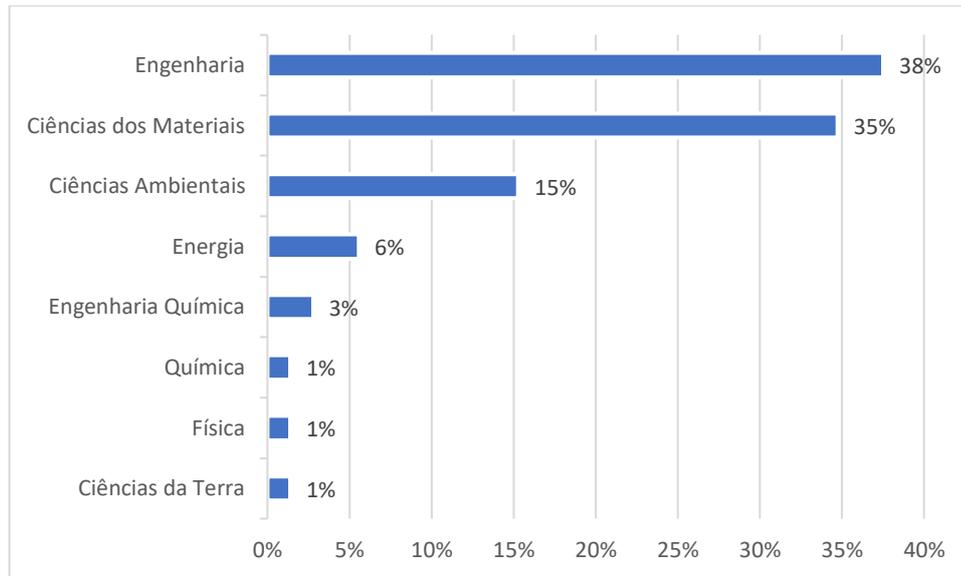


Figura 16: Distribuição de publicações por área de conhecimento.

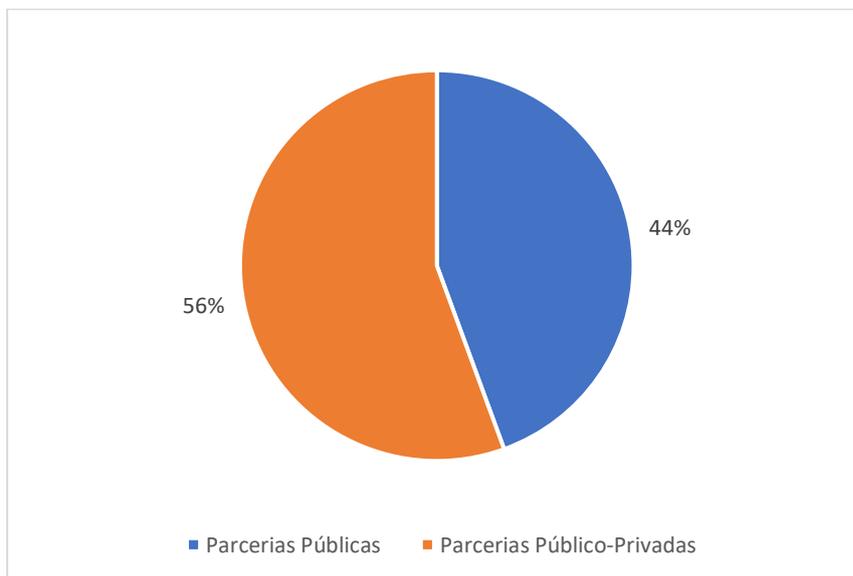


Com exceção das dissertações e teses do Grupo RECICLOS-CNPq na Figura 15, em sua maioria defendidas na Universidade Federal do Ouro Preto (UFOP), onde se localiza o Grupo, percebe-se que há uma grande quantidade de periódicos na área de engenharia. Já com a adição de informações da Figura 16, vemos a predominância da engenharia e da ciência dos materiais nas publicações. Uma vez que o objetivo é encontrar publicações que proponham métodos de reutilização do RBMF brasileiro, é esperado que publicações de cunho ambiental, antes em maior quantidade na análise macro, sejam excluídas do filtro, uma vez que elas buscam avaliar indicadores ambientais e mudanças nos ecossistemas das áreas afetadas pelos desastres de Mariana e Brumadinho.

Uma vez que os resíduos apresentam uma concentração substancial de óxido de silício e óxido de ferro em sua composição, as áreas de engenharia civil se destacam na análise meso, uma vez que o resíduo pode ser utilizado em diversas aplicações de construção civil. Uma das publicações mais citadas presente no periódico *Construction and Building Materials* é do Grupo RECICLOS-CNPq, e apresenta uma forma alternativa de utilização do RBMF brasileiro como agregado para argamassa e concreto, de forma a substituir outros agregados como cal. Os resultados indicaram que a substituição pode ser realizada numa proporção máxima de 20% para que seja economicamente viável, e além disso, as propriedades encontradas para a “argamassa reciclada”, como denominada no artigo, demonstram que sua aplicação é melhor adequada para trabalhos de alvenaria, como levantamento de muros de tijolos (FONTES et al, 2016).

Das 36 publicações obtidas para a análise meso, todas apresentaram pelo menos uma Universidade, Instituto ou Agência de Fomento pública em sua produção. Na Figura 17, podemos ver a distribuição percentual das publicações que apresentaram apenas entidades públicas e publicações que apresentaram parcerias público-privadas.

Figura 17: Distribuição percentual de publicações por parcerias inteiramente públicas e parcerias público-privadas.



Com isso, podemos perceber que as organizações públicas possuem uma grande importância nas pesquisas nacionais. Podemos ampliar esta análise com a Figura 18 e Figura 19, onde a Figura 18 exibe as universidades públicas com mais autorias dentre as publicações avaliadas, e a Figura 19 apresenta as maiores parcerias, agências de fomento ou instituições que receberam agradecimentos pelas pesquisas realizadas.

Figura 18: Distribuição percentual de artigos publicados pelas principais universidades públicas.

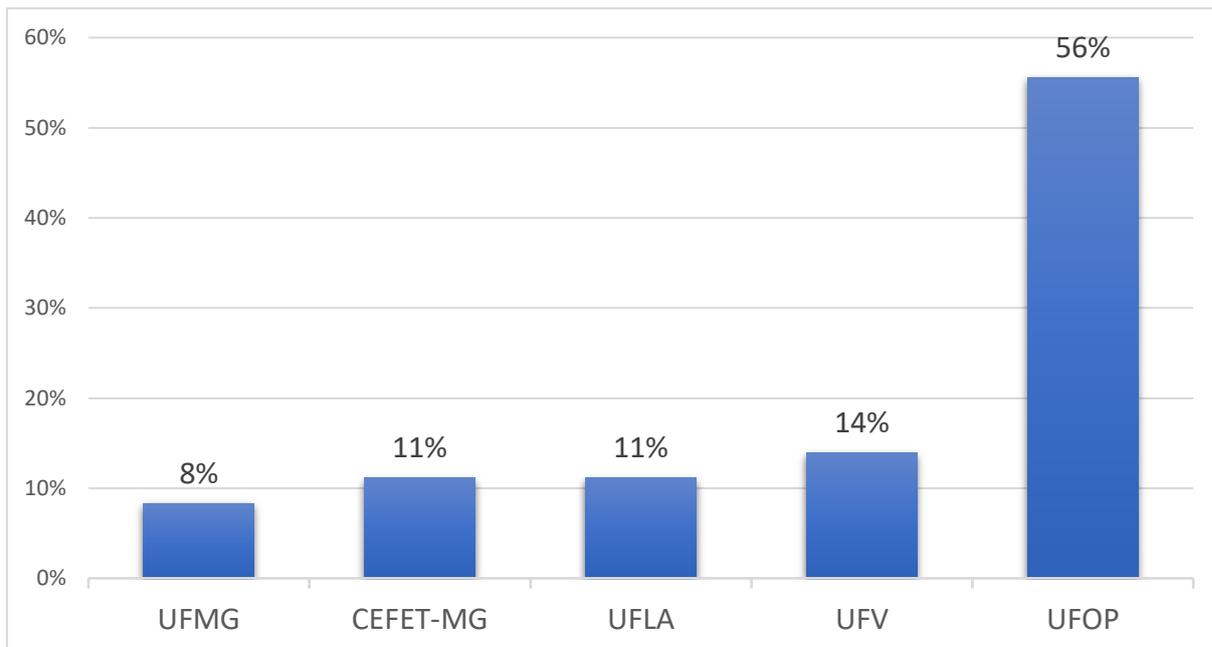
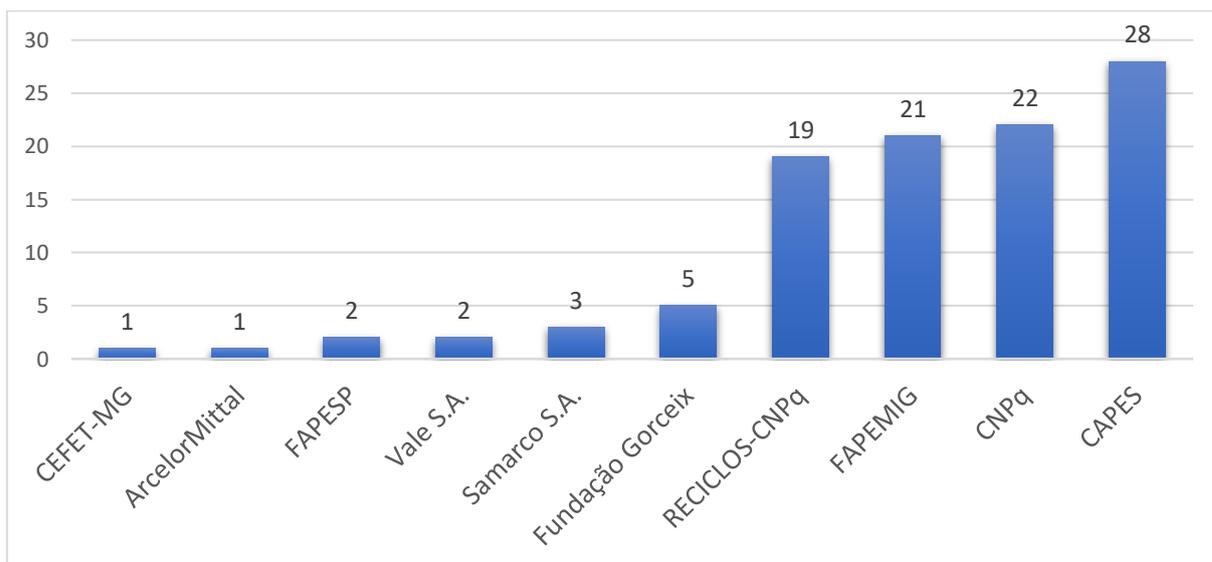


Figura 19: Principais parcerias e entidades que receberam agradecimentos pelas publicações analisadas.



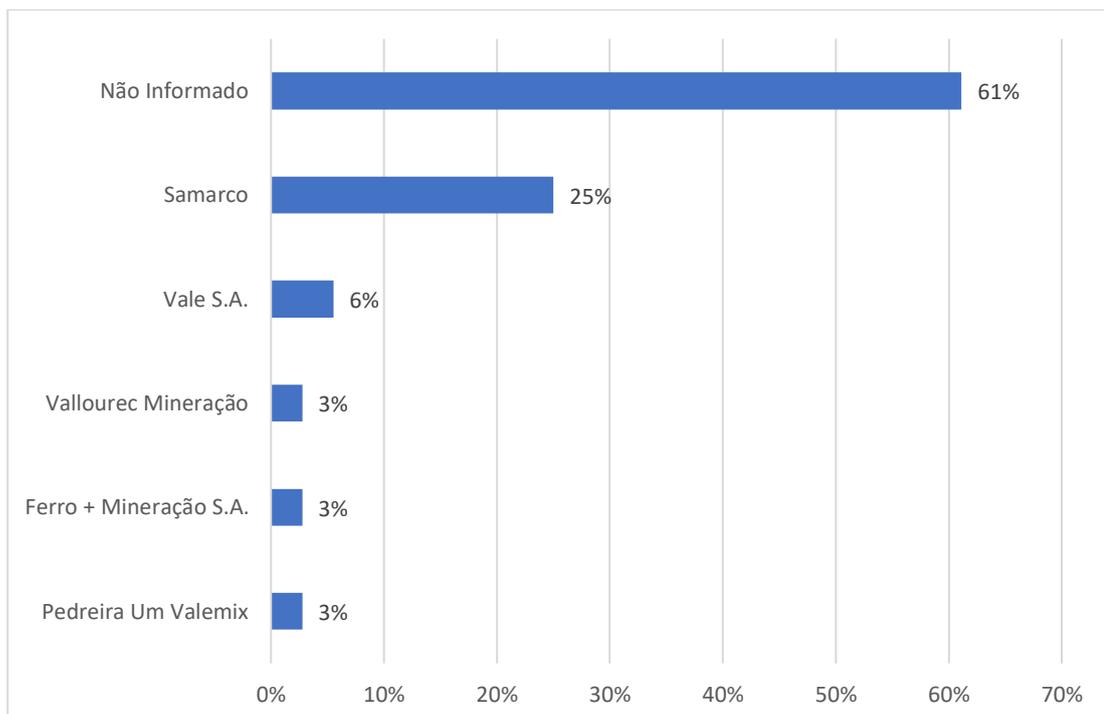
Percebe-se pela Figura 18 que as principais universidades, além de serem públicas, também estão localizadas na área do Estado de Minas Gerais. Já a Figura 19 mostra a predominância de agências públicas de fomento para a produção dos artigos e estudos científicos, como CAPES, CNPq e FAPEMIG. Entretanto, é notável a presença de empresas mineradoras em algumas parcerias, como a Samarco S.A., Vale S.A. e ArcelorMittal, ainda

mais levando-se em conta que as barragens que sofreram ruptura em Mariana e Brumadinho são proprietárias da Samarco S.A. e da Vale S.A., respectivamente, sendo importante lembrar que a Samarco S.A. é uma *joint venture* entre a Vale S.A. e a BHP Billiton, mineradora e petrolífera anglo-australiana.

Uma vez que a maioria das empresas de mineração e, conseqüentemente, barragens de minério de ferro, estão localizadas no mesmo Estado de universidades relevantes como as exibidas na Figura 18, a relação destas com as empresas mineradoras locais se torna vantajosa, expandindo a pesquisa no setor, e conseqüentemente, a eficiência da indústria em suas operações, além de trazer ao público resultados de pesquisas científicas que podem, por ventura, proporcionar caráter inovativo. Complementando estes dados, a origem do RBMF brasileiro utilizado em 35 das 36 publicações da análise meso é Minas Gerais, corroborando as informações anteriores (a publicação restante não informa o Estado brasileiro do material utilizado em sua metodologia).

Aprofundando a análise, foi possível extrair informações acerca da origem do RBMF de cada publicação, como é possível visualizar na Figura 20.

Figura 20: Origens industriais do rejeito de barragem de minério de ferro de cada publicação analisada.



A maioria das publicações não informam a origem industrial do material, embora, conforme supracitado, quase a totalidade informa a origem geográfica. Entretanto, 25% das publicações informam que o material foi obtido em barragens da Samarco S.A., e 6% de barragens da Vale S.A.

#### 4.1.3. ANÁLISE MICRO

Na análise micro, as publicações anteriormente selecionadas foram investigadas com o intuito de obter informações acerca da aplicação do RBMF brasileiro. A Tabela 3 resume os respectivos resultados.

**Tabela 3.** Exibição das aplicações de resíduo de barragens de minério de ferro brasileiro obtidos para os artigos das análises meso e micro.

Aplicação	Número de Publicações
Compósito Cimentício	7
Argamassa	4
Catalisador para Tratamento de Efluentes	3
Compósito Geopolimérico	3
Concreto	2
Pavimentação Rodoviária	2
Piso Cerâmico	2
Piso de Concreto Intertravado	2
Tinta	2
Aditivo para Produção de Biogás	1
Cascalho Sintético para Concreto	1
Cimento Alcalinamente Ativado	1
Cloreto Férrico para Tratamento de Efluentes	1
Misturas Asfálticas	1
Nanomaterial para Tratamento de Efluentes	1
Solo para Cultivo	1
Tijolo de Argila	1
Tijolo Solo-Cimento	1

Com base nestas aplicações, podemos ver melhor os resultados obtidos na análise meso, onde foi possível perceber anteriormente que aplicações que envolvem engenharia e ciência dos materiais encontram-se em maior quantidade. Ainda assim, os resultados se tornam mais promissores quando verificamos o todo: não apenas os resultados mais esperados, como

agregados de argamassas, concretos e cimentos foram encontrados em maior quantidade, mas também foram identificadas publicações que demonstraram alternativas de aplicação do RBMF brasileiro de forma satisfatória em diversas outras áreas de atuação, como tratamento de efluentes, catalisadores e, de forma inicialmente contraditória ao senso comum, solo para cultivo. Por isso, as aplicações foram categorizadas como descrito na Tabela 4, para que as de maior relevância pudessem ser então melhor detalhadas ao longo deste capítulo.

**Tabela 4.** Exibição das aplicações de resíduo de barragens de minério de ferro brasileiro obtidos para as publicações da análise meso, divididas em categorias e subcategorias.

<b>ENGENHARIA CIVIL</b>	
COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS, GEOPOLÍMEROS, ARGAMASSAS E CONCRETOS	20
PAVIMENTAÇÃO URBANA	5
TIJOLOS	2
TINTAS	2
<b>TRATAMENTO DE EFLUENTES</b>	5
<b>AGRICULTURA</b>	1
<b>ENERGIA</b>	1

A seleção dos documentos avaliados neste trabalho se deu pela relevância do artigo científico na base de dados ou pela inovação contida na incorporação do RBMF.

#### 4.2. PUBLICAÇÕES DE ENGENHARIA CIVIL

De acordo com Duggal (2009), a definição geral de cimento, a base dos compostos cimentícios, é de que são materiais com propriedades adesivas e coesivas capazes de unir partículas de materiais sólidos em uma massa compacta e rígida. Para a indústria civil, o cimento apresenta entre seus componentes compostos calcários como principal constituinte, com a função de unir partículas agregadas finas (como areia) e grosseiras (como brita) entre si.

Já o cimento Portland, um dos mais utilizados e que pode ser dividido em diversos tipos de acordo com suas composições, é um material cimentício hidráulico, ou seja, um material inorgânico que apresenta a habilidade de reagir com água em condição ambiente, de modo a sofrer endurecimento e formar um produto não apenas rígido mas também resistente a água (OJOVAN e LEE, 2005), que, de acordo com Duggal (2009), é um produto obtido por meio da calcinação de uma mistura em proporções adequadas de materiais calcários e argilosos,

finamente pulverizada, que ao atingir a temperatura de fusão incipiente (~1450 °C) dá origem ao *clínquer*, que é então pulverizado para dar origem ao cimento Portland. O *clínquer*, e portanto, os cimentos hidráulicos, são compostos basicamente por cal (CaO), sílica (SiO<sub>2</sub>) e alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), com pequenas proporções de óxido de ferro (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), óxido de magnésio (MgO) e outros resíduos em menor teor. Le-Chatelier e Tornebohm, de acordo com Duggal (2009), se referiram aos quatro principais componentes do *clínquer* como Alite (Silicato Tricálcico, 3CaO.SiO<sub>2</sub>), Belita, (Silicato Dicálcico, 2CaO.SiO<sub>2</sub>), Celita (Aluminato Tricálcico, 3CaO.Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) e Felita (Ferroaluminato Tetracálcico, 4CaO.Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). A fusão incipiente leva a formação destes óxidos de cálcio livres, o que permite que o material apresente propriedades de hidratação e ao mesmo tempo apresente silicatos de cálcio desidratados em quantidade suficiente para que o pó seco formado no fim do processo possua as propriedades hidráulicas buscadas (ACI, 2013).

Entretanto, o cimento Portland é uma ameaça ambiental advinda da indústria da construção civil. Sua fabricação é uma das principais contribuições antropogênicas para a emissão de carbono no mundo, onde uma tonelada de cimento Portland produzida emite o mesmo equivalente em dióxido de carbono em nossa atmosfera, de acordo com Karthika et al (2018), além do fato de que apenas a substituição do *clínquer* já seria suficiente para reduzir em até 58% o total de impactos provenientes da indústria de produção de cimento (CARVALHO et al, 2019). Por isso, há uma necessidade global de se buscar alternativas para o cimento Portland que apresentem baixo custo, aplicabilidade e qualidade equivalentes e menos prejudiciais para o meio ambiente. Dentre essas alternativas, os compósitos tem demonstrado resultados promissores.

Um material compósito pode ser definido como uma combinação de dois ou mais materiais que, quando misturados ou unidos, apresentam melhores propriedades do que quando utilizados individualmente, apresentando assim vantagens superiores às existentes anteriormente, sem perder as vantagens pré-existentes, como por exemplo apresentar baixa densidade e alta resistência para redução de peso sem que isso afete sua resistência mecânica (CAMPBELL, 2010).

Em geral, ainda de acordo com Campbell (2010), as duas fases principais de um material compósito são o reforço e a matriz. A fase de reforço é comumente uma fibra ou particulado, mais resistente, mais forte e mais rígido que a fase matriz, que por sua vez é uma fase contínua em polímero, metal ou cerâmica, a depender das propriedades necessárias. A matriz auxilia a fase de reforço em fibras, por exemplo, a se manter orientada de forma apropriada e a protege

de abrasão. As principais vantagens de materiais compósitos envolvem redução de massa do material, ser capaz de ser fabricado com propriedades otimizadas, resistência à corrosão, entre outros. Já as desvantagens mais comuns incluem custos elevados de matéria-prima, fabricação e montagem, além de suscetibilidade a danos por impacto e dificuldades elevadas no reparo quando comparado com estruturas metálicas.

A similaridade entre os RMBFs e materiais de construção, como a presença de quartzo ( $\text{SiO}_2$ ), alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) e hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), confere a eles propriedades mecânicas promissoras para a sua utilização total ou parcial em cimentos, argamassas, concretos e outros compósitos afins, reduzindo seus custos de produção e dando uma finalidade a um rejeito.

#### 4.2.1. COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS: CONCRETOS E ARGAMASSAS

##### 4.2.1.1. O CONCRETO

O concreto pode ser caracterizado como um compósito muito utilizado como material de construção que é formado a partir de uma mistura de proporções pré-estabelecidas de materiais de ligação, como cal e cimento, com agregados finos e grosseiros, água e aditivos diversos, que podem lhe garantir propriedades únicas como efeitos acelerador e retardante, agentes de trabalhabilidade, pozolanas, resistência a água, etc. Nesta mistura, como visto anteriormente, a água e o cimento reagem formando uma matriz onde os espaços existentes nela são ocupados pela adição dos agregados particulados finos, onde estes, então, auxiliam na ligação do material como um todo. Após o período de cura, onde o concreto é deixado em descanso para que a água reaja apropriadamente com o material, o concreto se torna extremamente rígido (DUGGAL, 2009).

De acordo com Duggal (2009), a proporção água:cimento é um dos principais fatores que influenciam a resistência de um concreto. É esta proporção, que em geral pode ser representada graficamente por uma linha reta crescente quando relacionada com a resistência, que promove a porosidade da pasta cimentícia endurecida, onde quanto maior a porosidade, menor a resistência. A propriedade mais útil do concreto é sua resistência à compressão. Entretanto, existem várias formas de resistência e testes correspondentes, tais como resistência à compressão, à tração, à flexão, à força de cisalhamento, mas não existem relações entre elas até os dias atuais, embora alguns valores apropriados são conhecidos.

A trabalhabilidade e a consistência de um concreto são propriedades distintas. Duggal (2009), define a trabalhabilidade como a propriedade do concreto que determina a quantidade de trabalho interno útil necessário para produzir compactação completa. Já a consistência

representa o grau de fluidez ou mobilidade, ou seja, um concreto de alta consistência pode não ser trabalhável dependendo da aplicação. Os principais fatores que podem afetar a trabalhabilidade são: teor de umidade; proporções da mistura; tamanho dos agregados; formato dos agregados; textura superficial; classificação dos agregados e modo de mistura.

#### 4.2.1.2. CONCRETOS ECO-EFICIENTES CONTENDO RBMF NA COMPOSIÇÃO

Uma das publicações mais relevantes encontradas no estudo prospectivo para este caso foi a publicação de De Carvalho et al (2019). Sua proposta envolve a substituição parcial do cimento Portland por outros materiais cimentícios suplementares para a produção final de concreto. Entende-se como um material cimentício suplementar, de acordo com a *Portland Cement Association*, todo material que contribua para as propriedades de um concreto endurecido por meio de atividades pozolânica (reatividade da sílica presente no material) ou hidráulica, de modo a fazer com que o concreto final seja menos custoso, tenha uma permeabilidade reduzida, maior resistência e possa apresentar outras propriedades adicionais. Para isso, foram preparadas misturas altamente empacotadas de concreto e areia para referência, e misturas contendo quatro rejeitos industriais e de mineração diferentes (escória de forno básico a oxigênio; RBMF, rejeitos de mineração de quartzo e rejeitos de mineração de quartzitos), em substituição parcial ao cimento presente no concreto.

Os rejeitos foram moídos de modo a obter frações de cada um dos rejeitos em pó mais fino que o cimento e também em pó mais grosseiro que o cimento. Por meio de investigação por microscópio eletrônico de varredura (MEV), foi possível avaliar a morfologia do RBMF, onde foi percebida a predominância de partículas de quartzo angulares e com bordas afiadas, enquanto um grande número de partículas menores foi aderido às partículas maiores do rejeito.

As frações finas e grosseiras foram então misturadas em 6 proporções distintas com cimento Portland, mantendo-se fixa a proporção de agregados de areia em todas elas. Com a adição de superplastificante, as misturas secas se tornaram pastas, que foram então avaliadas quanto ao seu espalhamento e densidade máxima de empacotamento. Foi observado que menores quantidades de pó grosseiro de RBMF tiveram melhores resultados, ao mesmo tempo em que os melhores resultados gerais foram obtidos para as misturas apresentando maiores quantidades de finos. A morfologia das partículas mais finas, à primeira vista, pode ser a diferencial para a melhor performance de empacotamento, de acordo com De Carvalho et al

(2019). Além disso, foi necessário adicionar água nas misturas em maior quantidade que para os outros rejeitos, de modo a não demonstrar tanta vantagem na economia de água: a referência apresentou uma relação água:finos de 0.30, enquanto as pastas de RBMF apresentaram valores entre 0.26 e 0.30, enquanto, de modo geral, os valores para outros resíduos variaram entre 0.25 e 0.23.

Em uma análise de índice de vazios e pulso de velocidade ultrassônica, os autores notaram uma particularidade para o RBMF. Os índices de vazios se mantiveram similares em todas as proporções de amostras, mas o pulso de velocidade ultrassônico reduziu drasticamente nas amostras com menor teor de RBMF na composição. Isto leva a crer que partículas mais finas de RBMF são agentes de entrada de ar no concreto, formando microporos no interior da massa entre partículas lamelares provenientes de materiais argilosos, inacessíveis à água. Com o aumento do teor de RBMF, o pulso de velocidade ultrassônica aumenta, uma vez que o rejeito consegue acessar os vazios antes inacessíveis.

Por fim, a performance mecânica do concreto apresentando RBMF em sua composição não atingiu resultados equivalentes aos de referência, o que corrobora os resultados anteriores com um maior índice de vazios e maior razão água:finos. Entretanto, os resultados para proporções com maiores teores de finos foram próximos da referência ou até ligeiramente superiores. Uma última avaliação para a eco-eficiência do concreto de cimento substituído resultou em melhores resultados para todas as amostras de todos os rejeitos avaliados, quando comparados com a referência. Assim, foi possível verificar que os RBMF podem substituir parcialmente o cimento Portland na produção de concreto para um concreto mais eco-eficiente.

#### 4.2.1.3. USO DE RBMF NA PRODUÇÃO DE CIMENTO E CONCRETO SUSTENTÁVEIS

Protasio et al, 2021, realizou investigações em cimentos e concretos contendo RBMF sem tratamento prévio ou redução de tamanho de partículas. Como pode ser visto na Tabela 1, o RBMF deste estudo apresenta um elevado teor de quartzo, com 90,7%, e apenas 9,3% de hematita na composição, o que o faz ser mais comparável à substituição da areia enquanto agregado. Por isso, foram preparadas pastas de cimento contendo o rejeito em 10%, 20% e 30% em massa, utilizando um cimento sem rejeito para referência; enquanto para o concreto foram preparados dois grupos de três amostras cada, onde todas apresentavam em sua composição areia natural, agregados grosseiros e água. Um grupo de três delas recebeu a adição de agregados finos de areia em substituição à areia natural e três receberam a adição de agregados

de RBMF, mantendo as proporções de 10%, 20% e 30% nos dois grupos. Para referência, foi utilizada uma sétima amostra de concreto sem agregados finos.

O cimento contendo RBMF foi avaliado quanto à sua pozolanicidade. Foi observado por meio de difração de raios-X um alto grau de cristalinidade no RBMF por conta da presença de quartzo, sem nenhuma evidência de formação de produtos de hidratação no material. Uma vez que a reatividade pozolânica advém de fases vítreas (amorfais) da sílica, notou-se que o RBMF não apresentou nenhuma atividade pozolânica, portanto. A quantidade de finos de rejeito na mistura poderia aumentar a reatividade da massa, por conta do aumento de área superficial específica, mas isto não se confirmou com a análise.

Com relação ao teste de *flow* da pasta cimentícia, houve um aumento gradual de fluidez com o aumento do teor de RBMF no cimento, atingindo a marca de 41,4% a mais de espalhamento no cimento com 30% de rejeito quando comparado à referência. Isto ocorre por conta da diferença de área superficial específica dos materiais, onde o tamanho do cimento, mais fino que os rejeitos, apresentam uma área maior. Assim, o RBMF passa a absorver mais água, contribuindo assim para uma maior fluidez da pasta.

Com relação ao teste de resistência à compressão, foi observado que quanto maior a porcentagem de RBMF na composição do cimento, menor era a resistência. Isto pode ser atribuído, de acordo com o autor, a substituição do material ativo presente na pasta por um material inerte, no caso, o rejeito. A perda de resistência atingiu marcas de 40% tanto para amostras de 30% de rejeito após 1 dia quanto após 90 dias.

Com relação ao concreto, após a adição de RBMF sua trabalhabilidade foi reduzida, enquanto sua coesão aumentou, o que já era esperado pelos autores. Amostras com 30% de rejeito exibiram uma redução de 50% na queda durante os testes de queda realizados, quando comparadas com a amostra de referência. Para uma dada consistência, uma argamassa contendo areia fina necessita de 25 a 30% mais água do que contendo areia natural. Desse modo, a substituição da areia por RBMF no concreto aumenta a superfície específica do material, causando um aumento na absorção de água. Além disso, a trabalhabilidade reduz conforme se aumenta a fração de rejeito, uma vez que o mesmo apresenta granulação fina, aumentando a coesão da mistura, mas também absorvendo mais água, como supracitado.

Foi possível notar, portanto, que a substituição da areia por RBMF levou a resultados positivos com relação a resistência mecânica por conta da densificação que o mesmo produz na matriz cimentícia. Os grãos de rejeito, como já visto, apresentam tamanho tal que podem acessar espaços de vazios entre grãos de areia, reduzindo a possibilidade de se formar as

chamadas “zonas fracas”, de acordo com o autor. A absorção de água reduziu conforme aumentou-se a fração de RBMF no concreto, o que pode ser explicado pela introdução de partículas finas na microestrutura do material. Com isso, foi possível verificar que as partículas finas também foram capazes de reduzir o tamanho dos poros criados durante o preparo do concreto. A referência apresentou poros mais largos, enquanto o rejeito foi capaz de promover uma microestrutura mais homogênea de vazios, conforme ocupada estes espaços.

Assim, foi possível notar a viabilidade na substituição de RBMF parcialmente em uma mistura para produção de concretos contendo areia natural em sua composição e sem tratamento prévio. As propriedades gerais do concreto não sofreram alterações significativas, o que demonstra a real possibilidade de se aplicar o rejeito no material. Além disso, PROTASIO et al, 2021, ainda esclarece que, no Brasil, são produzidas 55.000 toneladas de cimento, onde 330 Kg de cimento são utilizados para 2400 Kg de concreto, de forma que é possível produzir 400.000 toneladas de concreto com a mesma proporção de materiais de seu estudo. Neste cenário, é possível substituir 20% de areia por RBMF, reduzindo assim 21,4 milhões de toneladas de rejeitos por ano das barragens, e aumentando em 15% a performance final e progressivamente reduzindo o armazenamento de rejeitos nas barragens tradicionais.

#### 4.2.1.4. A ARGAMASSA

As argamassas são materiais utilizados com o intuito de fazer a conexão física entre tijolos, pedras, blocos, entre outros materiais sólidos de construção. Elas podem ser definidas, de acordo com Duggal (2009), como uma pasta com capacidades de fixação e endurecimento obtida por meio da mistura de agregados finos, como areia, materiais de ligação, como argila, gesso, cal ou cimento, e água. A composição de argamassas pode variar desde argamassa de cimento (sem adição de aditivos minerais), até argamassas contendo mais de um aditivo mineral na composição, como cimento, argila e areia simultaneamente.

As argamassas podem ser classificadas de acordo com a densidade aparente (quando apresenta agregados pesados como quartzo e areia, ou agregados mais leves como areia de pedrapomes, escórias, etc); de acordo com os materiais de ligação (argamassas de cimento, de cal, de gesso, etc); de acordo com a aplicação (aplicabilidade em tijolos, decoração em paredes, aplicações acústicas, etc), de acordo com suas propriedades mecânicas e físicas (argamassas de construção são divididas em nove graus distintos, dependendo da sua resistência à compressão, de 0,4 a 30 N/mm<sup>2</sup> (DUGGAL, 2009).

As características principais de uma argamassa, de acordo com Duggal (2009), são a sua compressão, desenvolvimento de uma boa ligação entre as unidades de construção (tijolos, blocos, etc), resistência à intempéries, além de apresentar viabilidade econômica e, além de ser durável, também garantir a durabilidade das unidades de construção que estiverem em contato com a pasta, sem que as juntas feitas com a argamassa apresentem fissuras ou rachaduras.

#### 4.2.1.5. ARGAMASSAS CONTENDO RBMF COMO AGREGADO RECICLÁVEL

Fontes et al (2016), utilizou o RBMF como agregado reciclável na produção de argamassas, como citado na análise meso. Foram preparadas amostras de argamassa que atendessem a norma brasileira ABNT NBR 13279:2005 - Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Algumas argamassas foram preparadas de modo tradicional, misturando-se agregados naturais (como areia por exemplo), cimento e cal em diferentes proporções; outras amostras substituíram totalmente os agregados naturais por RBMF e outras substituíram a cal por proporções distintas de RBMF fino, (10%, 20%, 50% e 100%). O RBMF utilizado neste estudo foi classificado como um resíduo de Classe II-A (Não-Perigoso e Não-Inerte), o que o torna um material não prejudicial para este uso.

Por meio de investigação por microscópio eletrônico de varredura e espectroscopia por energia dispersiva (MEV-EDS), foi possível avaliar a morfologia do RBMF, que apresentou um sistema volumétrico de grânulos com formatos bem definidos e em diversos tamanhos (Figura 21 e Figura 22). As partículas de quartzo e hematita, maiores em tamanho, contribuem com a adesão em si próprias de grânulos menores e de formatos mais planos, de modo a aumentar performance na ocupação dos espaços presentes no material durante seu preparo, além de conferir um tom avermelhado ao material por conta da hematita. Entretanto, isto necessita de maiores volumes de água na mistura para atingir consistência e plasticidade suficientemente adequadas no uso de uma argamassa. Além disso, a umidade do RBMF exibiu valores até cinco vezes maior que os valores presentes nos agregados naturais, devido à presença de uma grande quantidade de finos. A presença de 45% de ferro em sua composição aumentou a densidade absoluta em 31,7% se comparado aos agregados naturais.

Figura 21: Imagem obtida em MEV do RBMF a 1000x de magnificação. Fonte: FONTES et al, 2016.

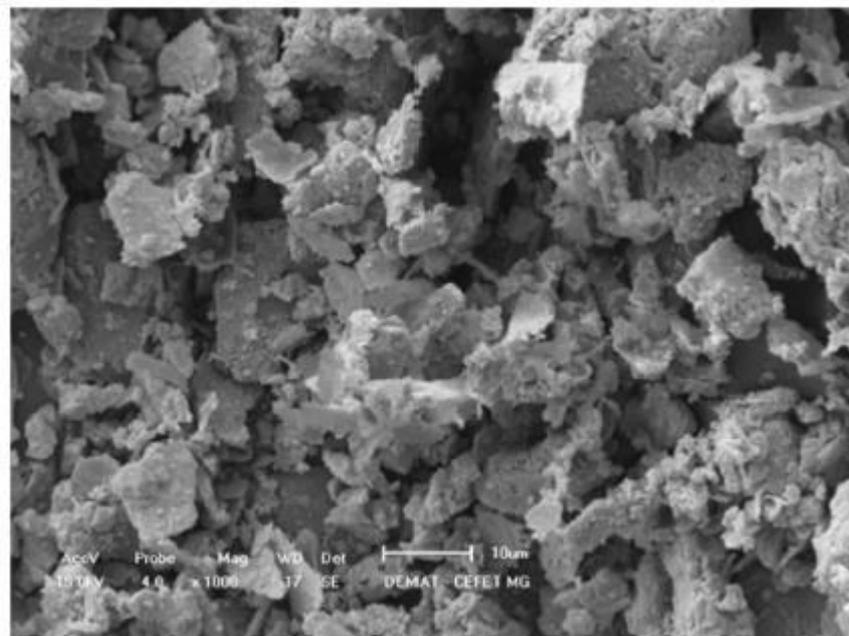
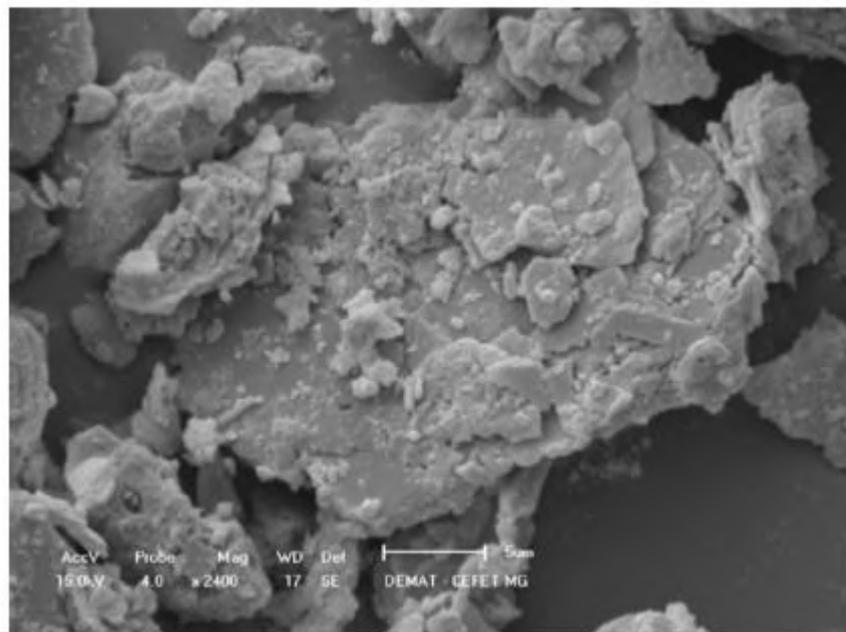


Figura 22: Imagem obtida em MEV do RBMF a 2400x de magnificação. Fonte: FONTES et al, 2016.



A relação entre o RBMF e umidade foi notada durante o preparo da argamassa. Quanto maior a proporção de RBMF adicionada no preparo da argamassa, mais água era necessária para se atingir taxas de *flow* idênticas às de argamassas tradicionais. Os cristais de cal são capazes de contribuir para um aumento na retenção de água da argamassa, pois quando

hidratada, a cal forma uma solução saturada de hidróxido de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) na mistura, que apresenta propriedades lubrificante e floculante entre as partículas de agregados presentes no meio. Conforme a cal é substituída pelo RBMF na mistura, a necessidade de adição de água aumenta, pois o menor teor da cal na composição reduz consigo a retenção de água na argamassa.

As argamassas contendo RBMF em substituição aos agregados naturais exibiram valores mais elevados de absorção de água por capilaridade. A dispersão da cal na mistura é reduzida nestas condições e há uma maior quantidade de partículas finas provenientes do RBMF que auxiliam na absorção de umidade. Esta elevação na chamada “capacidade de sortividade”, ou “*sorptivity capacity*” (que está ligada à durabilidade dos compósitos cimentícios) é função do pequeno teor de ar incorporado na argamassa: a cal promove um sistema poroso bem distribuído, onde a absorção de água é dificultada; uma vez que ela não consegue se dispersar na argamassa corretamente, este sistema é prejudicado, o que torna a absorção de água por capilaridade facilitada pela matriz.

Entretanto, ainda de acordo com os estudos dos autores, notou-se que grandes concentrações de finos de RBMF promovem rachaduras durante a compactação ocorrida pelo secamento da argamassa. Em concentrações menores, os finos ocupam os espaços no interior da argamassa sem comprometer sua plasticidade e contribuindo para uma melhor performance mecânica. Entretanto, a perda de água acelerada pela presença do RBMF reduz a aderência da argamassa durante o período de secagem, gerando fissuras (Figura 23). A maior presença de finos de RBMF na constituição da argamassa aumenta sua densidade de empacotamento e, portanto, sua densidade aparente, o que reduz sua trabalhabilidade e produtividade final em estado fresco.

Figura 23: Argamassa com substituição total do agregado natural por RBMF e argamassa contendo 50% da cal substituída por RBMF, respectivamente. Fonte: FONTES et al, 2016.



Com relação às propriedades mecânicas da argamassa contendo RBMF, foi possível notar um aumento de performance em todas as situações testadas quando comparadas às argamassas tradicionais, principalmente após 28 dias de avaliação. Quanto maior a razão cimento: RBMF, melhor a performance mecânica da argamassa, uma vez que o RBMF sofre um fenômeno de empacotamento pelos produtos de hidratação do cimento, fazendo com que a matriz se torne mais homogênea, contínua e densa. A proporção água: cimento em argamassas que apresentaram substituição parcial de RBMF na composição foi elevada, o que auxiliou o material a reter água por mais tempo, atingindo assim melhores resultados de resistência mecânica. Como resultado da presença mais duradoura de água na mistura, as reações de hidratação do cimento são beneficiadas, melhorando a performance da argamassa final. O fato de haver muitos finos do RBMF na composição promove a geração de uma estrutura que melhora a transferência de estresse interfacial entre os materiais, mantendo a umidade por mais tempo que o convencional.

Assim, podemos perceber que, de acordo com os resultados obtidos pelos estudos de Fontes et al (2016), o RBMF apresenta características que permitem sua utilização como agregado na produção de argamassas, e limitando sua utilização em um máximo de 20% em substituição à cal, seu uso se torna economicamente viável. Nota-se que a incorporação do RBMF gera uma maior necessidade de adição de água à mistura para atingir a consistência e plasticidade necessárias, gerando uma argamassa com melhores resultados em performance

mecânica após 28 dias. Além da maior necessidade de água, a argamassa contendo RBMF apresenta uma maior densidade aparente por conta da hematita e, conseqüentemente, teores de ar reduzidos. Suas características finais se tornam apropriadas para a aplicação em assentamento de tijolos, e ainda que não tenha atingido resultados para revestimento por conta das rachaduras, ela ainda pode ser utilizada para este fim.

#### 4.2.1.6. ARGAMASSAS CONTENDO RBMF E SUA REDUÇÃO NA CONDUTIVIDADE TÉRMICA DA ARGAMASSA CONVENCIONAL

Mendes et al (2019), avaliou a relação entre a morfologia e a condutividade térmica de argamassas com substituição de RBMFs e de quartzito friável, separadamente. Foram preparadas três argamassas em três proporções distintas (1:0:3; 1:1:6; 1:2:9; onde cimento : cal : agregado fino). Para cada proporção, foram preparadas uma argamassa referência usando cimento, cal e areia de rio como agregado fino. Para investigação, foram preparadas mais três argamassas, uma para cada proporção, substituindo a areia de rio por RBMF e mais três substituindo por quartzito friável moídos, totalizando nove amostras com três em cada proporção. As argamassas preparadas foram então moldadas em placas de 300 x 300 x 50mm.

O RBMF apresentou partículas muito mais finas que os outros agregados, e em maior quantidade. Elas se agregavam em pequenos núcleos, assemelhando-se ao comportamento visto em materiais argilosos. A argamassa contendo RBMF apresentou uma alta demanda de água para atingir o espalhamento necessário para o teste, consequência do formato e da quantidade de finos presentes no rejeito, como visto também no trabalho de Fontes et al (2016). Além disso, outro comportamento encontrado para os dois autores foi a redução da retenção de água da argamassa conforme ocorria o aumento da proporção de RBMF na composição, o que leva ao aumento da demanda de água citado acima.

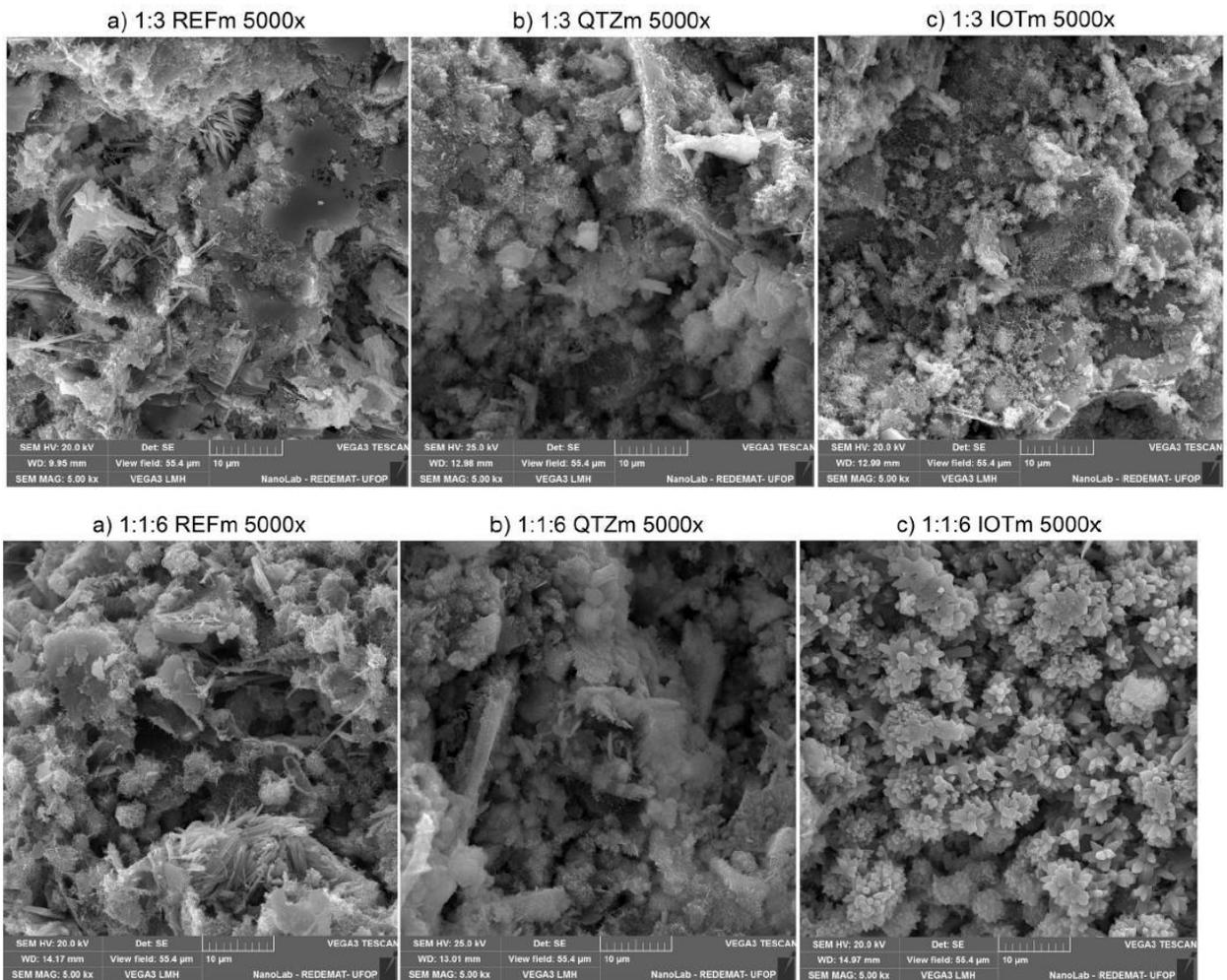
Além disso, mesmo com um teor elevado de ferro na sua composição levando o próprio rejeito a apresentar uma densidade específica aparente elevada quando comparado a outros agregados do estudo, a densidade específica da argamassa com RBMF foi mais baixa que a referência. A elevada taxa de retenção de água da argamassa possivelmente garantiu a estabilidade da água e do ar presentes na matriz durante a etapa de cura, levando a um aumento do número de vazios e reduzindo assim a densidade específica.

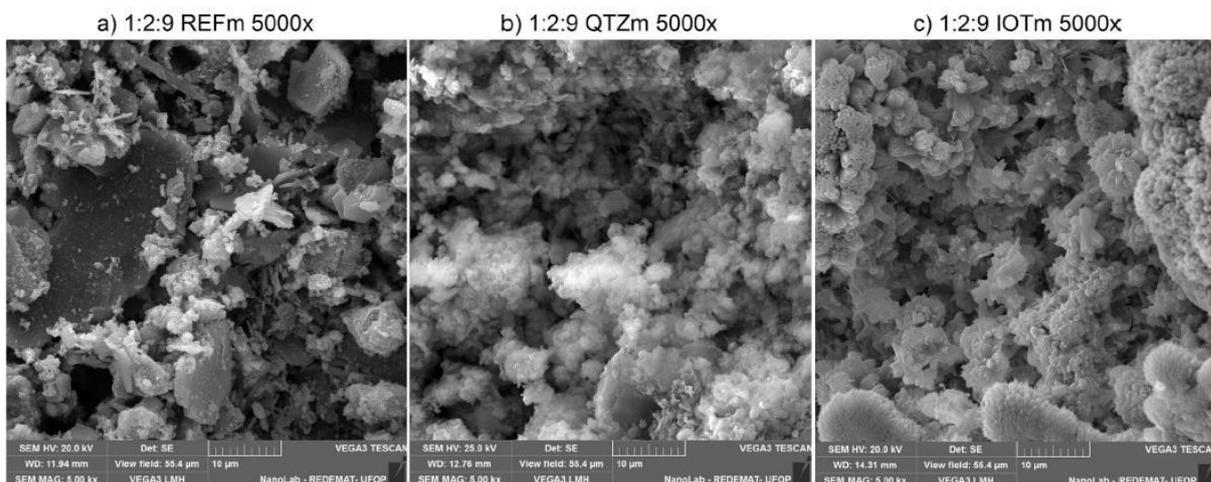
Por meio das visualizações obtidas com o auxílio do MEV, foi possível perceber que a condutividade térmica apresenta relação direta com a densidade específica entre argamassas

com o mesmo tipo de agregados finos, e que a condutividade térmica não está associada apenas a porosidade absoluta, mas também a distribuição de tamanhos de poros. Por fim, quanto maior o número de poros menores que 20  $\mu\text{m}$ , menor a condutividade térmica.

Ainda com o auxílio de imagens de MEV, foi possível notar que as matrizes das argamassas de referência apresentaram maior compactação, com menos presença de grandes vazios isolados. As argamassas contendo quartzito friável apresentaram poros dos mais diversos tamanhos e formatos. Já as argamassas contendo RBMF apresentaram um número significativo de poros com raios menores que 15  $\mu\text{m}$ , que era o limite de detecção. Isto levou a observações acerca do aumento do teor de cal, onde há um refinamento dos poros conforme seu teor aumenta na argamassa (Figura 24).

Figura 24: Imagens de MEV das argamassas referência (a), contendo quartzito friável (b) e contendo RBMF (c) com magnificação de 5000x para as proporções de 1:0:3, 1:1:6 e 1:2:9, respectivamente, em cada linha. Adaptado de Mendes et al (2019).





Os autores puderam observar que quanto maior o teor de cal na argamassa, menor será a condutividade térmica da mesma. Isto pode estar relacionado à relação com a alta taxa de retenção de água e à razão água:aglutinante presente por conta dos particulados finos do RBMF. Uma quantidade significativa de água não irá reagir com a massa, e portanto, irá sofrer evaporação. Com este fenômeno, haverá formação de poros e uma melhoria no sistema poroso da argamassa. Também foi observado que, como a redução da condutividade térmica reduz a taxa de transferência de calor entre ambientes internos e externos, argamassas que apresentem RBMF em sua composição podem potencialmente melhorar a performante térmica de uma construção e melhorar sua habitabilidade.

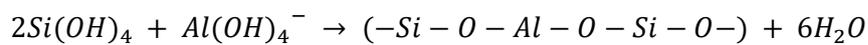
Dessa forma, Mendes et al (2019), conseguiu perceber que a morfologia de uma argamassa pode ser mais importante para sua condutividade térmica do que sua composição química, mineralógica e a condutividade térmica isolada de cada um de seus componentes. Poros menores apresentaram melhores resultados para a redução da condutividade térmica do que poros maiores. A retenção de água gerada pelo RBMF na composição da argamassa auxilia na criação de um sistema de poros refinado, de modo que a argamassa de RBMF apresentou os melhores resultados para redução na condutividade térmica no estudo, mesmo apresentando 59% de hematita em sua composição.

#### 4.2.2. COMPÓSITOS GEOPOLIMÉRICOS

Os compósitos geopoliméricos, assim como os compósitos cimentícios, são uma outra alternativa à utilização do cimento tradicional. De acordo com Cho (2015), os geopolímeros apresentam a capacidade de reduzir em até 80% a emissão de dióxido de carbono, uma vez que a fabricação de uma tonelada de geopolímero, em geral, tende a gerar em torno de 0,2 tonelada

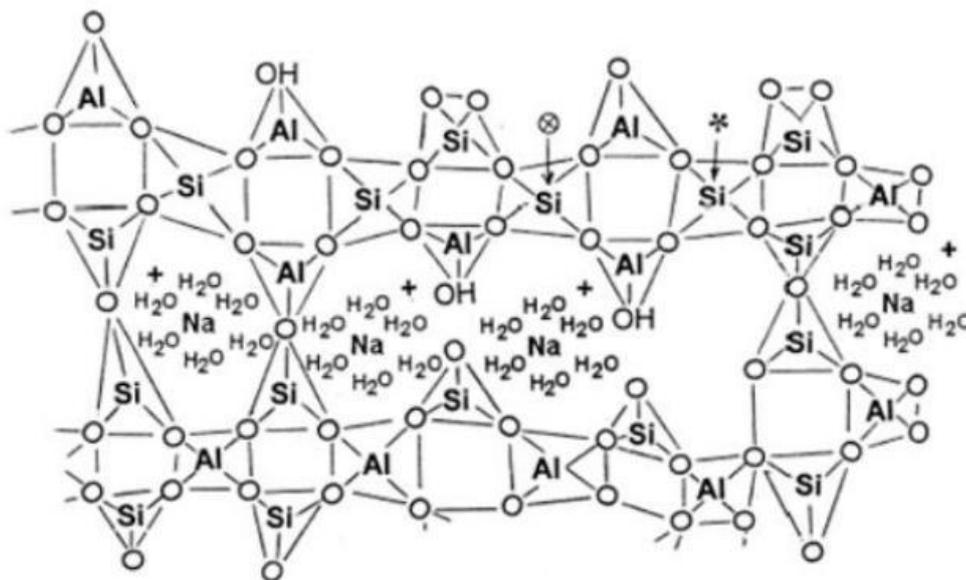
do poluente. Sua produção exige a mistura de água, alumina, sílica e um óxido de metal alcalino. Em geral, a alumina e a sílica podem ser substituídas por um aluminossilicato como o metacaulim, que é gerado a partir da calcinação de argilas ricas em caulinita e apresenta propriedades pozolânicas. Este material é comumente adicionado à produção de concreto (FIGUEIREDO et al, 2014).

A reação de síntese de um geopolímero, de modo geral, é dividida em três etapas. O aluminossilicato é dissolvido em silicato de sódio ou outra solução altamente alcalina, podendo ser a mistura de cátions metálicos, água deionizada e sílica ativa, onde este último também é usado na mistura para produção do cimento Portland e concretos. A dissolução nesta solução ativadora alcalina leva a uma policondensação, de acordo com a reação abaixo:



O íon alcalino presente em solução, como  $Na^+$  ou  $K^+$ , ataca o metacaulim para a formação do tetraedro de  $AlO_4^-$  e permanece nas proximidades da cadeia polimérica da reação, de modo a garantir que haja um balanceamento de cargas negativas ao redor dos íons  $Al^{3+}$ , em uma composição de tetraedros de  $SiO_4$  e  $AlO_4^-$ . A cadeia polimerizada, então, sofre precipitação dando origem a um polímero inorgânico e rígido, como mostrado na estrutura esquemática da Figura 25 (CHO, 2015).

Figura 25: Estrutura molecular esquemática de um geopolímero. Fonte: CHO, 2015.



Os geopolímeros apresentam maiores resistências à compressão quando comparados ao cimento Portland, embora a fragilidade similar à de cerâmicas de sua estrutura possa limitar certas aplicações e, por isso, eles podem ser adaptados de modo a receber novos reforços à estrutura, como fibras ou particulados, como qualquer compósito (CHO, 2015).

#### 4.2.2.1. COMPÓSITO GEOPOLIMÉRICO CONTENDO RBMF E RESÍDUO DE LÃ DE VIDRO

Defavéri et al (2019), apresentou uma nova forma de se buscar a utilização do RBMF. A indústria de minério de ferro, além de gerar rejeitos em grandes volumes que são depositados nas barragens, também gera outros tipos de resíduos durante a etapa de beneficiamento do minério. A lã de vidro é utilizada como material isolante para tubulações industriais e fornos de pelotização. Após atingir sua vida útil, é então descartado em aterros controlados como resíduo de lã de vidro. Porém, a lã de vidro apresenta reatividade pozolânica, por conta de sua estrutura predominantemente amorfa, segundo o autor. Dessa forma, Defavéri et al (2019), propôs o a avaliação econômica da produção de um compósito geopolimérico usando RBMF como material precursor primário para a síntese, e o uso do resíduo da lã de vidro como material precursor secundário, se utilizando de dois descartes da indústria de mineração de minério de ferro simultaneamente.

Foram preparadas amostras usando apenas RBMF e amostras com substituição parcial do rejeito pelo rejeito de lã de vidro. Para o preparo, as variáveis utilizadas foram o tempo de moagem dos rejeitos, concentração da solução alcalina utilizada para preparar as amostras e presença ou ausência do rejeito de lã de vidro na mistura. Os rejeitos de lã de vidro apresentaram um elevado teor de óxido de silício,  $\text{SiO}_2$ , e pequenas quantidades de óxidos de alumínio, ferro e cálcio, de acordo com a caracterização química por fluorescência de raios-X. A presença do rejeito de lã de vidro aumenta a presença de sílica amorfa na mistura, uma vez que o RBMF exhibe apenas sílica cristalina em sua estrutura, não reativa. Além disso, suas partículas apresentaram uma morfologia alongada, garantindo ao rejeito uma elevada área superficial específica.

A adição do rejeito de lã de vidro ao RBMF reduziu a densidade nominal do material, além de apresentar resultados para testes de flexão que indicaram uma relação direta entre uma concentração maior de ativador alcalino e a resistência à flexão do material; nos testes de flexão de 7 dias, entretanto, os resultados foram menores que para os compósitos geopoliméricos apenas de RBMF. Por isso, foi possível notar que o rejeito de lã de vidro não apresentava propriedades adequadas para servir como uma fibra de reforço para o compósito. Os testes de resistência a compressão de 7 dias também demonstraram valores superiores para os geopolímeros apenas de RBMF, principalmente quando a concentração utilizada de ativador alcalino e o tempo de moagem eram maiores. Os valores obtidos para os dois tipos de compósitos (com e sem o rejeito de lã de vidro) apresentaram superioridade quando comparados a compósitos produzidos a partir de outros rejeitos minerais e metacaulim. Isso mostra, segundo os autores, que os finos dos rejeitos são fatores decisivos para o desenvolvimento da resistência mecânica do compósito.

Defavéri et al (2019), obteve resultados interessantes em suas análises dos padrões de difração de raios-X dos compósitos geopoliméricos quando comparados aos padrões dos rejeitos antes da mistura. Os compósitos apenas de RBMF não apresentaram picos cristalinos de chamosita (mineral silicático com ferro e alumínio, tipicamente associado a magnetita), indicando sua dissolução para a formação de uma fase cristalina de zeólita tipo sodalita. Durante o aquecimento, os aluminossilicatos sofrem alterações de modo a apresentar picos bem definidos denominados como estruturas tipo zeólita. A reação se inicia em um aluminossilicato pouco cristalino, que passa a uma zeólita em fase meta-estável e por fim gera sodalita. Essa transformação indica a dissolução da fase gel e criação de novas fases mais estáveis como a sodalita, confirmando o processo de dissolução no compósito. Os geopolímeros contendo rejeito de lã de vidro apresentaram o mesmo comportamento de síntese de sodalita com redução dos picos de chamosita e chantalita (um silicato contendo cálcio e alumínio).

O pico de sodalita obtido para os geopolímeros contendo apenas RBMF tendeu a reduzir nas amostras com mais tempo de moagem, o que também foi visto para as amostras contendo rejeito de lã de vidro, mas nestas últimas foi possível identificar picos um pouco mais evidentes de chantalita, mostrando que o rejeito de lã de vidro serviu como um material precursor suplementar, provendo mais sílica e alumínio para a síntese do compósito geopolimérico. As fases de quartzo, hematita e goethita encontradas no RBMF demonstraram ser fases inertes no compósito formado.

Com isso, o estudo demonstrou que o RBMF foi capaz de promover a síntese de um geopolímero com resistências elevadas a compressão e flexão. A substituição parcial do rejeito de minério de ferro por rejeito de lã de vidro reduziu as resistências citadas, além de levar o material sintetizado a apresentar um comportamento mais quebradiço. Além disso, a concentração de solução alcalina utilizada e a distribuição de tamanho de partículas demonstraram ter grande influência na performance mecânica do geopolímero.

#### 4.2.3. PAVIMENTAÇÃO URBANA

Entende-se por pavimento, de acordo com Filho (2013), uma estrutura obtida por meio de um projeto específico de engenharia destinado a trânsito de veículos, ciclistas e/ou pessoas, aplicada sobre uma superfície que tenha sofrido terraplanagem, apresentando como função principal segurança e conforto ao usuário da mesma, com a melhor relação entre qualidade e custo possível. Pode ser feita com múltiplas camadas de materiais de diferentes propriedades e características de resistência, compressão e deformação. É comum que rodovias sejam feitas de pavimentos de concreto, asfaltos ou blocos intertravados, apresentando vida média em torno de 20 anos.

De acordo com a norma ABNT NBR 7207/1982, atualmente cancelada em definitivo, as principais funções de um pavimento são:

- Garantir a correta capacidade de resistência e distribuição de esforços verticais provenientes do tráfego ao subleito e demais camadas;
- Buscar melhorias nas condições de rolamento quanto á comodidade e segurança das pessoas e bens por elas transportados;
- Incrementar a resistência ao cisalhamento (forças de coesão) quanto aos esforços horizontais, tornando o mais durável possível a superfície de rolamento.

Por conta da necessidade de haver alta resistência e de serem constituídos por materiais asfálticos ou concreto, os RBMFs podem ser rejeitos promissores ao serem agregados aos pavimentos.

#### 4.2.3.1. UTILIZAÇÃO DE RBMF EM INFRAESTRUTURA RODOVIÁRIA

Bastos et al (2016), avaliou a viabilidade do uso de RBMF com diferentes aglutinantes de modo a estabilizar quimicamente o rejeito, aplicando-o em rodovias e afins. Foram preparadas misturas do rejeito com água e com três aglutinantes distintos: cimento, cal e escória de siderurgia, com suas concentrações variando entre 1% e 10%. A escória passou por uma separação magnética para a remoção da parte metálica antes do estudo.

Um dos experimentos realizados foi o Índice de Suporte Califórnia (*California Bearing Rating, CBR*), utilizado para avaliar a resistência de áreas pavimentadas; outras avaliações realizadas foram absorção de água, resistência a compressão e durabilidade, em câmara úmida e em ambiente aberto. Também foram realizadas caracterização química por fluorescência de raios-X (FRX), e mineralógica por difração de raios-X (DRX). O RBMF também foi submetido a análise ambiental para que pudesse ser classificado, onde foi constatado que o rejeito pertencia a Classe II A (Não Perigoso e Não Inerte), por conter altos teores de ferro e fenol, acima do limite estabelecido.

O RBMF apresentou um teor elevado de óxido de ferro (68,05%). A curva de distribuição de tamanho de partículas apresentou 85% de partículas finas, predominantemente de característica lodo-argilosa, com alta densidade volumétrica específica. A presença de hematita também garantiu uma densidade específica elevada, mas dentro do limite recomendado pelo Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER), de acordo com os autores. O rejeito também foi avaliado quanto aos Limites de Atterberg, testes realizados para definir o Limite de Liquidez, o Limite de Plasticidade e o Limite de Contração de um solo, apresentando valores que estão dentro do esperado para que o material seja aplicado em camadas de estruturas rodoviárias.

O teste CBR demonstrou que quanto maior o teor de aglutinante, maior o valor obtido no teste; o mesmo padrão foi visto para aumento no tempo de cura em todas as misturas. A mistura que apresentou resultados mais satisfatórios foi com 5% de cimento misturado ao RBMF, atingindo parâmetros para uso como base rodoviária para qualquer volume de tráfego. A mistura com cal a 10% e 7 dias de cura também apresentou capacidade de uso como base, mas em volumes médios de tráfego, enquanto as misturas com escória de siderurgia ficaram restrita apenas a camadas sub-base (uma camada abaixo da superfície de rolamento).

O uso de maiores teores de aglutinantes e maiores tempos de cura, como dito anteriormente, foi positivo, contribuindo para a redução da expansão das misturas. Em ensaio

de resistência a compressão, as misturas cimentícias resultaram em maiores valores de resistência, e estas mesmas misturas também apresentaram melhores resultados em câmara úmida. Em ambiente aberto, as misturas contendo cal e escória tiveram vantagem, por conta da disponibilidade maior de  $\text{CO}_2$  para realizar as reações necessárias de endurecimento dos materiais. O cal na presença de  $\text{CO}_2$  se torna carbonato de cálcio,  $\text{CaCO}_3$ , o que não ocorre em misturas cimentícias por conta de suas propriedades hidráulicas, enquanto a escória, que também apresenta cálcio em sua composição em forma de  $\text{CaO}$  e  $\text{Ca(OH)}_2$ , na presença da sílica e alumina do RBMF, dão origem a importantes reações com propriedades cimentícias, e possivelmente até mesmo com atividades pozolânicas, de acordo com os autores.

Os testes de durabilidade também demonstraram que a mistura cimentícia era a melhor dentre as três avaliadas, onde foi possível perceber que as amostras estabilizadas pelo cimento apresentaram uma grande resistência aos ciclos de teste, inclusive com a menor perda de massa dentre os três aglutinantes testados, tanto para câmara úmida quanto para ambiente aberto. Assim, foi perceptível que o cimento apresentou melhores resultados gerais quando misturado ao RBMF, apresentando resultados físicos e mecânicos satisfatórios para uso como pavimentação rodoviária principal. A escória, por exemplo, se desfez rapidamente no primeiro teste de imersão, e por isso não apresentou propriedades estabilizantes adequadas para ser usada como aglutinante do RBMF com objetivo de aplicação em camadas base de pavimentação.

#### 4.2.4. TIJOLOS

O tijolo é um dos materiais de construção mais antigos e ainda mais utilizado na história da humanidade por conta de sua durabilidade, facilidade de manuseio por conta de seu formato retangular, e seu preço acessível. Podem ser utilizados em diversas estruturas, e podem ser formados pela queima de materiais cerâmicos, pela mistura de areia e cal, ou também por concreto de cimento Portland, além de outros materiais orgânicos, solos, etc. Por conta disso, sua coloração geralmente tende a tons avermelhados por conta de sua composição química em caso cerâmico, ou acinzentado, caso fabricado com concreto. Uma de suas propriedades mais importantes é a dureza, resistência à elevada absorção de água e à impactos mecânicos moderados. Por isso, após serem preparados, os tijolos devem apresentar também resistência à compactação e fissuras (DUGGAL, 2009).

A composição média de um tijolo cerâmico consiste principalmente de sílica e alumina, misturados em proporção tal que, em contato com água, o material apresente

plasticidade suficiente para que possa ser moldado no formato adequado. Além disso, outros metais e ingredientes estão presentes em menores quantidades, tais como cal, magnésio, óxido de ferro, enxofre, dentre outros (DUGGAL, 2009).

Ainda de acordo com Duggal (2009), a sílica auxilia na retenção do formato moldado ao tijolo, além de conferir ao mesmo durabilidade e previne sua contração, mas em excesso torna o mesmo quebradiço e não-resistente a queima. A alumina garante absorção de água e plasticidade ao material cerâmico. Porém, em excesso, produz fissuras durante a secagem do tijolo, além de torna-lo muito refratário, ou seja, só atinge a fusão em elevadas temperaturas. Proporções adequadas de sílica reduzem a propriedade refratária do material. A cal, quando adicionada à mistura para produção do tijolo, reduz sua contração durante a secagem e auxilia a sílica a fundir durante o aquecimento, densificando o material. Em excesso, a cal leva o tijolo ao derretimento, perdendo seu formato, e em formato carbonatado, reduz seu ponto de fusão.

O óxido de ferro, por sua vez, geralmente não ultrapassa a porcentagem de 7% da argila, levando o material a possuir um tom avermelhado durante a queima quando em excesso de oxigênio, e marrom escuro quando a disponibilidade de oxigênio é insuficiente. Seu excesso leva o tijolo a apresentar coloração azul escura. Além disso, garante uma maior impermeabilidade e durabilidade ao material, reduz seu ponto de fusão, principalmente se estiver em forma de óxido ferroso, e melhora sua resistência física e dureza (DUGGAL, 2009).

O preparo de um tijolo cerâmico passa por diversas etapas, onde cada elevação de patamar de temperatura realiza uma função distinta e importante para as propriedades finais do produto. De acordo com Guimarães (2017), as transformações ocorridas são:

1. Entre 20-150 °C: a água livre é liberada, enquanto a água presente nos cristais internos de argila permanece na massa cerâmica;
2. Até 200 °C: a água coloidal é liberada, junto da água presente na matéria orgânica;
3. Aproximadamente 280 °C: ocorre a desidroxilação da gibbsita ( $\text{Al}(\text{OH})_3$ );
4. Entre 320-360 °C: a goethita [ $\text{FeO}(\text{OH})$ ] é então desidroxilada (a 320 °C com substituição isomórfica por  $\text{Al}_3^+$  e 360 °C sem substituição por  $\text{Al}_3^+$ ).
5. Entre 350-650 °C: os carbonatos presentes na argila começam a dissociar, iniciando pelo carbonato de magnésio e, em maiores temperaturas (cerca de

800 °C), o carbonato de cálcio, geralmente mais abundante, sofre sua dissociação.

6. Entre 450-650 °C: ocorre a decomposição dos minerais de argila com a eliminação da água de constituição, antes quimicamente combinada a eles por conta dos silicatos de Si e Al. Neste momento, as propriedades argilosas são perdidas de forma irreversível.
7. Aproximadamente 570 °C: o quartzo então sofre uma expansão de tamanho, passando de sua forma cristalina  $\alpha$  para  $\beta$ . Durante o resfriamento, nesta mesma temperatura, ocorre retração.
8. Entre 700-900 °C: ocorre a fusão inicial dos álcalis e óxido de ferro. É neste momento que a resistência começa a atingir valor mínimo aceitável. Acima de 700 °C, ocorrem reações químicas da sílica e da alumina com elementos fundentes, de modo a formar sílico-aluminatos que aumentam as resistências física e química do material, além de garantir estabilidade à peça cerâmica. A dilatação máxima da peça ocorre em torno de 800 °C.
9. Entre 900-950 °C: inicia a retração de sinterização e transformações mineralógicas. Aqui, ocorre um aumento rápido de retração.
10. 1000 °C: Nesta temperatura, para cerâmica vermelha, ocorre retração e dispensa de alimentação de combustível, onde o material sofre retração fornecendo calor ao ambiente interno do forno.
11. A partir de 1000 °C: ocorre a reorganização dos cristais em uma nova estrutura cristalina com aumento consequente da resistência mecânica. Ocorrem ligações vítreas geradas pelo fechamento de poros deixados vazios pela diminuição da absorção de água pelo material.
12. O resfriamento da peça começa a ocorrer de forma mais lenta entre 600 °C e 560 °C, onde ocorre a transformação alotrópica do quartzo- $\beta$  para quartzo- $\alpha$  e a peça começa a apresentar baixa resistência a choque térmico. Nesta ocasião, é importante que não haja mais mudanças bruscas de temperatura.

#### 4.2.4.1. INCORPORAÇÃO DE RBMF EM TIJOLOS DE CONSTRUÇÃO

Mendes et al (2019), estudou a viabilidade do uso do RBMF rico em sílica em pequenos tijolos cerâmicos perfurados (Figura 26) para construção por meio de misturas com

argilas denominadas pelo autor como “vermelha” e “amarela”. Foram preparadas 10 misturas com teores distintos entre os três materiais que formavam o material cerâmico final, variando os teores entre 0% e 40% de RBMF e 30% a 70% entre as duas argilas.

Figura 26: Tijolos de construção em pequena escala antes da queima. Fonte: MENDES et al, 2019.



Por conta do alto teor de sílica no RBMF utilizado, a plasticidade do material final foi obtida por meio das argilas, que apresentaram índice de plasticidade de 44% para a argila cinza e 35% para a argila amarela, onde os limites de Atterberg indicam plasticidade acima de 15%; os limites líquidos encontrados foram de 60% e 56%, respectivamente, de acordo com a literatura encontrada pelos autores, entre 30% e 60%, sendo assim adequadas para produção de cerâmica.

Com relação às análises de FRX, o RBMF apresentou 63,091% de sílica, 7,169 de alumina e 25,3792% de óxido de ferro, além de outros óxidos em menor proporção. A argila amarela apresentou 43,902% de sílica, 27,737% de alumina, 12,387% de óxido de ferro e 1,965% de óxido de titânio, enquanto a argila cinza exibiu os teores respectivos de 44,293%, 32,531%, 4,624% e 1,921%. A relação sílica/alumina é importante para indicar a presença ou ausência de sílica livre no material, o que mostra sua maior ou menos atividade pozolânica, com os dados de FRX, foi possível notar que a argila amarela apresentou uma relação maior

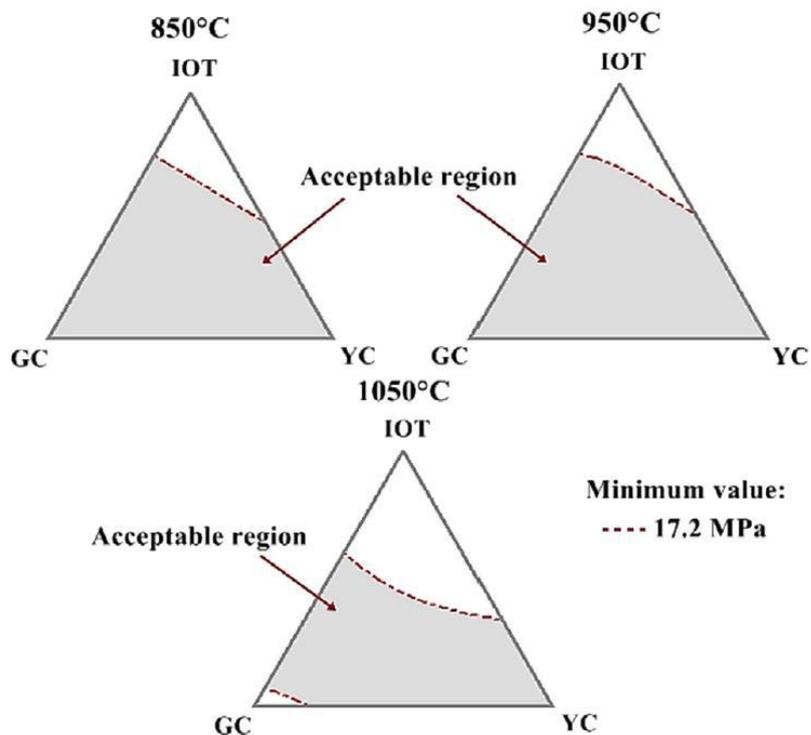
que a argila cinza, auxiliando na interação entre ela e o RBMF durante o preparo dos tijolos em altas temperaturas. O DRX mostrou a presença de picos de fase cristalina de caulinita nas argilas, que é um mineral importante para a conformação do material e para a melhoria da performance de propriedades dos produtos finais.

A temperatura é um parâmetro relevante na produção de cerâmicos. A sinterização, processo físico no qual materiais metálicos e cerâmicos passam por tratamentos térmicos para que as partículas do material se unam, reduzindo a porosidade do material e aumentando sua densidade. Isto é, a interface material / poro reduz drasticamente para dar lugar a uma interface material / material, fazendo com que os espaços vazios da estrutura sejam eliminados e ocorra a densificação do material. Por consequência, além da redução de porosidade e aumento da densidade do mesmo, o material também passa a apresentar uma maior resistência mecânica (DA SILVA e JÚNIOR, 1998), além da redução na capacidade de absorção de água, por conta dos espaços vazios eliminados. O que foi visto durante o estudo foi que a presença de materiais inertes como o RBMF, aumenta consigo a concentração de poros abertos ou interconectados, que não sofrem processos de densificação por conta de sua não ocupação pelas partículas do rejeito, como é o caso do óxido de ferro, que se espalha pela matriz, dificultando a sinterização completa. Assim, de modo geral, a interação entre as argilas e o rejeito levaram a um aumento de absorção de água. Mesmo assim, todas as misturas realizadas neste estudo mantiveram valores dentro da referência para absorção de água para tijolos de cerâmica da norma ABNT 15270-1:2017. Entretanto, para atingir os requisitos da norma ASTM C62, todas as misturas precisaram ser aquecidas até o intervalo entre 950 °C e 1050 °C.

Ainda levando-se em conta o aumento de porosidade causado pela presença do RBMF, foi visto que houve uma redução da resistência mecânica nos tijolos, ainda mais levando-se em conta o alto teor de sílica do rejeito estudado. De acordo com Queiroz (2009), em temperaturas próximas de 573 °C, o quartzo sofre uma transformação alotrópica de  $\alpha$  para  $\beta$ , aumentando o volume de suas partículas. Isto causa um aumento no volume da matriz, e conseqüentemente, gera tensões internas no material cerâmico. Além disso, de acordo com os autores do estudo, os grãos de quartzo passam a se descolar da matriz vítrea, levando a uma redução da resistência mecânica. A argila cinza se tornou o principal responsável pelo aumento de resistência do material a altas temperaturas, enquanto o RBMF fazia o papel oposto.

Os tijolos produzidos atingiram o valor esperado de resistência à compressão para atingir o requisito mínimo da norma NBR 15270-1:2017, de 1,5 MPa. Porém, tanto pela questão do tamanho reduzido quanto por, conseqüentemente, não haver uma norma para outros tamanhos além do padrão da indústria, os valores obtidos não puderam ser levados em conta de forma apropriada. Além disso, ainda apresentando valores adequados, o comportamento mecânico das amostras foi diferente dos tijolos cerâmicos tradicionais. A norma ASTM C-62 utiliza como valor mínimo 17,2 MPa, e por isso, ela foi utilizada para referência. A Figura 27 apresenta os triângulos de composição para cada temperatura, contendo em seus interiores as regiões onde o valor mínimo de resistência à compressão foi atingido.

Figura 27: Regiões que atingem os critérios de resistência definidos pela ASTM C62, onde IOT = *Iron Ore Tailing*; GC = *Gray Clay*; YC = *Yellow Clay*. Fonte: MENDES et al, 2019.



Mendes et al (2019), concluiu que os tijolos apresentaram Classificação II-A de periculosidade (Não-Perigoso e Não-Inerte), apresentando valores superiores aos limites estabelecidos apenas para o arsênio, impedindo por isso sua utilização em lugares que estejam em contato com água a ser bebida, mas ainda assim, a solubilização do arsênio em tijolos contendo RBMF foi menor que nos que não incorporaram o resíduo, e além disso, outros três elementos, cromo, ferro e alumínio, apresentaram solubilidades menores quando comparadas à

de tijolos comerciais. Os elementos presentes no RBMF foram melhores imobilizados nos tijolos estudados do que em tijolos comerciais. Sua metodologia apresentou resultados coerentes com outras fontes, e se mostrou viável. O uso de RBMF na composição dos tijolos cerâmicos reduziu a contração linear de queima, um parâmetro importante para a correta produção de materiais cerâmicos, e a resistência mecânica a compressão do produto, enquanto a sua densidade aparente foi aumentada junto da absorção de água e porosidade aparente. A temperatura ideal para a produção dos tijolos cerâmicos com RBMF incorporado escolhida foi de 950 °C, com teores percentuais de 29,1% de RBMF, 40,9% de argila cinza e 30,0% de argila amarela. Uma nova produção com formato prismático foi realizada com estes parâmetros, apresentando resultados similares, mostrando que a otimização da mistura é uma característica importante do processo de produção para atingir melhores resultados e propriedades do produto final.

#### 4.2.5. TINTAS

Tintas são, de acordo com Duggal (2009), camadas superficiais de líquidos que formam finos filmes na superfície onde são aplicadas. Podem ser classificadas em tintas a óleo, tintas a água, tintas cimentícias, tintas betuminosas e outras com características especiais, como tintas a prova de fogo, luminosas, hidrofóbicas, anticorrosão, etc. Sua função é proteger a superfície onde é aplicada contra estresses mecânicos e/ou químicos, intempéries, além de promover um acabamento decorativo, podendo apresentar diversas cores. A tinta ideal deve formar filmes finos e uniformes, apresentando capacidade de abranger uma grande cobertura, ter fácil trabalhabilidade, durabilidade, elasticidade para que não seja afetada por expansões ou contrações da superfície a qual é aplicada, nem por conta de ações de intemperismo ambiental. Além disso, é vantajoso que a tinta apresente alta resistência a água e ar, seja viável economicamente e forme uma superfície rígida.

Uma propriedade importante relativa à qualidade das tintas é a concentração volumétrica de pigmento, expressa como porcentagem do total de volume de constituintes não-voláteis presentes na tinta. Esse valor é essencial para a determinação da quantidade de pigmentos que podem ser adicionados ao polímero que será utilizado. O pigmento precisa ter capacidade umectante suficiente para ser espalhado por todo o polímero ou aglutinante, que por sua vez deve estar em volume suficiente para garantir que o pigmento possa ser espalhado e haja capacidade de ocupação de vazios entre as partículas de pigmento (DUGGAL, 2009).

#### 4.2.5.1. RBMF COMO PIGMENTO PARA TINTAS SUSTENTÁVEIS

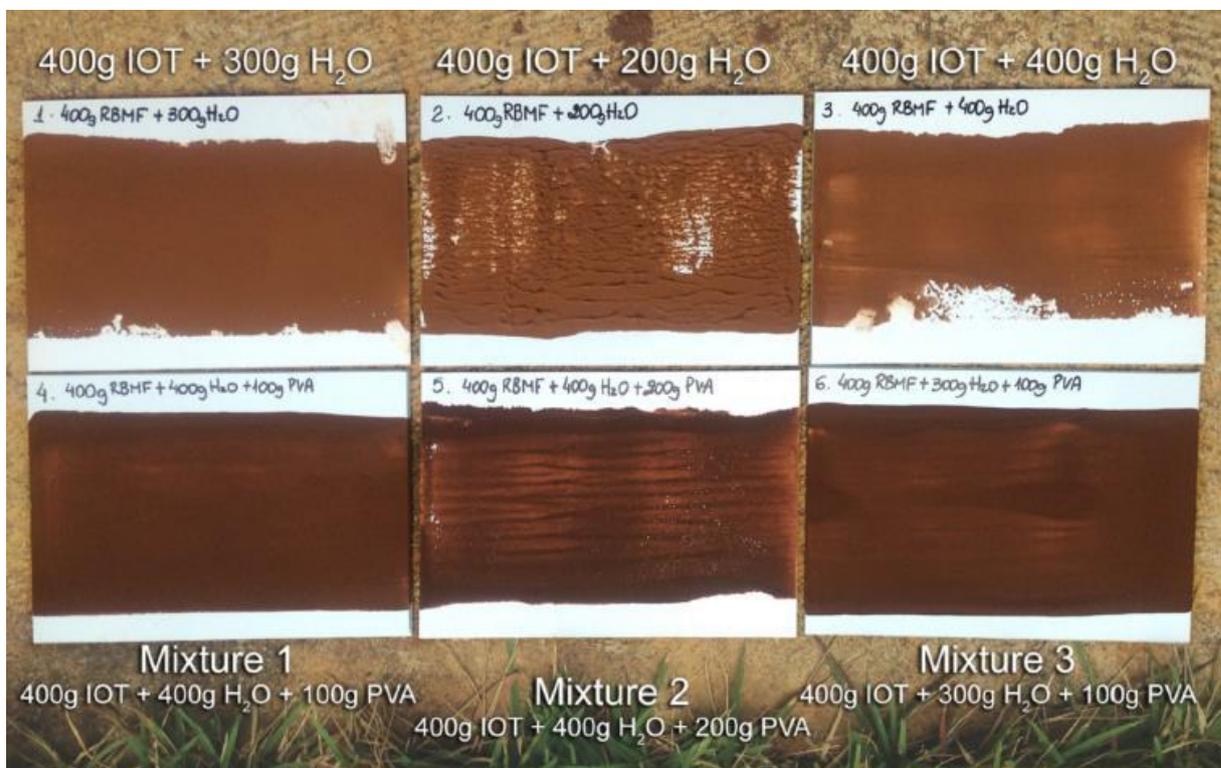
Galvão et al (2018), estudaram a viabilidade e as propriedades de tintas contendo RBMF sem tratamentos prévios em sua composição, agindo tanto quanto pigmento como carga, além do uso de água como solvente, de modo a tratá-las como tintas sustentáveis. Para isso, foram preparadas 14 amostras utilizando quatro tipos diferentes de ligantes: cimento Portland, cal hidratada, resina acrílica e polímero PVA utilizado em cola branca comum. Para referência, foram utilizadas duas tintas comerciais, sendo uma acrílica e outra de polímero PVA, ambas a base de água e de cor avermelhada. Foram avaliados parâmetros como variabilidade de cor e resistência a abrasão, e as cinco melhores foram avaliadas quanto ao custo por área de cimento coberta por cada amostra de tinta.

Como visto em outros estudos, o FRX do RBMF exibiu teores elevados de óxido de ferro (47,8%), sílica (30,0%) e alumina (21,2%), com DRX identificando fases cristalinas de hematita, quartzo e caulinita. A presença de materiais inertes e cristalinos, de acordo com os autores, é positiva para garantir uma boa estabilidade colorimétrica, bem como uma alta resistência à abrasão. O rejeito apresentou uma grande quantidade de finos, com 90% das partículas passantes menores que 46  $\mu\text{m}$  e 48% menores que 10  $\mu\text{m}$ . Para que a tinta não exiba partículas individualmente visíveis ou que produzam manchas, as partículas de pigmento devem ser menores que 50-70  $\mu\text{m}$ , fazendo com que o RBMF seja adequado para aplicação no estado *in natura*. Além disso, o rejeito aumentou a média do tamanho de partículas da tinta, o promovendo a formação de filmes relativamente mais grossos, garantindo assim uma tinta mais opaca e com mais propriedade protetiva. Em contrapartida, a tinta contendo RBMF acaba por não formar camadas com texturas tão lisas quanto as formadas por tintas tradicionais, onde há uma etapa de moagem das partículas de pigmento.

O teste de variabilidade colorimétrica foi realizado aplicando-se as tintas em placas de PVC e mostrou que quanto menor o custo da tinta, menor sua variabilidade, enquanto quanto maior a resistência a abrasão, maior o potencial de performance da tinta. Os valores obtidos para as tintas sustentáveis a base de PVA foram elevados, e quanto maior o teor de ligantes, maiores foram os valores, em especial para as tintas sustentáveis com resina acrílica e cal hidratado + PVA. Em contraposição, os piores resultados foram visualizados nas tintas que possuíam apenas cal hidratado ou cimento Portland, uma vez que estes são ligantes com baixa aderência e apresentam maior pulvurulência.

Tintas contendo cal hidratada e cimento Portland apresentaram resultados mais homogêneos durante a aplicação, seguidas pelas tintas comerciais. A alta viscosidade das tintas contendo resina acrílica levou a resultados negativos: quanto menor a viscosidade, mais fácil será a aplicação da tinta, mas também maior será sua taxa de evaporação de água, além de existir a possibilidade de escorrimento da mesma. Por isso, os pigmentos de tintas comerciais são constituídos de partículas menores que possuem uma grande área superficial, levando a uma maior demanda de ligantes na composição, levando a uma alta viscosidade. Esse parâmetro é dependente, portanto, do tipo de ligante usado na tinta, no teor do ligante e no teor de água da mistura. Alguns exemplos de amostras aplicadas em placas de PVC podem ser vistos na Figura 28.

Figura 28: Camadas de tintas sustentáveis aplicadas em placas de PVC, onde IOT significa Iron Ore Tailings (Resíduos de Minério de Ferro). Fonte: GALVAO et al, 2018



Algumas amostras apresentaram colorações avermelhadas, enquanto outras apresentaram tons de marrom, além de ser possível notar diferentes texturas e viscosidades. Assim, é possível perceber que a depender da coloração desejada, pode-se utilizar tintas sustentáveis contendo ligantes específicos, além de algumas destas tintas apresentarem

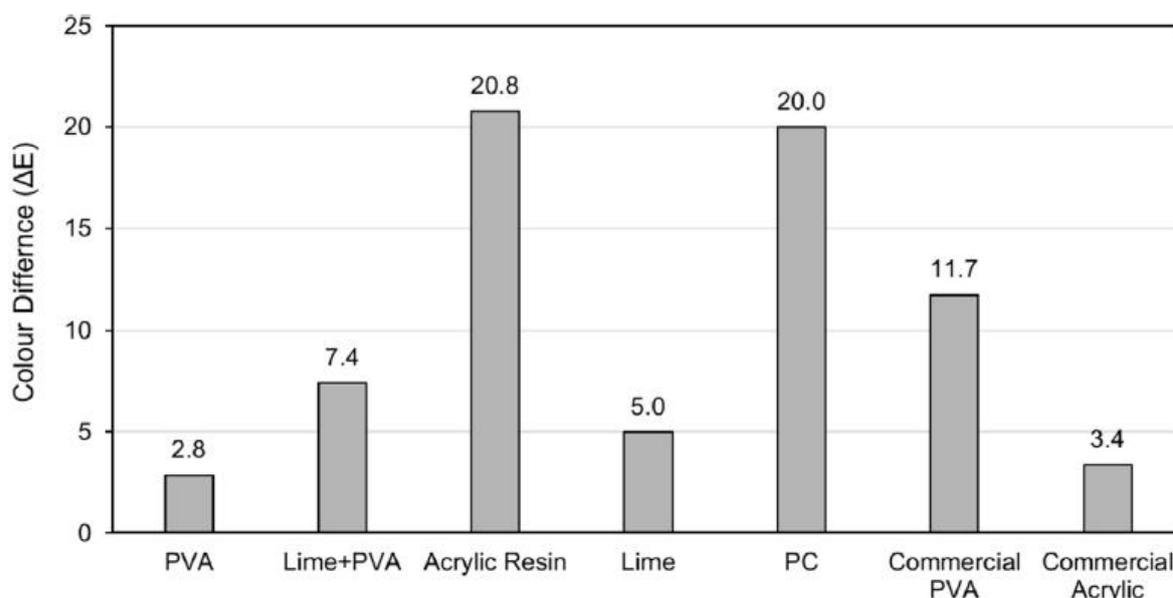
propriedades térmicas diferenciadas, como foi visto também em argamassas contendo RBMF neste trabalho.

Para avaliar a diferença de coloração, duas placas de cimento foram cobertas para cada amostra de tinta, onde uma das placas foi exposta a 12 meses de condições intempéricas naturais e uma não e a variação foi calculada por meio do método  $\Delta E$  entre duas cores no sistema RGB. As tintas sustentáveis contendo PVA como base aglutinante mantiveram uma grande similaridade entre as cores das placas de cimento (Figura 29), assim como a amostra apresentando cal hidratada. Foi possível notar também a resistência a água por conta de chuvas e radiação UV por conta da exposição solar. A resistência colorimétrica demonstra a estabilidade química do RBMF na composição da tinta sustentável, a eficiência na aglutinação por parte dos ligantes e também a adesão das tintas a superfícies cimentícias. Já para as tintas contendo resina acrílica e cimento, a diferença colorimétrica foi elevada (Figura 29). As amostras contendo cal hidratada possuem uma particularidade por conta das reações da cal com o dióxido de carbono presente no ar, e por isso a evaporação da água auxilia esse ligante a desenvolver camadas com boas performances, e a mistura entre PVA e cal hidratada teve resultados piores que com a cal sozinha, uma vez que o PVA pode ter sido responsável pela redução da taxa de evaporação da água.

Figura 29: Resultado de teste de durabilidade após 12 meses em placas de cimento com tintas sustentáveis de PVA. Fonte: GALVAO et al, 2018.



Figura 30: Variação colorimétrica das placas sujeitas ao teste de durabilidade após 12 meses de exposição a ambiente externo. Fonte: GALVAO et al, 2018.



Assim, foi possível notar que o RBMF enquanto carga para tintas sustentáveis se mostra factível e com viabilidade econômica, uma vez que os custos das tintas sustentáveis foram bem mais baixos que das tintas comerciais, variando entre \$0,01/m<sup>2</sup> para tintas contendo apenas cimento ou cal como ligante, até \$0,15/m<sup>2</sup> em tintas contendo PVA (que apresentaram resultados superiores), comparado com custos de \$0,72/m<sup>2</sup> para a tinta convencional de PVA e \$1,07/m<sup>2</sup> para a tinta comercial acrílica.

#### 4.3. PUBLICAÇÕES DE TRATAMENTO DE EFLUENTES

O uso de RBMF para tratamento de efluentes é algo que vem sendo estudado há anos. Como em geral a composição do rejeito é de quartzo e óxidos de ferro, é possível utilizá-lo para aproveitamento dos óxidos de ferro na síntese de catalisadores, e do quartzo como material inerte de suporte. Um exemplo é a síntese de zeólitas artificiais, estruturas cristalinas porosas bem definidas compostas por aluminossilicatos hidratados, geralmente conformado em unidades tetraédricas, como SiO<sub>4</sub> ou AlO<sub>4</sub><sup>-</sup>, vistos anteriormente neste trabalho. A rede tridimensional formada por essas estruturas apresenta muitos átomos de oxigênio que são compartilhados entre os átomos de silício e alumínio, geralmente duplas compartilhadas entre dois tetraedros distintos. Enquanto o átomo de Si apresenta cargas positivas (+4) que são compensadas por átomos de oxigênio (+2 cada), os átomos de Al (+3) passam a possuir uma carga negativa ao substituírem átomos de Si, permitindo assim a troca iônica característica de

estruturas zeolíticas com outras moléculas ou elementos de fora da rede, que passam a ocupar as cavidades internas da matriz, a depender de seus tamanhos (IZIDORO et al, 2019).

O RBMF também pode ser utilizado para a produção de cloreto férrico ( $\text{FeCl}_3$ ), um importante coagulante na área de tratamento de águas e efluentes, assim como coagulantes a base de alumínio. Os óxidos de ferro apresentam uma taxa de solubilidade em água significativamente baixa, e podem sofrer solubilização ácida utilizando ácido clorídrico (HCl) para a formação do coagulante supracitado. Esse coagulante apresenta capacidades elevadas de redução na turbidez da água, pois ele é capaz de formar flocos pesados que decantam com a ação da gravidade, além de possuir aplicabilidade em uma extensa faixa de pH (ALMEIDA e SCHNEIDER, 2020).

#### 4.3.1. RBMF COMO CATALISADOR E SUPORTE NA SÍNTESE DE NANOTUBOS DE CARBONO

No artigo científico de Silva et al (2020), o RBMF é utilizado sem tratamento prévio como catalisador e suporte na produção de nanotubos de carbono por meio da técnica de CVD (*Chemical Vapour Deposition*) em um forno do tipo Leito Fluidizado, reduzindo assim a etapa de tratamento químico para a síntese dos nanotubos. De acordo com os autores, estes nanotubos, formados a partir de moléculas como etileno, metano, dióxido de carbono e etanol como fontes de carbono, podem então ser utilizados na adsorção do hormônio sintético  $17\alpha$ -Ethinilestradiol (EE2), usado como contraceptivo e encontrado em diversos medicamentos, mas que quando não utilizado da forma apropriada interfere no sistema hormonal, afetando o desenvolvimento, reprodução e funções neurológicas e imunológicas, fazendo-se então necessário o tratamento de águas que contenham o hormônio em questão.

O RBMF foi colocado em um tubo de quartzo e alinhado ao reator de leito fluidizado, onde sofreu redução com uma mistura de  $\text{H}_2/\text{N}_2$  e parâmetros específicos. As duas fontes de carbono utilizadas foram uma mistura de etileno gasoso e gás nitrogênio,  $\text{N}_2$ ; e acetonitrila, com vazões e temperaturas determinadas pelos autores. Após a síntese dos nanotubos, eles foram avaliados quanto à eficácia na remoção do hormônio EE2, se utilizando de leituras espectrofotométricas na região do ultravioleta onde o EE2 exhibe o sinal analítico máximo de absorção (280 nm) de diferentes amostras contendo solução de EE2 e o material sintetizado. A avaliação também compreendeu cálculos de isotermas de adsorção e cinética da reação.

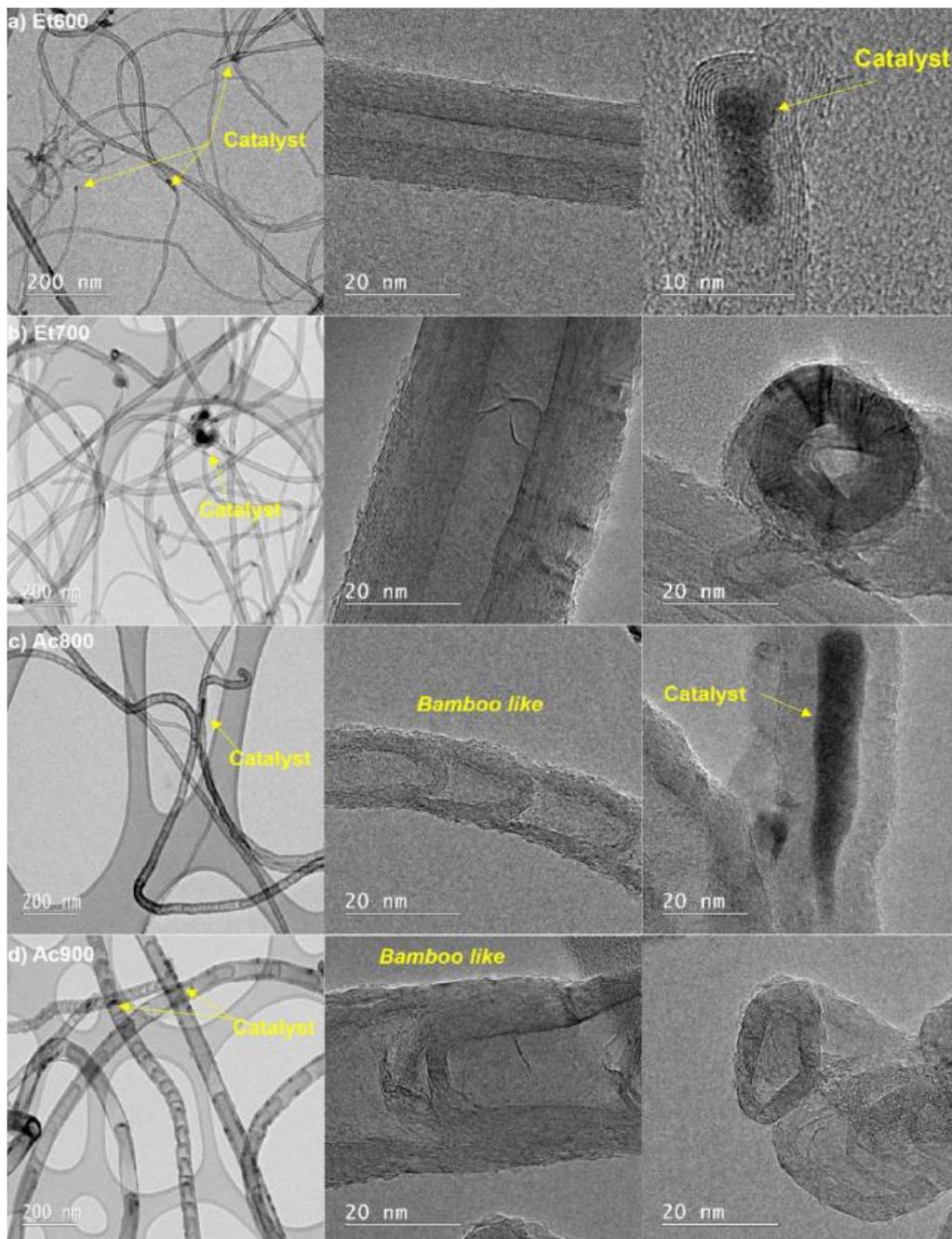
A caracterização do RBMF por meio de FRX e DRX confirmaram suas características química e mineralógica, de acordo com as encontradas em outros trabalhos. 44% do rejeito era composto de ferro. Com relação ao material sintetizado, apenas no intervalo de temperatura entre 600 °C e 700 °C para a solução de etileno (Et600 e Et700, respectivamente) e 800 °C e 900 °C para a solução de acetonitrila (Ac800 e Ac900, respectivamente) foram obtidos nanotubos de carbono com estruturas bem definidas, identificados via técnicas de microscopia de transmissão eletrônica (MET) e espectroscopia Raman. Foi possível notar, portanto, que o RBMF apresentou a capacidade de produzir materiais de qualidade morfológica equiparável a uma matriz ideal, contendo, de acordo com os autores, 10% de catalisador de ferro impregnado em suporte de sílica meso-porosa. A análise morfológica do material exibiu picos de fases de carbono grafítico e de quartzo, além de fases de ferro metálico e cementita ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ), um subproduto da formação de nanomateriais de carbono em processo de CVD. Outras etapas de caracterização foram envolvidas na análise, mostrando que a síntese dos nanotubos de carbono foi realizada corretamente, e com uma versão do nanomaterial dopado com nitrogênio por conta da acetonitrila enquanto fonte de carbono em uma das linhas de síntese.

A percentagem de remoção do hormônio EE2 pelos tubos atingiu a máxima de 32% para os Ac800 e de 31% para os nanotubos Et700. Estes dois nanomateriais apresentaram uma área superficial mais extensa, de  $17,4 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$  para a primeira e  $27,7 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$  para a segunda, o que é fundamental para processos de adsorção. Como referência, nanotubos purificados apresentam área superficial de  $250 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$  com máxima adsorção de cerca de  $30 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ . Por meio de estudo cinético, os Ac800 apresentaram valores de adsorção de  $21,6 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ , sendo este o maior valor obtido. Levando em conta que os nanotubos não foram purificados, o resultado se mostrou positivo. Também foi observado que durante a remoção do hormônio da solução, não houve solubilização e consequente contaminação de metais pesados na mesma.

Os Ac800 e Ac900 dopados com nitrogênio são considerados nanotubos defeituosos, uma vez que o nitrogênio não era de interesse no material, e ainda promove o encurtamento dos tubos, que apresentam paredes corrugadas e são separados em séries de compartimentos distintos, em estruturas defeituosas conhecidas por “*bamboo like*” (Figura 31). Além disso, o nitrogênio garante um menor caráter hidrofóbico, aumentando assim sua polaridade e seu ângulo de contato, onde todos esses parâmetros foram devidamente avaliados e confirmados pelos autores. Porém, estas últimas propriedades passam a serem vistas como positivas, uma vez que a finalidade é adsorver compostos orgânicos. Assim, estes nanotubos apresentam um maior grau de desorganização em suas estruturas, mas conseguem se dispersar melhor em

solução aquosa e em outros solventes polares. Já os Et600 e Et700 apresentaram uma conformação clássica de nanotubos de carbono múltiplas paredes. Esta estrutura consegue estabelecer fortes interações  $\pi$ - $\pi$  com contaminantes orgânicos, além de apresentar uma maior área superficial, importante para o processo adsortivo. Entretanto, esta estrutura é extremamente apolar e hidrofóbica, tornando-a difícil de se dispersar em solventes polares como a água, terminando por sofrerem aglomerações.

Figura 31: Micrografias de transmissão eletrônica para os materiais sintetizados. Fonte: SILVA et al, 2020.



Assim, Silva et al (2020), conseguiu demonstrar que é possível utilizar RBMF sem tratamentos prévios para a produção de nanotubos de carbono, conseguindo inclusive sintetizar dois tipos distintos entre si de nanotubos, com características parcialmente opostas. O custo deste procedimento, segundo os autores, é suficientemente viável a ponto de ser possível realizar em escala industrial, enquanto se reduz o volume de rejeitos de minério de ferro armazenados nas barragens.

#### 4.4. PUBLICAÇÕES DE AGRICULTURA

##### 4.4.1. USO DO RBMF PARA CULTIVO DE ARROZ

Como já é sabido, os rejeitos de mineração apresentam diversos tipos de minérios, minerais e, portanto, elementos químicos distintos em sua composição. Desse modo, é esperado que em locais de armazenamento de rejeitos encontremos uma maior concentração de alguns componentes que foram descartadas por não haver interesse econômico. Em alguns casos, como no caso do RBMF, de acordo com Andrade et al (2018), a lama armazenada nas represas pode haver elementos potencialmente tóxicos capazes de contaminar solos e águas, sendo um problema ambiental grave. Algumas plantações possuem a capacidade de absorver elementos tóxicos e levando eles a outros animais por meio da biomagnificação ao longo da cadeia alimentar. Muitos elementos, como As, Cd, Hg e Pb apresentam efeitos bioacumulativos, como ocorre com o arroz, capaz de acumular os quatro durante o seu cultivo.

Assim, Andrade et al (2018), propôs avaliar a capacidade de cultivar arroz utilizando a lama que esteve presente na barragem de minério de ferro rompida em Mariana, em 2015, com o intuito de investigar a capacidade de acumulação de elementos químicos do cereal em si próprio. Para isso, foi utilizada água de alta pureza durante todo o cultivo, ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ) ultrapuro para limpeza de todo o material plástico e toda a vidraria utilizada, além de realizar a esterilização do material necessário para cultura *in vitro* em uma autoclave. Todo o experimento ocorreu em uma câmara de fluxo laminar, e a determinação de todos os analitos buscados foi realizada por meio de espectrometria de massa com plasma indutivamente acoplado (ICP-MS): Mn, Fe, Zn, Al, Sr, Cu, Co, Se, As, Cd, Hg e Pb. Além disso, fatores de transferência de solo / raízes, solo / brotos e solo / grãos para As, Fe, Cu, Mn, Zn, Cd e Pb foram calculados. O arroz utilizado no estudo foi o arroz asiático (*Oryza sativa L.*).

Foram investigadas características de sementes de arroz utilizando camada superficial de solo ou lama a depender da amostra, e com meios de cultura pobre e rico em nutrientes (água e meio de cultura MS, respectivamente). Também foram realizadas investigações em plantações de arroz cultivadas em ambientes controlados entre dezembro de 2015 a maio de 2016 em solo alagado e em estufas (com condições controladas de temperatura e umidade), com 0%, 16%, 34% e 50% de lama no solo. O solo de cada amostra foi então coletado, e as plantas foram removidas. O arroz presente nas plantas foi então colhido e as plantas foram dissecadas para avaliação posterior de suas raízes, brotos e panículas. O solo foi estudado de modo a verificar sua textura, pH, matéria orgânica e capacidade de troca catiônica (CTC) do mesmo, além de serem determinadas as concentrações de fósforo, cálcio (em forma iônica,  $\text{Ca}^{2+}$ ) e magnésio (em forma iônica,  $\text{Mg}^{2+}$ ), onde o primeiro foi quantificado por espectrofotometria atômica de chama e os dois últimos foram quantificados por complexometria usando EDTA.

Amostras de sementes de arroz cultivadas apenas em lama apresentaram a menor concentração de clorofilas a e b e carotenoides, além de apresentarem raízes mais curtas, enquanto os brotos cresceram menos. O uso de meio de cultura MS não foi suficiente para contribuir para o crescimento adequado dos brotos das plantas, raízes e nem para induzir a produção de seus pigmentos fotossintéticos. As raízes das plantas adultas apresentaram concentrações baixas de Fe, Al, Sr e Pb entre as amostras contendo lama a 34% e 50%, e para este último, houve um aumento considerável da concentração de Cd, o que é justificado pelos autores pela ausência de matéria orgânica, que melhora a disponibilidade de Cd, uma vez que a matéria orgânica possui grupos tiol ( $\text{R-SH}$ , onde o grupo  $-\text{SH}$  é denominado tiol e o R pode ser um alcano, alceno ou outros grupos contendo carbono) que se ligam ao Cd, influenciando assim sua disponibilidade. Outros elementos tóxicos, como As e Pb, apresentaram menores concentrações nas raízes das plantas, não afetando assim seus crescimentos na maior presença de lama.

Com relação à concentração de clorofilas a e b, clorofila total e carotenoides das plantas de arroz cultivadas, foi possível observar que, ainda que as alturas das plantas dos solos contendo 16% e 34% de lama não foram alteradas de forma drástica, as concentrações foram significativamente menores. No caso do solo com 50% de lama, os valores foram os mais baixos encontrados. Ainda assim, a proporção entre as clorofilas a e b não foi alterada em nenhum dos cenários: todos apresentaram a proporção de 3:1, consistente com outros estudos dos autores. Isso leva a crer que a lama não causa prejuízos significativos à síntese de pigmentos fotossintéticos, mas pode causar prejuízos à fotossíntese de um modo geral pela quantidade

total ser reduzida. A explicação dada pelos autores do estudo para esta diminuição envolve a disponibilidade de nitrogênio no solo, pois as taxas de fotossíntese aumentam conforme as folhas exibem maiores concentrações do nutriente. A sua disponibilidade é dada pela mineralização da matéria orgânica promovida por microrganismos, que levam o nitrogênio à nitrato ( $\text{NO}_3$ ). Uma alta umidade e ausência de oxigênio no solo promovem desnitrificação, onde o nitrato sofre redução à óxido nitroso,  $\text{N}_2\text{O}$ , ou nitrogênio,  $\text{N}_2$ , dois gases que saem do solo para a atmosfera, portanto. Microrganismos fixadores de nitrogênio, segundo os autores, podem viver simbioticamente com plantas maiores, auxiliando-as a absorver o nitrogênio do solo, e como a presença da lama no solo reduz a quantidade de microrganismos, há uma dificuldade na fixação do nutriente e conseqüente prejuízo para o desenvolvimento fotossintético da planta.

O grupo apresentando 50% de lama no solo foi afetado pela adição da lama, reduzindo assim o tamanho final das plantas cultivadas e também a colheita de grãos. Em comparação com o controle, a altura foi reduzida em 41,2%, a biomassa de suas raízes reduziu 88,5%, brotos 87% e panículas em 90,6%. As concentrações de Fe nas raízes e no solo corresponderam a valores tóxicos ao arroz, e o cultivar utilizado no estudo é suscetível à toxicidade por Fe. A toxicidade por Fe em solos ocorre comumente quando há uma baixa CTC e baixas concentrações em Ca e K, de acordo com os autores, formando placas de Fe nas raízes que dificultam a absorção de nutrientes pela planta de arroz. Como o solo já estava deficiente em nutrientes por conter metade de sua massa em lama, as reduções significativas nas plantas analisadas são justificáveis. Como a lama apresenta partículas muito pequenas, ela auxilia na compactação do solo e na dificuldade de penetração das raízes, afetando o desenvolvimento geral da planta, uma vez que ela não consegue atingir profundidade suficientemente adequada para absorver nutrientes necessários para si.

A presença de matéria orgânica e a alta CTC do solo são responsáveis por reter os metais no mesmo, de acordo com os autores. Os resultados obtidos para o grupo de 50% de lama mostraram que a quantidade de matéria orgânica e a CTC foram muito menores que em outros grupos, o que explica uma alta mobilidade de elementos e fator de transferência do solo para as raízes. Além disso, a fertilidade do solo apresentando 50% de lama foi drasticamente afetada, uma vez que a matéria orgânica é um fertilizante natural que auxilia diretamente não apenas nas propriedades minerais do solo, mas também na sua porosidade, densidade e na presença de microrganismos. As raízes deste grupo, quando comparadas com as do grupo controle, apresentaram paredes celulares mais encurtadas, profundas e grossas do que em raízes comuns,

quando vistas por meio de MEV-EDS. Já os grãos cultivados em solo com 50% de lama apresentaram uma maior acumulação de Se, Sr, Cd e Mn, mas menores concentrações de As e Cu que os grupos de controle. As concentrações de Fe, Mn, Zn, Al, Cu e Se estavam de acordo com a literatura, enquanto para As, Cd e Pb, elementos preocupantes em altas concentrações, apenas o Cd apresentou valores acima dos presentes em arroz comercial. Ainda assim, os três elementos apresentaram valores menores que os níveis máximos determinados Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA). Os valores de Hg estavam abaixo do limite de detecção. Isto sugere que após etapas de fertilização e correção do solo, a área contaminada em Bento Rodrigues pelos desastres ocorridos podem ser uma boa alternativa para agricultura, reduzindo assim os danos ambientais do local, uma vez que o cultivo se mostrou dificultado sem nenhum tratamento prévio do solo a ser cultivado.

## CAPÍTULO 5

### 5. CONCLUSÃO

Por meio das informações e dados obtidos no estudo prospectivo de artigos científicos, foi possível mapear as oportunidades mais atuais e promissoras para a reutilização e valorização dos rejeitos de barragens de minério de ferro brasileiros. Foi possível evidenciar claramente a importância ambiental de sua incorporação em outras aplicações, sua baixa toxicidade quanto a aplicações que possam por ventura imobilizar quimicamente os constituintes dos rejeitos em questão, e a viabilidade real de aplicação dos rejeitos em múltiplas áreas diferentes, com ênfase principalmente no setor da engenharia e construção civil.

Alguns artigos obtidos durante o mapeamento foram inovadores e propuseram alternativas ao uso tradicional de determinados processos e/ou materiais por meio da adição parcial ou total de rejeitos de barragens de minério de ferro nacionais para a geração de produtos mais sustentáveis e de áreas inicialmente inesperadas, como síntese de diversos tipos de catalisadores para tratamento de efluentes, tintas, e foi possível identificar estudos que demonstraram a capacidade de utilizar os rejeitos para cultivos de grãos. A eficácia de determinados processos, aliado ao uso de volumes significativos do rejeito quando proposta sua incorporação em larga escala, evidencia a capacidade real de desenvolvimento de novas técnicas e soluções sustentáveis para aumentar o valor agregado de um rejeito que, até o momento atual, é pouco visto como uma oportunidade de expansão dos negócios do setor mineral, uma vez que seu uso fomentaria diversas áreas da economia e da sociedade.

Com a reutilização dos rejeitos de barragens de minério de ferro, é possível a redução dos custos de planejamento, construção e manutenção de barragens novas e antigas, uma vez que os rejeitos podem ser direcionados para plantas industriais que podem utilizá-los de forma consciente. Com isso, o número de barragens pode estabilizar ou reduzir, a longo prazo, enquanto a sociedade e o meio ambiente ganham com menores riscos associados com suas construções, além de fomentar a economia e reduzir o volume de produção de outros agentes poluidores, como visto com o cimento Portland, melhorando ainda mais o status ambiental de todo o ciclo existente.

## 6. REFERÊNCIAS

ABNT. NBR 7207:1982 - Terminologia e classificação de pavimentação. Brasil: Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT),: 3 p. 1982.

ABNT. NBR 10.004:2004 - Resíduos sólidos – Classificação. Brasil: Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT),: 71 p. 2004.

ABNT. NBR 10.006-2004 - Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. Brasil: Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT): 3 p. 2004.

ACI. CT-13: ACI Concrete Terminology. : American Concrete Institute  
78 p. 2013.

ALMEIDA, V. O.; SCHNEIDER, I. A. H. Production of a ferric chloride coagulant by leaching an iron ore tailing. *Minerals Engineering*, 156, p. 106511, 2020.

AMERICA'S CEMENT MANUFACTURERS. Supplementary Cementing Materials. S/ Ano. Disponível em: <https://www.cement.org/cement-concrete/concrete-materials/supplementary-cementing-materials>. Acesso em: 11/09/2021.

AMPARO, K. K. D. S.; RIBEIRO, M. D. C. O.; GUARIEIRO, L. L. N. Estudo de caso utilizando mapeamento de prospecção tecnológica como principal ferramenta de busca científica. *Perspectivas em Ciência da Informação*, 17, n. 4, p. 195-209, Out/Dez 2012.

ANDRADE, G. F.; PANIZ, F. P.; MARTINS, A. C., JR.; ROCHA, B. A. et al. Agricultural use of Samarco's spilled mud assessed by rice cultivation: A promising residue use? *Chemosphere*, 193, p. 892-902, Feb 2018.

APAZA APAZA, F. R.; RODRIGUES GUIMARÃES, A. C.; MARCOS VIVONI, A.; SCHRODER, R. Evaluation of the performance of iron ore waste as potential recycled aggregate for micro-surfacing type cold asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*, 266, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PROTEÍNA ANIMAL. Estatística do Setor. Brasil, 2021. Disponível em: <http://abpa-br.org/mercados/>. Acesso em: 11/09/2021.

BASTOS, L. A. D. C.; SILVA, G. C.; MENDES, J. C.; PEIXOTO, R. A. F. Using Iron Ore Tailings from Tailing Dams as Road Material. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28, n. 10, 2016.

BORSCHIVER S.; LEMOS, A. R. Technology roadmap. Planejamento estratégico para alinhar mercado-produto-tecnologia. Brasil: Interciência, 2016. 120 p. ISBN: 9788571933866.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução CONAMA n° 448, de 18 de janeiro de 2012**. Altera os arts. 2°, 4°, 5°, 6°, 8°, 9°, 10°, 11° da Resolução n° 307, de 5 de julho de 2002, do Conselho Nacional do Meio Ambiente-CONAMA. [S. l.]: Diário Oficial da União, 2012. Disponível em: <http://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=20314>. Acesso em: 23 out. 2021.

BRASIL. LEI N° 12.305, DE 2 DE AGOSTO DE 2010 - Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. República Federativa do Brasil, D.O.U de 03/08/2010, pág. n° 2, pp.

BRASIL. LEI N° 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 e altera a redação do art. 35 da Lei no 9.433, de 8 de janeiro de 1997, e do art. 4o da Lei no 9.984, de 17 de julho de 2000. República Federativa do Brasil, D.O.U de 21/09/2010, pág. n° 1, pp.

CAMPBELL, F. C. Introduction to Composite Materials. In: *Structural Composite Materials*: ASM International, 2010. cap. 1.

CAPES. Manual de Acesso - Periódicos CAPES. Brasil, 2019. Disponível em: [https://www.periodicos.capes.gov.br/images/documents/Portal\\_Periodicos\\_CAPES\\_Guia\\_2019\\_4\\_oficial.pdf](https://www.periodicos.capes.gov.br/images/documents/Portal_Periodicos_CAPES_Guia_2019_4_oficial.pdf). Acesso em: 11/09/2021.

CARMIGNANO, O.; VIEIRA, S.; TEIXEIRA, A. P.; LAMEIRAS, F. et al. Iron Ore Tailings: Characterization and Applications. Journal of the Brazilian Chemical Society, 2021.

CARMO, F. F. D.; KAMINO, L. H. Y.; JUNIOR, R. T.; CAMPOS, I. C. D. et al. Fundação tailings dam failures: the environment tragedy of the largest technological disaster of Brazilian mining in global context. Perspectives in Ecology and Conservation, 15, n. 3, p. 145-151, 2017.

CHO, S. Geopolymer composites and their applications in stress wave mitigation. 2015. 145 f. Dissertação (Doutorado de Filosofia em Engenharia Mecânica) - Departamento de Engenharia Mecânica, University of Illinois in Urbana-Champaign, Illinois - EUA.

COUTO, F. R.; FERREIRA, A. D. M.; PONTES, P. P.; MARQUES, A. R. Physical, chemical and microbiological characterization of the soils contaminated by iron ore tailing mud after Fundação Dam disaster in Brazil. Applied Soil Ecology, 158, 2021.

DE ANDRADE, L. C. R. Caracterização de rejeitos de mineração de ferro, in Natura e segregados, para aplicação como material de Construção civil. 2014. 96 f. Doutorado (Engenharia Civil) - Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa (UFV), Minas Gerais, Brasil.

DO CARMO E SILVA DEFÁVERI, K.; DOS SANTOS, L. F.; FRANCO DE CARVALHO, J. M.; PEIXOTO, R. A. F. et al. Iron ore tailing-based geopolymer containing glass wool residue: A study of mechanical and microstructural properties. Construction and Building Materials, 220, p. 375-385, 2019.

DUGGAL, S. K. Building Materials. 3 ed. New Age International (P) Limited, 2009. 544 p. ISBN: 978-8122433791.

FEAM. Inventário de Resíduos Sólidos da Mineração - Ano Base 2017. Fundação Estadual do Meio Ambiente (FEAM). Belo Horizonte - MG: Dezembro de 2018, p. 47. 2018.

FERNANDES, E. Z. Caracterização Física, Química, Mineralógica e Metalúrgica dos Produtos Granulados de Minério de Ferro. 2008. 329 f. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG, Belo Horizonte - MG.

FIGUEIREDO, C. P.; SANTOS, F. B.; CASCUDO, O.; CARASEK, H. et al. O papel do metacaulim na proteção dos concretos contra a ação deletéria de cloretos. Revista Ibracon de Estruturas e Materiais, 7, n. 4, p. 12, 2014.

FILHO, J. N. D. S. A. 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 em Engenharia de Materiais) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET-MG, Belo Horizonte - MG.

FONSECA, A. C. L. Alumínio. S/ Ano. Disponível em: <http://recursomineralmg.codemge.com.br/substancias-minerais/aluminio/#bauxita-no-quadrilátero-ferrífero>. Acesso em: 11/09/2021.

FONTES, W. C. Studies on the use potential of iron ore tailings as alternative raw material in manufacture of ceramic and hydraulic tiles. 2018. 117 f. Tese (Doutorado de Filosofia em Engenharia) - Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), Ouro Preto - MG.

FONTES, W. C.; MENDES, J. C.; SILVA, S. N. D.; PEIXOTO, R. A. F. Mortars for laying and coating produced with iron ore tailings from tailing dams. Construction and Building Materials, 112, p. 988-995, 2016.

FRANCO DE CARVALHO, J. M.; MELO, T. V. D.; FONTES, W. C.; BATISTA, J. O. D. S. et al. More eco-efficient concrete: An approach on optimization in the production and use of

waste-based supplementary cementing materials. *Construction and Building Materials*, 206, p. 397-409, 2019.

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

GOVERNO DA AUSTRÁLIA OCIDENTAL. Western Australia Iron Ore Profile - January 2021. Austrália: Janeiro de 2021, p. 4. 2021.

GUIMARÃES, C. A. D. O. Avaliação do ciclo de queima nas propriedades tecnológicas de cerâmica vermelha. 2017. 114 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência de Materiais) - Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF), Campos dos Goytacazes - RJ.

IBAMA. Rompimento da Barragem de Fundão: Documentos relacionados ao desastre da Samarco em Mariana/MG. 2020. Disponível em: <http://www.ibama.gov.br/recuperacao-ambiental/rompimento-da-barragem-de-fundao-desastre-da-samarco/documentos-relacionados-ao-desastre-da-samarco-em-mariana-mg>. Acesso em: 11/09/2021.

IZIDORO, J. C.; KIM, M. C.; BELLELLI, V. F.; PANE, M. C. et al. Synthesis of zeolite A using the waste of iron mine tailings dam and its application for industrial effluent treatment. *Journal of Sustainable Mining*, 2019.

KARTHIKA, V.; AWOYERA, P. O.; AKINWUMI, I. I.; GOBINATH, R. et al. Structural properties of lightweight self-compacting concrete made with pumice stone and mineral admixtures. *Romanian Journal of Materials*, 48, n. 2, p. 208-213, 2018.

LEÃO, M. **O mínimo que você precisa saber sobre projetos de pilhas de rejeito filtrado.** Instituto Minere, 2021. Disponível em: <https://institutominere.com.br/blog/O-minimo-que-voce-precisa-saber-sobre-projetos-de-pilhas-de-rejeito-filtrado>. Acesso em: 23/10/2021.

LUZ, A. B. D.; SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A. Tratamento de Minérios. 5 ed. Rio de Janeiro - RJ: Centro de Tecnologia Mineral (CETEM/MCT), 2010. 965 p. ISBN: 978-85-61121-62-4.

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

MENDES, J. C.; BARRETO, R. R.; DE PAULA, A. C. B.; ELÓI, F. P. D. F. et al. On the relationship between morphology and thermal conductivity of cement-based composites. *Cement and Concrete Composites*, 104, 2019.

MENDES PROTASIO, F. N.; RIBEIRO DE AVILLES, R.; LETICHEVSKY, S.; DE ANDRADE SILVA, F. The use of iron ore tailings obtained from the Germano dam in the production of a sustainable concrete. *Journal of Cleaner Production*, 278, 2021.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Boletim do Setor Mineral – Outubro de 2020. Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral. Brasil, p. 28. 2020.

MORAIS, C. F.; BELO, B. R.; BEZERRA, A. C. S.; LOURA, R. M. et al. Thermal and mechanical analyses of colored mortars produced using Brazilian iron ore tailings. *Construction and Building Materials*, 268, 2021.

MYMRIN, V.; PEDROSO, D. E.; PEDROSO, C. L.; AVANCI, M. A. et al. Physical-chemical processes of sustainable construction materials structure formation with iron ore processing tailings and aluminum anodizing sludge. *Construction and Building Materials*, 298, 2021.

NETO, J. C. **Apostila de Meio Ambiente - Curso Técnico em Mineração**. 2013. 132 p. Disponível em: [https://www.seduc.ce.gov.br/wp-content/uploads/sites/37/2012/06/mineracao\\_meio\\_ambiente\\_e\\_mineracao.pdf](https://www.seduc.ce.gov.br/wp-content/uploads/sites/37/2012/06/mineracao_meio_ambiente_e_mineracao.pdf). Acesso em: 23/10/2021.

OJOVAN, M. I.; LEE, W. E. An Introduction to Nuclear Waste Immobilisation. 2 ed. Elsevier, 2014. 358 p. ISBN: 978-0-08-099392-8.

PARENTE, C. E. T.; LINO, A. S.; CARVALHO, G. O.; PIZZOCHERO, A. C. et al. First year after the Brumadinho tailings' dam collapse: Spatial and seasonal variation of trace elements in sediments, fishes and macrophytes from the Paraopeba River, Brazil. *Environ Res*, 193, p. 110526, Feb 2021.

QUEIROZ, L. F. T. Efeito da quantidade de areia quartzosa no processamento, microestrutura e propriedades da cerâmica vermelha para telhas. 2009. 105 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) -, Universidade Estadual Do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF), Rio de Janeiro - RJ.

QUINTELLA, C. M.; MEIRA, M.; GUIMARÃES, A. K.; TANAJURA, A. D. S. et al. Technology Assessment as a Tool Applied in Science and Technology to Achieve Innovation: Optical Methods for Fuels Quality Assessment. *Revista Virtual de Química*, 3, n. 5, 2011.

SAMPAIO, J. A.; ANDRADE, M. C. D.; DUTRA, A. J. B. Bauxita. In: LUZ, A. B. D. e LINS, F. A. F. (Ed.). *Rochas e Minerais Industriais no Brasil: Usos e Especificações*. Rio de Janeiro - RJ: Centro de Tecnologia Mineral (CETEM/MCTI);, 2018. cap. 1, p. 311-337.

SILVA, A. G. P. D.; JÚNIOR, C. A. A sinterização rápida: sua aplicação, análise e relação com as técnicas inovadoras de sinterização. *Cerâmica*, 44, n. 290, 1998.

SILVA, R. C. F.; ARDISSON, J. D.; COTTA, A. A. C.; ARAUJO, M. H. et al. Use of iron mining tailings from dams for carbon nanotubes synthesis in fluidized bed for 17alpha-ethinylestradiol removal. *Environ Pollut*, 260, p. 114099, May 2020.

SOARES, L. Barragem de Rejeitos. In: LUZ, A. B. D.;SAMPAIO, J. A., et al (Ed.). *Tratamento de Minérios*. 5 ed. Rio de Janeiro - RJ: Centro de Tecnologia Mineral (CETEM/MCT), 2010. cap. 19, p. 831-896.

SOUZA, C. V. D. Estudo das técnicas de disposição de rejeitos de mineração. 2018. 77 f. Monografia (Bacharelado em Engenharia de Minas) - Departamento de Engenharia de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), Ouro Preto - MG.

VALE. O que são barragens. S/ Ano. Disponível em: [http://www.vale.com/brasil/PT/aboutvale/servicos-para-comunidade/minas-gerais/atualizacoes\\_brumadinho/Documents/PT/entenda-as-barragens-da-vale-pt.html](http://www.vale.com/brasil/PT/aboutvale/servicos-para-comunidade/minas-gerais/atualizacoes_brumadinho/Documents/PT/entenda-as-barragens-da-vale-pt.html). Acesso em: 11/09/2021.

WISE URANIUM PROJECT. Chronology of major tailings dam failures. 2021. Disponível em: <https://www.wise-uranium.org/mdaf.html>. Acesso em: 11/09/2021.

## 7. APÊNDICE A1 – Imagens de Satélite das Regiões Afetadas pelos Desastres de Mariana e Brumadinho

Figura 01: Imagem de satélite da região de Bento Rodrigues durante o mês de julho de 2015. Imagem extraída do *software* Google Earth Pro em setembro de 2021.

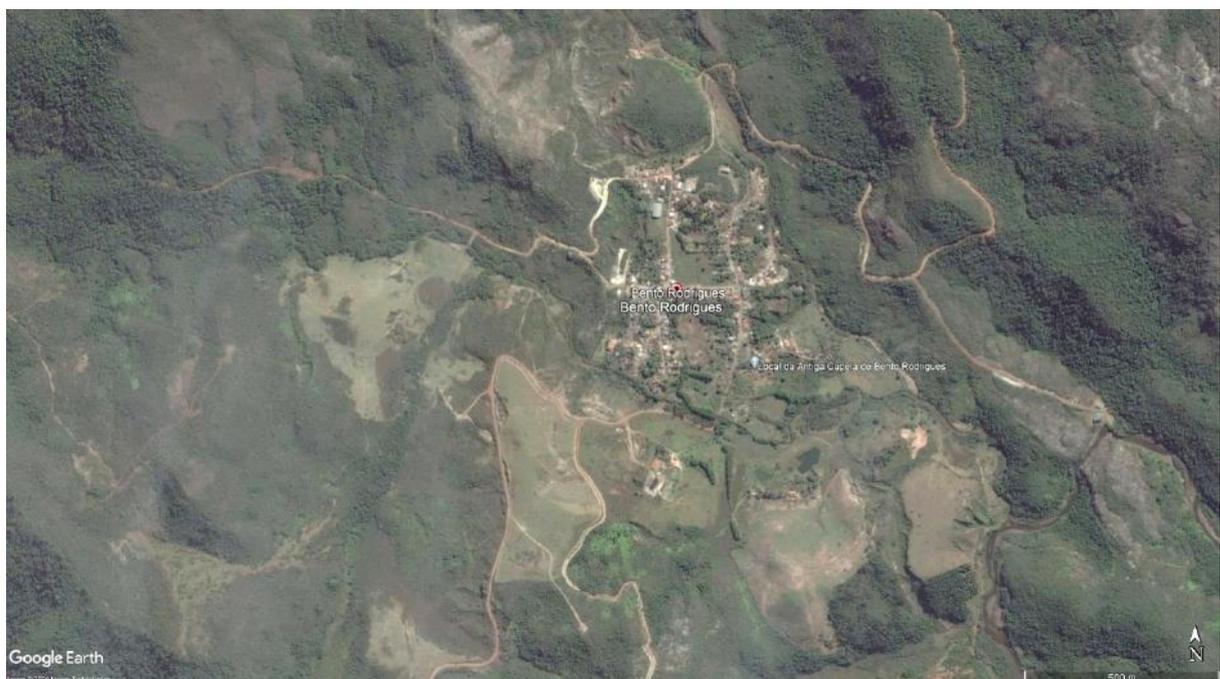


Figura 02: Imagem de satélite da região de Bento Rodrigues durante o mês de dezembro de 2015. Imagem extraída do *software* Google Earth Pro em setembro de 2021.



Figura 03: Imagem de satélite da região de Bento Rodrigues durante o mês de março de 2017. Imagem extraída do *software* Google Earth Pro em setembro de 2021.

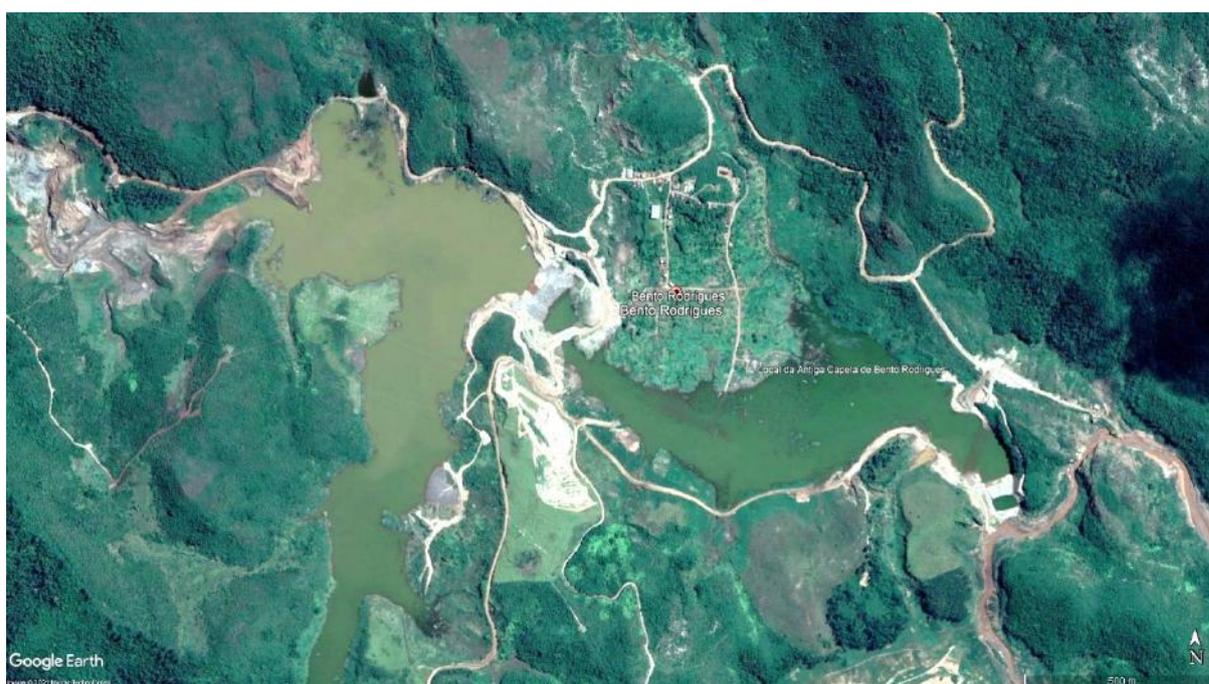


Figura 04: Imagem de satélite da região de Bento Rodrigues durante o mês de junho de 2020. Imagem extraída do *software* Google Earth Pro em setembro de 2021.



Figura 05: Imagem de satélite da região de Brumadinho durante o mês de julho de 2018. Imagem extraída do *software* Google Earth Pro em setembro de 2021.



Figura 06: Imagem de satélite da região de Brumadinho durante o mês de janeiro de 2019.  
Imagem extraída do *software* Google Earth Pro em setembro de 2021.



Figura 07: Imagem de satélite da região de Brumadinho durante o mês de março de 2019.  
Imagem extraída do *software* Google Earth Pro em setembro de 2021.



Figura 08: Imagem de satélite da região de Brumadinho durante o mês de abril de 2019.  
Imagem extraída do *software* Google Earth Pro em setembro de 2021.

