

VARIAÇÕES COMPOSICIONAIS E MINERALÓGICAS DO RESÍDUO DE MINÉRIO DE FERRO DEPOSITADO NO RIO DOCE APÓS O DESASTRE DE MARIANA

Gean Carlos da Silva Abreu¹, Fabricia Benda de Oliveira¹, Mirna Aparecida Neves¹, Eduardo Baudson Duarte², João Filipe Leite Vargas¹, Carlos Henrique Rodrigues de Oliveira³

¹ Universidade Federal do Espírito Santo, Alto Universitário, s/n, Guararema, 29500-000, Alegre, ES, Brasil, gean.abreu@edu.ufes.br, fabricia.oliveira@ufes.br, mirna.neves@ufes.br, filipeleite48@gmail.com

² Instituto Federal do Espírito Santo, Campus Nova Venécia, Rodovia Miguel Curry Carneiro, 799, Santa Luzia, 29800-000, Nova Venécia, ES, Brasil, eduardo.duarte@ifes.edu.br

³ Instituto Federal do Espírito Santo, Campus de Alegre, Rodovia ES-482 (Cachoeiro-Alegre), Km 72, 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, em Mariana (MG), liberando resíduo de minério de ferro no Rio Doce (MG/ES). Este trabalho apresenta a caracterização composicional e mineralógica do resíduo depositado no Baixo Rio Doce, desde a divisa de Minas Gerais com o Espírito Santo até o Oceano Atlântico. Foram analisadas amostras coletadas desde 2016 até 2024, além do material retido na Barragem de Candonga. A granulometria indica que o resíduo retido em Candonga é argilo-siltoso, enquanto no Rio Doce variou de siltoso em 2016 para predominantemente arenoso nos anos seguintes. A composição química mostra que, inicialmente, o Fe era predominante, mas, ao longo dos anos, o Si passou a prevalecer. Foram identificados quartzo, caulinita, muscovita, gibbsita e hematita, com traços de goethita apenas em 2016, 2022 e Candonga. Os resultados sugerem que o resíduo foi progressivamente retrabalhado pela dinâmica fluvial e incorporado aos sedimentos, tornando-se, em muitos locais amostrados em 2023 e 2024, indistinguível do material natural do rio.

Palavras-chave: Barragem de Fundão. Rejeito de Mineração. Impacto Ambiental.

Área do Conhecimento: Ciências Exatas e da Terra.

Introdução

O rompimento da barragem de Fundão, ocorrido em 05 de novembro de 2015, em Mariana (MG), foi um dos maiores desastres ambientais do Brasil, liberando milhões de metros cúbicos de resíduo de minério de ferro no ambiente. Esse evento impactou de forma intensa a bacia do Rio Doce, desde os trechos próximos à barragem até a foz, no Oceano Atlântico, comprometendo ecossistemas aquáticos, comunidades humanas e a dinâmica fluvial regional (Queiroz et al., 2018; Vergílio et al., 2021; Duarte et al., 2021; 2023). Parte do material ficou retida na Usina Hidrelétrica de Candonga, em Minas Gerais, mas uma fração expressiva foi transportada ao longo do rio, depositada parcialmente na área continental e atingindo a área oceânica, no Espírito Santo.

Desde então, o resíduo depositado passou a se integrar aos processos naturais de transporte e sedimentação, tornando essencial compreender sua composição, distribuição e comportamento ao longo do tempo. Nesse contexto, a caracterização mineralógica desses sedimentos surge como uma ferramenta fundamental para avaliar sua interação com o ambiente e fornecer subsídios para estudos ambientais, monitoramento e estratégias de recuperação da bacia do Rio Doce. Segundo Oliveira et al. (2025), até sete anos após o desastre, ainda havia resíduo de minério de ferro depositado na área

A Ciência do NANO e seu impacto transformador no MACRO

continental do Espírito Santo. Este material está sendo incorporado aos sedimentos aluviais, principalmente em locais com baixa energia hídrica, o que pode favorecer a liberação de metais potencialmente perigosos pelo resíduo caso ocorram variações das condições de oxirredução.

Assim, este trabalho teve como objetivo realizar a caracterização química e mineralógica do resíduo depositado no trecho do Baixo Rio Doce, a jusante da Usina Hidrelétrica de Candonga (Figura 1). As amostras foram coletadas na barragem de Candonga em Minas Gerais e ao longo da planície aluvionar do Rio Doce no Espírito Santo nos anos de 2016, 2022, 2023 e 2024.

Figura 1 - Mapa de localização dos pontos de coleta de amostras de resíduo de minério de ferro na porção do Baixo Rio Doce, no estado do Espírito Santo.



Fonte: Martins et al. (2023).

Metodologia

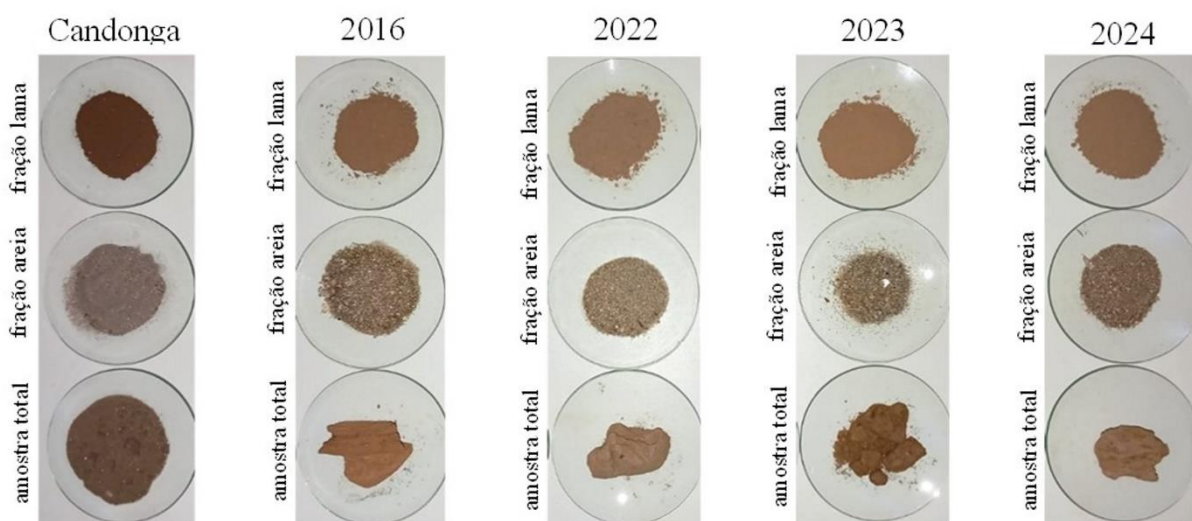
A caracterização granulométrica das amostras foi conduzida por meio de peneiramento, permitindo distinguir com precisão as frações texturais predominantes em cada local de coleta. A composição química foi determinada por espectrometria de fluorescência de raios-X (FRX), empregando detector semicondutor de Si(Li), radiação de 50 kV e corrente de 30 μ A, abrangendo o intervalo de elementos entre sódio (Na) e urânio (U). Esse procedimento possibilitou uma análise abrangente da concentração dos principais óxidos constituintes do resíduo.

A mineralogia foi investigada em amostras compostas utilizando difratometria de raios-X (DRX), em goniômetro equipado com tubo de cobre, com intervalo de leitura de ângulo 2θ entre 4° e 60° , passo de $0,02^\circ$ e taxa de varredura de 4° por minuto, assegurando alta resolução na identificação das fases minerais presentes. A interpretação dos difratogramas foi realizada com o auxílio de software especializado, associado a banco de dados cristalográficos, o que permitiu a identificação confiável das fases minerais. A quantificação relativa foi obtida por meio do método da Razão de Intensidade de Referência (RIR), possibilitando a avaliação semiquantitativa da contribuição de cada fase mineral no conjunto analisado.

Resultados

O resíduo de minério de ferro retido na barragem de Candonga possui textura predominantemente argilo-siltosa, enquanto amostras coletadas no Baixo Rio Doce em 2016 são essencialmente siltosas, com proporções secundárias de argila e areia. Já nas amostras de 2022, 2023 e 2024, predomina a fração arenosa e evidencia misturas entre resíduo e sedimentos ao longo do tempo. A Figura 2 mostra o aspecto macroscópico das amostras e de suas frações areia e lama. A fração areia é composta por uma mistura de grãos de quartzo e mica (muscovita), enquanto a fração lama, por sua coloração progressivamente mais clara, mostra teores menores de óxidos de ferro ao longo dos anos.

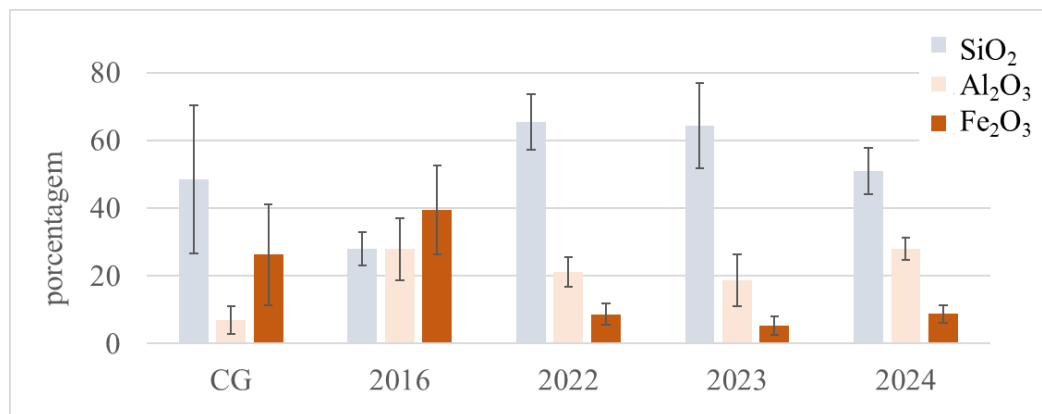
Figura 2 - Aspecto macroscópico de algumas amostras selecionadas de resíduo, coletadas na Barragem de Candonga e ao longo do Rio Doce, nos anos de 2016, 2022, 2023 e 2024.



Fonte: Autores (2025).

A composição química do resíduo apresenta altas concentrações de Si, Al e Fe (Figura 3). A porcentagem de Fe é mais alta nas amostras coletadas em 2016 e, ao longo dos anos, os teores são sempre mais baixos. Em Candonga, o Si predomina, provavelmente porque a fração retida na barragem é mais grossa (grãos maiores, na fração areia), na qual a sílica predomina. Já nos anos 2022, 2023 e 2024, o predomínio de sílica está relacionado à mistura de areias fluviais com o resíduo mineralário.

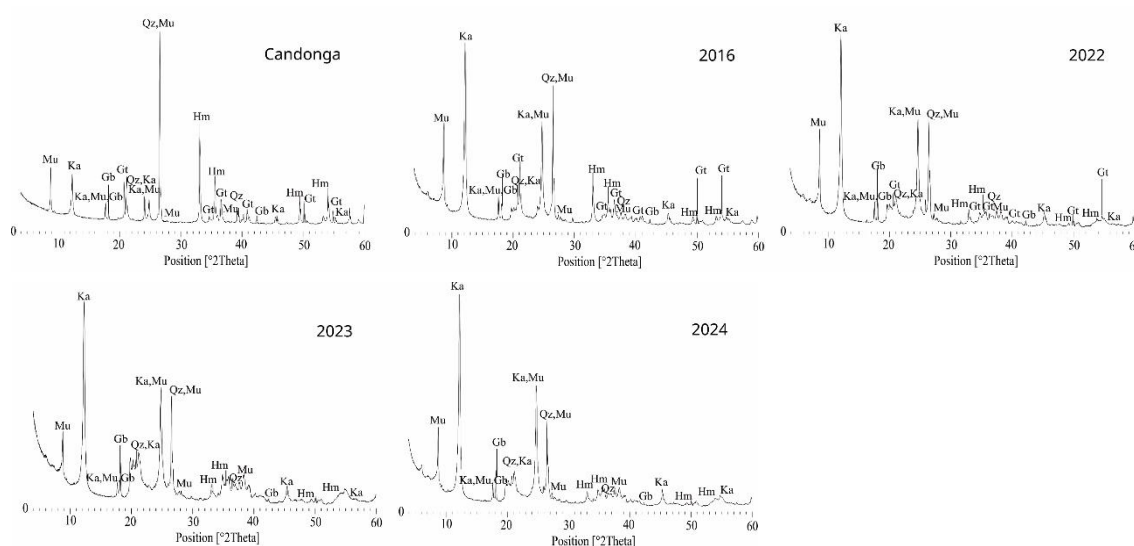
Figura 3 - Conteúdo de SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 nas amostras de resíduo de minério de ferro coletadas em Candonga (CG) e ao longo do Rio Doce nos anos de 2016, 2022, 2023 e 2024.



Fonte: Autores (2025).

Os minerais presentes nas amostras coletadas são: quartzo (SiO_2), caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$), muscovita ($\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$), gibbsita ($\text{Al}(\text{OH})_3$) e hematita (Fe_2O_3) (Figura 4). Também há traços de goethita ($\text{FeO}(\text{OH})$), presentes nas amostras de 2016, de Candonga e de 2022, mas ausentes nas coletas mais recentes. Esses resultados indicam que o resíduo vem sendo continuamente retrabalhado pela dinâmica fluvial, misturando-se gradativamente aos sedimentos naturais. Nas campanhas mais recentes, o material proveniente de Fundão tornou-se, em muitos casos, indistinguível dos depósitos originais do rio, embora ainda seja possível identificar restos do resíduo em áreas de terraço fluvial.

Figura 4 - Difratogramas das amostras de resíduo de minério de Fe coletadas em Candonga (CG) e ao longo do Rio Doce nos anos de 2016, 2022, 2023 e 2024.



Legenda: Mu – muscovita; Ka – caulinita; Gb – gibbsita; Qz – quartzo; Hm – hematita; Gt – goethita.

Fonte: Autores (2025).

Discussão

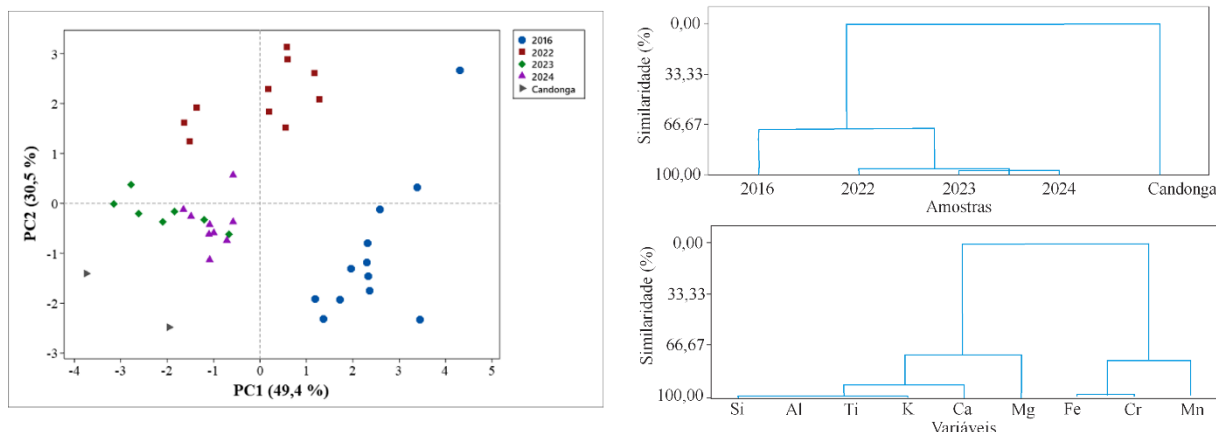
A análise por PCA (*Principal Component Analysis*) e os dendogramas (Figura 5) mostram diferenças entre a amostra de Candonga e as coletadas em 2016, sendo que ambas também diferem das demais. O Fe, Cr e Mn estão, provavelmente, ligados ao resíduo mineral, enquanto Si, Al, Ti, K, Ca e Mg se relacionam aos sedimentos fluviais. O mesmo padrão ocorre na mineralogia (Figura 6), onde o quartzo, a hematita e a goethita se agrupam nas amostras de Candonga e de 2016; enquanto o grupo da caulinita, gibbsita e muscovita indica mistura do resíduo com sedimentos fluviais nas amostras de 2022, 2023 e 2024.

Os resultados mostram que, ao longo de quase uma década, o resíduo de Fundão sofreu intenso retrabalhamento fluvial no Baixo Rio Doce, refletindo transporte e mistura com sedimentos naturais do Rio. A composição química também se alterou, com predomínio inicial de ferro revertendo para silício nos anos seguintes, indicando diluição do resíduo pelos sedimentos fluviais.

A mineralogia confirma a incorporação gradual do material ao substrato fluvial, com desaparecimento de traços de goethita em amostras recentes, sugerindo transformação ou redistribuição dos óxidos de ferro mais reativos. Embora a mistura sedimento-resíduo esteja bem integrada, restos do resíduo ainda persistem nos terraços fluviais, evidenciando riscos ambientais de longo prazo.

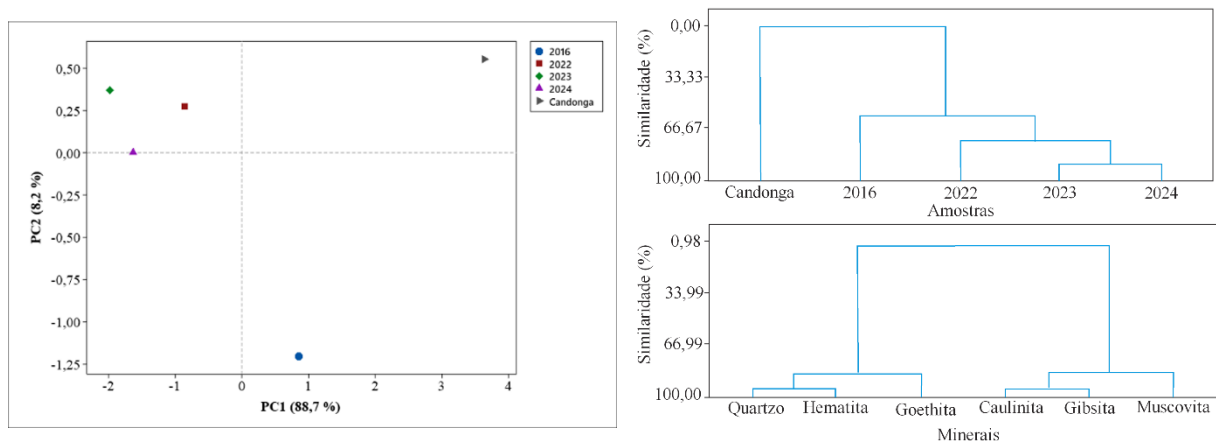
A Ciência do NANO e seu impacto transformador no MACRO

Figura 5 - Análise de PCA e dendogramas mostrando o agrupamento das amostras de resíduo de minério de ferro de acordo com seus constituintes químicos (Si, Al, Fe, Ti, Mn, Cr, Ca, Mg e K).



Fonte: Autores (2025).

Figura 6 - Análise de PCA e dendogramas mostrando o agrupamento das amostras de resíduo de minério de ferro de acordo com seus constituintes mineralógicos (quartzo, hematita, goethita, caulinita, gibbsita e muscovita).



Fonte: Autores (2025).

Conclusões

O resíduo de minério de ferro liberado pelo rompimento da Barragem de Fundão foi intensamente retrabalhado pela dinâmica fluvial e incorporado aos sedimentos do Baixo Rio Doce. Apesar dessa integração, restos do resíduo ainda permanecem nos terraços fluviais, tornando difícil distinguir o sedimento natural do material antropogênico na maioria dos pontos visitados. Esses achados reforçam a importância do monitoramento contínuo e sugerem que o uso de técnicas avançadas de estudo de proveniência pode oferecer uma compreensão mais detalhada do comportamento e da dispersão do resíduo no ambiente fluvial, contribuindo para estratégias de mitigação de impactos ambientais de longo prazo.

Referências

DUARTE, E. B.; NEVES, M. A.; OLIVEIRA, F. B. 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**, v. 195, n. 456, 2023. DOI: 10.1007/s10661-023-11087-y. GEOBASES - Sistema Integrado de Bases Geoespaciais do Estado do Espírito Santo. 2010. INCAPER. Disponível em: <http://www.geobases.es.gov.br/porta/>. Acesso em: 4 abr 2021.

A Ciência do NANO e seu impacto transformador no MACRO

MARTINS, Marx Engel. Caracterização física, química e mineralógica dos sedimentos do baixo rio Doce, após o rompimento da barragem de Fundão/MG. 2023. 77 f. Dissertação (Mestrado em Agroquímica) – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2023.

OLIVEIRA, F. B.; NEVES, M. A.; PONTES, J. L.; OLIVEIRA, C. H. R.; DUARTE, E. B.; MACHADO, L. E. Monitoring deposition and resuspension of the iron ore tailings in the Doce River after the Fundão Dam rupture. **Ambiente & Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, v. 20, e3026, 2025. DOI:10.4136/1980-993X.

QUEIROZ, H. M.; NOBREGA, G. N.; FERREIRA, T. O.; ALMEIDA, L. S.; ROMERO, T. B.; SANTAELLA, S. T. *et al.* The Samarco mine tailing disaster: a possible time-bomb for heavy metals contamination? **Science of the Total Environment**, 637E638, 498e506, 2018. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.04.370

VERGILIO, C. S.; LACERDA, D.; SOUZA, T. S.; OLIVEIRA, B. C. V.; FIORESI, V. S.; SOUZA, V. V. *et al.* Immediate and long-term impacts of one of the worst mining tailing dam failures worldwide (Bento Rodrigues, Minas Gerais, Brazil). **Science of the Total Environment**, v. 756, 143697, 2021. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.143697

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio financeiro da Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo (FAPES). Agradecemos ao Instituto Federal do Espírito Santo - IFES, *Campus* de Nova Venécia e *Campus* de Alegre pelo suporte e infraestrutura e ao Laboratório de Engenharia Química 1 e ao Laboratório de Geologia Aplicada da Universidade Federal do Espírito Santo - UFES, Alegre (ES).