

MINERALOGIA DO RESÍDUO DE MINÉRIO DE FERRO LANÇADO NO RIO DOCE APÓS O ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE FUNDÃO

Thiago Curty Vimercati¹, Mirna Aparecida Neves¹, Fabricia Benda de Oliveira¹, Gean Carlos da Silva Abreu¹, Carlos Henrique Rodrigues de Oliveira².

¹Universidade Federal do Espírito Santo, Alto Universitário, s/n, CP 16, Guararema - 29500-000, Alegre-ES, Brasil, thiago.vimercati@edu.ufes.br, mirna.neves@ufes.br, fabricia.oliveira@ufes.br, gean.abreu@edu.ufes.br.

²Instituto de Educação, Ciência e Tecnologia do Espírito Santo, Rodovia ES-482, Km 47, Distrito de Rive - 29500-000, Alegre - ES, Brasil, carlos.oliveira@ifes.edu.br.

Resumo

Em 05 de novembro de 2015 ocorreu o rompimento da barragem de Fundão, no município de Mariana-MG, liberando uma onda de lama de rejeito de minério de ferro. Esse desastre modificou intensamente a dinâmica sedimentar e a morfologia do Rio Doce, aumentando a quantidade de material fino oriundo do rejeito de beneficiamento do ferro. O presente trabalho apresenta a caracterização mineralógica do rejeito liberado no Rio Doce após o rompimento da barragem. As fases minerais foram determinadas utilizando difratometria de raio-X (DRX), e sua quantificação foi feita através do refinamento de Rietveld. Os resultados apresentados indicam que as concentrações de óxidos de ferro ao longo do Rio Doce, são mais baixas no material depositado após a barragem hídrica de Candonga e estão diminuindo ao longo dos anos analisados (2016 a 2022).

Palavras-chave: Óxido de Ferro. Difratometria de Raio-X. Meio ambiente. Contaminação.

Área do Conhecimento: Geociências.

Introdução

O rompimento da barragem de Fundão, no município de Mariana-MG, ocorreu no dia 05 de novembro de 2015, liberando cerca de 43 milhões de m³ de rejeito de minério de ferro no meio ambiente. Este rejeito foi transportado ao longo do Rio Doce por 663,2 km, até atingir o Oceano Atlântico, na costa do Espírito Santo. A falha na barragem da Samarco Mineração foi responsável pela morte de 19 pessoas, e é considerada a maior tragédia ambiental brasileira (IBAMA, 2015; Hatje *et al.*, 2017).

Esse desastre modificou intensamente a dinâmica sedimentar e a morfologia do Rio Doce, aumentando a quantidade de material fino oriundo do rejeito de beneficiamento do ferro (Duarte *et al.*, 2023). O fluxo de lama causou a erosão e assoreamento da planície aluvial, ao longo do canal, recobriu os solos e os sedimentos fluviais com uma espessa camada de lama, além de prejudicar a qualidade da água (Hatje *et al.*, 2017; Duarte *et al.*, 2021). O rejeito se acumulou na planície aluvionar e no estuário do Rio Doce, e espalhou-se pela plataforma oceânica, principalmente em direção ao norte (Aguiar *et al.*, 2023)

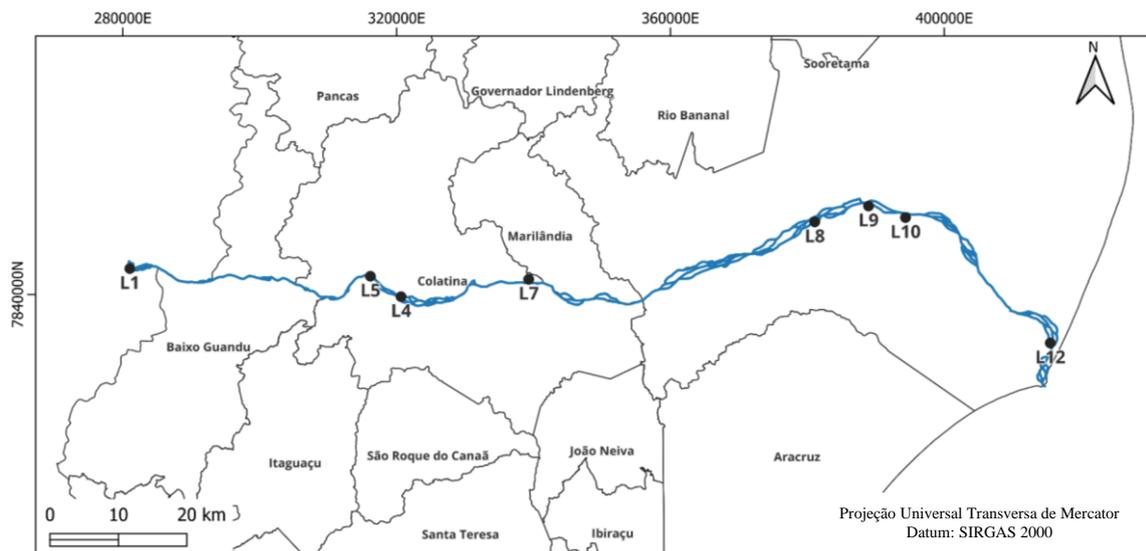
O rejeito liberado é proveniente da exploração de itabiritos do Quadrilátero Ferrífero. O processo de beneficiamento da mineração de ferro inclui a britagem, moagem e flotação, que são facilitados pelo uso de agentes químicos (Sá *et al.*, 2023). A fração fina liberada no ambiente é composta por quartzo, óxidos de ferro (hematita, goethita e magnetita) e por filossilicatos (micas e caulinita) (Valeriano *et al.*, 2019; Duarte *et al.*, 2023). Análises de extração química sequencial, demonstraram que os óxidos de ferro são a fonte primária de elementos traços possivelmente tóxicos (Camêlo *et al.*, 2024), portanto em episódios de fortes chuvas e erosão, onde o ambiente torna-se oxi-redutor, estes elementos podem ser gradualmente liberados na bacia hidrográfica (Hatje *et al.*, 2017; Duarte *et al.*, 2021)

Dessa forma, o presente trabalho apresenta a caracterização mineralógica do rejeito liberado no Rio Doce após o rompimento da barragem de Fundão, no Baixo Rio Doce, à partir da Usina Hidrelétrica Candonga.

Metodologia

Foram coletadas 8 amostras em abril de 2022, ao longo do baixo Rio Doce, no estado do Espírito Santo, entre os municípios de Baixo Guandú e Linhares, seguindo os pontos definidos por Duarte (2020), de acordo com a Figura 1. A amostragem foi realizada nas margens do rio, em áreas onde havia acumulação de lama, por meio de trincheiras com cerca de 60 cm de profundidade. Também houve a coleta de amostras do rejeito retido na Usina Hidrelétrica de Candonga, localizada entre os municípios Rio Doce e Santa Cruz do Escalvado, em Minas Gerais.

Figura 1 - Mapa de localização das amostras coletadas.



Fonte: O autor.

As amostras foram quarteadas nas frações areia, silte e argila, de acordo com Teixeira *et al.* (2017). Para isso, 50 gramas de amostra foi dispersada com 25 ml de solução de hidróxido de sódio (NaOH) 1 mol L⁻¹. A fração areia foi obtida por tamisação, enquanto o silte e argila foram separados por diferença de densidade em proveta de 1 litro. Posteriormente, todas as frações foram maceradas em almofariz de ágata, e totalmente passadas em peneira de 0,045 mm. A análise foi realizada no difratômetro de raio-X, com intervalo de leitura entre 04° e 70°, ângulo 2θ, e a uma taxa de varredura de 0,7°/min. A identificação e quantificação das fases minerais foi realizada pelo método de Rietveld, utilizando o banco de dados *Crystallography Open Database* (Gražulis *et al.*, 2009).

Resultados

A Tabela 1 exibe os resultados da interpretação e quantificação das fases minerais presentes nos difratogramas obtidos. A fração areia é composta majoritariamente por quartzo e micas (biotita e muscovita). Enquanto a fração silte apresentou como principal constituinte a caulinita, seguida pela biotita e quartzo, todas as amostras apresentaram uma baixa concentração de óxido de ferro, seja na forma mineral da hematita ou goethita. Na fração argila também há predominância da caulinita e biotita, porém a maior concentração de óxidos de ferro está na forma de goethita. A vermiculita é fruto da alteração das micas e aparece em baixa quantidade em todas as frações granulométricas.

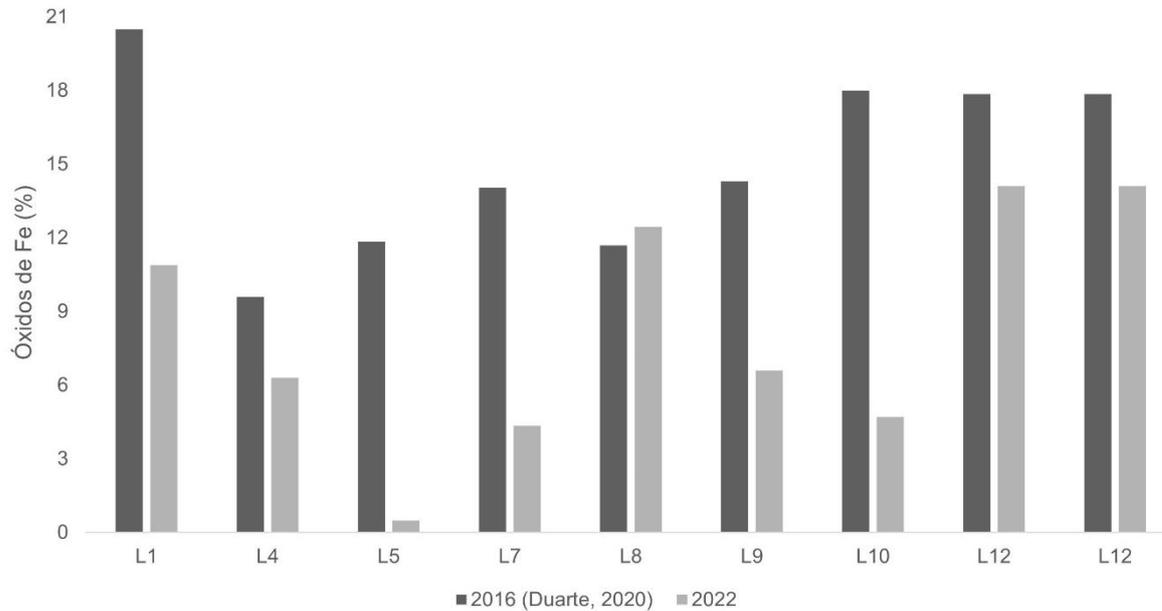
Nota-se que a amostra dos rejeitos retidos na barragem de Candonga, difere-se das demais por apresentar maior teor de óxidos de ferro, com a hematita e goethita aparecendo até mesmo na fração areia. No silte e argila a concentração destes minerais chega a 32,7%, e se verifica a presença em menor quantidade de ilmenita. Outra observação a respeito dessa amostra está no seu teor nulo de micas na fração areia e silte.

| Amostra | Candonga | L1 | L4 | L5 | L7 | L8 | L9 | L10 | L12 |
|----------------------|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Fração areia | | | | | | | | | |
| Quartzo | 94,8 | 95,1 | 58,6 | 46,3 | 58,8 | 31,4 | 71,4 | 99,5 | 36,2 |
| Hematita | 3,9 | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Goethita | 0,8 | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Biotita | - | 2,7 | 36,2 | 2 | 25,9 | 38,8 | 4 | 0 | 33,4 |
| Muscovita | - | 2,2 | 5,2 | 51,4 | 14,6 | 27,7 | 23,7 | 0,2 | 29 |
| Vermiculita | 0,5 | - | - | 0,3 | 0,7 | 2,1 | 0,9 | 0,3 | 1,4 |
| Fração silte | | | | | | | | | |
| Quartzo | 51,1 | 14,8 | 24,5 | 6,7 | 6,8 | 1,7 | 4,8 | 7,1 | 2,2 |
| Hematita | 23,6 | - | 1,8 | - | 2,9 | 1 | 1 | 0,6 | 1 |
| Goethita | 8,2 | - | - | 0,1 | 4,2 | 1,1 | - | - | 0,8 |
| ilmenita | 0,9 | - | 1,8 | - | - | - | - | - | - |
| Caulinita | 6,5 | 39,8 | 53,4 | 52,9 | 47,7 | 70,3 | 65,6 | 67,4 | 71,1 |
| Biotita | - | 44,6 | 17,6 | 35,6 | 37,3 | 24,8 | 26,4 | 20,8 | 19,9 |
| Muscovita | - | - | - | 3,5 | - | - | 0,9 | 4,1 | 3,7 |
| Vermiculita | 9,8 | 0,8 | 0,8 | 1,1 | 1 | 1,2 | 1,3 | - | 1,3 |
| Fração argila | | | | | | | | | |
| Hematita | 3,9 | - | - | 0,6 | 0,6 | 0,7 | 0,3 | - | 0,6 |
| Goethita | 25,5 | 21,8 | 9 | 0,3 | 1 | 22,1 | 11,3 | 8,8 | 25,8 |
| ilmenita | 3,3 | - | - | - | - | - | 0,6 | - | - |
| Caulinita | 28,5 | 55,7 | 50,2 | 70,5 | 60,2 | 77,1 | 58,6 | 45 | 53,6 |
| Biotita | 38,8 | - | 39,6 | 28,7 | 31,5 | - | 24,1 | 40,1 | - |
| Muscovita | - | 22,4 | - | - | - | - | - | 5,1 | 17,4 |
| Vermiculita | - | - | 1,1 | - | 6,8 | - | 5,2 | 1,1 | 2,6 |

Tabela 1 - Composição mineral das amostras estudadas, após refinamento de Rietveld.
Fonte: O autor.

Ao comparar os resultados obtidos em 2022 com os de amostras coletadas nos mesmos locais em 2016 por Duarte (2020) (Figura 2), observa-se um padrão de redução no teor de óxidos de ferro ao longo dos anos em todos os pontos, com exceção da amostra L8, onde houve aumento.

Figura 2 - Gráfico comparativo das concentrações de Óxidos de Ferro no Baixo Rio Doce



Fonte: O autor.

Discussão

Valeriano *et al.* (2019) estudaram os afluentes do Rio Doce, próximos à barragem de Fundão e demonstraram teores de óxidos de ferro entre 33,9 e 48,2%, com um padrão de diminuição da concentração sentido jusante. Esses teores se aproximam dos obtidos na amostra de Candonga, porém os valores encontrados nas demais amostras são inferiores. O padrão de redução da concentração de óxidos de ferro a jusante não foi observado nas análises atuais, nem em Duarte (2020). Observa-se um aumento da concentração na amostra L12, que corresponde à região estuarina do rio, corroborando com o encontrado por Aguiar *et al.* (2023), que considerou a foz do Rio Doce um local de acumulação dos rejeitos da tragédia.

Conclusão

Os resultados apresentados indicam que as concentrações de hematita e goethita ao longo do Rio Doce, são mais baixas no material depositado após a barragem hídrica de Candonga e estão diminuindo ao longo dos anos. A concentração destes minerais é maior na amostra coletada no lago da usina hidrelétrica, indicando que o rejeito pode estar retido nas obras de engenharia ao longo do rio.

Referências

- AGUIAR, V.M.C.; BASTOS, A. C.; QUARESMA, V. da S.; ORLANDO, M. T. D.; VEDOATO, F.; CAVICHINI, A. S.; BAPTISTA NETO, J. A. Trace metals distribution along sediment profiles from the Doce River Continental Shelf (DRCS) 3 years after the biggest environmental disaster in Brazil, the collapse of the Fundão Dam. **Regional Studies In Marine Science**, [S.L.], v. 63, p. 103001, out. 2023.
- CAMÊLO, D. de L.; SILVA FILHO, L. A. da; ARRUDA, D. L. de; CYRINO, L. M.; BARROSO, G. F.; CORRÊA, M. M.; BARBEIRA, P. J. S.; MENDES, D. B.; PASA, V. M. D.; PROFETI, D. Mineralogical fingerprint and human health risk from potentially toxic elements of Fe mining tailings from the Fundão dam. **Science Of The Total Environment**, [S.L.], v. 912, p. 169328, fev. 2024.

DUARTE, E. B. **Impacto do resíduo proveniente do rompimento da barragem de Fundão (MG) nos sedimentos do Baixo Rio Doce**. 2020. 70 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Agroquímica, CCENS, Universidade Federal do Espírito Santo, Alegre, 2020.

DUARTE, E. B.; NEVES, M. A.; OLIVEIRA, F. B. de. Main chemical and mineralogical components of the Rio Doce sediments and the iron ore tailing from the Fundão Dam disaster, Southeastern Brazil. **Environmental Monitoring And Assessment**, [S.L.], v. 195, n. 4, p. 1-13, 9 mar. 2023.

DUARTE, E. B.; NEVES, M. A.; OLIVEIRA, F. B. de; MARTINS, M. E.; OLIVEIRA, C. H. R. de; BURAK, D. L.; ORLANDO, M. T. D.; RANGEL, C. V. G. T. Trace metals in Rio Doce sediments before and after the collapse of the Fundão iron ore tailing dam, Southeastern Brazil. **Chemosphere**, [S.L.], v. 262, p. 127879, jan. 2021.

GRAZULIS, S.; CHATEIGNER, D.; DOWNS, R. T.; YOKOCHI, A. F. T.; QUIRÓS, M.; LUTTEROTTI, L.; MANAKOVA, E.; BUTKUS, J.; MOECK, P.; BAIL. Crystallography Open Database – an open-access collection of crystal structures. **Journal Of Applied Crystallography**, [S.L.], v. 42, n. 4, p. 726-729, 30 maio 2009.

HATJE, V.; PEDREIRA, Rodrigo M. A.; REZENDE, Carlos Eduardo de; SCHETTINI, Carlos Augusto França; SOUZA, Gabriel Cotrim de; MARIN, Danieli Canaver; HACKSPACHER, Peter Christian. The environmental impacts of one of the largest tailing dam failures worldwide. **Scientific Reports**, [S.L.], v. 7, n. 1, p. 1-13, 6 set. 2017.

IBAMA. Laudo Técnico Preliminar: Impactos ambientais decorrentes do desastre envolvendo o rompimento da barragem de Fundão, em Mariana, **Minas Gerais**. In: Minas Gerais. 2015.

SÁ, R. T. S. de; PRIANTI, M. T. A.; ANDRADE, R.; SILVA, A. O.; BATISTA, É. R.; SANTOS, J. V. dos; SILVA, F. M.; CARNEIRO, M. A. C.; GUILHERME, L. R. G.; CHAKRABORTY, S. Detailed characterization of iron-rich tailings after the Fundão dam failure, Brazil, with inclusion of proximal sensors data, as a secure basis for environmental and agricultural restoration. **Environmental Research**, [S.L.], v. 228, p. 115858, jul. 2023.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de Métodos de Análise de Solo**. 3. ed. Brasília: Embrapa, 2017. 577 p. (ISBN 978-85-7035-771-7).

VALERIANO, C. de M.; NEUMANN, R.; ALKMIM, A. R.; EVANGELISTA, H.; HEILBRON, M.; AGUIAR NETO, C. C.; SOUZA, G. P. de. Sm–Nd and Sr isotope fingerprinting of iron mining tailing deposits spilled from the failed SAMARCO Fundão dam 2015 accident at Mariana, SE-Brazil. **Applied Geochemistry**, [S.L.], v. 106, p. 34-44, jul. 2019.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio financeiro da Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo (FAPES). Agradecemos a Universidade Federal do Espírito Santo e ao Instituto Federal do Espírito Santo pelo suporte e estrutura, ao Laboratório de Engenharia Química 1 e ao Laboratório de Geologia Aplicada.