ANÁLISE DE CONTAMINANTES EM COMPONENTES DE TERRA PRODUZIDOS COM REJEITOS SEDIMENTADOS NA BACIA DO RIO DOCE

Contamination analysis in earthen components produced with iron ore tailings sedimented in Rio Doce basin

Sofia Araújo Lima Bessa
Escola de Arquitetura, UFMG | Belo Horizonte, MG | sofiabessa@ufmg.br

Stefânia Augusta Pereira
Escola de Arquitetura, UFMG | Belo Horizonte, MG | stefaugusta@gmail.com

RESUMO

Desde os últimos rompimentos de barragens em Minas Gerais, no entanto, a problemática da contaminação dos rejeitos de mineração de ferro (RMF) têm sido tema bastante relevante nos últimos anos. Enquanto alguns estudos sugerem contaminação nas áreas afetadas pelas atividades de mineração de ferro, considerando os cenários dos últimos acidentes em Minas Gerais, as análises realizadas em amostras de rejeitos coletadas diretamente nas barragens não apontam níveis de metais pesados acima dos valores das normas vigentes. Sendo assim, este artigo analisa os níveis de metais pesados encontrados em amostras de RMF sedimentados e dragados na Bacia do Roce e nos componentes de terra produzidos com esses materiais, solo, areia e cal hidratada. Os metais Ferro, Alumínio, Manganês e Cromo aparecem em níveis acima dos valores de referência nas amostras de RMF e nos componentes produzidos com estes. Ainda assim, foram classificados como Resíduos Não Perigosos e Não Inertes.

Palavras-chave: Metais Pesados; Lixiviação; Solubilização; Taipa de Pilão; Adobe.

ABSTRACT

Since the latest dam failures in Minas Gerais, the topic about contamination from iron ore tailings (IOT) has become increasingly relevant in recent years. While some studies suggest contamination in areas impacted by iron mining activities, considering the scenarios surrounding the recent accidents in Minas Gerais, analyses performed on IOT samples collected directly from the dams do not indicate heavy metal levels above the thresholds set by current regulations. Thus, this article examines the heavy metal levels found in sedimented and dredged IOT samples in the Rio Doce basin, as well as components made with these IOT and soil, sand, and hydrated lime. Iron, aluminium, manganese, and chromium are present at levels exceeding the reference values in the IOT samples and components produced with them as well; however, they were classified as non-dangerous and non-inert waste.

Keywords: Heavy Metals; Leaching; Solubilization; Rammed Earth; Adobe.

1 INTRODUÇÃO

O Estado de Minas Gerais se configura, desde o século XVII, como principal minerador do país (REZENDE, 2016), possuindo 40 das 100 maiores minas de extração do Brasil e responsável por 42,53% da exploração ativa de minérios (ANM, 2024). Desde os últimos rompimentos de barragens em Minas Gerais, no entanto, a problemática da contaminação dos rejeitos de mineração de ferro (RMF) por metais pesados têm sido tema recorrente nas notícias de jornais, assim como tem despertado o interesse da comunidade acadêmica.

A ruptura da Barragem de Fundão, em Mariana, MG, em novembro de 2015, quando 50 milhões de metros cúbicos de rejeitos foram despejados no Rio Doce e chegaram até o oceano Atlântico, afetou diretamente 39 municípios, sendo 36 em Minas Gerais e três municípios no Espírito Santo (GOMES *et al.,* 2017; LACAZ *et al.,* 2017). A análise dos sedimentos, antes e depois da chegada dos rejeitos no estuário do Rio Doce, mostrou um aumento de até cinco vezes na concentração de metais pesados – alumínio, ferro, zinco, cromo e bário (GOMES *et al.,* 2017).

Pouco mais de dois anos após a ruptura da barragem, alguns moradores de Barra Longa, MG, segundo município atingido pela lama de rejeitos de Fundão, começaram a receber o diagnóstico de contaminação por metais pesados. A maioria dos moradores examinados apresentava problemas de pele e dificuldade para respirar. Todos estavam intoxicados por Níquel e metade tinha níveis de Arsênio no sangue acima do normal (BBC, 2019).

Desastres tecnológicos tendem a ser menos aceitos pela população afetada do que os desastres naturais, o que pode gerar uma onda de revolta coletivas e exacerbar traumas individuais que podem desencadear problemas de ordem física e mental (ANDRADE *et al.,* 2021). Os impactos dos rejeitos no ecossistema ao redor das áreas de mineração ainda têm sido pouco estudados. Enquanto alguns estudos sugerem contaminação nas áreas afetadas pelas atividades de mineração de ferro, considerando os cenários dos últimos acidentes em Minas Gerais, as análises realizadas em amostras de rejeitos coletadas diretamente nas barragens não apontam níveis de metais pesados acima dos valores da legislação e normas vigentes.

Esses dados sugerem um grande desafio para o uso dos solos e dos sedimentos retirados dessas áreas. Os sedimentos que foram dragados dos rios Gualaxo do Norte e Carmo, pela Fundação Renova, estão disponibilizados em zonas ADMR (Área de Deposição de Material Excedente), nos municípios de Barra Longa e Rio Doce, e possuem potencial para serem utilizados na produção de componentes para construção civil, inclusive de terra, como paredes de taipa de pilão, blocos de terra comprimida e adobes, técnicas construtivas ainda muito utilizadas nesta região (BESSA *et al.,* 2024).

Considerando as questões apontadas, são apresentados e discutidos os dados relativos à análise de contaminantes em amostras de componentes de terra, a saber adobe e taipa de pilão, produzidos com os rejeitos de minério de ferro sedimentados e coletados na região de Barra Longa e Rio Doce, MG, com base na NBR 10004 (ABNT, 2004a) e normas correlatas (ABNT, 2004b; ABNT, 2004c). Discute-se, ainda, a contaminação dos solos e dos sedimentos das áreas impactadas pelas duas últimas rupturas de barragens em Minas Gerais, cujos dados são confrontados com as análises nas amostras e componentes.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Para analisar o nível de contaminação das amostras de RMF, de solo e dos componentes de terra produzidos, a pesquisa foi realizada em três etapas: i) coleta das amostras de RMF, no início de 2021, cinco anos após a ruptura da barragem; ii) produção e análise dos componentes, em 2022 e 2023; e iii) análise dos contaminantes nas amostras dos componentes simulando uma demolição (descarte pós-uso).

Para a produção dos adobes e corpos de prova representativos de taipa de pilão, foram utilizados: i) solo silto-argiloso; ii) rejeito de minério de ferro sedimentado (RMF); iii) areia natural quartzosa; e iv) cal hidratada. O solo foi coletado na cidade de Pedro Leopoldo, MG. A escolha por esse local se deu pela disponibilidade e pela similaridade com os solos da região de Mariana, MG. Em Barra Longa, a amostra de RMF foi coletada entre 60 e 80 cm de profundidade, para evitar a área de raízes, matéria orgânica e o solo usado para revegetação do local. Em Rio Doce, a amostra estava envelopada por uma manta geotêxtil, para estabilização. A areia natural foi adquirida comercialmente na cidade de Belo Horizonte, MG. A cal hidratada utilizada neste estudo foi do tipo CH-I que atende aos requisitos técnicos da norma NBR 7175 (ABNT, 2003), e possui ampla disponibilidade no mercado regional.

As amostras de SRMF e de solo foram caracterizadas por meio de ensaios físicos, a saber: granulometria, de acordo com a NBR 7181 (ABNT, 2016a); Limites de Atterberg, de acordo com a NBR 6459 e NBR 7180, respectivamente (ABNT, 2016b; ABNT, 2016c); massa específica, segundo a NBR 16605 (ABNT, 2017); massa unitária e volume de vazios, conforme descrito na NBR 16972 (ABNT, 2021a), e absorção de água de acordo com a NBR 16916 (ABNT, 2021b) (Tabela 1). A massa específica da areia, analisada por meio do equipamento analisador de densidade real da marca *ACP Instruments*, ficou em 2612 kg/m^3.

Tabela 1: Caracterização física das amostras de solo e de RMF

Amostra	Granulometria (%)		Massa específica (kg/m^3)	Massa unitária (kg/m^3)	Índice de vazios (%)	Absorção de água (%)	Índice de Plasticidade
	Argila	Areia					
Solo	55,50	28,00	2340	1012	57,50	21,28	22
RMF-BL	9,50	41,50	2990	1368	64,20	7,52	-
RMF-RD	6,00	59,00	2820	1498	64,50	3,33	-

Os adobes foram produzidos com misturas de solo, areia, RMF e cal, com dimensão de 10 x 10 x 20 cm (altura, largura e comprimento), em acordo com a NBR 16814 (ABNT, 2020). Os resultados das análises físicas e mecânicas foram publicados por Vimieiro *et al.* (2022; 2023). As amostras representativas de taipa de pilão foram produzidas com solo, RMF-BL e RMF-RD, em corpos de prova cilíndricos (altura 20 cm, diâmetro 10 cm) seguindo as recomendações da NBR 17014 (ABNT, 2022). Os resultados das análises físicas e mecânicas foram publicados por Lage *et al.* (2022) e Lage; Bessa (2024). Na Tabela 2, são apresentadas as misturas escolhidas para as análises de contaminação: uma amostra de adobe produzida apenas com solo; duas amostras de adobe produzidas com teores diferentes de cal, um baixo (4%) e outro elevado (10%), e sem RMF; duas misturas de taipa de pilão produzidas com 90% de RMF em substituição ao solo, considerando os rejeitos RD e BL.

Tabela 2: Componentes analisados e proporção de materiais – adobe e taipa de pilão

Amostras pós-demolição	Solo	Areia	RMF-RD	RMF-BL	Cal Hidratada
Adobe 1	1,00	1,40	-	-	-
Adobe 2	1,00	1,40	-	-	4%
Adobe 3	1,00	1,40	-	-	10%
Taipa 1	0,10		0,90	-	-
Taipa 2	0,10		-	0,90	-

A escolha das amostras contempla misturas produzidas com solo, estabilizadas ou não com cal, e amostras com solo e os dois tipos de RMF, separadamente. Outra questão relativa à escolha das amostras refere-se ao elevado custo dos ensaios de contaminação, o que levou à escolha de apenas algumas misturas a serem analisadas.

As amostras dos rejeitos RMF-BD e RMF-RD e de solo foram submetidas ao ensaio de lixiviação e de solubilização, em acordo com as NBR 10005 e 10006 (ABNT, 2004b e 2004c), respectivamente. Para essas análises, as amostras foram secas em estufa a 100° C, por 24 horas, passadas na peneira com abertura de 4,8 mm, separadas 2500 g e enviadas ao laboratório para análise e classificação, segundo a NBR 10004 (ABNT, 2004a). Os componentes produzidos com e sem RMF e com e sem cal também foram analisados em relação aos mesmos parâmetros. Após o tempo de secagem e cura de pelo menos 28 dias, os adobes e os corpos de prova de taipa, de cada mistura, foram triturados para simular uma demolição (simulação de descarte pós-uso) e passados na peneira com abertura 4,8 mm. Uma amostra de 2500 g de cada amostra foi enviada para análise em relação aos contaminantes inorgânicos e metais.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O nível de contaminantes das amostras de RMF, que foram sedimentados nas localidades atingidas pela lama de rejeitos após o distrito de Bento Rodrigues, e de Solo, foram analisados em relação aos metais e contaminantes inorgânicos. Nas análises de lixiviação, foram verificados os níveis de Arsênio, Bário, Cádmio, Chumbo, Cromo, Prata, Selênio e Mercúrio. Por essa análise, é possível classificar o material/resíduo como Perigoso ou Não perigoso (ABNT, 2004a). Todos os parâmetros analisados encontravam-se abaixo do limite estabelecido pela normativa.

No entanto, pela análise de solubilização, os elementos Alumínio, e Ferro, além do Manganês - somente nas amostras de RMF - estavam acima do limite. O valor encontrado para o Cromo ficou quase no limite na amostra RMF-BL, considerando a precisão do ensaio. Mesmo a amostra de Solo apresentou teores de Ferro e Alumínio acima do recomendado. Os resultados da análise de solubilização permitem classificar um resíduo como Inerte

ou Não Inerte. Dessa forma, as amostras RMF-RD, RMF-BL e a amostra de Solo foram classificadas como Resíduos Não Perigosos e Não Inertes (Classe II – A).

Em relação à análise dos contaminantes dos componentes, adobe e taipa de pilão, simulando uma etapa de pós-demolição, todos os parâmetros analisados no extrato lixiviado encontravam-se abaixo do limite estabelecido pela normativa. Em relação ao extrato solubilizado, no entanto, os metais Alumínio, Cromo, Ferro e Manganês foram detectados em concentrações acima do limite estabelecido pelo Anexo G da NBR 10004 (ABNT, 2004a).

Os valores do pH final do extrato solubilizado também aumentaram nas amostras produzidas com a cal, o que é esperado. A elevação do pH nos componentes de terra é induzida quando há necessidade de reforço metálico, uma vez que valores de pH acima de 12 tendem a proteger as armaduras da corrosão, como ocorre no concreto armado. No entanto, os valores de pH devem variar dentro de uma faixa segura considerando as etapas de produção, uso e pós-uso dos componentes. O valor do pH da amostra “Adobe 3”, produzida com 10% de cal, ficou acima de 12,5, valor limite para que se possa classificar uma substância como corrosiva (ABNT, 2004a), tendo sido classificada como “Classe I – Perigoso”.

Algumas pesquisas realizadas nos últimos anos demonstraram que há um impacto na saúde da população no entorno das minas de exploração de ferro e nos locais afetados por rupturas de barragens (ANDRADE *et al.,* 2021; MOTA *et al.,* 2022). No entanto, há uma tendência de que a ruptura das barragens e o impacto da dispersão da lama de rejeitos tenham contribuído na dispersão e na concentração de poluentes já existentes nos rios e nos solos impactados. A produção de componentes construtivos visando a produção de edificações nessas áreas deve ser precedida, também, por uma etapa informativa sobre a segurança do uso dos rejeitos e sedimentos (BESSA *et al.,* 2025). Além de ser parte do compromisso científico com as populações afetadas por esses incidentes, tem a função de instruir a sociedade acerca do uso potencial dos resíduos.

Os subprodutos de processos industriais e agroindustriais, em geral, são passíveis de serem reutilizados e não apenas descartados no meio ambiente. Contudo, é fundamental garantir a segurança no manuseio, aplicação, utilização e descarte pós-uso. As pesquisas têm avançado bastante na análise técnica da aplicação de resíduos e rejeitos nos materiais como substitutos de aglomerantes e agregados, mas ainda há uma carência na literatura sobre a análise ambiental e o risco no descarte futuro dos compósitos produzidos com rejeitos e resíduos.

4 CONCLUSÕES

Amostras de solo, de rejeito de minério de ferro sedimentados e de componentes de terra produzidos com e sem rejeitos e/ou cal foram analisadas em relação ao teor de contaminantes inorgânicos e metais. As seguintes conclusões podem ser pontuadas:

a. Os metais Ferro, Alumínio, Manganês e Cromo aparecem em níveis acima dos valores de referência nas amostras de RMF e nos componentes produzidos com estes. Ainda assim, foram classificados como Resíduos Não Perigosos e Não Inertes (Classe II – A).
b. A amostra de Adobe produzida com solo e 10% de cal hidratada foi classificada como Perigosa (NBR 10004, 2004) por apresentar valor de pH acima de 12,5 e ser considerada Corrosiva. Importante que os teores de cal utilizados na estabilização de componentes de terra sejam limitados a 8-9% de forma a manter a segurança nas etapas de produção, uso, aplicação e pós-demolição dos componentes de terra.
c. Mesmo quando não há valores limites na legislação vigente, alguns metais estão aumentados em amostras de Solo fora da área de influência de barragens, como o Ferro, Alumínio e Cromo. O Manganês também segue sendo um metal que causa preocupação pois aparece em concentrações muito elevadas. Sendo assim, uma análise de contaminantes deve ser sempre priorizada nas pesquisas com foco no reaproveitamento de rejeitos, resíduos, sedimentos e solos, mesmo sendo este último considerado um “material natural”.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (processos APQ05495-18 e APQ00172-23), pelo auxílio financeiro; e à Rede Mineira de Pesquisa, Desenvolvimento Científico, Tecnológico e Inovação (RED-00191-23), pelo auxílio no desenvolvimento de alguns dos ensaios de caracterização.

REFERÊNCIAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. **NBR 6459 -** Solo: determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 2016b.

____. **NBR 7175 -** Solo: determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 2003.

____. **NBR 6459 -** Solo: determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 2016b.

____. **NBR 7175 -** Solo: determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 2003.

____. **NBR 7180 -** Solo: determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 2016c.

____. **NBR 7181 -** Solo: análise granulométrica. Rio de Janeiro, 2016a.

____. **NBR 10004** - Resíduos sólidos - Classificação. Rio de Janeiro, 2004a.

____. **NBR 10005** - Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004b.

____. **NBR 10006** - Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004c.

____. **NBR 16605 -** Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2017.

____. **NBR 16972 -** Agregados - Determinação da massa unitária e do índice de vazios. Rio de Janeiro, 2021a.

____. **NBR 16916 -** Agregado miúdo - Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2021b.

____. **NBR 16814 -** Adobe — Requisitos e métodos de ensaio - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2020.

____. **NBR 17014 -** Taipa de pilão - Requisitos, procedimentos e controle. Rio de Janeiro, 2022.

ANDRADE, M. V. *et al.* Estimation of Health-Related Quality of Life Losses Owing to a Technological Disaster in Brazil Using EQ-5D-3L: A Cross-Sectional Study. **Value in Health Regional Issues**, v. 26, p. 66–74, 1 dez. 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.vhri.2021.02.003.

ANM. Agência Nacional de Mineração. **Anuário Mineral Brasileiro:** principais substâncias metálicas / Agência Nacional de Mineração; coordenação técnica de Karina Andrade Medeiros. – Brasília: ANM, 2024. 27 p. ; il.

BBC. **Tragédia de Mariana:** Vítimas da lama sofrem com doenças de pele e respiratórias por contaminação por metais pesados e temem nunca ser indenizadas pela Samarco, 2019. Acesso em 31 jan. 2025. Disponível em: <https://www.bbc.com/portuguese/brasil-47120719>.

BESSA, S. et al. Characterization and Analysis of Iron Ore Tailings Sediments and Their Possible Applications in Earthen Construction. **Buildings,** v. 14, n. 2, 1 fev. 2024. https://doi.org/10.3390/buildings14020362.

BESSA, S. A. L. *et al.* TEORIA E PRÁTICA: Relato de experiência em oficinas de construção com terra. **Revista Projetar -** Projeto e Percepção do Ambiente, v. 10, n. 1, jan. 2025. DOI: https://doi.org/10.21680/2448-296X.2025v10n1ID34587.

BESSA, S. A. L. *et al.* TEORIA E PRÁTICA: Relato de experiência em oficinas de construção com terra. **Revista Projetar -** Projeto e Percepção do Ambiente, v. 10, n. 1, jan. 2025. DOI: https://doi.org/10.21680/2448-296X.2025v10n1ID34587.

GOMES, L. E. DE O. *et al.* The impacts of the Samarco mine tailing spill on the Rio Doce estuary, Eastern Brazil. **Marine Pollution Bulletin,** v. 120, n. 1–2, p. 28–36, 2017. DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.04.056.

LACAZ, F. A. C.; *et al.* Tragédias brasileiras contemporâneas: o caso do rompimento da barragem de rejeitos de Fundão/Samarco. **Revista Brasileira de Saúde Ocupacional,** São Paulo, v. 42, p. 1-12, 2017. DOI: https://doi.org/10.1590/2317-6369000016016.

LAGE, G. T. L.; *et al.* Caracterização do sedimento de rejeito de minério de ferro para uso como estabilizante da taipa de pilão. In: 4o Congresso Luso-Brasileiro de Materiais de Construção Sustentáveis, 2022, Salvador. **Anais do 4o CLBMCS.** Salvador: UFBA, 2022. p. 620-633.

LAGE, G. T. L.; BESSA, S. A. L. Soil Stabilization with Brazilian Iron Ore Tailings to Produce Rammed Earth. **RILEM Bookseries.** 1ed.: Springer Nature Switzerland, 2024, p. 206-215. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-62690-6_21.

MOTA, P. J. *et al.* Prevalence of metal levels above the reference values in a municipality affected by the collapse of a mining tailings dam: Brumadinho Health Project. **Revista Brasileira de Epidemiologia**, v. 25, 2022. DOI: https://doi.org/10.1590/1980-549720220014.supl.2

REZENDE, V. L. A mineração em minas gerais: uma análise de sua expansão e os impactos ambientais e sociais causados por décadas de exploração. **Sociedade & Natureza,** Uberlândia, 28, p. 375-384, set/dez/2016. DOI: http://dx.doi.org/10.1590/1982-451320160304.

VIMIEIRO, J. I. C. *et al.* Análises físicas e mecânicas de adobes produzidos com sedimentos de rejeito de minério de ferro. In: 4o Congresso Luso-Brasileiro de Materiais de Construção Sustentáveis, 2022, Salvador. **Anais do 4o CLBMCS.** Salvador: UFBA, 2022. p. 293-303.

VIMIEIRO, J. I. C.; *et al.* A absorção por capilaridade em adobes produzidos com rejeitos de mineração. **MIX SUSTENTÁVEL (ONLINE),** v. 9, p. 195-207, 2023. DOI: https://doi.org/10.29183/2447-3073.MIX2023.v9.n4.195-207.