

Artigo Original

ANÁLISE ACIDENTE EM BRUMADINHO - MINAS GERAIS - UTILIZAÇÃO DE REJEITOS DE BARRAGENS NA CONSTRUÇÃO CIVIL

Autores: Beatriz Illipronti Laurino¹, Carla Tamires de Jesus Oliveira Preto¹, Cleber do Prado Ferreira Junior^{2,A}

¹Acadêmicas da Faculdades Metropolitanas Unidas, Engenharia Civil, São Paulo, SP, Brasil.

²Professor da Faculdades Metropolitanas Unidas, Engenharia Civil, São Paulo, SP, Brasil.

Informações do artigo

Palavras Chave:

Barragem; Brumadinho;
Materiais de Construção;
Utilização de Rejeitos.

Resumo

Barragens de rejeitos são reservatórios feitos com o objetivo de reter água e resíduos sólidos resultantes da extração de minérios para que evite danos ambientais. No Brasil, existem centenas e apesar de toda tecnologia envolvida, rompimentos continuam acontecendo e trazendo enormes prejuízos ambientais e sociais para a população. Um exemplo recente é o caso da barragem do Córrego do Feijão, localizada no município de Brumadinho, em Minas Gerais, que no dia 25 de janeiro de 2019 desmoronou resultando em um enorme desastre industrial, humanitário e ambiental impactando diretamente todos os habitantes da cidade, trazendo um número grande de vítimas fatais, desaparecidos e desalojados, além de diversos animais mortos, solo e rios contaminados pelos rejeitos de minério. O rejeito de minério de ferro pode ser considerado uma matéria-prima, visto que se torna um produto sustentável e que atende aos requisitos técnicos exigidos pelas normas brasileira e internacional. São diferentes em suas características fazendo com que altere sua função e antes de usá-lo como uma alternativa de reaproveitamento são necessários alguns estudos e testes de ensaio em amostras de materiais de construção para avaliar qual a melhor forma de utilizá-lo. Através de diversas pesquisas e experimentos foram descobertas formas de reuso desse material na construção civil, como por exemplo em blocos cerâmicos. Dessa forma, através desse artigo buscamos uma alternativa para a redução dos passivos ambientais representados por essas barragens de rejeito, diminuindo consideravelmente o volume a ser represado nas barragens. Dar uma destinação para esses rejeitos será uma solução ambiental bastante satisfatória entre outras.

^AAutor correspondente:

Cleber do Prado Ferreira Junior² - E-mail: cleber.ferreira@fmu.br – ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1691-1733>

DOI: <https://doi.org/10.31415/bjns.v3i1.86> - Artigo recebido em: 04 de fevereiro de 2020 ; aceito em 17 de fevereiro de 2020; publicado em 10 de março de 2020. Brazilian Journal of Natural Sciences, Vol. 3, N.1, março 2020. Disponível online a partir de 10 de março de 2020, ISSN 2595-0584. www.bjns.com.br. Todos os autores contribuíram igualmente com o artigo. Os autores declaram não haver conflito de interesse.

Este é um artigo de acesso aberto sob a licença CC - BY: <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>

Article ID

Keywords:
Sunscreen,
plant extracts,
solar radiation.

Abstract

Tailings dams are reservoirs made to retain water and waste subject to mineral extraction to avoid environmental damage. In Brazil, there are hundreds and despite all the technology involved, disruptions continue occur and cause enormous environmental and social damage to the population. A recent example is the bean dam located in municipality of Brumadinho, Minas Gerais, which on January 25, 2019 collapsed resulting in a huge industrial, humanitarian and environmental disaster directly impacting all the inhabitants of the city, bringing a large number of fatalities, missing and desalinated, and several dead animals, soil and rivers contaminated by ore tailings. Iron ore tailings can be considered as a raw material as it becomes a sustainable product that meets the technical requirements of Brazilian and international. They are different in their characteristics making change their function and before use as a reuse alternative are tests some trials and tests on building materials to evaluate how to best use it. Through this article, we seek an alternative to reduce the environmental liabilities represented by these tailings' dams, considerably reducing the volume to be dammed in the dams. Giving these wastes a destination will be a very satisfactory environmental solution, among others.

INTRODUÇÃO

O manual de segurança e inspeção de barragens define barragem de rejeitos como um barramento construído com a finalidade de reter rejeitos ou materiais estéreis de mineração e de outros processos industriais [1].

Existem no Brasil diversos barramentos destinados a diferentes usos. Recentes acidentes envolveram barragens de rejeitos de mineração, o que desperta atenção para essas estruturas [2].

As barragens de rejeitos são das maiores estruturas geotécnicas terrestres construídas [3] e são reconhecidas por gerarem grande impacto ambiental [2]. São usadas para o depósito dos resíduos e água gerados a partir do processo de mineração [4] que funcionam como uma barreira que pode ser feita de solo compactado, blocos de rocha ou rejeito. Conforme são depositados, acomodam-se ao fundo, deixando a água na parte superior para então ser tratada e ter parte reutilizada para o processo de mineração e parte ser devolvida ao meio ambiente [5].

Rejeito é o material proveniente de beneficiamento do minério, do qual já foi retirada a parte economicamente importante [6]. Por gerarem grande impacto ambiental e não possuírem valor comercial, as em-

presas optam por descartar os rejeitos da forma mais econômica, ou seja, como material para a construção da própria barragem, minimizando os impactos ambientais resultantes [7].

Algumas das barragens atendem as normas de segurança compatíveis com os padrões internacionais exigentes, entretanto muitas ainda permanecem sem fiscalização necessária, o que faz com que estejam sujeitas a ultrapassagem de níveis de segurança, enchentes, entre outros fatores que podem resultar em rompimento da estrutura causando prejuízos ambientais, econômicos e sociais. Uma razão para as falhas é o não seguimento dos critérios adequados de projeto, construção e operação. Essas falhas vêm custando vidas, além de todo impacto ambiental causado [2].

Passados pouco mais de três anos do caso da barragem de Mariana, outra eclosão aconteceu em Minas Gerais, dessa vez em Brumadinho. A barragem Córrego do Feijão da empresa Vale, em 11 de Dezembro de 2018 teve a licença para ampliação da capacidade de produção da barragem de 10,6 milhões de toneladas para 17 milhões de toneladas por ano. A licença foi dada pelo Conselho Estadual de Política Ambiental (COPAM), da Secretaria de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável de Minas (Semad) [8]. Após 42 dias, em 25 de Janeiro de 2019 a barragem foi palco

para o desmoronamento que lançou lama e dejetos, alcançando moradias e pousadas, além da área rural 290 hectares foram atingidos e as mais de trezentas vidas que foram tiradas [9].

Estudos feitos através dos rejeitos de minério de ferro indicam a possibilidade de reutilização dos mesmos na construção civil, sejam em asfaltos, blocos cerâmicos, argamassas, entre outros, de forma que o volume de rejeitos seja diminuído visando à preservação do meio ambiente.

Material e Método

A pesquisa tem como objetivo mostrar uma solução para barragens de rejeitos que estão em estado de alerta. Sendo assim, foram realizadas diversas pesquisas de artigos buscados na internet junto com uma análise comparativa de rejeito de minério de ferro, argila cinza e argila amarela, para que fosse comprovada a eficiência de utilização de tal material na execução de blocos cerâmicos na construção civil.

Sistema da Barragem I do Córrego do Feijão

O Sistema Córrego do Feijão faz parte do Complexo Minerador Paraopebas, de propriedade da Vale, sendo constituído pelas Barragens I e VI.

A Barragem I da Mina do Feijão foi implantada em 1976 com o intuito de contenção de rejeitos finos e provenientes do beneficiamento de minério. O sistema está localizado na Mina do Feijão, Alto do Curso da Bacia do rio Paraopebas, nas cabeceiras do ribeirão Ferro-Carvão, afluente pela margem direita do Paraopebas, em terras do município de Brumadinho, Minas Gerais.

Foi construída sobre solo rochoso com boa capacidade de suporte e permeabilidade baixa. Os aterros do 4º ao 9º alteamento foram construídos pelo método de montante, que é o mais antigo, simples e econômico para a construção de barragens [2]. Neste método a estrutura do barramento é iniciada a partir de um dique, construído com materiais de boa qualidade como enrocamento ou material argiloso compactado [10].

A barragem tinha o seu monitoramento através da leitura periódica de piezômetros sandpipe ou Casa-grande, indicadores de nível d'água, inclinômetros e medidores de vazão e de percolação. Através da leitura, os dados eram lançados em tabela e gráficos para comparação com os níveis de segurança estabelecidos em premissa: atenção, alerta emergência.

Qualquer barragem é apenas um meio para se atingir o objetivo principal do empreendimento: a criação de um reservatório. Desse modo, é de vital importância a escolha do local onde se pretende construir uma represa. Devem ser levados em consideração os aspectos geológicos, topográficos, climáticos, biológicos, socioeconômicos, etc [11].

No conceito técnico, deve-se ter ciência da importância do projeto, dos materiais utilizados na construção e as necessidades de segurança que a barragem precisará, tendo em mente que com o passar dos anos é comum o aparecimento de trincas, erosão nas estruturas assoreamento e perda de resistência [11].

Ecologicamente falando, a construção de barragens rompe o equilíbrio natural que existe na região. Grandes reservatórios têm grande influência no meio ambiente, alterando até mesmo o clima da região por conta do contato rejeito-ar e rejeito-solo, causando também maiores taxas de evaporação e vapor-transpiração aumentando a umidade do ar. É possível até mesmo ocorrerem cheias trágicas colocando em risco a região e a própria barragem [11].

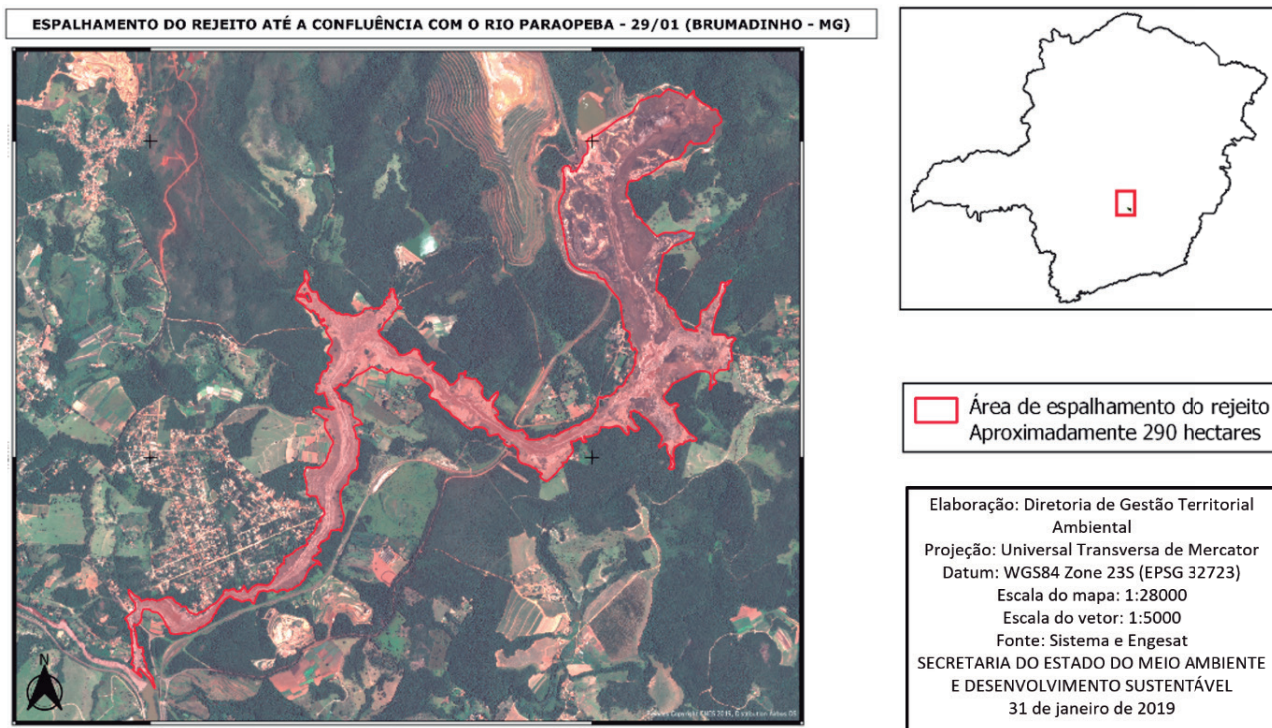
Rompimento da Barragem

A barragem que estava inativa desde 2015 e armazenava 12 milhões de metros cúbicos de lama de rejeitos da mineração de ferro chegou a romper em 25 de Janeiro de 2019 espalhando rejeitos até confluência do rio Paraopeba, como mostrada na **Figura 1**.

Analisando dados do Serviço Geológico do Brasil (CPRM), nota-se que após o rompimento em 25 de Janeiro a velocidade de escoamento dos rejeitos era de 1 km/h fazendo com que chegasse a uma distância de aproximadamente 96 km, na cidade de São José da Varginha em 29 de Janeiro.

As chuvas que ocorreram após uma semana do rompimento levaram os rejeitos até o rio Paraopeba tornando a água imprópria para uso. Foram inviabilizados os serviços de captação de águas nesse rio para o abastecimento de grandes cidades, como por exemplo, Pará de Minas e Belo Horizonte, prejudicando muitos agricultores que não tinham mais como irrigar suas plantações [12].

A tragédia contabilizou aproximadamente 300 vítimas. Além disso, a contaminação da água por elementos químicos nocivos à saúde, em um mês já havia avançado cerca de 250 quilômetros no rio Paraopeba, atingindo pelo caminho 16 municípios [13].

Figura 1 – Espalhamento do rejeito até a confluência com o rio Paraopeba**Figura1.** Fonte: Secretaria de Estado de Meio-Ambiente e Desenv. Sustentável - 29/01/2019 - SEMAD

Os 12 milhões de metros cúbicos de lama devem elevar o transporte de sedimentos ao longo do tempo [14] causando assoreamento do leito e barragens de hidrelétricas dos rios Paraopeba e São Francisco, além da contaminação dos mananciais subsuperficiais. A fauna e flora foram atingidas, pois 51% da área atingida são ecossistemas naturais ricos em biodiversidade, dos quais mais de 65% (98,18 ha) eram matas em estágio ecológico avançado.

Segundo médicos entrevistados pela BBC News Brasil, 13 elementos químicos foram identificados na lama entre eles níquel, magnésio e cádmio que mesmo em quantidades pequenas podem ser prejudiciais à saúde. Por ser uma barragem antiga pode ser altamente tóxica e não é possível medir a concentração atual destes componentes no solo.

Os rejeitos que chegam aos rios contaminam a fauna e flora, afetando a cadeia alimentar, mas os resultados só poderão ser percebidos daqui a décadas.

Reaproveitamento de Rejeitos de Barragem na Construção Civil

Os rejeitos de minério de ferro são diferentes em suas características, variando em função do proces-

so de beneficiamento do minério, do tipo de minério bruto ou mesmo da variabilidade das frentes de lavra e da sua posição na barragem de rejeito [15].

As mudanças nas características devido ao processo de beneficiamento se dão em função do local que são destinados, tamanho das partículas, entre outros fatores [6]. Segundo Lopes [16] existe influência do teor do ferro no comportamento mecânico dos rejeitos. A proporção entre o ferro (>) e a sílica (<) implica diretamente no peso específico dos grãos.

Os rejeitos granulares formados por grãos de areias finas a médias, não plásticas, possuem alta permeabilidade e apresentam baixa compressibilidade, enquanto as lamas formadas por partículas de grãos de siltes e argilas, possuem alta plasticidade, difícil sedimentação e alta compressibilidade [15].

Em estudos sobre os rejeitos de minério de ferro do estado de Minas Gerais realizados por Nery [17] por meio de análise fluorescente de raio X, obteve resultados que mostraram que as partículas finas de rejeito não são tóxicas e apresentam estrutura cristalina estável, inerte, sem presença de substâncias infecciosas ou expansivas [17]. A partir de testes notou que é possível incorporar um teor considerável de minério de ferro na fabricação de blocos cerâmicos de veda-

ção. Para garantir que os blocos sejam aplicados na construção civil sem causar efeitos negativos tanto no meio ambiente quanto na sua utilização na construção, são realizados ensaios de caracterização ambiental. O rejeito de minério de ferro é composto por sílica e óxido de ferro com partículas de diversos formatos e tamanhos similares, o que permite adição do rejeito.

Na **tabela 1**, nota-se que o rejeito de minério

de ferro por conta da sua não plasticidade pode ser considerado um silte arenoso já que possui pequena parcela de argila. Além disso, comparando o limite de plasticidade temos outra vantagem, pois quanto maior o limite, maior a dificuldade de secagem dos corpos de prova o que acarreta problemas na secagem e queima [17].

Tabela 1 – Frações granulométricas

Material	Argila (%)	Silte (%)	Areia fina (%)
Rejeito de mineiro de ferro (RMF)	11,90	49,50	38,60
Argila Cinza (AC)	62,40	30,10	7,50
Argila Amarela (AA)	43,60	20,80	35,60

Fonte: Mendes, 2019 [17]

Tabela 2 – Características físicas

Material	Massa Específica dos Sólidos (g/cm ³)	Diâmetro Médio	Limite de Liquidez	Limite de Plasticidade	Índice de Plasticidade
Rejeito de minério de ferro	2,933	47	0	0	0
Argila cinza	2,609	< 1	60	44	16
Argila amarela	2,748	1,8	56	35	21

Fonte: Mendes, 2019 [17]

Tabela 3 – Composição química obtida por FRX* das matérias primas

Material	Sio ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	K ₂ O	P ₂ O ₅	Outros	PF**
Composição química (%)										
Rejeito de minério de ferro	63,091	7,169	25,792	0,280	0,201	0,122	0,319	0,392	0,256	2,279
Argila cinza	44,293	32,531	4,624	1,921	0,443	0,086	0,265	0,329	0,257	15,211
Argila amarela	43,902	27,737	12,387	1,965	0,407	0,434	0,724	0,440	0,398	11,606

Fonte: Mendes, 2019 [17]- *FRX (espectrometria de fluorescência de raios X). **PF – Perda de Fogo

Resultados

Caracterização dos Corpos de Prova

Densidade: Propriedade importante, pois afeta a reação dos blocos cerâmicos durante a queima. Ao adicionar o rejeito de minério de ferro existe um aumento na densidade por conta da sua massa específica e também por apresentar grandes partículas.

Retração Linear: O rejeito de minério atua como preenchimento e consequentemente atua na diminuição da retração linear, independente da temperatura na queima. Sua aplicação pode ser com intuito de controlar a retração linear das peças cerâmicas de forma a melhorar sua estabilidade dimensional, além de resultar numa menor incidência de deformações diminuindo a perda de materiais durante a produção.

Densidade Aparente Pós-Queima: contribui com o aumento desta densidade por conta de sua maior massa específica dos sólidos do material.

Porosidade Aparente: Por conta da grande quantidade de quartzo, contribui no aumento da porosidade quando observado separadamente. Apesar desse fato, o efeito provocado pela inércia foi predominante du-

rante a queima, aumentando significadamente o aumento da porosidade.

Absorção d'água: A adição do rejeito de minério provoca a absorção d'água, causando maior concentração de poros abertos e interligados que não serão "fechados" durante a sinterização. Este é um dos principais parâmetros para a aplicação de peças cerâmicas. De acordo com estudos, os blocos cerâmicos se aplicam perfeitamente na norma estabelecida pela NBR 15270-1.

Resistência a Compressão Axial: o rejeito de minério pode reduzir a resistência mecânica. Ao analisar a temperatura, nota-se que tanto a porosidade quanto a rugosidade da superfície reduzem. Devido ao maior teor de quartzo e hematita (óxido de ferro III) presentes, as amostras que contém porcentagens de rejeito de minério de ferro (M1 e M7) apresentam superfícies mais irregulares.

Determinação Composição Ótima: Segundo a NBR 15270-1 e ASTM C62, os blocos cerâmicos de vedação devem apresentar características de absorção d'água e resistência mecânica de modo a garantir a qualidade técnica do produto como podemos analisar na tabela abaixo.

Tabela 4 - Composições ótimas de acordo com a temperatura de queima

Temperatura	Rejeito de minério de ferro	Argila cinza	Argila amarela	Predição	
				Absorção d'água (%)	Resistência a compressão (Mpa)
850oC	0,291	0,409	0,300	21,72	17,71
950 oC	0,291	0,409	0,300	20,90	17,58
1050 oC	0,233	0,467	0,300	13,69	17,70

Fonte: Mendes [17]

Os blocos cerâmicos produzidos com rejeitos de minério de ferro apresentam melhor comportamento, ocorrendo uma boa imobilização dos metais quando se tornarem resíduos da construção e demolição (RCD) ou de descarte de peças defeituosas. Podem ser classificados como resíduos da Classe II A – não perigosos não inertes.

Pode-se dizer que o bloco desenvolvido com a incorporação de rejeito de minério de ferro, causa baixo impacto ambiental, não sendo agressivo ao meio e à

saúde humana durante a vida útil dos elementos construídos a partir deste (alvenarias de vedação). A única ressalva é a aplicação dos blocos em reservatórios de água cuja alvenaria seja aparente.

Através dos resultados analisados, vemos a possibilidade do reaproveitamento de rejeitos de minério de ferro na construção civil, desde que sejam analisados em laboratório para que a qualidade técnica do material seja garantida e não ocorram problemas tanto na construção quanto ao meio ambiente.

Conclusão

Apesar da barragem do córrego do feijão ter sua construção num local com boa capacidade de suporte, com método seguro e estar avaliada como sendo de baixo risco, o rompimento aconteceu. O rompimento de uma barragem afeta diretamente o meio ambiente, além da parte social e econômica de uma região.

Visto os problemas que podem ser causados perante a operação de uma barragem tanto quanto o descaso que leva à sua ruptura, visamos demonstrar fatores favoráveis de modo a diminuir a quantidade de resíduos existentes fazendo a reutilização dos mesmos em pró da construção civil, conseguindo inclusive a melhoria de resistência mecânica dos blocos cerâmicos, vantagem em relação à massa específica e plasticidade em relação à composição normal do material.

O bloco desenvolvido também gera baixo impacto ambiental, tanto na sua vida útil quanto em caso de se tornar resíduos de demolição. A única contra indicação se deve ao fato de não poder ser utilizado em caso de alvenaria aparente a água devido à sua porosidade.

Portando a reutilização dos rejeitos de minério de ferro é de extrema relevância por diminuir o impacto ambiental gerado pela barragem, uma vez que a retirada causa uma “limpeza”, melhorando a qualidade do ar, poluição nas coleções hídricas, entre outros fatores, e também pela utilização dos blocos obedecerem às normas estabelecidas pela NBR.

Referências

[1] BRASIL. Ministério da Integração Nacional. Secretaria de Infraestrutura Hídrica. **Manual de segurança e inspeção de barragens**. Brasília, 2002.

[2] DUARTE, Anderson Pires. **Classificação das barragens de contenção de rejeitos de mineração e de resíduos industriais no estado de Minas Gerais em relação ao potencial de risco**. Universidade Federal de Minas Gerais. Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Belo Horizonte, 2008.

[3] AZAM, Shahid; LI, Qiren. **Tailings dam failures: a review of the last one hundred years**. *Geotechnical news*, v. 28, n. 4, p. 50-54, 2010.

[4] LOZANO, Fernando Arturo Erazo. **Seleção de locais para barragens de rejeitos usando o método de análise hierárquica**. 2006. Tese de Doutorado.

Universidade de São Paulo.

[5] AMBIENTAL, GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA; BERTOLIN, MARIANE. **Resíduos de desastres ambientais: um olhar diferenciado sobre o rompimento da Barragem do Fundão** (Mineradora Samarco), em Mariana-MG.

[6] MACHADO, William Gladstone de Freitas. **Monitoramento de barragens de contenção de rejeitos da mineração**. 2007. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

[7] ESPÓSITO, T. de J. **Metodologia probabilística e observacional aplicada a barragens de rejeito construídas por aterro hidráulico**. Brasília: UnB, 2000.

[8] CARVALHO, M.A & Vieira, V. Brumadinho: o segundo alerta. Self – Ver Inst Junguiano São Paulo, 2019.

[9] BRIZA, Dulce Helena Rizzardo. **Brumadinho. Self-Revista do Instituto Junguiano de São Paulo**, v. 4, n. 1, 2019.

[10] HERNANDEZ, H. M. **Caracterização geomecânica de rejeitos aplicada a barragens de aterro hidráulico**. Brasília: UnB, 2002.

[11] BARRETO, Maria José Rezende; CORREA, Elza Maria Staciari. **As barragens e os problemas decorrentes de sua construção (notas preliminares)**. 1983.

[12] BASTOS, Lucas Augusto de Castro. **Utilização de rejeito de barragem de minério de ferro como matéria prima para infraestrutura rodoviária**. 2013.

[13] BOSKOVIC, Alessandra Barichello. **Brumadinho: indenizações acidentárias e a inaplicabilidade do teto fixado pelo art. 223-G da CLT para os danos extrapatrimoniais**. Brumadinho: indenizações acidentárias e a inaplicabilidade do teto fixado pelo art. 223-G da CLT para os danos extrapatrimoniais, 2019.

[14] MAGRIS, R. A.; MARTA-ALMEIDA, M.; MONTEIRO, J. A.; BAN, N. C. 2019. **A modelling approach to assess the impact of land mining on marine biodiversity: Assessment in coastal catchments experiencing catastrophic events (SW Brazil)**. *Science of The Total Environment*, n. 659, p. 828-840.

[15] FERNANDES, G. (2005). **Comportamento de Estruturas de Pavimentos Ferroviários com Utilização de Solos Finos e/ ou Resíduos de Mineração de Ferro Associados a Geossintéticos**. Tese de Dou-

torado, Universidade de Brasília, UnB, Brasília. 250p.

[16] LOPES, M. C. O. **Disposição hidráulica de rejeitos arenosos e influência nos parâmetros de resistência. 2000.** Tese de Doutorado. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF.

[17] MENDES, C. B. **Reaproveitamento do rejeito de minério de ferro, liberado no desastre envolvendo o rompimento da barragem de fundão (MG), na produção de blocos cerâmicos. 2019.** Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, MG.