



Universidade Federal
de São João del-Rei

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL-REI

CAMPUS ALTO PARAPEBA

Letícia Ferreira Morais

***REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO PROVENIENTE DO ROMPIMENTO DE
BARRAGEM EM MARIANA - MG E SUA APLICAÇÃO NA FORMULAÇÃO DE NOVOS
MATERIAIS: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA***

Ouro Branco – Minas Gerais

Julho de 2023



Universidade Federal
de São João del-Rei

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL-REI
CAMPUS ALTO PARAOPÉBA

Letícia Ferreira Morais

***REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO PROVENIENTE DO ROMPIMENTO DE
BARRAGEM EM MARIANA - MG E SUA APLICAÇÃO NA FORMULAÇÃO DE NOVOS
MATERIAIS: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA***

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Coordenação do Curso de
Graduação em Engenharia Civil, da
Universidade Federal de São João del-Rei,
Campus Alto Paraopeba, como requisito
parcial para a obtenção do grau de
Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Anderson Ravik dos Santos

Ouro Branco – Minas Gerais

Julho de 2023

Ficha catalográfica elaborada pela Divisão de Biblioteca (DIBIB)
e Núcleo de Tecnologia da Informação (NTINF) da UFSJ,
com os dados fornecidos pela autora

Morais, Leticia Ferreira.

M828r REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO PROVENIENTE DO
ROMPIMENTO DE BARRAGEM EM MARIANA - MG E SUA
APLICAÇÃO NA FORMULAÇÃO DE NOVOS MATERIAIS: UMA

REVISÃO SISTEMÁTICA / Leticia Ferreira Moraes;
orientador Anderson Ravik dos Santos. -- Ouro
Branco, 2023.

10 p.

Trabalho de Conclusão (Graduação - Engenharia
Civil) -- Universidade Federal de São João del-Rei,
2023.

Letícia Ferreira Morais

REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO PROVENIENTE DO ROMPIMENTO DE BARRAGEM EM MARIANA-MG E SUA APLICAÇÃO NA FORMULAÇÃO DE NOVOS MATERIAIS: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do Curso de Graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal de São João del-Rei, Campus Alto Paraopeba, como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovado em 04 de julho de 2023

COMISSÃO EXAMINADORA:

Documento assinado digitalmente
 ANDERSON RAVIK DOS SANTOS
Data: 12/07/2023 09:45:37-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Me. Anderson Ravik dos Santos
(Professor Orientador)

Documento assinado digitalmente
 LUCAS ROQUETE AMPARO
Data: 11/07/2023 20:02:05-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Lucas Roquete Amparo
(Professor da Engenharia Civil da UFSJ)

Documento assinado digitalmente
 ANDREIA DA CONCEICAO DE FARIA
Data: 11/07/2023 20:44:22-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Eng. Civil Me. Andreia da Conceição de Faria
(Avaliadora convidada)

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por sempre me mostrar o caminho certo. À minha família, principalmente minha mãe Nilda, meu padrasto Walmir e minha avó Berenícia pelo apoio e incentivo que serviram de alicerce para as minhas realizações. À minha irmã Thaís pela amizade e apoio. Ao meu orientador Prof. Me. Anderson Ravik dos Santos por aceitar conduzir o meu trabalho de pesquisa e pelas valiosas contribuições durante todo o processo. A todos os meus professores do curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de São João del-Rei pela excelência da qualidade técnica de cada um. E a todos os meus amigos do curso de graduação que compartilharam dos inúmeros desafios que enfrentamos, sempre com o espírito colaborativo.

“Por vezes sentimos que aquilo que fazemos não é senão uma gota de água no mar. Mas o mar seria menor se lhe faltasse uma gota.”

(Madre Teresa de Calcutá)

REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO PROVENIENTE DO ROMPIMENTO DE BARRAGEM EM MARIANA - MG E SUA APLICAÇÃO NA FORMULAÇÃO DE NOVOS MATERIAIS: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA

Letícia Ferreira Morais¹

1: Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ), Brasil
Campus Alto Paraopeba (CAP)
Rod. MG 443, KM 7 Fazenda do Cadete, Ouro Branco - MG 36495-000
<https://www.ufsj.edu.br/cap/>

Resumo O presente trabalho apresenta uma revisão sistemática das pesquisas mais recentes acerca de possíveis aplicações do Rejeito de Minério de Ferro (RMF), proveniente do rompimento da Barragem de Fundão, ocorrido em Mariana – MG, na produção de novos materiais. Foi utilizado o método Systematic Search Flow adaptado para a revisão de literatura. A preparação do rejeito antes de sua utilização, métodos de caracterização, composição mineral, materiais produzidos e ensaios executados foram descritos e discutidos de forma abrangente. Na maioria dos casos houve a necessidade de preparação. Para a caracterização do rejeito tratado, os métodos mais utilizados foram a Difração de Raio-X (DRX) e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). A composição mineral do RMF se deu, principalmente, por quartzo e hematita. Diversos materiais foram produzidos com a incorporação do rejeito, principalmente concretos e argamassas, blocos e tijolos, compósitos plásticos e cerâmicos, dentre outros compósitos. Para avaliação das propriedades destes materiais, os ensaios mais utilizados foram absorção de água e resistência à compressão, comuns para matrizes cimentícias. Diante da diversidade de materiais produzidos com o rejeito, o resíduo se mostrou como uma promissora alternativa para solucionar o problema da deposição de RMF em barragens, auxiliando ainda na mitigação de impactos ambientais causados pelos rompimentos já ocorridos.

Palavras-chave: Rejeito de Minério de Ferro, Mariana - MG, Materiais, Revisão de literatura, Rompimento da Barragem do Fundão.

Abstract This paper presents a systematic review about the most recent research on possible applications of the Iron Ore Tailings (IOT) from the collapse of the Fundão dam in Mariana - MG, in the production of new materials. The literature review process was carried out using the adapted Systematic Search Flow method. The preparation of the tailings before their use, characterization methods, mineral composition, materials produced and tests performed were described and discussed in an extensive (or embracing) manner. In most cases the preparation was needed. For the characterization of the treated tailings, the most used methods were X-Ray Diffraction (XRD) and Scanning Electron Microscopy (SEM). The mineral composition of the IOT was mainly quartz and hematite. Several materials were produced with the incorporation of the tailings, mainly concrete and mortar, blocks and bricks, plastic and ceramic composites among other composites. To evaluate the properties of these materials, the tests most often used were water absorption and compressive strength, common for cement matrices. Given the diversity of materials produced with the tailings, the waste has proven to be a promising alternative to solve the problem of IOT deposition in dams, also helping to mitigate the environmental impacts caused by the ruptures that have already occurred.

Key-words: Iron Ore Tailings, Mariana - MG, Materials, Literature review, Failure of the Fundão Dam.

1. INTRODUÇÃO

O Brasil é o terceiro maior produtor de minério de ferro do mundo, atrás somente da Austrália e da China, respectivamente (USGS, 2023). Estima-se que em 2021 a produção de minério de ferro beneficiado no país tenha sido superior a 430 milhões de toneladas, contendo neste material cerca de 63,37 % de ferro (ANM, 2023). Os minérios de ferro são substâncias minerais a partir das quais é obtido o ferro metálico (Fe), amplamente explorado comercialmente. No Brasil, o Quadrilátero Ferrífero, em Minas Gerais, é uma das principais regiões produtoras de minério itabirítico ou hematítico (CARVALHO *et al.*, 2014).

Para se tornar comerciável, o minério de ferro precisa passar por uma série de etapas até chegar ao produto final. Trata-se do beneficiamento, que visa modificar a granulometria, a concentração relativa das espécies minerais presentes ou a forma, sem alterar a identidade química e física da matéria-prima. O processo inicia-se com o minério bruto, procedente da etapa de lavra, passando pela cominuição, que consiste na redução do tamanho e separação em uma única espécie mineralógica. Para evitar a cominuição excessiva, faz-se a separação por tamanho ou classificação. Uma vez que o minério foi submetido à redução de tamanho, ele passa pela etapa de concentração, que consiste em separar o mineral de interesse da ganga (minerais não aproveitados). Para esta etapa a flotação é o método de concentração mais utilizado, na qual é necessário eliminar parte da água do concentrado, o chamado desaguamento. Por fim, o material passa por procedimentos de secagem (LUZ; SAMPAIO; ALMEIDA, 2010).

Em todo este processo de beneficiamento, no qual se utiliza grande quantidade de água, são gerados volumes expressivos de rejeito de minério de ferro (RMF). Por conta disso, a forma mais comum de proceder a disposição final deste material residual são as barragens (IBRAM, 2016). Quando se trata de mineração, as barragens de rejeito costumam ser construídas seguindo o primeiro ano de produção. Porém, à medida que a lavra avança e, conseqüentemente, há um aumento da produção de rejeitos, elas são alteadas. Desta forma, novos materiais são dispostos acima da crista e sobre o antigo talude, excluindo a necessidade de rebaixamento do nível do reservatório e evitando interrupções nas operações (MACHADO, 2007).

Nos últimos anos falhas de barragens de RMF provaram que este método de disposição apresenta inseguranças, podendo causar impactos sociais, ambientais e econômicos duradouros e, muitas vezes, irreversíveis (ROCHE; THYGESEN; BAKER, 2017). A construção de barragem por alteamento, mais especificamente a montante, é o método com maior porcentagem de falhas (32 %). As causas mais frequentes de ruptura são o galgamento, quando a água transborda por cima da barragem, e a liquefação, uma ruptura devido ao aumento de poropressões, causando a perda de resistência e rigidez do solo, em condições não drenadas. A média de falhas anual de barragens de rejeitos é de 2,5; sendo que entre 2014 a 2017 ocorreram 18 falhas significativas em barragens pelo mundo, sendo 5 destas no Brasil (WISE, 2017).

Uma situação de grande repercussão e que trouxe visibilidade para o assunto foi o rompimento da Barragem de Fundão, localizada em Mariana (MG), de propriedade da Samarco Mineração S/A, que entrou em operação em dezembro de 2008. No dia 5 de novembro de 2015, devido a uma forte percolação, a barragem se rompeu, e o reservatório, que estava em processo inicial de enchimento, foi esvaziado. O colapso da estrutura ocasionou o extravasamento imediato de aproximadamente 40 milhões de metros cúbicos de RMF e sílica, entre outros particulados. Outros 16 milhões de metros cúbicos continuaram escoando lentamente, alcançando o Rio Doce e desaguando no Oceano Atlântico, na cidade de Linhares (ES). O acidente provocou a morte de 19 pessoas, o desalojamento de várias famílias e impactos ambientais expressivos (MPF, 2015).

Devido à ruptura da Barragem do Fundão e outros acidentes similares, a indústria da mineração tem buscado se reinventar, aderindo a novas práticas, atendendo a reformulação das normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e ampliando os investimentos em sistemas, equipamentos e técnicas de segurança das operações. Os objetivos das mineradoras têm sido, a curto prazo, evitar acidentes em outras barragens e minimizar as conseqüências, caso aconteçam. A médio e a longo prazo, porém, é necessário buscar modelos mais seguros e sustentáveis de gerenciar os rejeitos da mineração (IBRAM, 2022).

O rompimento de barragem ocorrido em Mariana - MG evidenciou a necessidade de abordagens mais seguras e sustentáveis para o gerenciamento desses resíduos. Várias pesquisas vêm sendo desenvolvidas com o intuito de encontrar soluções inovadoras que não envolvam a utilização de barragens para o armazenamento desses materiais. Dentre as alternativas propostas, destacam-se o uso de tecnologias de beneficiamento e concentração de minério para reduzir a quantidade de rejeitos gerados, visando promover uma indústria mineradora mais sustentável e responsável.

Outros pesquisadores têm se empenhado em encontrar alternativas viáveis para lidar com o RMF depositado no meio ambiente após o acidente ocorrido, como forma de mitigar os impactos ambientais causados. Estes trabalhos são o foco da presente revisão bibliográfica, que possui como objetivo apresentar de forma abrangente como o RMF proveniente do acidente tem sido aplicado na proposição de novos materiais e técnicas, a partir de trabalhos relevantes e atuais.

2. METODOLOGIA

Para o desenvolvimento desta revisão sistemática de literatura, foi utilizado o método *Systematic Search Flow (SSF)* adaptado de Ferenhof e Fernandes (2016). O método consiste em quatro fases: Protocolo de pesquisa, Análise, Síntese e Escrita.

A Fase 1, Protocolo de pesquisa, é composta pela definição da estratégia de busca utilizando termos específicos e operadores lógicos; escolha das bases de dados; estabelecimento de filtros, como ano de publicação e tipo de documento; pré-seleção de documentos e organização do portfólio bibliográfico. A pesquisa limitou-se a trabalhos em formato de artigo, dissertação ou tese, disponíveis nos bancos de dados *Google Escolar* e *Scopus*, publicados a partir de 2015, quando aconteceu o rompimento. Os termos de busca foram inseridos em inglês e português, para que não fossem excluídos os trabalhos publicados nacionalmente. Dos 997 artigos encontrados nesta fase, 954 estavam disponíveis para download.

A Fase 2, Análise, consiste na consolidação dos dados agrupados na fase anterior. Por meio de uma planilha eletrônica fez-se a combinação e agrupamento dos dados gerais levantados, como título, ano de publicação, universidade, área, material produzido e objetivo. Foi realizada então uma pré-seleção, onde um total de 931 artigos foram descartados: 193 por duplicidade e 738 por falta de aderência ao tema.

Os 23 artigos que atenderam ao objetivo da pesquisa foram selecionados para a Fase 3, Síntese. Nesta fase foram construídas as inferências sobre o tema. Todos os dados necessários para o desenvolvimento da revisão foram extraídos e organizados em uma nova planilha eletrônica. Alguns tópicos foram definidos para auxiliar nesta nova organização: se houve tratamento do rejeito; métodos de caracterização utilizados; composição do rejeito; materiais produzidos e ensaios realizados para analisar as amostras.

Por fim, a Fase 4, Escrita, refere-se à consolidação dos resultados através da escrita científica. As discussões apresentadas a seguir, juntamente com os dados levantados agrupados de forma gráfica, compreendem esta fase final do método.

O Fluxograma apresentado na Figura 1 resume como as quatro etapas do método SSF foram utilizadas para a composição deste trabalho.

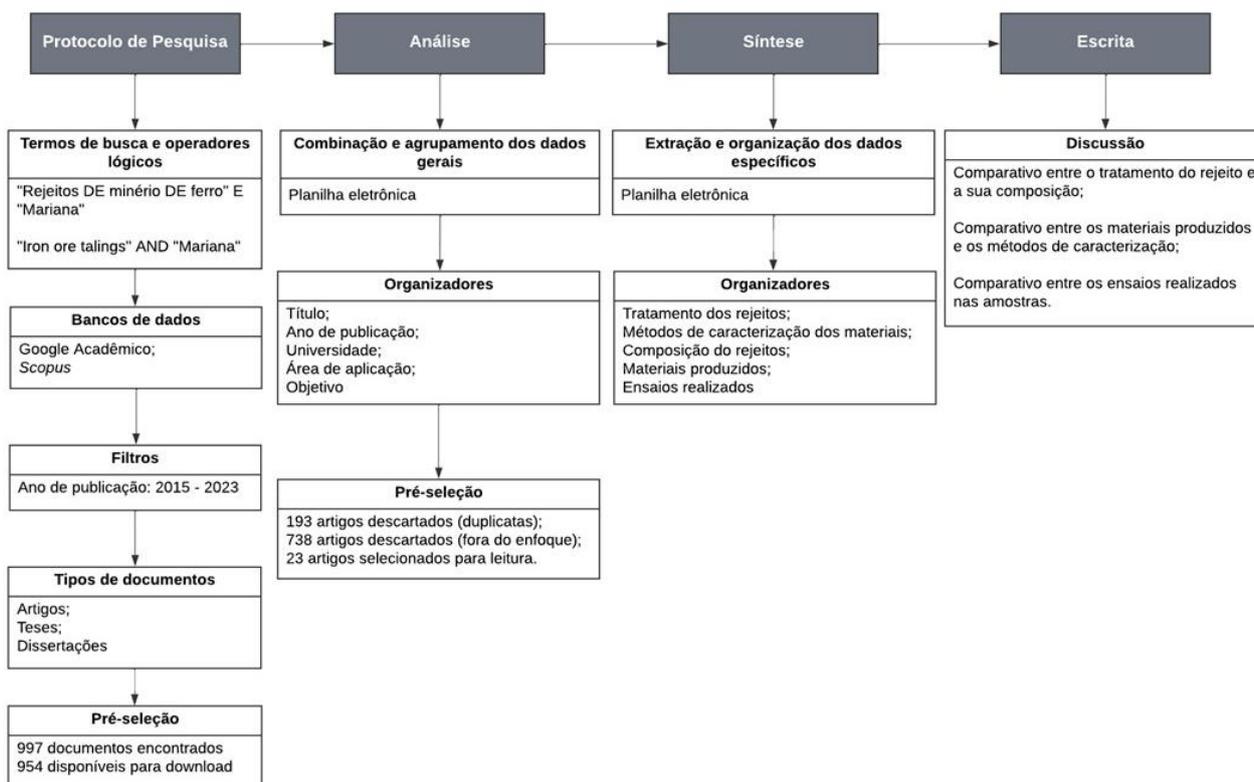


Figura 1 – Processo de revisão de literatura pelo método SSF adaptado (FERENHOF; FERNANDES, 2016)

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Preparação dos rejeitos

O alto teor de água presente na composição do RMF pode alterar e/ou prejudicar as propriedades de amostras produzidas a partir da sua incorporação, sendo a sua preparação recomendável e justificável (MME, 2009). Conforme pode ser observado na Figura 2, praticamente todas as pesquisas (97 %) utilizaram RMF tratado (DUARTE *et al.*, 2020; SILVA, PAIVA, 2020; MACHADO *et al.*, 2019; PEDROSO *et al.*, 2020). Em apenas 3 % dos trabalhos o RMF foi utilizado *in natura*, sem nenhum tipo de tratamento, como em Bessa *et al.* (2022).

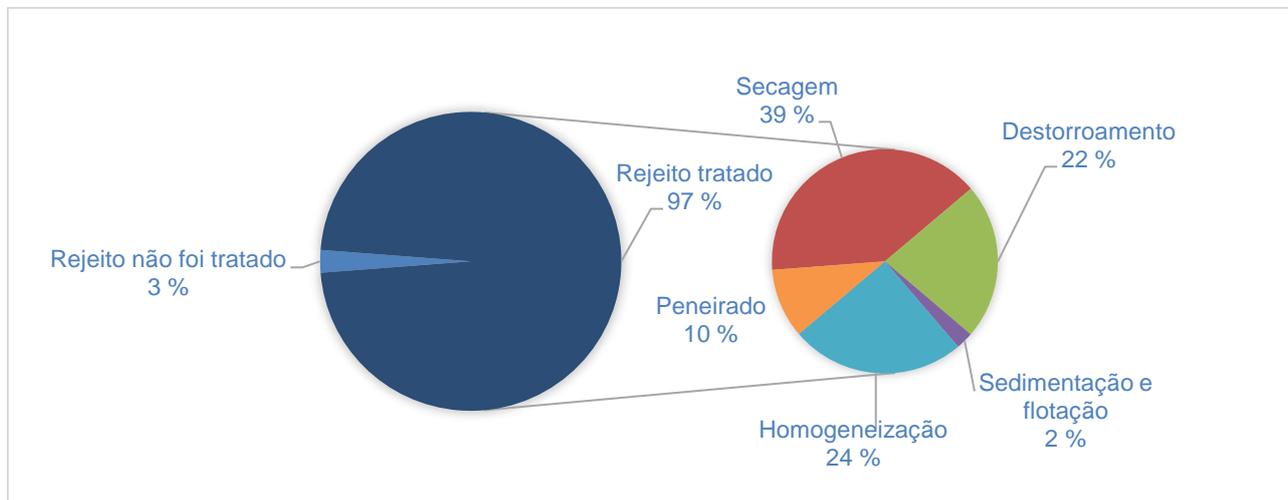


Figura 2 – Preparação do rejeito

Os métodos de tratamento mais utilizados foram a secagem, (GUIMARÃES *et al.*, 2018; FARIA, 2023; RUY, 2022; AVANCI, 2022; BRESSIANI *et al.*, 2022; DUARTE *et al.*, 2019), a homogeneização (SÁ *et al.*, 2022; EUGÊNIO *et al.*, 2021; MACHADO *et al.*, 2019; DUARTE *et al.*, 2020) e o destorroamento (SILVA; PAIVA, 2020; FONTES *et al.*, 2021; MACHADO *et al.*, 2019; PEDROSO *et al.*, 2020). A preferência pela secagem, que consiste na remoção da água da superfície livre dos materiais, pode residir no fato de que o processo auxilia na conservação de resíduos além de permitir seu manuseio, transporte e armazenamento sem perdas significativas (MOURA, 2009). Embora seja viável para pesquisas de laboratório, onde o volume de RMF é pequeno, a secagem não é viável para a indústria mineradora. Ainda que a armazenagem a seco do RMF seja uma alternativa mais segura que as barragens, o custo para secar os rejeitos e armazená-los em silos é muito mais alto (PASSARINHO, 2019).

3.2. Métodos de caracterização dos materiais

Conforme apresentado na Figura 3, diversos métodos de caracterização do RMF foram utilizados pelos pesquisadores sendo os mais recorrentes Difração de Raio-X (DRX) (GUIMARÃES *et al.*, 2018; FARIA, 2023; RUY, 2022); Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) (AVANCI, 2022; AMARAL *et al.*, 2021); Fluorescência de Raios-X (FRX) (BESSA *et al.*, 2022; DUARTE *et al.*, 2019); Distribuição granulométrica (BRESSIANI *et al.*, 2022; MENDES *et al.*, 2019) e Espectroscopia Dispersiva de Raios-X (EDX) (CECHIN *et al.*, 2022; MYMRIN *et al.*, 2021).

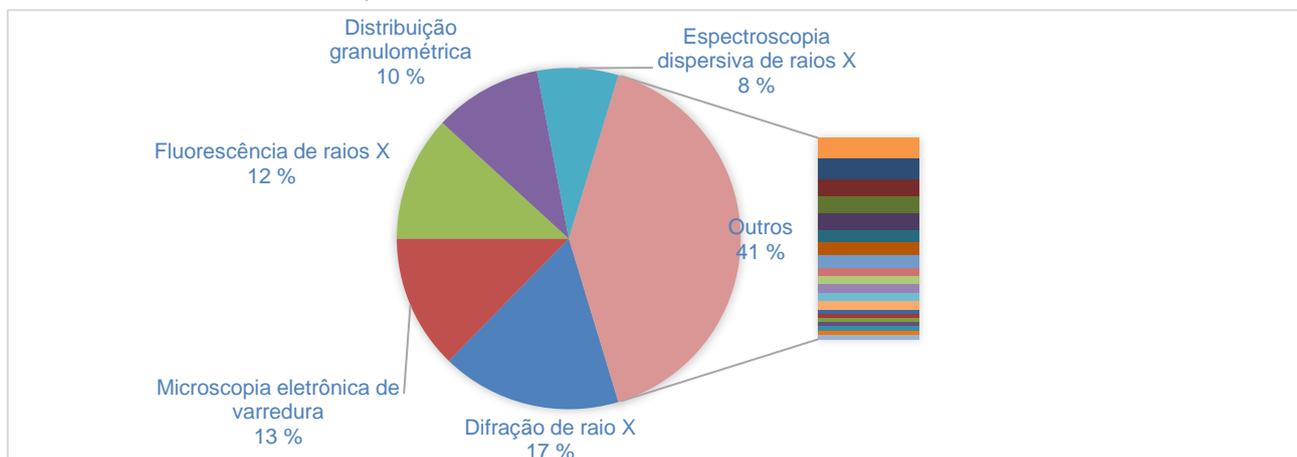


Figura 3 – Métodos de caracterização dos materiais

As técnicas instrumentais DRX e MEV são amplamente utilizadas para a identificação de um mineral específico e de sua respectiva composição química. Enquanto a DRX se aplica majoritariamente à argilominerais, soluções sólidas ou séries isomórficas, a MEV é bastante utilizada na caracterização tecnológica de minérios, permitindo a observação de aspectos superficiais em curto tempo de análise além de fornecer o espectro completo dos elementos em uma única operação. A FRX, por sua vez é uma técnica versátil de análise química, que permite a análise de amostras sob a forma líquida ou sólida, tendo ampla capacidade de detecção e abrangendo elementos para os quais a espectrografia óptica de emissão é ineficiente (BARBOSA *et al.*, 2010). Ainda, a EDX é utilizada no estudo de caracterização microscópica de materiais, permitindo rapidamente a determinação da composição mineral em amostras de tamanhos muito reduzidos. Além disso, concede o mapeamento da distribuição de elementos químicos por minerais, gerando mapas composicionais de elementos (UFOP, 2023).

Outros métodos de caracterização também foram utilizados pelos autores, porém em menor frequência, como é o caso da análise de massa específica (BESSA *et al.*, 2022; MENDES *et al.*, 2019), análise granulométrica por granulômetro a laser (AMARAL *et al.*, 2021; DUARTE *et al.*, 2019), análise termogravimétrica (CECHIN *et al.*, 2022; MENDES *et al.*, 2019), espectrometria de emissão óptica por plasma acoplado indutivamente (BRESSIANI *et al.*, 2022; VILELA *et al.*, 2020), análise de micro massa a laser (MYMRIN *et al.*, 2021; POVALUK *et al.*, 2022), teste de densidade (FONTES *et al.*, 2021; EUGÊNIO *et al.*, 2021), espectroscopia de absorção atômica (MYMRIN *et al.*, 2021; PEDROSO *et al.*, 2022), pH (EUGÊNIO *et al.*, 2021; PEDROSO *et al.*, 2020), absorção de água (DUARTE *et al.*, 2020), análise térmica diferencial (CECHIN *et al.*, 2022), teste de superfície específica (SÁ *et al.*, 2022), teste de perdas ao fogo (PEDROSO *et al.*, 2020), massa unitária (DUARTE *et al.*, 2020), condutividade elétrica (FARIA, 2023), entre outros.

3.3. Composição dos rejeitos de minério de ferro

Como pode ser observado na Figura 4, os principais minerais componentes dos RMF utilizados nas pesquisas foram quartzo, hematita, caulinita, goethita e magnetita, respectivamente. Esta diversidade está relacionada à localização da cidade de Mariana, que faz parte do quadrilátero ferrífero em Minas Gerais. A área, que concentra os mais diversos tipos de minerais, é a principal região produtora de minério de ferro do país, onde encontram-se predominantemente minerais como a hematita, goethita e magnetita; ainda que o itabirito também seja de fácil acesso e o mais significativo em termos econômicos (ROESER *et al.*, 2010; DUARTE, 2019). Existem outros minerais que são juntamente identificados, denominados de ganga, todavia, eles não geram interesse econômico para a extração do ferro.

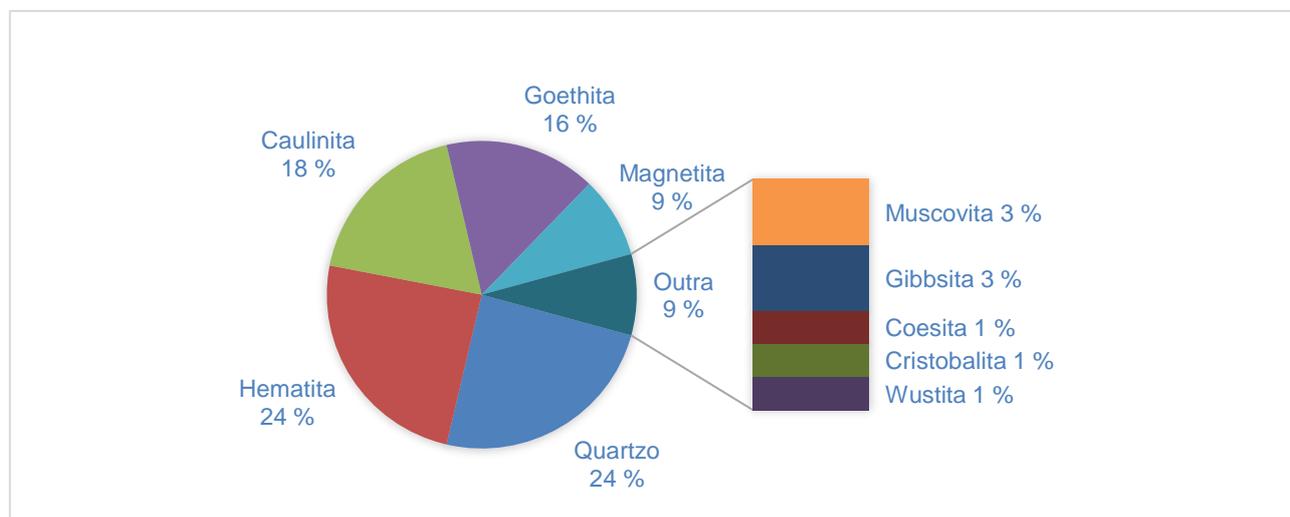


Figura 4 – Composição mineral dos rejeitos

O quartzo é o principal mineral de ganga existente nos minérios, o que justifica sua posição como principal composto encontrado no RMF (DUARTE *et al.*, 2019; SÁ *et al.*, 2019). Ele é extremamente resistente ao ataque químico e físico, possuindo cerca de 46,7 % de silício e 53,3 % de oxigênio. A caulinita é um silicato de alumínio hidratado, também presente na ganga. Sua composição é 39,5 % de alumina, 46,5 % de sílica e 14 % de água (VILELA *et al.*, 2020; EUGÊNIO *et al.*, 2021). Já a hematita é o mineral que possui o maior teor de ferro em sua composição, sendo considerado puro, uma vez que tem 69,94 % de ferro e 30,06 % de oxigênio (EUGÊNIO *et al.*, 2023; MACHADO *et al.*, 2019). A magnetita também é considerada um mineral puro (MYMRIN *et al.*, 2021; FARIA, 2023); ela possui 72,4 % de ferro e 27,6 % de oxigênio (DANA apud GOMES, 2009). Embora tenha teor de ferro superior ao da hematita, a magnetita é menos estável a altas temperaturas e baixas pressões (KLEIN E HURLBUT; RAMDHOR; DEER *et al.*, apud GOMES, 2009). Outro

mineral muito comum no RMF, a goethita, advém do intemperismo dos minerais portadores de ferro. Sua composição é 62,9 % de ferro, 27 % de oxigênio e 10,1 % de água (POVALUK *et al.*, 2022; PEDROSO *et al.*, 2022). Foi identificada ainda a presença de outros minerais, em pequena escala, como a muscovita (FARIA, 2023; GUIMARÃES *et al.*, 2018), gibbsita (MENDES *et al.*, 2019), coesita (SÁ *et al.*, 2022) e a cristobalita e wustita (FONTES *et al.*, 2021).

3.4. Materiais produzidos

A incorporação de RMF a outras matérias-primas permite a produção de diversos materiais compósitos, como pode ser visto na Figura 5. A maioria das pesquisas se dedicou a propor novas formulações de concretos e argamassas com adição do material residual. Isso porque o rejeito pode ser utilizado como adição ou substituição parcial de agregados finos (BESSA *et al.*, 2022; DUARTE *et al.*, 2019; POVALUK *et al.*, 2022; PEDROSO *et al.*, 2022; DUARTE *et al.*, 2020).

Outro tipo de material que vem sendo amplamente explorado são os compósitos plásticos. Nestes, o RMF atua como carga de enchimento, além de funcionar como agente pigmentante (BRESSIANI *et al.*, 2022; EUGÊNIO *et al.*, 2023). O RMF pode ser adicionado também à argila para auxiliar na melhoria de propriedades de tijolos, blocos e telhas, como a resistência mecânica, a durabilidade e a estabilidade dimensional (FARIA, 2023; MENDES *et al.*, 2019; VILELA *et al.*, 2020; EUGÊNIO *et al.*, 2021; MACHADO *et al.*, 2019; FONTES *et al.*, 2021). O mesmo vale para outros compósitos cerâmicos (RUY, 2022; AVANCI, 2022; AMARAL *et al.*, 2021; CECHIN *et al.*, 2022; MYMRIN *et al.*, 2021; PEDROSO *et al.*, 2020). Alguns materiais produzidos utilizando RMF, porém menos recorrentes, foram rocha artificial (SILVA; PAIVA, 2020); geopolímero (GUIMARÃES *et al.*, 2018); pavimento (SÁ *et al.*, 2022) e outros materiais de construção sustentáveis. Há ainda trabalhos que propuseram compósitos com uma diversidade maior de matérias-primas, como RMF, resíduos de demolição de concreto e resíduos de produção de cal (MYMRIN *et al.*, 2021).

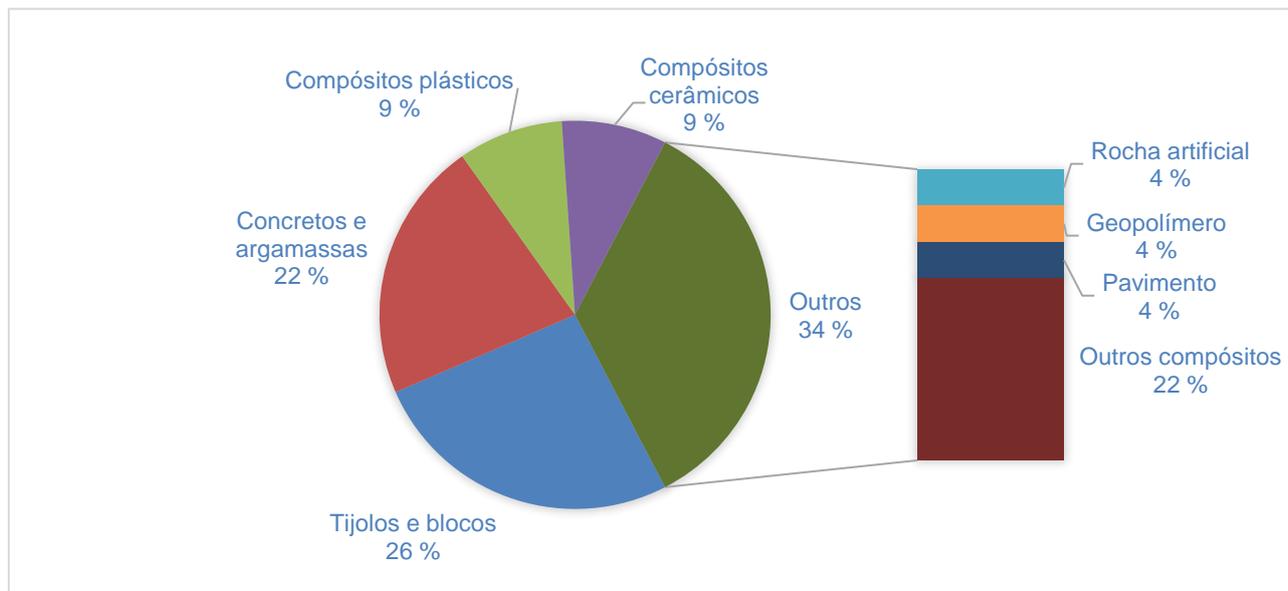


Figura 5 – Materiais produzidos com RMF

3.5. Ensaio realizados

Como pode ser observado na Figura 6, uma diversidade de ensaios foi realizada a fim de analisar as propriedades das amostras produzidas dentre as pesquisas levantadas. Percebe-se um interesse maior pelas propriedades físicas e mecânicas, sendo a absorção de água, resistência à compressão, densidade e retração linear, aquelas com maior incidência.

O ensaio de absorção de água permite determinar a hidrofiliabilidade ou hidrofobicidade do material e é importante para aplicação de materiais em ambientes úmidos (GUIMARÃES *et al.*, 2018; FARIA, 2023; RUY, 2022; AVANCI, 2022; BESSA *et al.*, 2022; DUARTE *et al.*, 2019; AMARAL *et al.*, 2021; MENDES *et al.*, 2019).

O ensaio de resistência à compressão, que mede a força gasta para deformar corpos de prova cilíndricos ou prismáticos, é muito comum para concretos e outros materiais de matriz cimentícia (SÁ *et al.*, 2022; VILELA *et al.*, 2020; MYMRIN *et al.*, 2021; PEDROSO *et al.*, 2020). A preferência pelo ensaio de compressão de prismas reside no fato de que esta é uma alternativa mais econômica em comparação ao ensaio de compressão de paredes ou outros elementos estruturais, que apresentam custos elevados e requerem equipamentos sofisticados (GOMES, 2001).

Outra propriedade comumente avaliada é a densidade dos materiais, que está diretamente relacionada à sua resistência estrutural e suporte de cargas, e também afeta seu isolamento térmico e acústico. Além disso,

materiais mais densos podem ser mais pesados, o que pode afetar a facilidade de manuseio, transporte e colocação. Assim, a densidade é uma propriedade amplamente explorada em pesquisa que envolvem a produção de tijolos e blocos. (ATKINS; JONES, 2001 apud SAMPAIO; FRANÇA; BRAGA, 2007) (MENDES *et al.*, 2019; CECHIN *et al.*, 2022; MACHADO *et al.*, 2019; SILVA; PAIVA, 2022).

Se tratando dos materiais cerâmicos, depois do processo de queima, eles passam por uma fase de retração devido a variações dimensionais dos corpos de provas. Para analisar este efeito, faz-se uso do ensaio de retração linear. Desta forma, a qualidade do corpo de prova é relacionada diretamente com as propriedades dimensionais da peça, resultado das etapas de produção (GURGEL *et al.*, 2020) (PEDROSO *et al.*, 2022; POVALUK *et al.*, 2022; MENDES *et al.*, 2019).

Outros ensaios figuraram significativamente dentre os trabalhos realizados como o ensaio de resistência à flexão, propriedade mecânica complementar a resistência à compressão (RUY, 2022; AMARAL *et al.*, 2021; CECHIN *et al.*, 2022) e o ensaio de porosidade, que permite quantificar em percentual o volume total de poros abertos em relação ao volume dos corpos de prova (DUARTE *et al.*, 2019; AMARAL *et al.*, 2021; MENDES *et al.*, 2019; SILVA; PAIVA, 2020).

Algumas avaliações foram empregadas com menos frequência, evidenciando uma diversidade nos objetivos específicos dos trabalhos, como a resistência à água (PEDROSO *et al.*, 2022), lixiviação e solubilidade (MYMRIN *et al.*, 2021), ensaio de expansão (POVALUK *et al.*, 2022), coloração (FONTES *et al.*, 2021), resistência à tração (EUGÊNIO *et al.*, 2021), ensaio de carbonatação (BESSA *et al.*, 2022), teste de fadiga (SÁ *et al.*, 2022); resistência ao impacto (EUGÊNIO *et al.*, 2021), módulo de ruptura (NARCISO *et al.*, 2022) e resistência flexural (FONTES *et al.*, 2021).

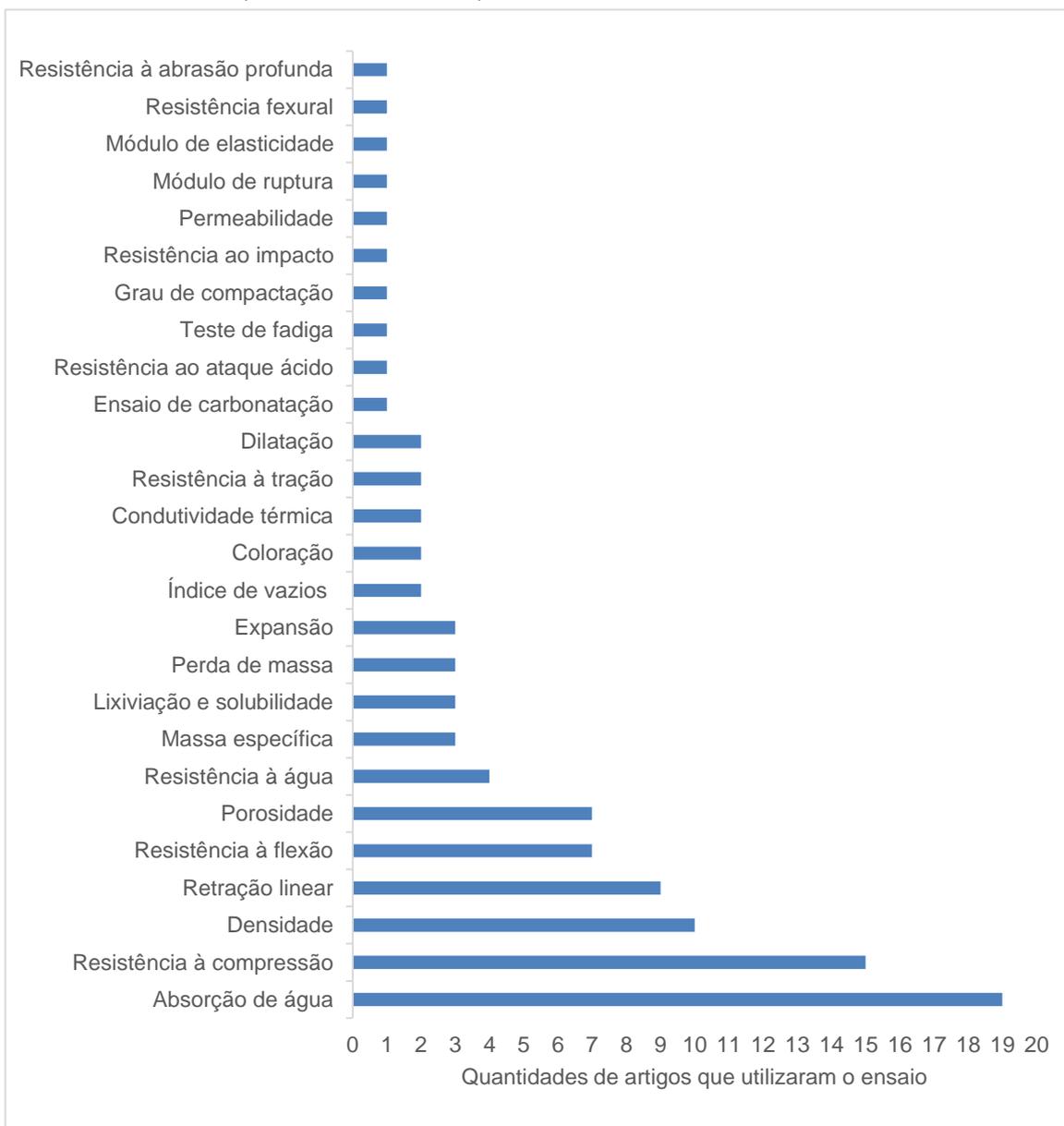


Figura 6 – Ensaios realizados

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos por meio desta revisão bibliográfica indicam a versatilidade e potencial do RMF para ser utilizado na composição de diversos materiais, principalmente no âmbito da construção civil. Embora seja possível desenvolver pesquisas com o rejeito *in natura* percebe-se a necessidade de preparar o material residual, principalmente quanto à secagem, a fim de permitir seu manuseio de forma adequada e segura, além de facilitar o seu transporte e armazenamento.

A caracterização do RMF quanto à sua composição química e mineral, forma e granulometria, também se apresenta de fundamental importância para justificar seu desempenho em relação às propriedades desejadas, além de apontar de forma mais segura suas possíveis aplicações. Vale ressaltar que o RMF em questão, proveniente do acidente de barragem Mariana - MG é uma rica fonte de quartzo e hematita, minerais importantes em estudos geológicos e petrográficos e materiais de construção civil, como rochas ornamentais.

As propriedades alcançadas pelos materiais produzidos podem ser avaliadas por uma infinidade de ensaios, dos quais se destaca a absorção de água, resistência à compressão, resistência à flexão e retração linear.

Assim, dada a versatilidade de composição, produção e desempenho, os materiais produzidos com o rejeito se apresentam como uma alternativa promissora para solucionar o problema da deposição de RMF em barragens, além de mitigarem os impactos ambientais causados por rompimentos já ocorridos. Além disso, esta prática incentiva a preservação de recursos naturais utilizados na produção dos mais diversos materiais, tornando os processos construtivos mais sustentáveis e ecológicos.

Além disso, este trabalho de revisão se mostrou de grande relevância no âmbito da engenharia civil ao identificar novas aplicações, avaliar propriedades e comportamentos dos materiais produzidos utilizando RMF. Essas informações são valiosas para a promoção de práticas sustentáveis e para o desenvolvimento de soluções mais eficientes e econômicas na indústria da construção.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (ANM). Superintendência de Regulação Econômica e Governança Regulatória – SRG. Anuário Mineral Brasileiro: Principais Substâncias Metálicas 2022. Brasília, 2023. 35p.

Amaral, I.B.C.; Cavalcante, L.C.D.; Fabris, J.D.; Prat, B.V.; Reis, A.B. Use of Mining Tailings or Their Sedimentation and Flotation Fractions in a Mixture with Soil to Produce Structural Ceramics. *Sustainability* 2021, 13, 911.

AVANCI, M.A. Compósitos para construção civil a partir de resíduo de minério de ferro da cidade de Mariana, lodo de dragagem do Porto de Paranaguá e resíduo de produção de cal. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica do Paraná, 2022.

BESSA, Sofia A. L. *et al.* Produção e avaliação de microconcretos com rejeito de minério de ferro para a fabricação de componentes construtivos. *Revista Matéria*. v.27, n.2, 2022.

BRESSIANI, Thaiany. S. C. *et al.* Produção de Madeira Plástica a partir do Rejeito de Mineração e Resíduo Plástico: Uma Atividade Experimental. *Revista Virtual de Química*. 2022. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.21577/1984-6835.20220080>>. Acesso em: 5 jun. 2023.

CARVALHO, P. S. L. de, *et al.* Minério de ferro. BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n. 39, p. 197-233, mar. 2014.

CHECHIN, L. *et al.* Ceramics composites from iron ore tailings and blast furnace slag. *Construction and Building Materials*. v.48, p.10506-10515, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.12.260>>.

DUARTE, G. M. C. *et al.* Desenvolvimento de argamassa geopolimérica incorporando o sedimento de Candonga. In: XXVIII Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa. Belo Horizonte - MG, 2019.

DUARTE, G. M. C., SILVA, F. G. P. A., LAMEIRAS, F. S., & SANTOS, A. M. M. Geopolymer Mortar with the Tailings from the Fundão Dam Rupture. *Technology and Investment*, v.11, p.99-109, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.4236/ti.2020.114006>>.

DUARTE, H.A. Ferro – um elemento químico estratégico que permeia história, economia e sociedade. *Química Nova*. v. 42, n.10, p.1146-1153, 2019. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.21577/0100-4042.20170443>>.

EUGÊNIO, T. M. C. *et al.* Study on the feasibility of using iron ore tailing (iot) on technological properties of concrete roof tiles. *Construction and Building Materials*. v.279, p.122484, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122484>>.

- EUGÊNIO, T. M. C. *et al.* Study on the use of mining waste as raw material for extruded fiber cement production. *Construction and Building Materials*. v.63, p.105547, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.job.2022.105547>>.
- FARENHOF, H. A.; FERNANDES, R. F. Desmitificando a revisão de literatura como base para redação científica: método SFF. *Revista ACP*. v. 21, n. 3, 2016.
- FARIA, A. da C. de. Tijolo prensado produzido com rejeito de barragem de minério de ferro. Dissertação (Mestrado em Engenharia das Construções) – Universidade Federal de Ouro Preto, 2023.
- FONTES, W.C. *et al.* Hydraulic Tiles Produced with Fine Aggregates and Pigments Reclaimed from Iron Ore Tailings. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. v.7, p.151-165, 2021. Disponível em: < <https://doi.org/10.1007/s40831-020-00329-9>>.
- GOMES, Itamar Ribeiro *et al.* Simulação numérica do ensaio de compressão de prismas de alvenaria pelo método dos elementos finitos com comportamento de interface. 2001.
- GOMES, M.A. Caracterização tecnológica no aproveitamento do rejeito do minério de ferro. Tese (Mestrado em Engenharia Mineral) – Universidade Federal de Ouro Preto, 2009.
- GUIMARÃES, A.C.P.D.; OLIVEIRA, M.F.M. de; SILVA, J.P.C. da; LAMEIRAS, F.S. Obtenção de geopolímero com adição de rejeito de mineração depositado na Barragem de Candonga (Rio Doce – MG, Brasil). In: 3º Congresso Luso-Brasileiro Materiais de Construção Sustentáveis. Coimbra, 2018.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO (IBRAM). *Gestão e Manejo de Rejeitos da Mineração/Instituto Brasileiro de Mineração*. Brasília, 2016. 128p.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO (IBRAM). *Livro Verde da Mineração do Brasil*. Brasília, 2022. 192p.
- LUZ, Adão Benvindo (Ed.); SAMPAIO, João Alves (Ed.); ALMEIDA, Salvador Luiz Matos (Ed.). *Tratamento de Minérios 2010*. 5.ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010. 932p.
- MACHADO, M. de S. M. M. *et al.* Blocks for civil construction made with the sediment deposited in the Candonga dam. *Metallurgy and materials*. v.72, p.105-111, 2019. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1590/0370-44672017720198> >.
- MACHADO, W. G. DE F. Monitoramento de barragens de contenção de rejeitos da mineração. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2007.
- MENDES, B.C. *et al.* Technical and environmental assessment of the incorporation of iron ore tailings in construction clay bricks. *Construction and Building Materials*. v.227, p.116669, 2019. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.08.050>>.
- MINISTÉRIO PÚBLICO FEDERAL (MPF). *O desastre — Caso Samarco*, 2015. Disponível em: <<https://www.mpf.mp.br/grandes-casos/caso-samarco/o-desastre>>. Acesso em: 2 jun. 2023.
- MOURA, Brígida Dantas de. Automação de um sistema rotatório para secagem do rejeito de maracujá. 2009. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte.
- MYMRIN, V. *et al.* Advanced sustainable construction materials from hazardous iron ore treatment waste, concrete debris and lime production waste. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. v.120, p.1777-1791, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s00170-022-08784-2>>.
- MYMRIN, V. *et al.* Eco-friendly cementless concrete from hazardous iron ore tailing and waste of cellulose-pulp, concrete demolition, and lime production. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. v.122, p.933-945, 2022. Disponível em: < <https://doi.org/10.1007/s00170-022-09811-y>>.
- MYMRIN, V. *et al.* Materials From Hazardous Iron Ore Treatment Waste, Concrete Demolition Debris And Lime Production Waste to Increase Environmental Sustainability of Industrial Regions. *Research Square*. 2021. Disponível em: < <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1041333/v1>>.
- MYMRIN, V. *et al.* Physical-chemical processes of sustainable construction materials structure formation with iron ore processing tailings and aluminum anodizing sludge. *Construction and Building Materials*. v.298, p.123698, 2021. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123698>>.
- PASSARINHO, Nathalia. Tragédia com barragem da Vale em Brumadinho pode ser a pior no mundo em 3 décadas. *BBC News*, Londres, v. 29, 2019.
- PEDROSO, C.L. *et al.* New composites from waste: iron ore, pulp, lime, and concrete. *Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental*. v.24, n.6, 2020. Disponível em: <

<https://doi.org/10.5902/2236117062661>>.

Roche, C., Thygesen, K., Baker, E. (Eds.) 2017. Mine Tailings Storage: Safety Is No Accident. A UNEP Rapid Response Assessment. United Nations Environment Programme and GRID-Arendal, Nairobi and Arendal. Disponível em: <https://miningwatch.ca/sites/default/files/2017-11-uneppgrid-minetailingssafety-finalreport_0.pdf>. Acesso em: 1 jun. 2023.

ROESER, H.M.P.; ROESER, P.A. O quadrilátero ferrífero - MG, Brasil: aspectos sobre sua história, seus recursos minerais e problemas ambientais relacionados. *Genomos*. v.8, p. 33-37, 2010.

RUY, V.A. Reaproveitamento do rejeito de enriquecimento do minério de ferro - Iodo de Mariana – MG, para a produção de cerâmica ambientalmente correta. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica do Paraná, 2022.

SILVA, C. B. da; PAIVA, P. R. P. de. *et al.* Artificial stone production using iron ore tailing (IOT). *Cerâmica*. v.66, p.164-171, 2020. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1590/0366-69132020663782854>>.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO (UFOP). Laboratório de Microscopia e Microanálises. Microscopia Eletrônica, 2023. Disponível em: <[https://lmic.degeo.ufop.br/microscopia-eletr%C3%B4nica#:~:text=O%20EDS%20\(energy%20dispersive%20x,excitados%2C%20mudando%20de%20n%C3%ADveis%20energ%C3%A9ticos](https://lmic.degeo.ufop.br/microscopia-eletr%C3%B4nica#:~:text=O%20EDS%20(energy%20dispersive%20x,excitados%2C%20mudando%20de%20n%C3%ADveis%20energ%C3%A9ticos)>. Acesso em: 21 jun. 2023.

VILELA, A. P. *et al.* Technological properties of soil-cement bricks produced with iron ore mining waste. *Construction and Building Materials*. v.262, p.120883, 2020. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120883>>.

WISE. World Information Service on Energy and Uranium - Project. Chronology of major tailings dam failures. 2017.