



Caracterização geotécnica e geoquímica dos rejeitos da barragem da Mina Córrego do Feijão, em Brumadinho (MG), em decorrência do desastre de 25/01/2019

Aluno: C. C. Pereira*

Orientador: J. L. Picanço*

*Instituto de Geociências (IG-UNICAMP), DGRN

Resumo

O rompimento da barragem de rejeitos da Mina do Córrego do Feijão em janeiro de 2019, no município de Brumadinho - MG espantou o país. Com mais de 250 mortos e 11 desaparecidos, diversas entidades do país se reuniram para entender os motivos e consequências deste desastre. Devido às formações ferríferas bandadas, o Quadrilátero Ferrífero tem como principal material de exploração os minérios de ferro. Esse tipo de minério possui peculiaridades, principalmente em relação aos subprodutos da etapa de beneficiamento. Os rejeitos da mineração de ferro possuem densidades maiores em frações granulométricas mais finas devido a minerais como hematita ($5,20$ a $5,26 \text{ mg/cm}^3$) e goethita ($3,30$ a $4,30 \text{ g/cm}^3$), pouca ou nenhuma plasticidade ($\leq 35\%$), sendo suscetível ao fenômeno de liquefação. Robertson *et al.* (2019), afirmam que o gatilho para o rompimento da barragem foi a liquefação estática, que gerou um fluxo muito intenso de lama e detritos. A barragem de rejeitos que rompeu foi construída utilizando o método de alteamento a montante, e estudos geotécnicos indicavam que havia risco de acidente. O rejeito que se depositou ao longo do Córrego Ferro-Carvão é mal graduado, em sua maior parte na fração areia fina, rico em minerais ferrosos (hematita, goethita e magnetitas), densidades de até $4,9 \text{ g/cm}^3$ e baixa ou nenhuma plasticidade. Estes materiais também apresentam valores elevados de metais pesados, como Cd, Cu, Hg, Cr, Ni e Mn, trazendo riscos ambientais. Este caso é similar em diversos aspectos ao desastre que ocorreu em Mariana (MG) de 2015, com diferenças importantes em relação a granulometria. Ainda assim, é necessário realizar novas amostragens e trabalhos de campo de modo a entender a gravidade da situação e planejar medidas de prevenção e recuperação.

1. Introdução

Em 25 de janeiro de 2019, ocorreu o colapso da barragem de rejeitos da Mina do Córrego do Feijão, da Cia. Vale do Rio Doce, no município de Brumadinho-MG. A massa de lama foi liberada, destruindo e soterrando construções da mina, causando destruição nas construções a jusante, além de 259 mortos e 11 desaparecidos (Wise Uranium Project, 2019).

O município de Brumadinho se situa na Região Metropolitana de Belo Horizonte (Figura 1), dentro do Quadrilátero Ferrífero, área extremamente propícia para a extração de minérios de ferro (UHLEIN e NOCE, 2012). Sendo assim, tem sua origem atrelada às atividades de extração de recursos minerais, principalmente minérios de ferro (CENACID, 2019).

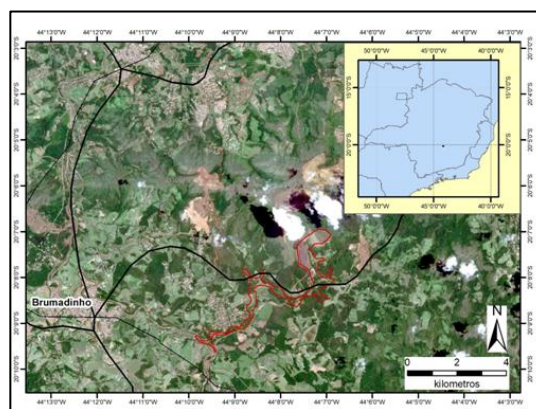


Figura 1: Localização da área de estudo. O polígono vermelho representa a área mais afetada pelo fluxo de rejeitos de mineração (CENACID, 2019).

Após pouco mais de um ano desde o rompimento, estudos concluíram (ROBERTSON *et al.*, 2019, VIGLIO *et al.*, 2019a) que o colapso da barragem

ocorreu devido ao processo de liquefação, gerado pelo aumento da pressão em materiais granulares, como é o caso dos rejeitos de mineração de ferro (SILVA, 2010; CASTILHO, 2017). Segundo Pereira (2005), o risco de liquefação é bem comum em barragens construídas utilizando-se o método de alteamento a montante, como era o caso na Mina Córrego do Feijão.

Durante a passagem do fluxo, o solo foi arrancado do leito e das margens do Córrego do Feijão. A mistura dos dois materiais se deu em diferentes proporções, e escoou para jusante. A deposição deste material se deu ao longo do córrego, na medida em que o fluxo perdia a força. Existe já uma avaliação preliminar sobre as áreas de maior e menor energia ao longo do córrego (CENACID, 2019). No entanto, pouco se sabe sobre a distribuição deste material ao longo do córrego em termos de mineralogia e granulometria.

2. Objetivos

Devido ao fato do desastre de Brumadinho ter ocorrido recentemente, os dados que possibilitam identificar as características dos rejeitos e dos solos após o rompimento da Barragem I da Mina Córrego do Feijão ainda são escassos.

Sendo assim, o objetivo inicial desta pesquisa foi realizar viagem de campo e coleta de amostras de solo, rejeitos e sua mistura para caracterização geotécnica a partir de ensaios de sedimentação e granulometria. Porém, devido ao isolamento social recomendado pela pandemia do COVID-19, foi necessário readequar o trabalho a esta nova realidade, uma vez que o trabalho de campo estava previsto para ocorrer entre março e abril de 2020.

Tendo isso em vista, o objetivo desta pesquisa é reunir os dados geotécnicos e geoquímicos dos rejeitos do rompimento da barragem em Brumadinho. A partir dessas informações disponíveis na literatura, pretende-se apontar as possíveis implicações ambientais deste material, ao comparar com os dados de caso similar, que ocorreu em 2015 no município de Mariana (MG).

3. Revisão bibliográfica

A Barragem I da Mina Córrego do Feijão foi construída em 1976 e continuou suas operações até o desastre no início de 2019, sendo que em 2006, no seu oitavo alteamento possuía uma altura total de aproximadamente 81 m (SILVA, 2010). O dique inicial foi feito utilizando rejeitos finos com revestimento de laterita compactada, sendo que a maioria dos alteamentos feitos no local foram feitos com o método de montante, um dos mais suscetíveis ao fenômeno de liquefação (PEREIRA, 2005; SILVA, 2010; CASTILHO, 2017).

O caso de Brumadinho não é o primeiro de rompimento de barragem de rejeitos na região do Quadrilátero Ferrífero. Somente na última década houve desastres similares em Mariana e Itabirito, ambos

no estado de Minas Gerais. O desastre de Mariana em novembro de 2015, quando o rompimento da barragem de rejeitos da Mina do Fundão provocou a contaminação do rio Doce, causou diversos impactos ambientais, sociais e econômicos cuja amplitude e efeitos ainda estão sendo estudados (FERNANDES *et al.*, 2016; MORGENSTERN *et al.*, 2016; NISHIJIMA & ROCHA, 2019; WISE, 2019; MACEDO *et al.*, 2020).

Apesar dos casos de rompimento das barragens de Mariana e Brumadinho serem ambas de minérios de ferro e a liquefação ser um dos causadores dos desastres, os rejeitos desses locais diferem principalmente quanto à granulometria. Os rejeitos da Mina do Fundão são predominantemente em frações de areia fina e silte, enquanto os da Mina Córrego do Feijão são mais silto-arenosos (MORGENSTERN *et al.*, 2016; ROBERTSON *et al.*, 2019; LIMA *et al.*, 2020).

O fenômeno da liquefação, em termos gerais, é o processo em que um material em seu estado natural (sólido ou gasoso) passa a um estado fluido. No caso do solo, este material se torna liquefeito, assumindo comportamento conhecido popularmente como “areia movediça” (PEREIRA, 2005; CASTILHO, 2017; BAO *et al.*, 2019).

Os materiais mais suscetíveis ao fenômeno de liquefação são aqueles de características granulares, fofos e se encontram saturados (BAO *et al.*, 2019). Um exemplo disso são os rejeitos de mineração de ferro (PEREIRA, 2005; SILVA, 2010).

A partir de atividades de extração de metais, como ferro e ouro, gera-se subprodutos que não possuem interesse econômico, chamados de rejeitos. Esses materiais, resultado do processo de beneficiamento do minério de ferro, podem ser fontes de contaminação, devido à presença de metais pesados e outros elementos que persistem na cadeia trófica (SILVA *et al.*, 2004)

4. Caracterização dos rejeitos

Segundo Silva *et al.* (2004) e Pereira (2005), os rejeitos de mineração de ferro e os solos proximais à essa atividade, possuem maior densidade, como consequência da presença de minerais mais densos nas rochas fonte, como hematita (5,20 a 5,26 mg/cm³) e goethita (3,30 a 4,30 g/cm³).

Por meio de difração de raios-x (DRX) Robertson *et al.* (2019), identificaram os principais minerais em amostras da lama e rejeitos da barragem após o rompimento. Os valores encontrados indicam uma maior concentração de minerais mais densos e ricos em ferro, como hematita, goethita e magnetita e quantidade abaixo do esperado de quartzo.

Segundo Silva (2010), a partir de ensaios geotécnicos realizados com os rejeitos da barragem da Mina Córrego do Feijão, foi possível classificar que os rejeitos são predominantemente na fração silte e areia fina, sendo caracterizados como rejeitos arenosos-siltosos mal graduados. Além disso, a maioria das amostras de rejeito apresentam comportamento não

plástico, com limite de liquidez abaixo de 35%, indicando um potencial ao fenômeno de liquefação (SILVA, 2010).

Após o rompimento da barragem em janeiro de 2019, foram realizados novos ensaios de granulometria com os rejeitos grossos coletados na região em que havia os taludes da barragem (ROBERTSON *et al.*, 2019). Os resultados desses novos ensaios seguem o mesmo padrão encontrado por Silva (2010), como pode ser visto na Figura 2.

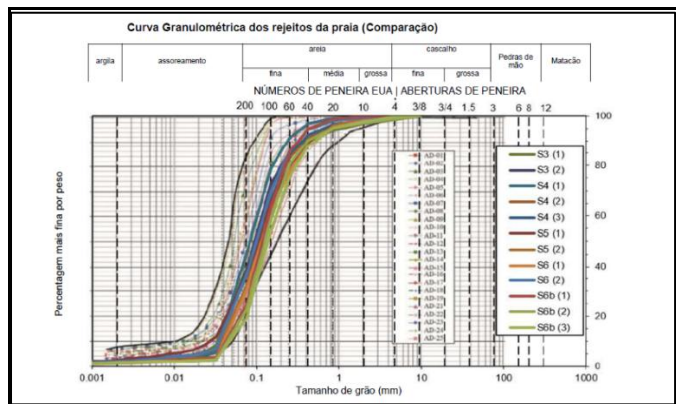


Figura 2: Comparação das curvas granulométricas dos rejeitos de 2010 e 2019 (ROBERTSON *et al.*, 2019).

Para identificar as concentrações dos principais elementos dos rejeitos da Barragem I da Mina Córrego do Feijão foram coletadas seis amostras de rejeitos, bem como amostras de águas e sedimentos ao longo do rio Paraopeba (VIGLIO *et al.*, 2019b). Na Tabela 1 constam os valores medianos em ppm e porcentagem (somente para Al e Fe) para os elementos químicos que possuem diferença significativa entre os rejeitos e sedimentos da bacia do rio Paraopeba antes e após o rompimento.

Tabela 1: Valores medianos de alguns elementos químicos dos rejeitos da Barragem I da Mina Córrego do Feijão, das águas e sedimentos coletados em entre fevereiro e março de 2019, e dados anteriores ao rompimento de 2009 a 2011 (adaptado do VIGLIO *et al.*, 2019b).

Elemento	Mediana rejeito (2019)	Mediana da bacia (março/2019)	Mediana da bacia (2009-2011)
Al (%)	1,365	0,515	1,300
As	17	5	3
Ba	159,5	31,5	51,0
Be	2,0	0,5	0,5
Cd	29,75	6,85	7,20
Co	0,405	0,030	0,030
Cu	88,75	7,30	15,60
Fe203 (%)	68,45	17,38	3,11
Hg	0,145	0,020	0,030

In	23,10	3,35	12,60
Li	25,85	8,70	15,00
Mn	6831	459	351
Mo	1,675	0,430	0,350
Ni	0,07	0,01	0,02
P	28,5	3,7	6,0
Pb	936,0	219,5	214,0
Sr	15	2	7
Zn	71,5	23,5	29,0

5. Discussões finais

Devido à proximidade espacial e cronológica dos rompimentos das barragens do Fundão e Córrego do Feijão, bem como similaridades dos tipos de mineração e causas do rompimento, a comparação entre os dois eventos se torna relevante (Tabela 2).

Tabela 2: Comparação das principais características dos rejeitos das barragens do Fundão (Mariana - MG) e Córrego do Feijão (Brumadinho - MG). Dados retirados de Fernandes *et al.* (2016), Morgenstern *et al.* (2016), Robertson *et al.* (2019), Viglio *et al.* (2019b), Lima *et al.* (2020).

Características dos rejeitos	Fundão	Córrego do Feijão
fração granulométrica predominante	silte	areia fina
volume	55 - 62 milhões m ³	9,7 milhões m ³
alcance da deposição	40 km	8,4 km
principais minerais (lama)	hematita (43%) goethita (31%) quartzo (19%) caulinita (4,4%)	hematita (48%) goethita (25,5%) quartzo (10%) caulinita (9%)
gravidade específica	grosso - 2,85 lama - 3,95	grosso - 4,90 lama - 4,00
plasticidade	grosso - não plástico lama - 7 a 11%	grosso - não plástico lama - 18%

Segundo Lima *et al.* (2020), a principal diferença entre os rompimentos das barragens em Mariana (MG) e Brumadinho (MG) está na gradação dos rejeitos. Os rejeitos da barragem do Fundão possuem uma maior predominância de fração silte e argila, até mesmo nos rejeitos grossos, enquanto os

rejeitos da barragem do Córrego do Feijão são em maioria na fração areia fina (MORGENSTERN *et al.*, 2016; ROBERTSON *et al.*, 2019).

A diferença de granulometria pode estar relacionada a outra propriedade dos rejeitos, que é a composição mineralógica. Apesar de nos dois casos os principais minerais serem os mesmos (hematita, goethita, quartzo e caulinita), suas concentrações são diferentes, principalmente para o quartzo (MORGENSTERN *et al.*, 2016; ROBERTSON *et al.*, 2019). Essa diferença mineralógica influencia na densidade dos rejeitos, fazendo com que os rejeitos grossos da barragem do Fundão (2,85 g/cm³), percorram uma distância maior que os de Brumadinho (4,90 g/cm³) (PINTO, 2006; ROBERTSON *et al.*, 2019; LIMA *et al.*, 2020).

Lima *et al.* (2020) identificaram que, após o rompimento, o fluxo de lama e rejeitos pode ser dividido em quatro zonas de dano crítico (ZDC), conforme a intensidade e o tipo de fluxo (Figura 3).

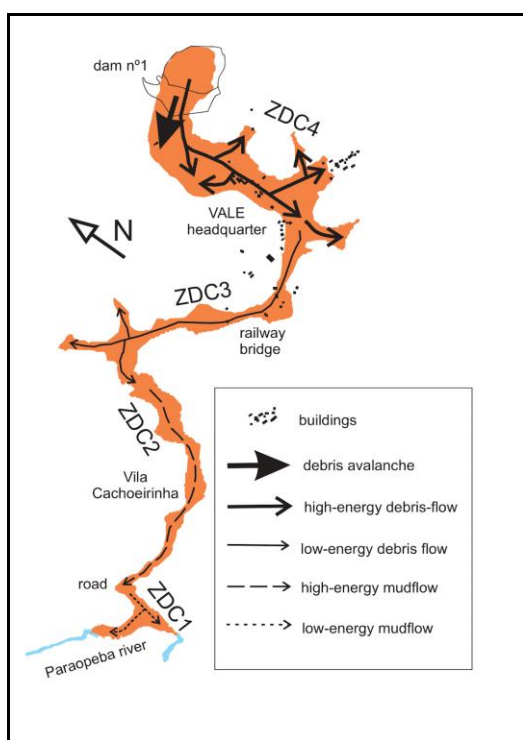


Figura 8: Localização das Zonas de dano crítico (ZDC) ao longo do Córrego Ferro-Carvão (Lima *et al.*, 2020).

Ao longo do Córrego Ferro-Carvão, o fluxo de material passa de um *debris flow* (ZDC4 e ZDC3) para *mud flow* (ZDC1 e ZDC2), indicando não somente uma mudança na velocidade e força de destruição do fluxo, mas também na granulometria que se deposita (LIMA *et al.*, 2020, no prelo).

Fernandes *et al.* (2016) apontaram que após o rompimento da barragem do Fundão, foi identificado teores elevados de metais pesados nas águas. Na caracterização geoquímica dos rejeitos da Mina Córrego do Feijão (Tabela 1) foram identificados valores mais altos para alguns metais pesados, como mercúrio, níquel e cromo, que podem provocar a bioacumulação destes

elementos (FERNANDES, *et al.*, 2016; VIGLIO *et al.*, 2019b).

6. Conclusões

Tendo em vista a diferença na composição granulométrica ao longo do fluxo da lama de rejeito após o rompimento da barragem, recomenda-se a investigação das condições geotécnicas e geoquímicas tendo como critério de amostragem as zonas de dano crítico. Uma vez que até então, a literatura realizou amostragens de monitoramento do desastre, apresentando resultados gerais, porém com a perspectiva dos diferentes tipos de fluxo que ocorreram na área, seria interessante identificar como cada ZDC varia em composição granulométrica, mineralógica e química (ROBERTSON *et al.*, 2019; VIGLIO *et al.*, 2019a; VIGLIO *et al.*, 2019b; LIMA *et al.*, 2020).

Além disso, os impactos ambientais, sociais e econômicos ainda estão sendo dimensionados, sendo importante manter atividades de pesquisa na região, não somente para entender esses efeitos, mas também como fomento para projetos de recuperação da área.

Além disso, os impactos ambientais, sociais e econômicos ainda estão sendo dimensionados, sendo importante manter atividades de pesquisa na região, não somente para entender esses efeitos, mas também como fomento para projetos de recuperação da área.

7. Referências Bibliográficas

BAO, X., *et al.* **Soil liquefaction mitigation in geotechnical engineering: an overview of recently developed methods.** Soil Dynamics And Earthquake Engineering, [S.L.], v. 120, p. 273-291, maio 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.soildyn.2019.01.020>.

CASTILHO, Breno de Matos. **Análise dos gatilhos de liquefação dinâmica e modelagem numérica da Barragem do Germano.** 2017. 97 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Geotécnica, Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2017. Disponível em:

<<http://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/8543>>. Acesso em: 13 fev. 2020.

CENACID (CENTRO DE APOIO CIENTÍFICO EM DESASTRES - Universidade Federal do Paraná). **Missão CENACID emergencial para apoio a resposta ao desastre relacionado ao rompimento da barragem de rejeitos da Mina Córrego do Feijão, pertencente a Cia. Vale do Rio Doce, no município de Brumadinho-MG.** Brumadinho: S.e., 2019. 30 p.

FERNANDES, G. W., *et al.* **Deep into the mud: ecological and socio-economic impacts of the dam breach in Mariana, Brazil.** *Natureza & Conservação*, [S.L.], v. 14, n. 2, p. 35-45, jul. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ncon.2016.10.003>.

LIMA, R. E., *et al.* **An anthropogenic flow type gravitational mass movement: the Córrego do Feijão tailings dam disaster, Brumadinho, Brazil.** *Landslides* [S.L.], p. 1-10, 2020. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s10346-020-01450-2>.

MACÊDO, A. K. S. *et al.* **Histological and molecular changes in gill and liver of fish (*Astyanax lacustris* Lütken, 1875) exposed to water from the Doce basin after the rupture of a mining tailings dam in Mariana, MG, Brazil.** *Science Of The Total Environment*, [S.L.], v. 735, p. 1-13, set. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139505>.

MORGENSTERN, N. R. *et al.* **Fundão Tailings Dam Review Panel: report on the immediate causes of the failure of the fundão dam.** S.L.: S.e., 2016. 88 p.

NISHIJIMA, M.; ROCHA, F. F. **An economic investigation of the dengue incidence as a result of a tailings dam accident in Brazil.** *Journal Of Environmental Management*, [S.L.], v. 253, p. 1-6, jan. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109748>.

PEREIRA, E. L. **Estudo do potencial de liquefação de rejeitos de minério de ferro sob carregamento estático.** 2005. 185 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil da Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2005. Disponível em: <<https://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/6039>>. Acesso em: 13 fev. 2020.

PINTO, C. S. **Curso Básico de Mecânica de Solos.** 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006. 367 p.

ROBERTSON P. K., MELO L., WILIAMS D. J., WILSON G. W. (2019). **Report of the Expert Panel on the Technical Causes of the Failure of Feijão Dam I.** December 12 2019. Disponível em: <<http://www.b1technicalinvestigation.com/pt/>>. Acesso em: 13/02/2020.

SILVA, S. R. *et al.* **Caracterização de rejeito de mineração de ouro para avaliação de solubilização de metais pesados e arsênio e revegetação local.** *Rev. Bras. Ciênc. Solo*, Viçosa, v. 28, n. 1, p. 189-196, Feb. 2004. Available from <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-06832004000100018&lng=en&nrm=iso>. access on 22 Apr. 2019. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832004000100018>.

SILVA, W. P. da. **Estudo do potencial de liquefação estática de uma barragem de rejeito alteada para montante aplicando a metodologia de Olson (2001).** 2010. 120 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Geotécnica, Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2010. Disponível em: <<http://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/2454>>. Acesso em: 13 fev. 2020.

UHLEIN, A.; NOCE, C. M. **Quadrilátero Ferrífero.** In: HASUI, Yociteru *et al.* **Geologia do Brasil.** São Paulo: Beca, 2012. p. 228-235.

VIGLIO, E. P. *et al.* **Monitoramento Especial da Bacia do Rio Paraopeba: Relatório 02 - Monitoramento Geoquímico.** Belo Horizonte: Cprm - Serviço Geológico do Brasil, 2019a. 24 p.

VIGLIO, E. P. *et al.* **Monitoramento Especial da Bacia do Rio Paraopeba: Relatório 03 - Monitoramento Geoquímico.** Belo Horizonte: Cprm - Serviço Geológico do Brasil, 2019b. 24 p.

WISE. **Chronology of major tailings dam failures.** WISE Uranium Project-Tailings Dam Safety. Disponível em: <<http://www.wise-uranium.org/mdaf.html>>. Acessado em: 10/02/2019