

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPIRITO SANTO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
CENTRO TECNOLÓGICO**

IZABELA TAVARES SPAGNOL

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DE CONCRETOS PRODUZIDOS COM
RESÍDUO DE MINÉRIO DE FERRO PROVENIENTE DO ROMPIMENTO DA
BARRAGEM DE FUNDÃO EM RELAÇÃO AOS PARÂMETROS AMBIENTAIS**

**VITÓRIA
2021**

IZABELA TAVARES SPAGNOL

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DE CONCRETOS PRODUZIDOS COM
RESÍDUO DE MINÉRIO DE FERRO PROVENIENTE DO ROMPIMENTO DA
BARRAGEM DE FUNDÃO EM RELAÇÃO AOS PARÂMETROS AMBIENTAIS**

Entrega Parcial do Projeto de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheira Ambiental.

Orientadora: Prof^a Dr^a. Geilma Lima Vieira
Coorientadora: Prof^a Dr^a. Regina Keller

VITÓRIA
2021

RESUMO

SPAGNOL, I. T. **Análise do comportamento de concretos produzidos com resíduo de minério de ferro proveniente do rompimento da barragem de Fundão em relação aos parâmetros ambientais**. 2021. Projeto de graduação. Engenharia Ambiental – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2021.

O Brasil é o segundo maior produtor de minério de ferro do mundo, sendo esta uma importante atividade econômica brasileira. Porém, no processo de extração e beneficiamento do minério de ferro são gerados diversos resíduos que devem ter destinação adequada. A principal forma de disposição destes resíduos são as barragens de resíduos, que têm se apresentado como uma alternativa de risco no Brasil, por conta da sobrecarga de materiais e negligência de operação e manutenção, prova disso, são os diversos acidentes ocorridos atualmente. Assim, o reaproveitamento dos resíduos de minério se torna eficaz para evitar a sobrecarga das barragens, evitando acidentes. Neste cenário, o presente trabalho tem como objetivo avaliar, na perspectiva ambiental, o comportamento de concretos com incorporação do resíduo de minério de ferro proveniente do rompimento da barragem de Fundão, no município de Mariana/MG, visando solução eficaz para seu reaproveitamento ambientalmente seguro. Para tal finalidade de estudo, uma amostra do resíduo de minério, foi submetida às análises química e físicas, que indicaram como apropriado o uso do material na construção civil, sobretudo na produção de materiais como concretos, argamassas, tijolos e também na fabricação de cimento. Ainda, foi realizada a classificação ambiental do resíduo, segundo a ABNT NBR 10.004, sendo possível sua classificação como resíduo não perigoso e não inerte, indicando possibilidade de seu uso na construção civil sem que haja prejuízos ambientais. Posteriormente, foram avaliados concretos produzidos com adição do resíduo, sendo submetidos ao ensaio de lixiviação de acordo com a norma EA NEN 7375:2004. O estudo confirmou a solidificação/estabilização dos metais presentes no resíduo de minério de ferro estudado, por meio da sua incorporação em concretos produzidos à base de cimento Portland, sendo, portanto, uma solução ambientalmente segura e correta para a problemática da grande geração de resíduos na produção de

minério de ferro.

Palavras-chave: Resíduo de minério de ferro, Gerenciamento de resíduos, Concreto, Lixiviação.

ABSTRACT

SPAGNOL, I. T. **Analysis of the behavior of concretes produced with waste iron ore from the rupture of the Fundão Dam in relation to environmental parameters.** 2021. Graduation project. Environmental Engineering - Federal University of Espírito Santo, Vitória, 2021.

Brazil is the second largest producer of iron ore in the world, which is an important Brazilian economic activity. However, in the process of extraction and processing of iron ore, various wastes are emitted that must be disposed of. The main form of disposal of this waste is as tailings dams, which have been presented as a risk alternative in Brazil, due to the overload of materials and neglect of operation and maintenance, proof of this, are the various accidents that have occurred today. Thus, the reuse of ore tailings becomes effective to avoid overloading the dams, avoiding accidents. In this scenario, the present work aims to evaluate, from an environmental perspective, the behavior of concretes with incorporation of iron ore residue from the rupture of the Fundão dam, in the city of Mariana / MG. . For this study, a sample of the ore residue was subjected to chemical and physical analysis, which indicated that the use of the material in civil construction was appropriate, especially in the production of materials such as concrete, mortar, bricks and also in the manufacture of cement. In addition, an environmental classification of the waste was carried out, according to ABNT NBR 10.004, making it possible to classify it as a non-hazardous and non-inert waste, indicating the possibility of its use in civil construction without environmental hazards. Subsequently, concretes were obtained with the addition of the residue, being obtained to the leaching test according to the EA NEN 7375: 2004 standard. The study confirmed the solidification / stabilization of the metals present in any iron ore residue studied, by incorporating it into concrete obtained from Portland cement, therefore being an environmentally safe and correct solution to the problem of the large generation of waste in the production of iron ore.

Keywords: Iron ore tailings, Waste management, Concrete, Leaching.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço à Deus, que me ama ainda que eu não mereça e que traçou planos incríveis para minha vida, me trazendo até aqui.

Agradeço imensamente à minha família, por ser minha maior torcida. Aos meus pais Carina e Dinael, que nunca mediram esforços para me ver realizando meus sonhos, e minha irmã Karen, por ser minha melhor amiga. Por eles e com eles, pisei em lugares que nunca imaginei antes.

Agradeço à minha orientadora Professora Doutora Geilma Lima Vieira, por todo suporte técnico e emocional, durante todos esses anos em que trabalhamos juntas. Também à minha coorientadora Professora Doutora Regina Keller, por todo apoio e paciência, e por ter aceito meu convite de embarcar nessa pesquisa. Ter como orientadoras duas grandes mulheres da pesquisa me trouxe muita inspiração.

Agradeço aos meus amigos da Engenharia Ambiental/UFES, Deysi, Vic, Viczinha, Isa, Danielsan, Rafa, Luiz Guilherme, Ainoã e Antônio Tadeu, por terem sido meu lar durante esses anos longe de casa. Vocês trouxeram leveza e emoção à minha graduação. Amigos da faculdade marcam uma vida inteira!

Agradeço também todo o suporte do Laboratório de Materiais de Construção – LEMAC/UFES e por todo auxílio na execução dos ensaios, e também por todas as amizades que construí ali: Breno, Henrique, Tião, Márcio, Loriato, Denise, Felipão, Roberta e Cláudia.

Por fim, agradeço ao CNPq pelo suporte financeiro, que possibilitou o cumprimento das atividades desta pesquisa.

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1: Resultados dos ensaios mecânicos de Nascimento (2018).....	27
Tabela 2: Limite máximo no extrato obtido no ensaio de lixiviação.	41
Tabela 3: Limite máximo no extrato obtido no ensaio de solubilização.	42
Tabela 4: Traço unitário dos concretos.....	44
Tabela 5: Tempos para coleta da amostra dos tanques.	46
Tabela 6: Padrões cumulativos U1 e U2 requeridos pela NEN 7375 (NNI, 2004).	47
Tabela 7: Composição Química por FRX.	49
Tabela 8: Composição encontrada para o RBMF em diferentes trabalhos (%).	50
Tabela 9: Diâmetros do resíduo de minério comparado com outras adições utilizadas em concretos, além do tipo de cimento utilizado nesta pesquisa.....	53
Tabela 10: Resultados do ensaio de Lixiviação.....	53
Tabela 11: Resultados do ensaio de Solubilização.....	54
Tabela 12: Resultados da Lixiviação acumulada nos concretos após os 8 ciclos avaliados.	56
Tabela 13: Resultado da lixiviação de metais nos corpos de prova em mg/L.	58

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Barragem de Fundão - Mariana/MG.....	9
Figura 2: Destruição causada pela lama proveniente do rompimento da barragem de Fundão, no distrito de Bento Rodrigues.	10
Figura 3: Fluxograma de classificação de resíduos sólidos.	17
Figura 4: Esquema da produção de minério de ferro.	21
Figura 5: Estrutura de uma barragem de rejeito.....	22
Figura 6: Barragem de Fundão após o rompimento, em Novembro de 2017.	24
Figura 7: Destruição causada pela lama proveniente do rompimento da barragem de Fundão, no distrito de Bento Rodrigues, Mariana/MG.	25
Figura 8: Rio Doce após a chegada da lama.	25
Figura 9: Programa Experimental.....	34
Figura 10: Resíduo disposto para secagem natural.	35
Figura 11: Resíduo quarteado.	36
Figura 12: Resíduo passando pela secagem na estufa.	36
Figura 13: Resíduo armazenado pronto para uso.	37
Figura 14: Ensaio de granulometria na peneira #200.....	38
Figura 15: Amostra de resíduo utilizada no ensaio.....	39
Figura 16: Determinação do pH do resíduo misturado à água.	39
Figura 17: Agitador rotatório.....	40
Figura 18: Filtro à vácuo utilizado no ensaio.	40
Figura 19: Amostras do extrato lixiviado após ser filtrado.	41
Figura 20: Tratamento em branco do ensaio.....	41
Figura 21: Produção dos concretos no LEMAC/UFES.....	44
Figura 22: Corpos de prova produzidos com adição do resíduo.	45
Figura 23: Ensaio de Abatimento pelo Tronco de Cone.	45
Figura 24: Corpo de prova e recipiente para o ensaio de lixiviação de metais em concretos.....	46
Figura 25: Difratoograma de raios-x do resíduo.	51
Figura 26: Granulometria do resíduo.....	52
Figura 27: Variação do pH do lixiviado ao longo do tempo.....	59
Figura 28: Variação da condutibilidade do lixiviado ao longo do tempo.	61

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	9
1.1 OBJETIVOS	12
1.1.1 Objetivo Geral.....	12
1.1.2 Objetivos Específicos	12
1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO	12
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1 RESÍDUOS SÓLIDOS.....	14
2.2 Classificação dos Resíduos Sólidos.....	16
2.3 RESÍDUOS INDUSTRIAIS	19
2.3.1 Resíduo de minério de ferro	20
2.4 Solidificação/estabilização.....	28
2.5 Cimento Portland no processo de solidificação/estabilização de resíduos.....	30
3. METODOLOGIA	32
3.1 PROGRAMA EXPERIMENTAL	32
3.2 Caracterização do resíduo	35
3.2.1 Determinação da composição química e mineralógica do resíduo.....	37
3.2.2 Determinação da granulometria do resíduo.....	37
3.2.3 Caracterização ambiental do resíduo	38
3.3 Caracterização Ambiental dos concretos produzidos	43
3.3.1 Caracterização dos corpos de prova	43
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	49
4.1 Caracterização do resíduo	49
4.1.1 Caracterização química	49
4.1.2 Caracterização Mineralógica	51
4.1.3 Caracterização granulométrica.....	52
4.1.4 Caracterização ambiental	53
4.2 Caracterização dos concretos produzidos.....	56
5. CONCLUSÕES	63
6. REFERÊNCIAS	64

1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento econômico desordenado, que acompanha as necessidades humanas, cresce juntamente com os problemas ambientais. A demanda por produtos que melhoram a qualidade de vida da população pressiona o meio ambiente com o uso indiscriminado dos recursos naturais não renováveis e a geração cada vez mais acentuada de materiais de pouco ou nenhum valor econômico, que recebem uma destinação inadequada e tornam-se uma preocupação ambiental (COSTA, 2010).

Nesse contexto, as atividades industriais representam significativo destaque no que tange a quantidade de resíduos produzidos. Dentre elas se destaca a atividade mineradora, que coloca o Brasil como o segundo maior produtor de minério de ferro do mundo (USGS, 2018).

Os resíduos da atividade mineradora são dispostos em grandiosas estruturas denominadas de barragens. Essas estruturas, além dos impactos na água, solo e paisagem, produzidos ao longo de sua construção e vida útil, portam eminente risco de rompimento, quando não monitoradas corretamente, (BARREDA, 2008; ANDRADE, 2016). Exemplo disso, foi o rompimento da Barragem de Fundão (Figura 1), no município de Mariana, estado de Minas Gerais, no dia 5 de novembro de 2015.

Figura 1: Barragem de Fundão - Mariana/MG.



Fonte: GloboNews, 2018.

Na ocasião, 39,2 milhões de lama de resíduo de minério de ferro desceram para os

rios Gualaxo do Norte, Carmo e Doce, seguindo até o mar. A passagem da lama deixou um rastro de destruição (Figura 2), causando graves danos contínuos e, na maioria dos casos, permanentes, de âmbito econômico, social e ambiental, além de custar a vida de 19 pessoas.

Figura 2: Destruição causada pela lama proveniente do rompimento da barragem de Fundão, no distrito de Bento Rodrigues.



Fonte: D'AGOSTINO, 2015.

O rompimento da Barragem de Fundão e os problemas decorrentes do desastre, trouxeram visibilidade à problemática da quantidade de resíduos dispostos de forma não controlada. Problemas dessa natureza, despertam a necessidade de alternativas que os solucionem.

Uma solução viável, que vem sendo estudada desde o evento, é a aplicação desse material como matéria-prima alternativa em outros setores industriais (GURSEL; MARYMAN; OSTERTAG, 2016). Por conta das características químicas e físicas atribuídas, tais materiais apresentam competência para aplicação na construção civil quando substituindo materiais de construção convencionais, principalmente na fabricação de cimento e também na incorporação de concretos (BORGES, 2020).

Trabalhos como Shettima et al. (2016), que avaliaram os resíduos de minério de ferro como substituto do agregado miúdo, e Barbosa (2017), que avaliou a utilização do

resíduo como matéria-prima para fabricação de cerâmica vermelha, validaram o reaproveitamento do resíduo na construção civil, identificando apropriados resultados físicos e mecânicos, com melhorias na resistência mecânica e durabilidade.

Nascimento (2018), ao utilizar o resíduo de minério de ferro da Barragem de Fundão como adição na fabricação de concreto, constatou viabilidade na utilização do material na construção civil, do ponto de vista mecânico. Tais resultados são vistos como positivos, e dão margem para que outros estudos sejam conduzidos a partir dos concretos produzidos, contribuindo para melhor caracterização do mesmo e validação mais segura de seu uso, principalmente se tratando da segurança ambiental.

Quando se trata de reaproveitamento de resíduos, sobretudo os que podem conter metais pesados e outros contaminantes ambientais em sua composição, não apenas as características mecânicas devem ser satisfatórias. O concreto produzido deve ser utilizado de forma ambientalmente segura, para que não se torne um novo problema ambiental, causado pela lixiviação de compostos quando em contato com o ambiente. Apesar disso, os parâmetros ambientais não são abordados ou considerados com frequência nos estudos em concretos produzidos com subprodutos industriais, o que pode resultar em uma validação errônea do produto gerado.

Diante disso, o presente estudo busca a avaliação dos concretos produzidos com adição de resíduos provenientes da barragem de Fundão, verificando, através de ensaios laboratoriais, se ao serem utilizados, os mesmos correspondem aos padrões ambientais exigidos na norma brasileira ABNT 10.004, certificando seu uso correto e caracterização completa, de forma a dar uma finalidade não só economicamente e mecanicamente eficaz, mas também garantindo a segurança ambiental.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é avaliar, na perspectiva ambiental, o comportamento de concretos com incorporação do resíduo de minério de ferro proveniente do rompimento da barragem de Fundão, no município de Mariana/MG, visando solução eficaz para seu reaproveitamento ambientalmente seguro.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar física e quimicamente o resíduo de minério de ferro, visando as possibilidades químicas e mecânicas de seu reaproveitamento.
- Classificar o resíduo trabalhado de acordo com a Norma Brasileira ABNT 10.004.
- Avaliar os concretos produzidos com diferentes percentuais do resíduo proveniente do rompimento da Barragem de Fundão em Mariana/MG, sobre a perspectiva ambiental, por meio de ensaios de caracterização dos resíduos e do concreto elaborado.
- Certificar a viabilidade ambiental do uso do concreto produzido com base na normalização brasileira para classificação de resíduos, garantindo a segurança ambiental na construção civil.

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho foi dividido em 5 capítulos. O primeiro é introdutório e trata da apresentação do tema, com contextualização, apresentação das lacunas, justificativa e expectativas quanto a proficiência do estudo, além da apresentação dos objetivos estimados para o trabalho.

O segundo capítulo se baseia em uma revisão bibliográfica que promove o conhecimento de assuntos indispensáveis para o entendimento do trabalho como um

todo. Este conhecimento prévio facilita o contato com termos e expressões específicas do tema, levando à maior compreensão da pesquisa. Os principais assuntos tratados nessa etapa envolvem o conhecimento da gestão de resíduos no Brasil, o conhecimento mais detalhado do resíduo estudado, considerando, principalmente sua linha de produção, além de incluir o conhecimento dos procedimentos de reaproveitamento utilizados na pesquisa, a fim de garantir segurança ambiental para o concreto em sua fase de uso.

O terceiro capítulo detalha a metodologia implementada para atingir os objetivos propostos, especificando os materiais e métodos utilizados para cada ensaio. Já o quarto capítulo trata-se da apresentação dos resultados e a discussão dos mesmos, lidando com o resíduo de forma particular. O quinto e último capítulo promove uma conclusão formada a partir de todos os resultados obtidos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 RESÍDUOS SÓLIDOS

Resíduos sólidos são materiais com pouca ou nenhuma relevância financeira que são descartados do meio de produção. Com o crescimento populacional e desenvolvimento econômico, a quantidade de material descartado e, em sua grande parte, de forma incorreta, tende a aumentar, o que faz da situação um problema ambiental ao alterar o meio em proporções variadas, desde a alteração da paisagem e liberação de odores que causam incômodo à população, até a contaminação de solos e águas superficiais e subterrâneas por conta de contaminantes liberados pela lixiviação dos resíduos depositados (CASTILHO et al., 2006).

Vale ressaltar, que quando o resíduo esgota todas suas possibilidades de uso, seja em tratamento, recuperação ou reutilização e reciclagem, não restando outra opção além da disposição final, o material então é definido como rejeito. Se tratando de materiais onde sua reutilização é possível e viável seguindo as orientações normativas brasileiras, refere-se como resíduos. Além disso, resíduos também podem ser definidos como coprodutos. Para isto, este deve ter seu uso em algum outro ciclo produtivo, deve ser produzido como parte integral de um processo produtivo e quando puder ser utilizado de forma direta, sem que haja processos adicionais (EUROPEAN UNION, 2008).

O Brasil é o principal gerador de resíduos da América Latina, responsável por 40% do que é gerado na região (ONU MEIO AMBIENTE, 2018). Com base nesse panorama e como reflexo dessa demanda, surge a necessidade de uma manutenção adequada de todo esse resíduo gerado com vistas a uma gestão integrada. Nesse contexto, a Política Nacional de Resíduos Sólidos, recebida como instrumento indutor do desenvolvimento socioambiental, reúne importantes diretrizes e ações de forma a promover um gerenciamento efetivo para os resíduos sólidos no Brasil.

A política, sancionada em 2010, definiu os resíduos sólidos como:

[...] 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 (BRASIL, 2010).

Além de definir que os resíduos devem ser descartados somente após o esgotamento de todas as alternativas de tratamento e reaproveitamento de suas características disponíveis, a política estabeleceu uma prioridade no gerenciamento dos resíduos, sendo essa: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento e disposição final ambientalmente segura (BRASIL, 2010). Tais posições mudaram o cenário do descarte de resíduos sólidos no Brasil, estimulando sua recuperação. Diretrizes e ações desse caráter agregam valor a esses materiais e são eficientes na melhoria da qualidade do meio ambiente.

A PNRS também estabelece definições que diferenciam reutilização e reciclagem, distinção importante para definir o processo de aproveitamento do material de estudo. Reciclagem se entende como a transformação do resíduo em insumos ou novos produtos, alterando suas propriedades físico-químicas e biológicas. Já a reutilização se trata do aproveitamento sem que haja qualquer transformação nas características do material (BRASIL, 2010).

Portanto, se tratando da incorporação de resíduos siderúrgicos na produção de materiais de construção, acontece o processo de reciclagem, ainda que o resíduo é utilizado em sua forma original, alterações em suas propriedades químicas e físicas tendem a acontecer na imobilização de metais.

No âmbito do reaproveitamento, a construção civil é um setor que se tornou uma alternativa acessível. Isso se dá pelo fato de, além de apresentar impactos ambientais em todas as etapas do seu processo, o ramo é responsável pelo consumo de 60% das matérias-primas da terra (BRIBIÁN, et al., 2011). Como muitos resíduos possuem características que tendem a agregar as propriedades dos materiais que recebem sua

incorporação, sua utilização como matéria-prima se torna econômica e ambientalmente benéfica, ao minimizar o consumo de recursos.

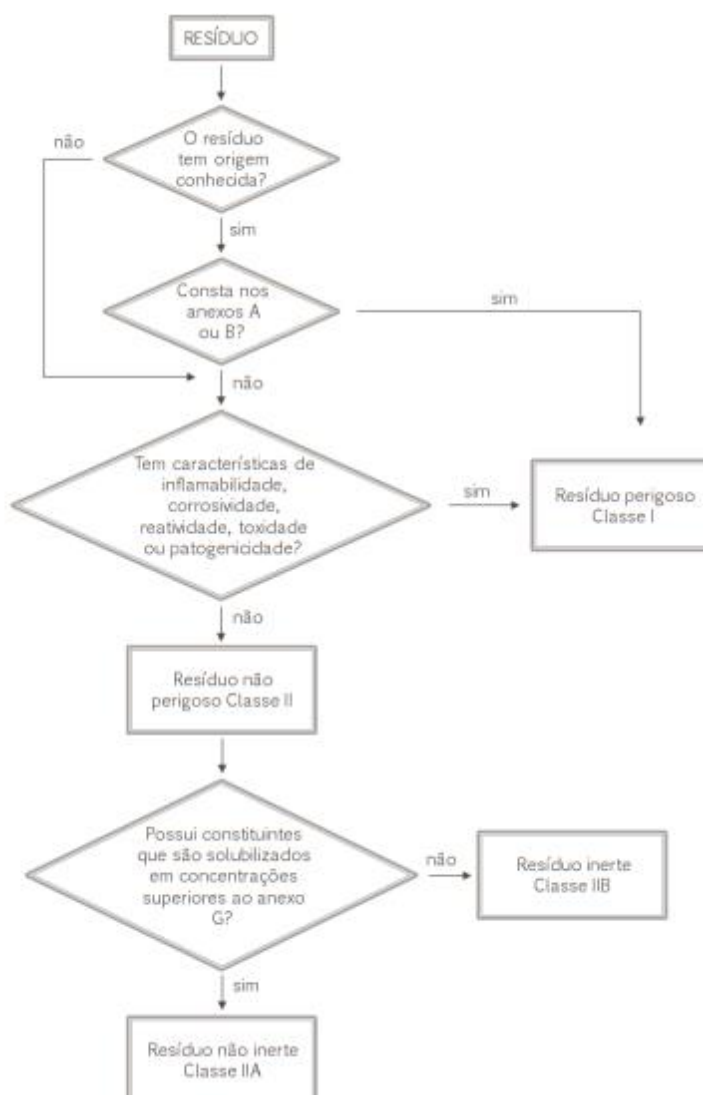
2.2 CLASSIFICAÇÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS

Pretendendo facilitar a manutenção dos resíduos sólidos, a PNRS (BRASIL, 2010) estabeleceu formas de classificação desses materiais. Ao tornar suas características conhecidas, o gerenciamento do resíduo caminha para alternativas mais seguras e ambientalmente adequadas, sendo, portanto, sua origem o primeiro passo da classificação, tratando-se de uma informação de extrema importância nas decisões a serem tomadas com relação ao seu tratamento, reuso e até mesmo disposição final.

Quanto à origem, os resíduos sólidos são classificados pela PNRS como domiciliares, industriais, resíduos de limpeza urbana, resíduos sólidos urbanos, comerciais e de prestadores de serviços, resíduos de serviços públicos de saneamento básico, resíduos de serviços de saúde, resíduos da construção civil, resíduos agrossilvopastoris, resíduos de serviço de transportes e resíduos de mineração (BRASIL, 2010). Além disso, a identificação dos constituintes do resíduo também faz parte da classificação, e se baseia nas matérias primas, os insumos e o processo de origem (BRASIL, 2004).

Outra forma de classificação descrita pela PNRS é quanto a periculosidade, podendo os resíduos serem identificados como perigosos ou não perigosos (BRASIL, 2010). A classificação pode ser feita empregando a norma ABNT NBR 10.004:2004, que tem aplicabilidade para todo tipo de resíduo. Na norma, os materiais são classificados em duas categorias, classe I onde se enquadram os resíduos perigosos e classe II, envolvendo os não perigosos, que por sua vez, se dividem em não inertes (Classe IIA) e inertes (Classe IIB). Para facilitar o processo de classificação, a norma fornece o fluxograma da Figura 3.

Figura 3: Fluxograma de classificação de resíduos sólidos.



Fonte: ABNT, 2004.

Os resíduos perigosos são aqueles que, de acordo com a norma, apresentam risco à saúde pública e, caso gerenciado de forma incorreta, risco severos ao meio ambiente. As características que definem um resíduo como perigoso incluem a toxicidade, inflamabilidade, corrosividade, reatividade e patogenicidade.

Para uma classificação completa e segura, o ensaio de lixiviação proposto pela NBR 10.005 (ABNT, 2004) é aplicado para se determinar a periculosidade do material em estudo. De acordo com a presente norma, se entende por lixiviação um processo que determina a capacidade de transferência de substâncias presentes no resíduo, por meio de dissolução no meio extrator (ABNT, 2004). O extrato lixiviado gerado no ensaio é analisado de acordo com os padrões impostos pelo anexo F da NBR 10.004 (ABNT, 2004). Caso algum composto selecionado para análise ultrapasse os limites

estabelecidos, considera-se o resíduo como perigoso. Portanto, o conhecimento dos processos de lixiviação e suas análises, torna-se fundamental para classificação correta dos resíduos.

A possibilidade de reaproveitamento de resíduos perigosos, principalmente no Brasil, ainda é baixa. Isso faz com que a maioria desses materiais seja disposta em aterros qualificados para resíduos perigosos sem nenhum aproveitamento material ou energético. Com vistas às suas possibilidades de uso, tais resíduos podem passar por tratamentos específicos, a fim de reduzir sua periculosidade. O tratamento de resíduos propõe uma alteração nas suas características, neutralizando suas características perigosas. Pode conduzir a uma valorização econômica dirigida para extrair valores materiais ou energéticos, que contribuem para diminuir os custos de tratamento e, em alguns casos, podem gerar receitas superiores a estes custos (VALLE, 2002), como também preparar o resíduo para ser utilizado em outros meios de produção.

De outra forma, os resíduos não perigosos não inertes apresentam podem apresentar características como biodegradabilidade, combustibilidade e/ou solubilidade em água (BRASIL, 2004). Estes resíduos são classificados assim quando após terem contato dinâmico com água, tiverem seus constituintes solubilizados em concentrações superiores aos padrões de potabilidade vigentes. Isso se dá pelo fato de reagirem de forma física com a água, excetuando-se aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor (ABNT, 2004). Apesar desse aspecto, que pode trazer prejuízos ambientais, o tratamento desse tipo de resíduo é de fácil acesso e muito eficaz, possibilitando seu reaproveitamento de forma segura.

Por fim, os resíduos não perigosos e inertes são aqueles que não são solúveis, nem inflamáveis, além de não apresentarem qualquer tipo de reação física ou química (BRASIL, 2004). Esses materiais se mostram indiferentes ao contato com a água, não reagindo quimicamente. Ao ser testado, seu lixiviado tende a não apresentar valores acima do disposto pela norma e também não apresenta solubilização dos seus compostos em água. Tal característica facilita sua reutilização, pois não sofrem qualquer tipo de alteração em sua composição com o passar do tempo e não afetam

outras substâncias ao entrar em contato com as mesmas.

2.3 RESÍDUOS INDUSTRIAIS

Dentre as principais classes colocadas para o gerenciamento dos resíduos, estão aqueles de origem industrial. Estes abrangem todos os resíduos gerados nos processos produtivos e instalações industriais, em qualquer que seja a etapa, podendo ser gerados tanto durante a produção como também nas atividades auxiliares, incluindo manutenção, obras, limpezas, entre outras ações (BRASIL, 2010).

Pela quantidade de constituintes químicos que são utilizados nas etapas de produção e acabam implementados nos produtos descartados, os resíduos industriais são considerados um dos mais severos materiais para o meio ambiente. Isso se dá pela agressividade em que produtos como metais e solventes químicos afetam o ambiente em que são lançados, contaminando rios, mares, ar e o solo (RIBEIRO; MORELLI, 2009).

No Brasil, parte dos resíduos industriais são provenientes do setor siderúrgico, já que o país ocupa uma posição de destaque na produção de ferro e aço, principalmente por conta das grandes reservas de minério de ferro de boa qualidade e de fácil acesso, representando 9,8% das reservas existentes no mundo (MILANEZ et al., 2013).

O parque brasileiro produtor de aço é composto por 30 usinas, que juntas apresentam uma capacidade instalada de 35 milhões de t/ano de aço bruto. Tal fato faz do Brasil o 9º maior exportador de aço do mundo, tendo um saldo comercial de 5,8 bilhões de dólares, principalmente por conta da exportação, que abrange mais de 100 destinos ao redor do mundo. A principal produção siderúrgica brasileira é voltada para construção civil, ramo automotivo, bens de capital, máquinas e equipamentos agrícolas (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2019).

Conhecido o panorama brasileiro da indústria siderúrgica e sua relevância, é sabido que, por consequência do crescimento da produção, tem-se o aumento da quantidade

de resíduos gerados, sendo esse um de seus principais impactos na perspectiva ambiental. Tal cenário traz a necessidade de uma eficiente gestão dos impasses ambientais que surgiram juntamente com a indústria, e que com o passar do tempo se tornaram significativos e passíveis de interferência.

Nesse contexto, a gestão ambiental tem buscado intermediar o vínculo entre uma produção sustentável e o meio ambiente por meio de políticas de minimização, reciclagem, reutilização, tratamento e disposição final adequada para os seus resíduos. Portanto, a atual Política Nacional de Resíduos Sólidos define que o gerenciamento dessa categoria de resíduos, considerada hoje um notório desafio para o setor industrial, é de responsabilidade da própria indústria geradora, providenciando seu reaproveitamento, tratamento e disposição final correta (BRASIL, 2010). Com isso, surgiu a comercialização dos resíduos, que muitas vezes por conta de seus constituintes, se torna eficiente em outro processo produtivo, sendo uma matéria-prima econômica e ambientalmente benéficas.

2.3.1 Resíduo de minério de ferro

Dentre os resíduos industriais gerados, um dos mais expressivos são os formados na produção de minério de ferro, matéria prima para as siderurgias. O Brasil é o segundo maior produtor de minério de ferro do mundo, estando atrás apenas da China em termos de produção. Tal posição pode ser justificada pela quantidade de reservas de minério no Brasil, estimadas em 31 bilhões de toneladas (USGS, 2015).

A mineração teve seu início no século XVIII com o declínio do ciclo do ouro, trazendo a necessidade de novos garimpos, ocasionando na descoberta de consideráveis reservas de Ferro e Manganês. Porém, foi a partir dos acontecimentos ocasionados pela Segunda Guerra Mundial, que a mineração passou a ser mais evidente no Brasil, fomentando a exportação. Dentre esses acontecimentos está o Acordo de Washington, onde o Brasil recebeu apoio financeiro para construir um terminal marítimo, modernizar ferrovias e abrir uma mina na bacia do Rio Doce (SILVA, 1995).

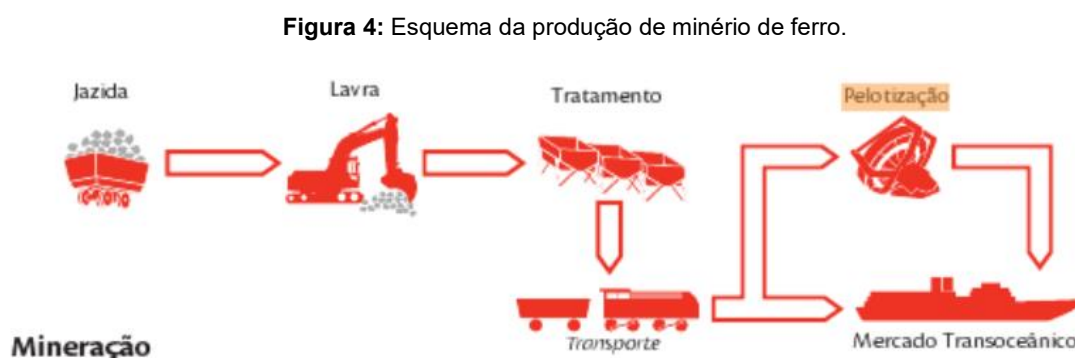
Tais fatos ao longo da história impulsionaram a atividade minerária no Brasil. Porém, sua expansão exigiu maior retirada de recursos hídricos, além de um desenfreado desmatamento, se tornando uma preocupação ambiental.

2.3.1.1 Processo de Produção

Até que o minério tome sua forma em patamares economicamente desejáveis, ocorrem grandes processos, desde sua extração até seu tratamento. Nesse caminho, muitos materiais de pouco ou nenhum valor econômico são gerados, denominados rejeitos.

A primeira etapa do processo de produção do minério de ferro, consiste na retirada do minério com teor economicamente viável de ferro. Nessa mesma fase, materiais encontrados sem valor econômico são armazenados em pilhas, para que se tenha maior acesso ao material de melhor qualidade. Após extraído, o minério segue para seu beneficiamento, tratamento que, por meio de uma série de processos, separa os minerais desejados dos minerais de ganga, fração a qual não há interesse econômico (IBRAM, 2015).

No processo de beneficiamento, o tratamento visa preparar ou purificar o minério, por meio de procedimentos químicos ou físicos, nunca alterando sua composição química. Nessa etapa, além de minério de boa qualidade, grandes volumes e massas de resíduos são gerados em forma de lama ou pasta, material denominado de rejeito (DNPM, 2014). As etapas de produção podem ser melhor observadas na Figura 4.



Fonte: CGEE, 2010.

Todo esse material corresponde a aproximadamente 70% do que é gerado no processo produtivo do minério de ferro, e por conter substâncias que alteram caracterís-

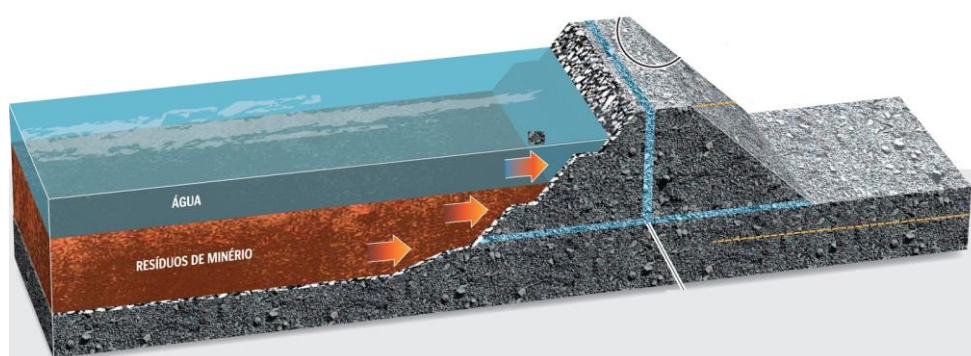
ticas do meio ambiente, como metais pesados, necessitam de uma disposição adequada (IBRAM, 2015). Nesse contexto, as barragens de rejeito se tornam a principal forma de armazenamento deste material descartado.

2.3.1.2 Barragens

Com o grande volume de resíduos gerados no processo de produção do minério de ferro, a disposição de material na superfície, com a técnica de aterro hidráulico, se tornou a mais comum entre as mineradoras brasileiras ao longo dos anos (MILONAS, 2006).

As barragens são obras de engenharia de grande porte, responsáveis por significativos impactos ambientais, como o desmatamento na sua fase de construção, a contaminação de águas subterrâneas e o impacto visual gerado (SILVA, 2007; DUARTE, 2008; CASTRO et al., 2011). Tal prática passou a fazer parte da história da mineração brasileira, de forma mais expressiva, a partir dos anos 70, quando o número de barragens espalhadas pelo Brasil cresceu de forma surpreendente (FRANCO e MASCARENHAS, 1995). Na Figura 5 está representada a estrutura geral de uma barragem de rejeito.

Figura 5: Estrutura de uma barragem de rejeito.



Fonte: Adaptado de RONCHI, 2015.

Além disso, aspectos relacionados à segurança nas barragens necessitam de alerta, pois, por serem grandes empreendimentos, sua má gerência e até mesmo imperceptíveis descuidos podem acarretar um mau funcionamento com potencial para ocasionar o vazamento ou até mesmo o rompimento dessas barragens, causando danos

ambientais, sociais e econômicos (ANDRADE, 2014).

Por conta do risco eminente de rompimento de barragens além dos impactos ambientais intrínsecos à utilização dessas estruturas como forma de armazenamento de resíduos, em 2001 foram instituídas as Normas Reguladoras de Mineração. Essas normas passaram a fazer parte da legislação mineira, se tornando instrumento técnico no ordenamento das atividades mineradoras brasileiras, além de intensificarem a fiscalização de segurança das mesmas (DNPM, 2001).

Além disso, o Brasil possui atualmente 33 órgãos fiscalizadores de segurança de barragens. Mas ainda assim, aproximadamente 150 barragens apresentam situação crítica em 22 estados brasileiros, com destaque para as barragens de rejeito (ANA, 2020). Esse panorama esclarece a necessidade de potencialização da fiscalização, além da urgência em buscar por novas alternativas que possam substituir, ou descarregar a quantidade de resíduos dispostos nas barragens.

Nesse contexto, algumas rotas alternativas para a disposição de resíduos de minério de ferro são propostas na literatura. Stella, Duarte e Pereira (2020) definem o método de filtração do resíduo como uma interessante alternativa de disposição do material, onde a água utilizada no processo é parcialmente recuperada, possibilitando sua reutilização, além de reduzir a área de disposição com estruturas de contenção. Além de outras tecnologias como espessamento do resíduo para sua disposição final em pasta. Nessa opção, a fase líquida é separada da parte sólida do material restante do processo de produção, e tem a finalidade de também reduzir a área de disposição (LARA, 2011).

Portanto, seguindo a premissa de reduzir a área de disposição com barragens, a reutilização dos resíduos de minério de ferro se torna viável e importante para assegurar maior segurança das barragens, além da vantagem econômica e também ambiental.

2.3.1.3 Rompimento da Barragem de Fundão

No dia 5 de novembro de 2015, ocorreu o rompimento da barragem de Fundão, no município de Mariana/MG. Tal evento, até então é considerado o maior desastre ambiental da história brasileira, principalmente pela quantidade de resíduos lançados nos corpos d'água (D'AGOSTINO, 2015).

O rompimento ocasionou destruição intra e extra-calha do Rio Doce, além de deixar a população atingida em estado de calamidade pública. No momento do ocorrido, 43,3 milhões de metros cúbicos de lama de resíduo foram liberadas do reservatório, que continha cerca de 56,6 milhões de metros cúbicos de material. Desse volume, 4,5 milhões de metros cúbicos de lama ficaram retidos dentro da própria mineradora, enquanto 39,2 milhões desceram para os rios Gualaxo do Norte, Carmo e Doce, seguindo até o mar (CH2M, 2017). A barragem de Fundão após o rompimento pode ser observada na Figura 6.

Figura 6: Barragem de Fundão após o rompimento, em Novembro de 2017.



Fonte: NASCIMENTO (2018)

Se tratando dos danos ambientais extra-calha, evidenciados nos trechos entre o ponto onde o rompimento aconteceu até o reservatório da Usina Hidrelétrica Risoleta Neves, se observou o comprometimento das áreas marginais dos rios afetados em até 200m e 50m, além de atingir espessuras de até 10 metros, no caso do distrito de Bento Rodrigues, ao longo do rio Gualaxo do Norte (DA SILVA; CUNHA; VIGLIO, 2016). Toda essa movimentação de lama de resíduo resultou na danificação de uma área de 1.026,65 ha de cobertura vegetal, incluindo uma parcela de Mata Atlântica presente

na região (FREITAS; SILVA; MENEZES, 2016).

Figura 7: Destruição causada pela lama proveniente do rompimento da barragem de Fundão, no distrito de Bento Rodrigues, Mariana/MG.



Fonte: AGÊNCIA BRASIL, 2015.

Se tratando dos danos ambientais, Fernandes et. al (2017) e Do Carmo et. al (2017) evidenciaram que o rompimento comprometeu a qualidade das águas do Rio Doce (Figura 8), vegetação e solos presentes nas margens do rio, os habitats e a biodiversidade aquática.

Figura 8: Rio Doce após a chegada da lama.



Fonte: AGÊNCIA BRASIL, 2015.

Um dos efeitos do rompimento foi alertar ao país aos riscos carregados por uma negligente gestão de barragens, que na maioria das vezes são sobrecarregadas e de escassa manutenção. Com isso, grande visibilidade cercou o gerenciamento desses

resíduos, principalmente pela quantidade material gerada, além dos riscos acometidos à sua reservação.

2.3.1.4 Reaproveitamento do resíduo de minério de ferro

O potencial de reaproveitamento dos resíduos de minério de ferro vem sendo estudados principalmente por meio da separação magnética e concentração dos minerais presentes no material (GUERRA, 2014).

Começaram, portanto, a ser estudadas as alternativas de aproveitamento, que podem ser na própria usina, além de fazer com que o resíduo seja útil como matéria-prima em outros meios de produção, com destaque na construção civil, devido às semelhanças encontradas entre os materiais usados neste meio e os resíduos de minério de ferro, podendo contribuir para a melhoria das propriedades mecânicas dos materiais (ANDRADE; MARQUES; PEIXOTO, 2016).

Segundo Galhardo (2015) e Ferreira (2007), o resíduo de minério de ferro se fez acessível e viável para aproveitamento em camadas estruturais de pavimentos. Ainda, Mendes (2019) concluiu que o resíduo proveniente da barragem de fundão mostrou-se adequado na fabricação de blocos cerâmicos. Além disso, outros autores como PEIXOTO (2016), ANDRADE (2014), COSTA, GUMIERI e BRANDÃO (2014), FONTES (2013) e COELHO (2008) também avaliaram as opções para o reaproveitamento de resíduos da mineração de ferro como materiais da construção civil, validando seu uso.

Dentre os tipos de usos do resíduo de minério na construção civil, pesquisas vêm estudando o reaproveitamento em tijolos, paviers, argamassa, concretos. O uso em concretos vem se mostrando interessante, uma vez que o resíduo possui características semelhantes aos materiais utilizados em sua produção, além disso, promove um uso sustentável para este material, uma vez que o concreto é o material de construção mais consumido no mundo, a incorporação do resíduo em sua produção fornece menores consumos de matérias-primas, além de diminuir a emissão de poluentes, uma

vez que reduz o consumo de cimento (ANDRADE; MARQUES, PEIXOTO, 2016).

Nascimento (2018) incorporou o resíduo de minério de ferro da barragem de Fundão na matriz cimentícia para fabricação de concreto e constatou que a reciclagem do resíduo para tal finalidade, apresenta viabilidade técnica e acrescenta vantagens ao concreto produzido. Seus resultados estão dispostos na Tabela 1.

Tabela 1: Resultados dos ensaios mecânicos de Nascimento (2018).

Ensaio	Resultados Obtidos (NASCIMENTO, 2018)			
	a/c = 0,60			
	Referência	Adição 5%	Adição 10%	Adição 15%
Determinação da consistência	11 mm	8,5 mm	7,2 mm	7,5 mm
Resistência à compressão axial (180 dias)	43,62 Mpa	48,40 Mpa	48,50 Mpa	44,15 Mpa
Resistência à tração por compressão diametral (180 dias)	5,74 Mpa	6,62 Mpa	5,89 Mpa	5,67 Mpa
Absorção de água por imersão e fervura (180 dias)	5,09%	5,80%	4,60%	4,58%
Índice de vazios (180 dias)	11,91%	12,19%	10,74%	10,71%
Absorção por capilaridade (180 dias)	0,246 g/cm ²	0,220 g/cm ²	0,224 g/cm ²	0,247 g/cm ²
Ensaio	a/c = 0,45			
	Referência	Adição 5%	Adição 10%	Adição 15%
Determinação da consistência	10,5 mm	8 mm	6,5 mm	6,5 mm
Resistência à compressão axial (180 dias)	67,64 Mpa	67,80 Mpa	70,50 Mpa	68,17 Mpa
Resistência à tração por compressão diametral (180 dias)	7,31 Mpa	6,72 Mpa	6,56 Mpa	7,28 Mpa
Absorção de água por imersão e fervura (180 dias)	5,13%	5,01%	3,69%	4,12%
Índice de vazios (180 dias)	11,95%	11,74%	8,77%	9,68%
Absorção por capilaridade (180 dias)	0,317 g/cm ²	0,164 g/cm ²	0,151 g/cm ²	0,143 g/cm ²

Fonte: Adaptado de Nascimento (2018).

Se tratando da resistência à compressão axial, Nascimento (2018) constatou que a adição do resíduo proporcionou aos concretos, melhor desempenho que suas referências, na maioria dos casos. O mesmo é visto com relação à resistência à tração por compressão diametral. Quanto nas de durabilidade, definida através dos ensaios de absorção de água por imersão e fervura, índice de vazios e absorção por capilaridade, foi possível perceber que o resíduo sendo aplicado como *filler*, causa a descontinuidade de poros e impedem que agentes agressivos penetrem o interior dos

concretos. Para esse caso, a adição de 10% de RBMF foi a apresentou os melhores resultados tanto nas resistências mecânicas quanto nos ensaios de durabilidade. Tais resultados validando, portanto, o uso do resíduo de minério de ferro da barragem de Fundão no ponto de vista mecânico.

Além disso, é importante conhecer características químicas do resíduo. No Brasil, os principais minérios explorados apresentam compostos de hematita (Fe_2O_3) e sílica, compostos que acarretam características interessantes para materiais fabricados a partir desses minérios, como melhorias nas propriedades mecânicas de resistência e durabilidade (IBRAM, 2015). Além disso, outros minerais também são comumente encontrados nos minérios, como Caulinita, Gibbsita, Goethita, Magnetita, entre outros (MACHADO et al., 2003).

Gomes et al. (2011), ao caracterizar os resíduos de uma barragem, identificou teores médios de 48,08% de Fe_2O_3 , 20,58% de SiO_2 e 3,16% de Al_2O_3 nestes resíduos. Nesse caso, supõe-se que esta seja uma realidade em muitas barragens brasileiras, onde grande quantidade de minérios com significativo teor de ferro já foram extraídos e beneficiados por processos pouco eficazes (ANDRADE, 2014).

Nesse contexto, o reaproveitamento na construção civil, principalmente após o desastre em Mariana, vem ganhando destaque, principalmente por conta das características do resíduo, que possui composição química similar aos materiais utilizados na construção civil. Ainda, pelo fato da construção civil ser uma atividade de grande impacto ambiental, responsável por um alto consumo de matérias primas, e geração de resíduos, o reaproveitamento de resíduos nesta atividade é uma oportunidade bastante interessante para minimizar os seus impactos (IBRACON, 2010).

2.4 SOLIDIFICAÇÃO/ESTABILIZAÇÃO

A solidificação/estabilização é uma alternativa para o tratamento de resíduos sólidos, sobretudo perigosos, ao se buscar seu reaproveitamento ambientalmente seguro. O procedimento consiste em uma combinação de processos físicos e químicos que formam uma matriz sólida e previnem a liberação de contaminantes no ambiente, diminuindo sua mobilidade e toxicidade (PAIXÃO, 2019).

É um método para imobilizar os compostos perigosos presentes em um resíduo, pois não elimina ou diminui a quantidade de integrantes, mas apenas adsorve, encapsula ou muda a forma físico-química do contaminante presente, gerando um produto menos lixiviável (SILVA, 2007).

Neste processo, as duas etapas ocorrem de forma distinta e simultânea. A solidificação se trata de um fenômeno físico, e acontece quando o contaminante é encapsulado em uma matriz sólida, a partir do emprego de um aglomerante como agente solidificante. Nesse caso, observa-se apenas alterações na forma física, não indicando mudanças nas ligações químicas entre os compostos, sendo então a redução do arraste de contaminantes dada pela diminuição da área superficial exposta à lixiviação (JO-CHEM, 2017; CAETANO, 2016; TORRAS et al., 2011; GRAHAM et al., 2006).

A estabilização, por sua vez, é um processo químico, com a finalidade de evitar a liberação dos contaminantes ao meio ambiente, diminuindo o potencial de periculosidade com redução da mobilidade. Nesse mecanismo, o aglomerante produz uma reação química com os elementos tóxicos, os tornando menos suscetível às liberações no ambiente (CAETANO, 2016; BRITO e SOARES, 2009).

Dentre as formas de aplicação dessa tecnologia, os principais tipos de processos são os orgânicos e os inorgânicos. Os orgânicos são aqueles que incluem como agente solidificante poliéster, asfalto, poliolefinas, resinas epóxi e uréia-formaldeído. Dentre os inorgânicos são utilizados o cimento, que é o mais usual e já carrega inúmeras frentes de pesquisa a respeito do seu potencial de encapsulamento, além de materiais pozolânicos, cal, gesso e os silicatos (BARTH e PERCIN, 1990).

A vantagens e desvantagens que são evidenciadas nessa tecnologia vão depender do tipo de processo empregado, dos aglomerantes, das características principais dos resíduos a serem utilizados e das condições locais específicas de aplicação do procedimento (CAETANO, 2016).

Dentre as vantagens, está o fato de o mecanismo possibilitar uma alternativa de reaproveitamento de resíduos perigosos, transformando-os em materiais possíveis de serem manuseados e aplicados em outros meios de produção. Além disso, alguns

resíduos, dependendo de sua composição química e seu processo de produção, podem atribuir propriedades mecânicas e físicas benéficas ao concreto e sua utilização.

Se tratando das desvantagens, se observa que, caso os corpos de prova apresentarem porosidade, a lixiviação dos contaminantes pode ser facilitada, não havendo mobilização suficiente, além disso, o volume do resíduo pode aumentar por conta da adição do aglomerante (KULAKOWSKI ET.AL, 2016). Portanto, o processo se torna ineficiente, e por conta disso, exige cautela e pesquisa, para determinação da forma mais coerente de execução do método.

Ao se aplicar a metodologia de solidificação e estabilização nos resíduos, espera-se uma mudança na classificação dos mesmos. Os resíduos, outrora classificados como perigosos, podem então ser classificados como inertes ou não perigosos, podendo assim, serem utilizados e manuseados de forma segura, aumentando as alternativas de reaproveitamento, evitando sua destinação inadequada e, conseqüentemente, um passivo ambiental (HAQUE, 2016).

2.5 CIMENTO PORTLAND NO PROCESSO DE SOLIDIFICAÇÃO/ESTABILIZAÇÃO DE RESÍDUOS

Para o processo de estabilização/solubilização, o material de construção mais utilizado é o cimento Portland. Isso se dá devido à sua disponibilidade e, principalmente, por ser considerado um aglomerante hidráulico, o que evidencia propriedades físico-químicas e mecânicas que conferem baixa permeabilidade, baixa difusividade e elevada resistência mecânica quando em contato com a água (JOICHEM, 2017).

As principais matérias-primas no processo de fabricação do cimento Portland são calcário, minério de ferro, argilas pozolânicas que, inseridas em um forno rotativo a uma temperatura elevada (~1450°C), forma um composto chamado “clínquer”. Nessa mistura, cada constituinte presente pode atribuir características diversas ao cimento, quando o processo de fabricação é concluído (PAIVA, 2019). Tais componentes, ao se combinar com a água, provoca endurecimento (SILVA, 2013).

A estabilização/solubilização por meio de concretos produzidos à base de cimento

Portland é usualmente aplicada para o caso de encapsulamento de resíduos contendo metais pesados em sua composição. Em tais situações, o cimento age possibilitando a precipitação dos metais em hidróxido quando as reações de hidratação acontecem formando um meio alcalino (OJOVAN e LEE, 2014).

Pinto (2005) estudou a estabilização por solidificação de resíduos com metais pesados em sua composição, assim como o resíduo de minério de ferro, utilizando cimento Portland e argila como agentes solidificantes. Os resultados indicaram reações entre o resíduo e o cimento que comprovaram que o cimento e argila encapsularam os metais presentes no resíduo, fazendo com que nenhum dos contaminantes se apresentassem acima dos limites estipulados pela legislação ambiental.

Além disso, Brehm et al. (2013) verificaram a estabilização por solidificação do lodo de fosfatização em matrizes de cerâmica vermelha e em concretos de cimento Portland. Os resultados indicaram uma tendência à estabilização dos metais avaliados tanto na matriz cerâmica quanto na matriz de cimento Portland.

Em outro exemplo, Sgorlon, Bertoli e Menezes (2017), utilizaram resíduo sólido industrial na fabricação de blocos de concreto para pavimentação. Através dos ensaios nos blocos produzidos, concluíram que não há lixiviação ou solubilização de contaminantes no ambiente durante a utilização dos blocos na pavimentação, pois foi constatada a solidificação/estabilização do resíduo por meio dos valores de eficiência de retenção obtidos para a maioria dos contaminantes.

Portanto, para a efetividade do processo ao incorporar resíduos, sobretudo perigosos, nas matrizes cimentícias, deve ser avaliada com base em parâmetros como resistência mecânica, coeficiente de permeabilidade e lixiviação. A análise desses aspectos é relevante pois a interferência dos metais pesados nos produtos de hidratação do cimento geram alterações no processo de solidificação, impossibilitando o desempenho do material (HODUL e DROCHYTKA, 2016).

3. METODOLOGIA

3.1 PROGRAMA EXPERIMENTAL

O objetivo do programa experimental é determinar os ensaios e as variáveis de pesquisa a fim de atender os objetivos do trabalho. Temos, portanto, as variáveis independentes, que são aquelas pré-determinadas pelo pesquisador e constitui fator importante na influência dos resultados e as variáveis de resposta, que são aquelas de interesse no experimento. No caso estudado, as variáveis independentes são representadas pelo tipo de resíduo trabalhado, e as de resposta constituem na lixiviação, solubilização, solidificação, granulometria e composição química e mineralógica.

O planejamento da pesquisa permite que as variáveis de resposta sejam determinadas e avaliadas, e envolve todas as etapas que levarão a conclusão sobre o comportamento do concreto com incorporação de resíduo de minério de ferro, respondendo se o encapsulamento ocorre ou não, validando, na perspectiva ambiental, o concreto produzido.

Portanto, o programa experimental deu-se em duas etapas, a primeira consistindo na realização dos ensaios de caracterização do resíduo, com ensaios de lixiviação, solubilização e determinação da composição química e mineralógica, permitindo um conhecimento dos materiais a serem trabalhados.

A segunda etapa integra os ensaios de lixiviação nos corpos de prova produzidos com a incorporação do resíduo trabalhado, onde será possível observar o comportamento do artefato produzido e avaliar sua viabilidade ambiental, que será comprovada por meio da comparação com os valores padrões da NBR 10.004 (ABNT, 2004). Ao fim das duas etapas, os resultados serão avaliados de forma individual e de forma conjunta, a fim de comparação, para que se possa determinar o resíduo mais viável.

Figura 9, pode ser contemplado o programa experimental de maneira visual englobando todos os ensaios realizados.

Figura 9: Programa Experimental.



Fonte: Elaborado pela autora (2021)

3.2 CARACTERIZAÇÃO DO RESÍDUO

A caracterização química do resíduo será feita considerando os parâmetros composição química e composição mineralógica. Tais informações permitem maior conhecimento a respeito do comportamento dos resíduos em análise quando submetidos à ensaios e tratamentos, subsidiando sua aplicação em concretos.

O resíduo utilizado para as análises e produção dos concretos foi o mesmo utilizado por Nascimento (2018). A coleta e amostragem do resíduo se deu de acordo com a norma NBR 10.007 (ABNT, 2004).

O local da coleta se deu na Rua São Bento, Bento Rodrigues, distrito de Mariana/MG, há alguns metros da barragem de Fundão. Após a coleta, o resíduo foi transportado para o Laboratório de Materiais de Construção – LEMAC/UFES onde foi disposto para secagem natural (Figura 10), peneiramento em peneira 4,8 mm e enfim, quarteamento (Figura 11).

Figura 10: Resíduo disposto para secagem natural.



Fonte: Acervo pessoal da autora.

Figura 11: Resíduo quarteado.



Fonte: Acervo pessoal da autora.

Para o uso do resíduo nos demais ensaios, o material passou por secagem em estufa (Figura 12) e então pesados e armazenados em sacos para continuidade de seu uso na pesquisa (Figura 13).

Figura 12: Resíduo passando pela secagem na estufa.



Fonte: Acervo pessoal da autora.

Figura 13: Resíduo armazenado pronto para uso.



Fonte: Acervo pessoal da autora.

3.2.1 Determinação da composição química e mineralógica do resíduo

A composição química do resíduo foi determinada por meio da espectrometria de fluorescência de raios-x (FRX). Nessa técnica, o resíduo absorve os raios emitidos pelo equipamento e produzem a fluorescência, que por sua vez, viabiliza a identificação dos componentes químicos presentes no material.

Para o conhecimento da composição mineralógica, realizou-se a análise de difração de raios-x. Esta etapa foi realizada no Laboratório de raios-x, do Labpetro, na Universidade Federal do Espírito Santo (UFES) e o equipamento utilizado foi o Difratorômetro de raios-x BRUCKER D8 ADVANCE.

3.2.2 Determinação da granulometria do resíduo

Para realização da análise granulométrica do resíduo foi utilizado um granulômetro a laser. Este tipo de análise foi definido tendo em vista que o resíduo se apresentava sobre um aspecto bastante fino, passando quase em sua totalidade na peneira de nº 200 (Figura 14). Tal fato foi observado seguindo a NBR 11579 (ABNT, 2012).

Figura 14: Ensaio de granulometria na peneira #200.



Fonte: Acervo pessoal da autora.

3.2.3 Caracterização ambiental do resíduo

A caracterização do resíduo estudado é realizada com base na NBR 10.004 (ABNT, 2004), por meio dos ensaios de lixiviação e solubilização, descritos nas normas NBR 10.005 (ABNT, 2004) e NBR 10.006 (ABNT, 2004), respectivamente.

3.2.3.1 Lixiviação

Os procedimentos adotados para o ensaio de lixiviação foram referentes a resíduos inorgânicos, com teor de sólidos igual a 100%, descritos na NBR 10.005 (ABNT, 2004). Para a execução do teste, 50g da amostra foi adicionada ao frasco de lixiviação (Figura 15), que por sua vez foi completo por 96,5 mL de água destilada.

Figura 15: Amostra de resíduo utilizada no ensaio.



Fonte: Acervo pessoal da autora.

Após isso, o pH dessa mistura é verificado (Figura 16). Caso apresente valor menor ou igual a 5, se junta à amostra uma solução de 5,7 mL de ácido acético glacial, 64,3 mL de NaOH e 1L de água. Por outro lado, se a mistura apresentar pH maior que 5, é necessário adicionar 3,5 mL de HCl e homogeneizar a solução, a aquecendo à 50°C no agitador durante 10 minutos. Após isso, mede-se o pH novamente, caso ele seja menor ou igual a 5, se faz o uso da solução já descrita, porém, se o pH for maior que 5, adiciona-se uma solução composta por 5,7 mL de ácido acético glacial e 1 litro de água destilada.

Figura 16: Determinação do pH do resíduo misturado à água.



Fonte: Acervo pessoal da autora.

Com a amostra pronta no frasco de lixiviação, ele é fechado e submetido à agitação durante 18 horas, à uma temperatura de até 25°C e com uma rotação de 30 RPM no agitador rotatório (Figura 17). Passado esse tempo, a amostra é filtrada por um filtro pressurizado ou à vácuo, com fibra de vidro com porosidade de 0,6 micrometros aproximadamente (Figura 18).

Figura 17: Agitador rotatório.



Fonte: Acervo pessoal da autora.

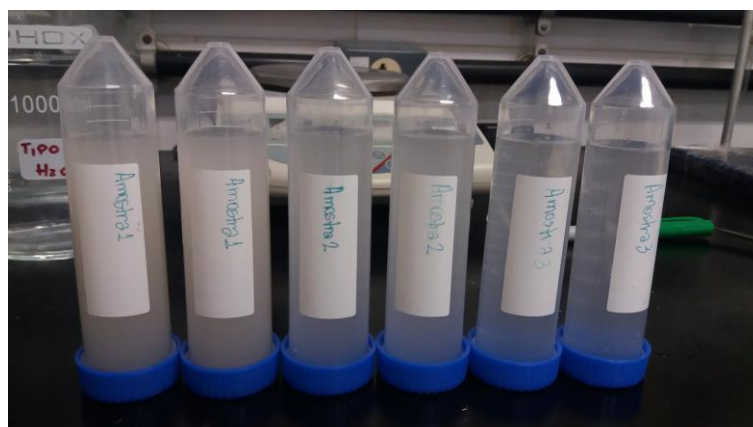
Figura 18: Filtro à vácuo utilizado no ensaio.



Fonte: Acervo pessoal da autora.

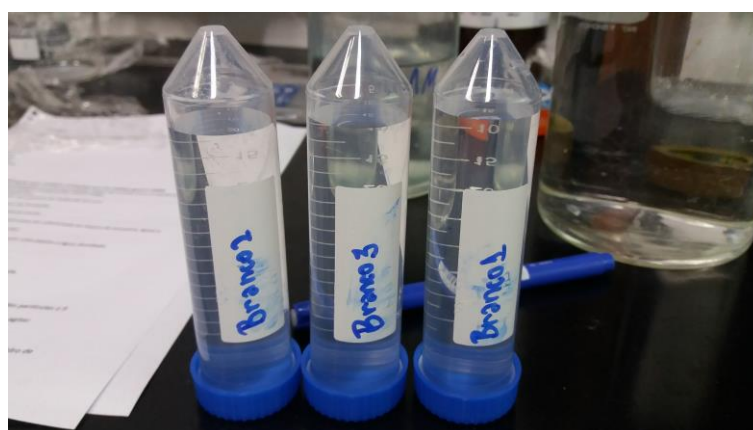
Após obter o extrato lixiviado, é necessário determinar o pH da amostra e enfim retirar 3 alíquotas e preservá-las, com adição de 1 mL de ácido nítrico (Figura 19). Ressalta-se que também é necessário um tratamento em “branco”, contendo apenas a solução de extração, para comparação dos resultados (Figura 20).

Figura 19: Amostras do extrato lixiviado após ser filtrado.



Fonte: Acervo pessoal da autora.

Figura 20: Tratamento em branco do ensaio.



Fonte: Acervo pessoal da autora.

Os parâmetros avaliados são retirados do anexo F da NBR 10.004 (ABNT, 2004), e são eles arsênio, bário, cádmio, chumbo, cromo total, fluoreto, mercúrio, prata e selênio, todos classificados como inorgânicos. Caso a amostra apresente concentrações maiores que o limite máximo para cada uma dessas substâncias, define-se o resíduo como perigoso. Os limites máximos para a concentração de cada composto citado, no lixiviado, estão descritos na Tabela 2.

Tabela 2: Limite máximo no extrato obtido no ensaio de lixiviação.

Parâmetro	Limite máximo no lixiviado (mg/L)
Arsênio	1,0
Bário	70,0
Cádmio	0,5
Chumbo	1,0

Parâmetro	Limite máximo no lixiviado (mg/L)
Cromo Total	5,0
Fluoreto	150,0
Mercúrio	0,1
Prata	5,0
Selênio	1,0

Fonte: NBR 10.004 (ABNT, 2004).

3.2.3.2 Solubilização

A determinação da concentração de substâncias solubilizadas é realizada com base na NBR 10.006 (ABNT, 2004). Para o procedimento, são preparados 250g do resíduo em um frasco, onde é adicionado um volume de água destilada completando 1L. O frasco é então coberto, sendo mantido em repouso por sete dias após o preparo da amostra. Passado esse tempo, a solução é filtrada. O que passa pelo filtro é denominado extrato solubilizado, e é com base nele que a análise é realizada. Os parâmetros analisados foram definidos com base no anexo G da NBR 10.004 (ABNT, 2004), e são eles descritos na Tabela 3 juntamente com seu limite de concentração.

Tabela 3: Limite máximo no extrato obtido no ensaio de solubilização.

Parâmetro	Limite máximo no extrato (mg/L)
Prata	0,05
Arsênio	0,01
Bário	0,7
Cádmio	0,005
Cromo	0,05
Mercúrio	0,001
Chumbo	0,01
Selênio	0,0
Alumínio	0,2
Cianeto	0,07
Cloreto	250,0
Cobre	2,0
Fenóis Totais	0,01
Ferro	0,3
Fluoreto	1,5

Parâmetro	Limite máximo no extrato (mg/L)
Manganês	0,1
Nitrato	10,0
Sódio	200,0
Sulfato	250,0
Surfactantes	0,5
Zinco	5,0

Fonte: NBR 10.004 (ABNT, 2004).

3.3 CARACTERIZAÇÃO AMBIENTAL DOS CONCRETOS PRODUZIDOS

A etapa da caracterização ambiental é composta pela verificação de contaminantes em concretos produzidos a partir da incorporação do resíduo estudado, onde se analisa os aspectos de encapsulamento. O procedimento será executado de acordo com a norma EA NEN 7.375:2004: Leaching characteristics of moulded or monolithic Building and waste materials (UKEPA, 2005), uma vez que a norma estabelece padrões para lixiviação de contaminantes especificamente em corpos de prova de concreto, especificando o tamanho da amostra e tempo de coleta.

3.3.1 Caracterização dos corpos de prova

Nessa etapa se verifica a eficiência do processo de solidificação/estabilização como tratamento dos resíduos, visando seu reaproveitamento na construção civil de forma ambientalmente segura.

3.3.1.1 Corpos de prova

Os corpos de prova foram os mesmos utilizados na pesquisa de Nascimento (2018). Primeiramente foi realizada a etapa de estudo da dosagem dos concretos com incorporação do resíduo, a qual possibilitou a seleção do melhor traço de concreto a ser obtido com os materiais utilizados, de forma a se obter um abatimento pelo método do tronco de cone de 10 ± 1 cm, segundo a NBR NM 67 (ABNT, 1998).

A partir da etapa de dosagem, foram definidos os traços de concreto para estudo, que

estão dispostos na Tabela 4.

Tabela 4: Traço unitário dos concretos.

Cimento (c)	Areia (a)	Brita (p)	Relação água/aglomerante (a/a)	Teor de adição de Resíduo de minério de ferro (%)	Tipo
1	1,51	2,33	0,45	0%	REF
				5%	A5
				10%	A10
				15%	A15
1	2,81	3,52	0,6	0%	REF
				5%	A5
				10%	A10
				15%	A15

Fonte: Adaptado de Nascimento (2018).

Por fim, encaminhou-se para a etapa de produção (Figura 21). Para os concretos produzidos (Figura 22), os teores de adição de resíduo de minério de ferro foram de 0, 5, 10 e 15%, para permitir uma avaliação também a respeito dos diferentes níveis de resíduo no concreto. Foram determinadas ainda, as características de abatimento e massa específica do concreto no estado fresco (Figura 23).

Figura 21: Produção dos concretos no LEMAC/UFES.



Fonte: Acervo pessoal da autora.

Figura 22: Corpos de prova produzidos com adição do resíduo.



Fonte: Acervo pessoal da autora.

Figura 23: Ensaio de Abatimento pelo Tronco de Cone.



Fonte: Acervo pessoal da autora.

3.3.1.2 Caracterização do lixiviado do corpo de prova com incorporação do resíduo de minério de ferro

Com a ausência de normas brasileiras que determinem uma metodologia para avaliação específica de corpos de prova, o ensaio de lixiviação nos concretos foi realizado de acordo com a norma EA NEN 7375:2004 – Leaching characteristics of moulded or monolithic Building and waste materials (NNI, 2004), conhecido como teste tanque.

Nesse teste, foi avaliado 1 corpo de prova para cada traço de concreto produzido com os resíduos estudados. Na metodologia adotada, o corpo de prova fica submerso por

64 dias em recipientes denominados “tanques”, com água destilada cobrindo todo o concreto, com no mínimo 2 cm de sobra para cada lado (Figura 24). Os recipientes, com capacidade para 2,5 litros de água, são preenchidos com 2,3 litros, e então são fechados com plástico filme e mantidos em repouso até os dias determinados para a coleta da amostra. Os tempos de coleta são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5: Tempos para coleta da amostra dos tanques.

Período	Tempo (dias)
1	0,25 ± 10%
2	1 ± 10%
3	1,25 ± 10%
4	4 ± 10%
5	9 ± 10%
6	16 ± 1
7	36 ± 1
8	64 ± 1

Fonte: NNI, 2004.

Figura 24: Corpo de prova e recipiente para o ensaio de lixiviação de metais em concretos.



Fonte: Acervo pessoal da autora.

Vale ressaltar, que apesar de a norma trazer os processos nomeados como lixiviação, por conta das características do ensaio e da utilização apenas de água destilada, ele se caracteriza como o ensaio de solubilização da NBR 10.006 (ABNT, 2004).

A cada período dado, a amostra é coletada, filtrada e armazenada em tubos Falcon para que siga para sua análise por meio da técnica de Espectrometria de Massas com Plasma Indutivamente Acoplado (ICP-MS). Após a coleta, o recipiente é preenchido novamente por água para realizar um novo ciclo, seguindo assim até que se complete

os 64 dias.

Os compostos selecionados para análise seguem os da NBR 10.004 (ABNT, 2004) para análise da lixiviação dos resíduos, sendo eles arsênio, bário, cádmio, chumbo, cromo total, fluoreto, mercúrio, prata e selênio. Os resultados obtidos foram comparados com os parâmetros U1 e U2 estabelecidos pela EA NEN 7375:2004 (NNI, 2004) e também pelos limites definidos pela NBR 10.004 (ABNT, 2004).

Os valores de U1 e U2 estabelecidos pela EA NEN 7375:2004 (NNI, 2004) (Tabela 6) enquadram a lixiviação dos concretos em três categorias, sendo elas a categoria 1, que inclui os materiais que apresentam taxa de lixiviação total de qualquer contaminante abaixo dos valores de U1 e, portanto, não apresentam restrições ao uso. A categoria 2, referente aos materiais que apresentam taxa de lixiviação total de qualquer contaminante entre os respectivos valores de U1 e U2. Estes materiais não possuem restrição ambiental, porém, terminado seu uso, é obrigatório remover os compostos contaminantes que tenham concentrações superiores a U1. E por fim, a categoria 3, que consiste em materiais que apresentam taxa de lixiviação total de qualquer contaminante acima dos valores de U2. Para materiais inseridos nessa categoria, a utilização na construção civil deve ser restrita, tomando as devidas precauções para evitar a lixiviação dos compostos contaminantes.

Tabela 6: Padrões cumulativos U1 e U2 requeridos pela NEN 7375 (NNI, 2004).

Metal Pesado	U1 (mg/m²)	U2 (mg/m²)
As	40	300
Cd	1	7,5
Cr	150	950
Cu	50	350
Se	1,5	9,5
Zn	200	1500

Fonte: NNI, 2004.

Portanto, para possibilitar a classificação dos resultados de acordo com a norma internacional, é preciso que a concentração da lixiviação total dos metais pesados esteja em mg/m². Para isso, se fez o uso da Equação 1 proposta por Eighmy (1997).

$$B_i = \frac{c_i \times V}{1000 \times A} \quad (\text{Equação 1})$$

Onde:

B_i = liberação do elemento por unidade de área no período i (mg/m^2);

C_i = a concentração do elemento no período (mg/L);

V = o volume do lixiviante (L);

A = área superficial do material monolítico (m^2).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 CARACTERIZAÇÃO DO RESÍDUO

4.1.1 Caracterização química

Os resultados da composição química do resíduo de minério de ferro estão apresentados na Tabela 7.

Tabela 7: Composição Química por FRX.

Elementos	Teor %
SiO ₂	54,7
Fe ₂ O ₃	39,1
Al ₂ O ₃	3,3
K ₂ O	0,2
TiO ₂	0,1
P ₂ O ₅	0,1
CaO	0,1
MnO	0,1
MgO	0,1
Na ₂ O	< 0,1
SO ₃	< 0,1

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Observa-se que o material possui um alto teor de dióxido de silício (SiO₂) e hematita (Fe₂O₃), 54,7% e 39,1%, respectivamente. Esse resultado se assemelha ao estudado por Guerra (2014) e Santa'anna Filho (2013), que encontraram maior teor de sílica em suas amostras, como pode ser observado na Tabela 8.

Tabela 8: Composição encontrada para o RBMF em diferentes trabalhos (%).

Parâmetro	GUERRA (2014)	BEZERRA (2017)	SANT'ANA FILHO (2013)	FONTES (2013)	Resíduo de Minério de Ferro estudado
SiO ₂	67,85	31,5	63	24,10	54,7
Fe ₂ O ₃	26,51	50,6 -	35	45,75	39,1
Al ₂ O ₃	2,62	-	1,2	4,8	3,3
K ₂ O	0,25	-	-	-	0,2
TiO ₂	< 0,1	-	-	-	0,1
P ₂ O ₅	< 0,1	-	-	< 0,1	0,1
CaO	< 0,1	-	-	-	0,1
MnO	< 0,1	-	-	< 0,1	0,1
Na ₂ O	< 0,1	-	-	-	< 0,1
SO ₃	-	-	-	-	< 0,1

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

O processo utilizado no beneficiamento do minério de ferro, o método de amostragem e o local de coleta influenciam diretamente em suas características. Ainda assim, pode-se notar que os resíduos obtidos nesta pesquisa, se assemelham bastante aos estudados, uma vez que possuem maior quantidade de quartzo em sua amostra. Isto provavelmente se deve ao percurso que a lama percorreu até chegar ao município de Bento Rodrigues, local de coleta de amostras de resíduo desta pesquisa.

Sendo assim, é importante verificar que o resíduo foi coletado na área afetada, que fica localizada a apenas 5 km da barragem de Fundão, o que demonstra que provavelmente não exista grande diferença entre o resíduo que se concentrou na área do desastre e os resíduos de minério armazenados nas barragens.

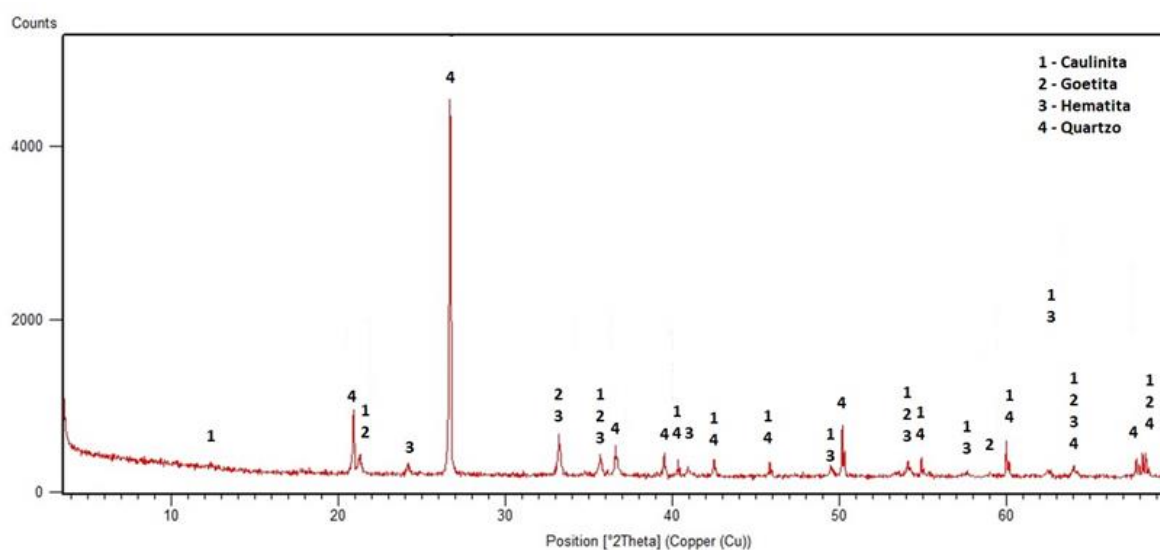
A presença da sílica no resíduo é bastante benéfica para o seu aproveitamento na construção civil, uma vez que é um composto presente em agregados, cimento, adições minerais, evidenciando um possível uso deste material em concretos.

Com relação à hematita, Bauer (2012) afirma que pequenas porcentagens de óxidos de ferro podem ser benéficas ao concreto, uma vez que atuam melhorando a compacidade do concreto, e assim, suas propriedades mecânicas e de durabilidade, devendo-se avaliar quais seriam as porcentagens adequadas de incorporação. Zhao et al. (2014) afirmam ainda que, a presença de óxidos de ferro confere aos concretos uma alta densidade e resistência, podendo ser utilizados para produção de concretos pesados.

4.1.2 Caracterização Mineralógica

Com relação a análise de difração de raios-x, o difratograma obtido para a amostra de resíduo estudada é mostrado na Figura 25.

Figura 25: Difratograma de raios-x do resíduo.



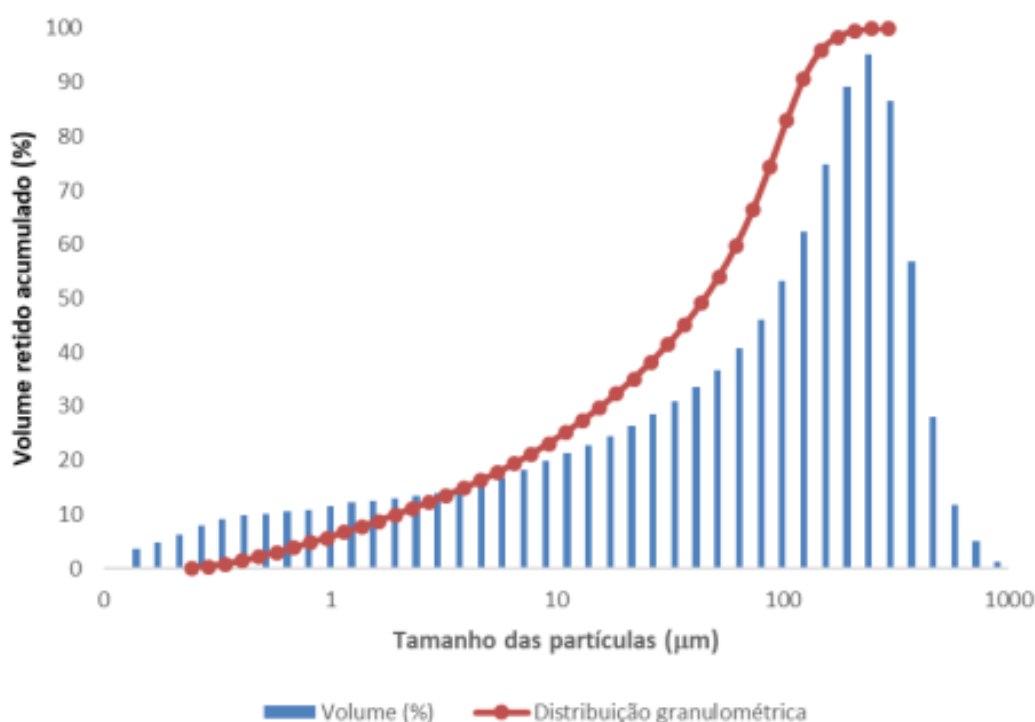
Percebe-se que a análise demonstrou que os minerais presentes na amostra são majoritariamente, quartzo. Os compostos de Ferro, Hematita e Goetita, são provenientes de perdas no processo de beneficiamento do minério de ferro. Podemos observar ainda a presença de caulinita, o que demonstra a presença de argila no resíduo.

Porém, a presença de compostos de ferro, muitas vezes é indesejável para aplicação em concretos, do ponto de vista estético, devido sua coloração avermelhada. Além disso, em grande quantidade, podem influenciar no aparecimento de trincas e rachaduras, pois exerce uma ação de dilatação.

4.1.3 Caracterização granulométrica

Avaliando-se a granulometria do resíduo de minério de ferro estudado, pode-se constatar que cerca de 80% do material se mostrou fino, ou seja, passante na peneira de 0,075 mm, como pode ser observado na Figura 26.

Figura 26: Granulometria do resíduo.



De acordo com Silva et. al (2005), o resíduo enquadra-se na faixa *filler*. O *filler* é um material que possui granulometria muito fina, o que faz desse material uma ótima associação para aumentar o desempenho e diminuir a capilaridade e a permeabilidade de concretos, promovendo o empacotamento granulométrico do cimento (DAL MOLIN, 2005).

Além disso, percebe-se um percentual de cerca de 30% abaixo de 38 µm, que, de acordo com os autores citados podem se enquadrar na faixa microfiller de adições minerais (SILVA et. al, 2005).

Ainda, percebe-se que a granulometria do resíduo se assemelha a de outras adições, como mostrado na Tabela 9. Assim, certifica-se uma possível utilização do resíduo na construção civil seja como *filler* em concretos, uma vez que é muito fino para ser usado como areia, e, devido sua composição química, e também granulometria, não é

classificado como uma pozolana de acordo com a NBR 12.653 (ABNT, 2014).

Tabela 9: Diâmetros do resíduo de minério comparado com outras adições utilizadas em concretos, além do tipo de cimento utilizado nesta pesquisa.

Diâmetro	Resíduo de minério	Cinzas volantes*	Metacaulim*	Sílica ativa*	CPV ARI*
D10 (µm)	1,99	7,33	2,27	2,45	3,60
D50 (µm)	45,38	50,13	29,05	18,44	11,79
D90 (µm)	122,3	209,167	59,01	31,8	29,02

Fonte: * Retirado dos trabalhos de Andrade (2017) e Diaz (2016).

Essa caracterização física se assemelha com a literatura. Guerra (2014), identificou que o resíduo apresentou propriedades físicas, químicas e ambientais satisfatórias para a sua utilização como material *filler* nos blocos de concreto com adição do resíduo.

Considerando as características do resíduo apontadas, percebe-se que existe um grande potencial para aproveitamento do material na construção civil, principalmente em concretos, tendo em vista sua composição química e granulometria. Desta forma, o resíduo pode, principalmente, ser utilizado como uma adição mineral, de forma a contribuir para a melhoria do desempenho mecânica e para a durabilidade de concretos.

4.1.4 Caracterização ambiental

Os resultados físico-químicos obtidos pelo teste de lixiviação do resíduo são mostrados na Tabela 10 e apontam que nenhum dos parâmetros avaliados (prata, arsênio, bário, cádmio, cromo, mercúrio, chumbo e selênio) excedem os limites impostos pela norma ABNT NBR 10.004 em seu anexo F. Tal comportamento indica que o material em análise se classifica como não-perigoso.

Tabela 10: Resultados do ensaio de Lixiviação.

Parâmetros	Limite Máximo (ABNT NBR 10004)	Resultado	Unidade
Fluoreto	150,0	0,34	mgF/L

Parâmetros	Limite Máximo (ABNT NBR 10004)	Resultado	Unidade
Prata	5,0	< 0,005	mgAg/L
Arsênio	1,0	< 0,002	mgAs/L
Bário	70,0	0,18	mgBa/L
Cádmio	0,5	< 0,5	mgCd/L
Cromo	5,0	< 0,01	mgCr/L
Mercúrio	0,1	< 0,001	mgHg/L
Chumbo	1,0	< 0,01	mgPb/L
Selênio	1,0	< 0,005	mgSe/L

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Por outro lado, nem todos os parâmetros analisados no teste de solubilização atenderam aos limites estabelecidos pela norma, uma vez que o resíduo apresentou solubilização de ferro na água além do permitido, como pode ser observado na Tabela 11.

Tabela 11: Resultados do ensaio de Solubilização.

Parâmetros	Limite Máximo (ABNT NBR 10004)	Resultado	Unidade
Prata	0,05	< 0,005	mgAg/L
Arsênio	0,01	< 0,002	mgAs/L
Bário	0,7	0,03	mgBa/L
Cádmio	0,005	< 0,001	mgCd/L
Cromo	0,05	< 0,01	mgCr/L
Mercúrio	0,001	< 0,001	mgHg/L
Chumbo	0,01	< 0,01	mgPb/L
Selênio	0,0	< 0,005	mgSe/L
Alumínio	0,2	0,07	mgAl/L
Cianeto	0,07	< 0,05	mgCN/L
Cloreto	250,0	17,99	mgCl/L

Parâmetros	Limite Máximo (ABNT NBR 10004)	Resultado	Unidade
Cobre	2,0	< 0,01	mgCu/L
Fenóis Totais	0,01	< 0,001	mg/L
Ferro	0,3	0,37	mgFe/L
Fluoreto	1,5	0,06	mgF/L
Manganês	0,1	< 0,01	mgMn/L
Nitrato	10,0	0,46	mgN/L
Sódio	200,0	15,28	mgNa/L
Sulfato	250,0	< 2,00	mgSO ₄ /L
Surfactantes	0,5	< 0,10	mgLAS/L
Zinco	5,0	0,02	mgZn/L

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Resíduos com tal classificação (não perigosos e não inertes) são intitulados pela norma como resíduos de Classe II A, e podem ter propriedades de biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água.

Mendes (2019) e Guerra (2014) também encontraram semelhante padrão de caracterização para os resíduos de minério de ferro avaliados. Resíduos que possuem essa classificação são indicados ao reaproveitamento sem que haja a necessidade de eventuais tratamentos ou tratamentos leves (SILVA, 2007). Isso se dá pelo fato de não agredirem ao meio ambiente ou a saúde pública ao retornarem ao ciclo de produção. Além disso, a estabilização por solidificação desse resíduo pode ser muito útil no seu reaproveitamento, evitando possíveis problemas ambientais por parte do resíduo.

Outros autores como Filho et al. (2017) e Dantas (2019) verificaram que o resíduo de minério de ferro estudado se caracterizava como não perigoso e inerte (Classe II B). Essas diferenças indicam que a classificação do resíduo pode variar de acordo com seu ponto de coleta dentro do ciclo produtivo, com o tipo de processo de geração e até mesmo a localização das jazidas da matéria prima.

4.2 CARACTERIZAÇÃO DOS CONCRETOS PRODUZIDOS

O resíduo de minério de ferro estudado não é considerado perigoso, visto seu desempenho após o ensaio de lixiviação. Porém, o mesmo possui propriedades de solubilidade de metais em água, tornando necessária a avaliação das propriedades de lixiviação de metais após a incorporação do resíduo nos concretos.

O resultado da lixiviação acumulada nos concretos após os 64 dias de ensaio pode ser observado na Tabela 12. Vale ressaltar que o resultado está apresentado em mg/m^2 por motivos de comparação com os valores U1 e U2 fornecidos pela norma NEN 7375 (NNI, 2004).

Tabela 12: Resultados da Lixiviação acumulada nos concretos após os 8 ciclos avaliados.

Lixiviação acumulada (mg/m^2)	Ag	As	Cd	Cr	Cu	Mn	Pb	Se
REF 0,45	0,073	0,019	0,013	0,159	0,366	0,156	0,091	0,053
A5 0,45	0,058	0,020	0,016	0,044	0,379	0,251	0,107	0,037
A10 0,45	0,075	0,017	0,011	0,053	0,214	0,080	0,197	0,035
A15 0,45	0,055	0,015	0,012	0,031	0,244	0,092	0,057	0,035
REF 0,6	0,137	0,014	0,014	0,111	0,468	0,169	0,077	0,044
A5 0,6	0,080	0,015	0,013	0,050	0,386	0,163	0,108	0,033
A10 0,6	0,057	0,014	0,011	0,008	0,950	0,100	0,037	0,036
A15 0,6	0,067	0,013	0,011	0,032	0,233	0,090	0,047	0,032
U1 (mg/m^2)	40	-	1	150	50	-	-	1,5
U2 (mg/m^2)	300	-	7,5	950	350	-	-	9,5

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

*Foi considerada uma área superficial de $0,045 \text{ m}^2$ para cada um dos corpos de prova avaliados, de acordo com as dimensões dos mesmos.

Verifica-se, portanto, que a lixiviação acumulada dos metais avaliados, para todos os traços de concreto foi inferior ao limite estabelecido para uso em materiais monolíticos pela norma NEN 7375 (NNI, 2004). Os metais com lixiviação acumulada mais evidente foram cobre e manganês, ainda que não tenham ultrapassado os limites propostos pela norma.

Observa-se que todos os resultados se apresentam inferiores ao limite U1, indicando que a adição do resíduo de minério de ferro em concretos é segura do ponto de vista ambiental, não apresentando, portanto, nenhuma restrição em relação à sua utilização.

Tal constatação também foi apresentada por Mendes (2019) ao comparar a lixiviação de blocos de cerâmica com adição de resíduo de minério de ferro e bloco comercial sem o resíduo. Também foi observado por Teixeira (2017), ao identificar comportamento semelhante ao incorporar ao concreto o resíduo de FGD, que também é classificado como não perigo e não inerte, assim como o resíduo de minério de ferro estudado.

Observa-se na Tabela 12, que a lixiviação de todos os elementos avaliados (As, Ag, Cd, Cr, Cu, Mn, Pb, Se e Zn) se mostrou maior no corpo de prova de referência quando comparado aos demais corpos de prova com adição do resíduo. Tal comportamento é observado até mesmo para os blocos que apresentam maiores teores de minério de ferro.

Tal fato indica que, na perspectiva ambiental, os corpos de prova com adição do resíduo de minério de ferro apresentaram melhor comportamento com relação à lixiviação de compostos, ocorrendo uma boa imobilização dos metais (MENDES, 2019).

Isso pode ser explicado pelo alto teor de óxido de ferro (Fe_2O_3) presente no resíduo de minério de ferro e, conseqüentemente, na mistura do bloco com o resíduo, ainda que tal composto não tenha sido avaliado na lixiviação por não haver norma que restrinja sua concentração limite. Destaca-se, portanto, que o óxido de ferro possui a capacidade de incorporação de metais pesados, tendo sido comumente empregado na remoção de tais elementos de efluentes líquidos e residuais (SHUKLA et al., 2010).

Percebe-se ainda, que uma maior relação água/aglomerante apresentou menor lixiviação de contaminantes, proporcionando um maior encapsulamento de metais, principalmente com maiores teores de adição de resíduo. Resultado semelhante foi apresentado por Jochem (2017), uma vez que para uma maior relação água/aglomerante é formado mais C-S-H, principal agente na imobilização de metais.

É importante também avaliar os valores obtidos para cada metal presente no resíduo com base nos parâmetros estabelecidos pelas ABNT NBR 10.004 (2004), a fim de se obter uma comparação brasileira dos resultados. A relação entre os valores obtidos no ensaio e os limites máximos estabelecidos pela norma para extrato lixiviado pode ser observada na Tabela 13.

Tabela 13: Resultado da lixiviação de metais nos corpos de prova em mg/L.

Amostra	Concentração do extrato lixiviado em mg/L.								
	Ag	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Mn	Pb	Se
Resíduo	< 0,005	<0,002	<0,05	<0,01	<0,001	<0,01	<0,01	<0,01	<0,005
REF 0,45	0.00165	0.000430	0.00029	0.00358	0.00823	0.00176	0.00352	0.00195	0.00131
A5 0,45	0.00130	0.000440	0.00036	0.00098	0.00853	0.00127	0.00565	0.00229	0.00095
A10 0,45	0.00168	0.000383	0.00025	0.001197	0.00481	0.00109	0.00181	0.00436	0.00084
A15 0,45	0.00124	0.000343	0.00026	0.00071	0.00549	0.00105	0.00207	0.00124	0.00083
REF 0,6	0.00308	0.000306	0.00030	0.00250	0.01053	0.001136	0.00381	0.00165	0.00108
A5 0,6	0.00181	0.000345	0.00029	0.001132	0.00868	0.00107	0.00366	0.00241	0.00076
A10 0,6	0.00127	0.000313	0.00025	0.00018	0.02137	0.00100	0.00224	0.00076	0.00087
A15 0,6	0.00151	0.000303	0.00026	0.00072	0.00525	0.00094	0.00203	0.00099	0.00079
NBR (mg/L)	5	1	0.5	5	5	0.1	-	1	1

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Na Tabela 13 os valores obtidos estão em mg/L para facilitar a comparação com os limites na norma brasileira, que são fornecidos em tal unidade. Além disso, esse resultado foi comparado com os valores obtidos na análise do extrato lixiviado do resíduo, com a finalidade de identificar se houve encapsulamento dos metais na matriz cimentícia.

Observa-se que nenhum dos elementos analisados ultrapassou os limites impostos pela norma em nenhuma das adições do resíduo ao concreto. Essa certificação reafirma a utilização dos concretos com adição do resíduo como segura ao meio

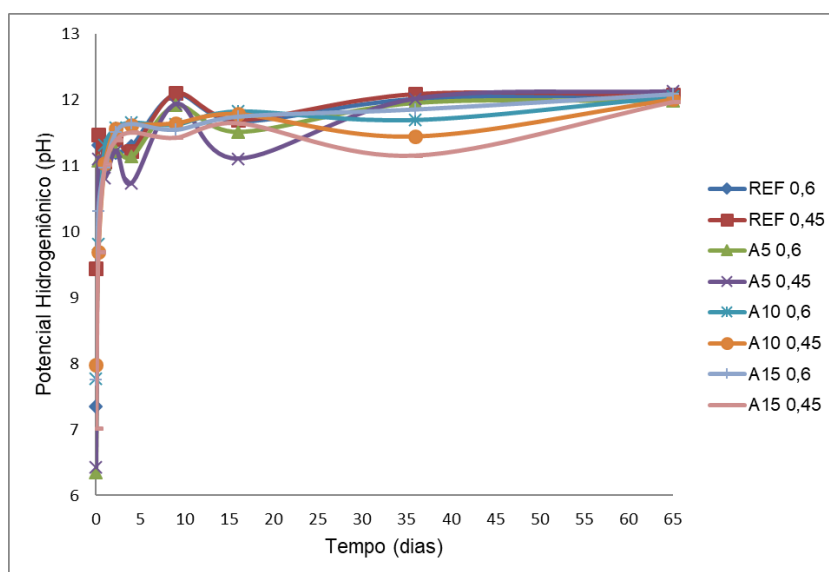
ambiente.

Além disso, os elementos Prata, Arsênio, Cádmiio, Cromo, Mercúrio, Manganês, Chumbo e Selênio foram encapsulados de forma eficiente, não tendo sua concentração aumentada após o processo de solidificação/estabilização. Isso indica que os concretos produzidos apresentam significativa capacidade em manter os metais pesados presos na sua matriz endurecida (CAETANO, 2016).

Por outro lado, o cobre não apresentou estabilização em sua concentração após o processo. Isso se dá ao fato de sua concentração aumentar quando em contato com a matriz cimentícia. Ainda assim, observa-se que o cobre não ultrapassou os limites da norma, não sendo um empecilho para a utilização do concreto adaptado com o resíduo de minério de ferro.

O comportamento do pH dos extratos lixiviados coletados ao longo dos 64 dias de ensaio pode ser analisado pela Figura 27.

Figura 27: Variação do pH do lixiviado ao longo do tempo.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Observa-se um grande aumento nos valores de pH das amostras ao se comparar o momento inicial do experimento, com pH próximo de 5 e o momento final do teste, apresentando pH em torno de 12, e percebendo-se, por fim, uma tendência de estabilização do pH no decorrer do ensaio.

Essa alteração significativa do pH inicial das amostras pode estar relacionada a

alcalinidade natural de materiais cimentícios, que se encontra entre 12 e 13. O valor do pH atingido pelas amostras pode ser considerado adequado para promover a imobilização de possíveis contaminantes (QIAO; POON; CHEESEMAN, 2006), uma vez que, segundo Spence e Shi (2004), a faixa ideal de pH para imobilização de metais pesados em sistemas de solidificação e estabilização encontra-se entre 8 e 12.

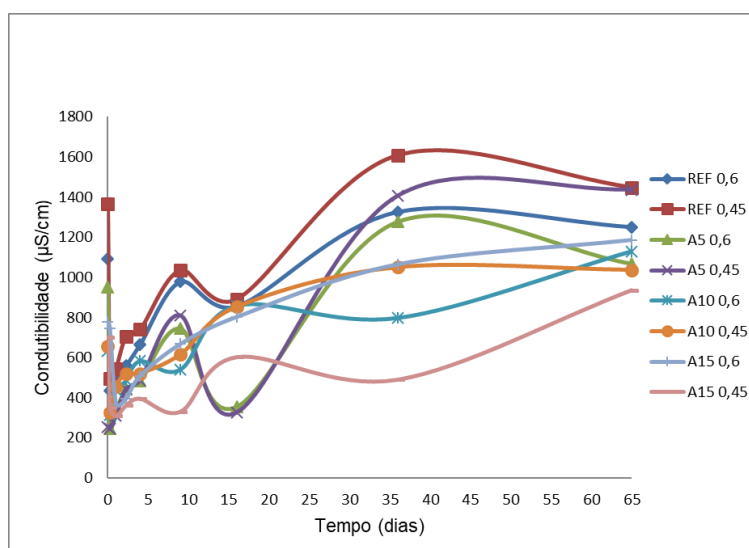
O principal componente de ligação do processo de encapsulamento em concretos são os C-S-H formados. A presença de Ca(OH)_2 mantém o valor de pH alto à ponto de os contaminantes não serem liberados da matriz do produto solidificado (JOICHEM, 2017).

Além disso, vale ressaltar que, ao utilizar cimento Portland para estabilizar e solidificar resíduos sólidos industriais, como é o caso do resíduo de minério de ferro em questão, o pH da matriz favorece a conversão de cátions em hidróxidos, óxido e carbonatos insolúveis, incorporando íons metálicos à estrutura cristalina da matriz de cimento. Tal fato justifica a eficiência de retenção apresentada pelos metais (CONNER, 1990).

Por outro lado, é importante salientar que, como descrito por De Groot e Sloop (1992), a lixiviação de compostos em matrizes cimentícias é influenciada pela alcalinidade da matriz, sendo a lixiviação mínima identificada na faixa de pH de 7 a 10. Portanto, o aumento do pH das amostras ao longo do ensaio também pode indicar um aumento da lixiviação de metais com um maior tempo de exposição dos corpos de prova às condições úmidas.

Porém, apesar de se verificar uma maior disponibilidade para a lixiviação de metais durante praticamente todo o período do ensaio, não foram verificadas concentrações anormais de metais nos lixiviados avaliados, indicando a capacidade de encapsulamento dos metais avaliados dentro da matriz de concreto.

Em contrapartida, o comportamento da condutividade das amostras, ao longo desse período de ensaio, não apresentou tamanha uniformidade, uma vez que foram observadas oscilações significativas durante todo o procedimento. Os resultados cerca desse parâmetro ao longo do ensaio, pode ser observado abaixo na Figura 28.

Figura 28: Variação da condutibilidade do lixiviado ao longo do tempo.

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

A condutividade é um indicativo da lixiviação de contaminantes, uma vez que uma maior condutividade é um sinal de que está havendo mobilidade de espécies iônicas (SCHAEFER; ROCHA, CHERIAF, 2008).

Observa-se, que no instante zero para o primeiro momento (0,25 dias), ocorre uma pequena queda na condutividade. Porém, essa tendência muda, percebendo-se um aumento na condutividade de todos os traços nos primeiros 10 dias de ensaio, portanto, a lixiviação de contaminantes apresenta um crescimento constante nesses instantes. Tal comportamento também foi observado por Van Gerven (2004) e Schaefer, Rocha e Cheriaf (2008), indicando maior mobilidade das espécies iônicas nas primeiras horas.

Portanto, a partir do período de 10 dias, as amostras começam a apresentar diferenças significativas no comportamento da condutividade, sobretudo para os traços REF e A5 a 0,6 e REF e A5 a 0,45. Nestes lixiviados a condutividade do meio começa a declinar, indicando uma maior retenção de contaminantes, contribuindo para uma menor lixiviação de contaminantes.

É possível observar, portanto, que tanto as amostras de referência quanto as de menor teor de resíduo (A5) apresentaram, durante todo o ensaio, um comportamento semelhante em suas duas formas de relação água/cimento 0,6 e 0,45. Desempenho este que não foi observado para as demais amostras, que oscilaram de forma desordenada durante todo o ensaio para estes parâmetros.

É importante verificar que as oscilações ocorridas na condutividade refletem o comportamento dos mecanismos de transporte de íons. Espera-se que esse transporte seja mais intensificado no início do ensaio, uma vez que predominam os mecanismos de dissolução e lavagem superficial da amostra (DE GROOT; SLOOT, 1992; VAN GERVEN et al., 2002).

Porém, o comportamento das diferentes dosagens de resíduo nos corpos de prova, frente a estes mecanismos, foi diferente, o que indica que, quanto maiores teores de resíduo contribuem positivamente na retenção de íons.

Assim, percebe-se que houve a solidificação/estabilização dos metais presentes no resíduo de minério de ferro estudado, por meio da sua incorporação em concretos produzidos à base de cimento Portland. Foi observado o encapsulamento dos metais avaliados dentro da matriz de concreto, sendo, portanto, a incorporação do resíduo em concretos uma alternativa segura do ponto de vista ambiental.

5. CONCLUSÕES

A análise dos resultados obtidos permite concluir que a incorporação do resíduo de minério de ferro no concreto é um método viável tecnicamente de reaproveitamento e uma destinação ambientalmente segura do mesmo. Tal afirmação se dá, principalmente, pelos resultados obtidos nos testes de lixiviação, que atestaram que o resíduo não é perigoso ao meio ambiente.

Além disso, foi possível observar, com análises granulométricas e de composição química, diversos benefícios ao concreto, acarretados pelo resíduo. As análises granulométricas e sua composição química possibilitaram a utilização do material como uma adição mineral em concreto, e ainda, pelo seu alto teor de finura, o mesmo pode ser utilizado como *filler*. Esta utilização é bastante benéfica, pois contribui para o preenchimento dos vazios da massa de concreto, decorrendo assim, uma diminuição de sua porosidade, o que promoverá uma melhoria em suas propriedades mecânicas e de durabilidade.

Com relação à caracterização ambiental do resíduo, foi possível concluir que o material se classifica como não perigoso e, por conta o excesso de ferro solubilizado em água, não inerte. Sendo, portanto, inserido na classe II A da norma NBR 10.004 (ABNT, 2004). Tal classificação indica a possibilidade segura do uso do resíduo na construção civil, com pouco ou nenhum pré tratamento.

Se tratando da análise dos concretos produzidos com adição do resíduo, ficou evidenciado que a matriz cimentícia tem capacidade para promover o seu encapsulamento, mesmo com a lixiviação ocorrendo em todo tempo de ensaio. Assim, esta pode ser considerada uma alternativa para o reaproveitamento deste resíduo, trazendo muitos ganhos para a construção civil e para o meio ambiente.

Por fim, os resultados tendem a contribuir para o gerenciamento dos resíduos de minério de ferro, e ainda, possibilitar uma solução para disposição final sustentável dos resíduos gerados no desastre de Mariana, de forma segura ambientalmente.

6. REFERÊNCIAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10.004:** Resíduos sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 2004.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10.005:** Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de Resíduos Sólidos. Rio de Janeiro, 2004.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10.006:** Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de Resíduos Sólidos. Rio de Janeiro, 2004.

AGOSTINO, R. **Rompimento de barragens em Mariana: perguntas e respostas.** G1 SP, São Paulo, nov. 2015. Disponível em: <<http://g1.globo.com/ciencia-e-saude/noticia/2015/11/rompimento-de-barragens-em-mariana-perguntas-e-respostas.html>>. Acesso em 23 abr. 2020.

ANDRADE, L. C. R.; MARQUES, A. G.; PEIXOTO, R. A. F. **Perspectivas para o reaproveitamento de rejeitos da mineração de ferro como materiais de construção.** Geografias, v. 12, n. 1, p. 32-44, 2016.

ANDRADE, Luana Caetano Rocha de, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, dezembro de 2014. **Caracterização de rejeitos de mineração de ferro, in natura e segregados, para aplicação como material de construção civil.** Orientador: Eduardo Antonio Gomes Marques. Coorientador: Ricardo André Fiorotti Peixoto.

APHA - AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. **Standard Methods for the examination of water and wastewater.** American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environmental Federation, 21th ed. Washington. 2005. 937p.

ARAÚJO, J. A. **Reciclagem de pó de Forno Elétrico a Arco para a produção de Aglomerado Pré-fundido (APF) para uso em processo siderúrgico.** Tese

(Doutorado). 293p. Universidade de São Paulo. São Carlos-SP, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS (ABRELPE). **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2018**. São Paulo: Abrelpe, 2019.

BARTH,E.F.;PERCIN,P. **Stabilization and Solidification of hazardous wastes- Pollution technology review**. V. Park Ridge, Noyes Data, 1990.

BORGES, Pedro Henrique Andrade et al. **Uso da escória de aciaria como agregado siderúrgico: uma discussão sobre os aspectos ambientais e legais no Brasil**. 2020.

BRASIL. **Proposição de limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos de fontes fixas para a indústria siderúrgica em nível nacional**. 7º GT Fontes Fixas – Sub-grupo de Minas Gerais. Belo Horizonte: MMA, 2008. 28 p.

BRASIL. República Federativa do Brasil. LEI Nº 12.305, 02 de agosto de 2010. **Política Nacional de Resíduos Sólidos**. Brasília, 2010.

BREHM, Feliciane Andrade et al. Análise da estabilização por solidificação de lodo de fosfatização em matrizes de cimento Portland e de cerâmica vermelha para a utilização na construção civil. **Ambiente Construído**, v. 13, n. 2, p. 15-27, 2013.

BRIBIAN, Z. I. et al. **Life cycle assessment of building materials: Comparative analysis of energy and environmental impacts and evaluation of the eco-efficiency improvement potential**. Building and Environment, 2011.

BRITO, A. L. F. **Protocolo de Avaliação de Materiais Resultantes da Estabilização por Solidificação de Resíduos**. 179 f. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

BRITO, A. L. F.; SOARES, S. R. **Avaliação da integridade e da retenção de metais**

pesados em materiais estabilizados por solidificação. Eng. Sanit. Ambient, vol.14,n.1, p.39-48, 2009.

CAETANO, Juliana Argente. **Reaproveitamento do resíduo Terra da Shredder através da técnica de solidificação/estabilização em matrizes de cimento Portland para aplicação na construção civil.** 2016. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

CASRILHOJR., A. B. et al. **Gerenciamento de resíduos sólidos urbanos com ênfase na proteção de corpos d'água: Prevenção, Geração e Tratamento de Lixiviados de Aterros Sanitários.** Prosab-Programa de Pesquisa em Saneamento Básico, Florianópolis, Santa Catarina, 2006, 1ª edição, editora Sermograf Artes Gráficas e Editora Ltda. 475p.

CASTRO, T. A.; NALINI JUNIOR, H. A.; LIMA, H. M. **Entendendo a Mineração no Quadrilátero Ferrífero.** Belo Horizonte: Ecológico. 93 p. 2011.

Centro de Gestão de Estudos Estratégicos (CGEE). **Siderurgia no Brasil 2010 – 2025: Subsídios para a tomada de decisão.** Brasília, 2010. 112 p.

CH2M. **Plano de Manejo de Rejeitos,** Rev. 1, 2017.

CONNER, J.R. **Chemical fixation and solidification of hazardous wastes.** New York: Van Nostrand Reinhold, 1990.

CÓRDOBA, P.; GONZÁLEZ, M. E.; GONZÁLEZ, A.; MAROTO-VALER, M.; MORENO, N.; SEPÚLVEDA, N.; NAVIA, R.; QUEROL, X. **Evaluation of a Flue Gas Desulphurisation (FGD)-Gypsum from a Wet Limestone FGD as Adsorbent for Removal of Selenium in Water Streams.** Journal of Environmental & Analytical Toxicology, v. 5, n. 5, 2015. 6 p.

DA SILVA, Cassio Roberto; CUNHA, Fernanda Gonçalves; VIGLIO, Eduardo Paim. **Rompimento da barragem de mineração de ferro em Mariana-Minas Gerais, Brasil: Impactos físico-químicos**. In: III Congresso da Sociedade de Análise de Risco Latino Americana, São Paulo. 2016.

DA SILVA, Olintho Pereira. **A mineração em minas gerais: passado, presente e futuro**. Geonomos, 1995.

DE GROOT, G. J.; SLOOT, H. A. van der. **Stabilization and solidification of hazardous, radioactive and mixed wastes**. In: GILLIAN, T. M.; WILES, C. C. (eds.). **Determination of leaching characteristics of waste materials to environmental product certification**. v. 2. Baltimore, PA: American Society for Testing Materials, p. 149-170, 1992.

Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM). Portaria N° 237, **Normas Reguladoras de Mineração**. Departamento Nacional de Produção Mineral, 2001.

DEUS, Rafael Mattos; BATTISTELLE, Rosane Aparecida Gomes; SILVA, Gustavo Henrique Ribeiro. Resíduos sólidos no Brasil: contexto, lacunas e tendências. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 20, n. 4, p. 685-698, 2015.

DNPM - DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL. **Sumário Mineral - 2014**. Disponível em <<http://www.dnpm.gov.br/dnpm/sumarios/sumario-mineral-2014>>. Acesso em 23 abr. 2020.

DUARTE, A. P. **Classificação das barragens de contenção de rejeitos de mineração e de resíduos industriais no estado de Minas Gerais em relação ao potencial de risco**. UFMG: Belo Horizonte. 2008. (Dissertação de Mestrado).

FREITAS, Carlos Machado de; SILVA, Mariano Andrade da; MENEZES, Fernanda

Carvalho de. **O desastre na barragem de mineração da Samarco: fratura exposta dos limites do Brasil na redução de risco de desastres**. Ciência e Cultura, v. 68, n. 3, p. 25-30, 2016.

FREITAS, José Júlio Garcia; RAYMUNDO, Valério; JESUS, H. C. **A importância do monitoramento do pH em resíduos industriais de beneficiamento de minerais não-metálicos**. Cerâmica Industrial, v. 14, n. 2, p. 1-6, 2009.

GOMES, M. A. **Caracterização tecnológica no aproveitamento do rejeito de minério de ferro**. Ouro Preto: UFOP. 77p. (Dissertação de mestrado). 2009.

HAQUE, M. A. **Assessment of nickel leaching phenomena from landfill waste mixed paving block for eco-friendly field application**. Journal of Cleaner Production, v. 139, p. 99-112, 2016.

HODUL, J.; DROCHYTKA, R. **Examination of microstructure of solidification product containing hazardous sludge**. International Conference on Ecology and new Building materials and products, ICEBMP 2016. Procedia Engineering, v. 151, p. 402-409, 2016.

IBRAM - INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. **Informações sobre a economia mineral brasileira - 2015**. 2015. 25p.

INSTITUTO AÇO BRASIL. **Relatório de sustentabilidade-2018**. 2019.

JOCHEM, Lidiane Fernanda et al. **Efeito do agregado reciclado dos resíduos de construção e demolição na retenção dos metais pesados em processos de solidificação e estabilização**. 2017.

JOHN, V. M.; AGOPYAN, V. **Reciclagem de escória de alto-forno no Brasil**. In: SEMINÁRIO NACIONAL SOBRE REUSO/RECICLAGEM DE RESÍDUOS SÓLIDOS INDUSTRIAIS, 2000, São Paulo. **Anais...**São Paulo: Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo, 2000. 5p.

KULAKOWSKI, Marlova Piva et al. Avaliação Ambiental de Produtos e Sistemas Construtivos Inovadores com Resíduos: Lixiviação e Solubilização. **Avaliação de Desempenho de Tecnologias Construtivas Inovadoras: Materiais e Sustentabilidade**, p.37-76, 26 jul. 2016. Editora Scienza.

LARA, A. F. M. de. **Espessamento e transporte de pasta mineral**. Universidade Federal de Minas Gerais – Departamento de Engenharia de Minas, Belo Horizonte . 2011.

LUO L; ZHANG Y; BAO S; CHEN T. **Utilization of iron ore Tailings as ra material for Portland cement clinker production**. Hindawi Publishing Corporation. 6 p. 2016.

MACHADO, F.B.; MOREIRA, C.A.; ZANARDO, A; ANDRE, A.C.;GODOY, A.M.; FERREIRA, J. A.; GALEMBECK, T.; NARDY, A.J.R.; ARTUR, A.C.; OLIVEIRA, M.A.F.de. **Enciclopédia Multimídia de Minerais**. 2003.

MENDES, Beatryz Cardoso. **Reaproveitamento do rejeito de minério de ferro, liberado no desastre envolvendo o rompimento da barragem de Fundão (MG), na produção de blocos cerâmicos**. 2019.

METHA, P. K.; MONTEIRO, P. J. **Concreto: Microestrutura, propriedades e materiais**. 3ª edição. São Paulo. Ibracon. 2008.

MILANEZ, B.; SCOTTO, G.; JÚNIOR, H. A. S.; BOSSI, D.; KATO, K. **Injustiça ambiental, mineral e siderurgia**. 2013

MILONAS, Joice Gonçalves. **Análise do processo de reconstituição de amostras para caracterização do comportamento de barragens de rejeitos de minério de ferro em aterro hidráulico**. 2006. Dissertação (Mestrado) — Universidade de Brasília, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Brasília.

MONTEIRO, José Henrique Penido. **Manual de gerenciamento integrado de resíduos sólidos**. 2001.

MOTA, José Carlos et al. Características e impactos ambientais causados pelos resíduos sólidos: uma visão conceitual. **Águas Subterrâneas**, v. 1, 2009.

NASCIMENTO, D. W. **Estudo sobre a influência da adição de resíduo de minério de ferro como pigmento e nas propriedades do concreto de cimento Portland.** 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Vitória. 2019.

NNI - NETHERLANDS NORMALISATIE-INSTITUUT. EA NEN 7375:2004: **Leaching Characteristics of Moulded or Monolithic Building and Waste Materials.** Nederlands Normalisatie-instituut: Delft, The Netherlands, 2004.

PINTO C. A. **Estudo da estabilização por solidificação de resíduos contendo metais pesados.** Dissertação (mestrado em engenharia civil) USP, São Paulo, 2005.

QIAO, X. C.; POON, C. S.; CHEESEMAN, C. **Use of flue gas desulphurisation (FGD) waste and rejected fly ash in waste stabilization/solidification systems.** *Waste Management*, 26, p. 141-149, 2006.

SCHAEFER, Cecília Ogliari; ROCHA, Janaíde Cavalcante; CHERIAF, Malik. **Análise da lixiviação de metais pesados em argamassas produzidas com agregados reciclados.** 2008.

SGORLON; BERTOLI; MENEZES. **Utilização de resíduo sólido industrial na fabricação de blocos de concreto para pavimentação: Estudo do comportamento físico, químico e mecânico da matriz cimentícia.** 2017.

SHETTIMAA. U; HUSSIM M. W; AHMAD Y; MIRZA J. **Evaluation of iron ore tailings as replacement for fine aggregate in concrete.** *Construction and Building Materials*. V. 120. P. 72 – 79. 2016.

SHUKLA, S. K. et al. **Utilization of concentrate of membrane filtration of bleach plant effluent in brick production.** *Journal of Hazardous Materials*, v. 184, n. 1–3, p. 585–590, dez. 2010.

SPENCE, R. D.; SHI, C. **Stabilization and Solidification of Hazardous, Radioactive, and Mixed Wastes.** Boca Raton, Florida. Ed. CRC Press, 2004. 378p.

STELA, Luis Henrique; DUARTE, Juliana Canto; PEREIRA, Camila Ortulan. **Métodos de disposição dos rejeitos de minério de ferro alternativos ao método de**

barragens: uma revisão. Revista Brasileira de Processos Químicos, v. 1, n. 1, p. 34-45, 2020.

VAN GERVEN, T.; VAN BAELEN, D.; DUTRÉ, V.; VANDECASTEELE, C. **Influence of carbonation and carbonation methods on leaching of metals from mortars.** **Cement and Concrete Research**, volume 34, pages 149-156, 2004.