INOVAÇÃO SUSTENTÁVEL: REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO PARA PRODUÇÃO DE MOBILIÁRIO URBANO

Sustainable innovation: iron ore tailings in the production of urban furniture

Luis Felipe dos Santos Lara
CEFET-MG | Belo Horizonte, Minas Gerais | luislaraenge@gmail.com

Laís Resende
VALE S.A. | Belo Horizonte, Minas Gerais | lais.resende@vale.com

Augusto Cesar da Silva Bezerra
CEFET-MG | Belo Horizonte, Minas Gerais | augustobezerra@cefetmg.br

RESUMO

O rejeito de minério de ferro (RMF) é um passivo ambiental devido ao risco de sua disposição em barragens e pilhas. Este estudo desenvolveu um concreto utilizando RMF como agregado miúdo, substituindo totalmente a areia convencional. Foram produzidos diversos itens de mobiliário urbano os quais foram avaliados em relação à resistência à compressão, absorção de água, índice de vazios e análise visual. O ataque ácido foi investigado para avaliar a durabilidade. Os resultados indicaram que a utilização do RMF reduziu a consistência do concreto, aumentou a absorção de água, o índice de vazios e diminuiu a resistência à compressão. A substituição da areia pelo RMF resultou em 668 kg de rejeito por metro cúbico de concreto produzido, com resistência C30. Espera-se que este estudo contribua para a compreensão do efeito da utilização do RMF como agregado miúdo para a produção de mobiliário urbano e sua contribuição ambiental, econômica e social.

Palavras-chave: Rejeito de minério de ferro; Mobiliário urbano; Sustentabilidade; Economia circular; Economia verde.

ABSTRACT

Iron ore tailings (IOT) is environmental liability due to the risk of its disposal in dams and piles. This study developed concrete using IOT as fine aggregate, completely replacing conventional sand. Several items of urban furniture were produced and evaluated in relation to compressive strength, water absorption, void index and visual analysis. Acid etching was investigated to assess durability. The results indicated that the use of RMF reduced the consistency of concrete, increased water absorption, the void index and reduced compressive strength. Replacing sand with RMF resulted in 668 kg of waste per cubic meter of concrete produced, with strength C30. It is expected that this study will contribute to understanding the effect of using IOT as a fine aggregate for the production of urban furniture and its environmental, economic and social contribution.

Keywords: Iron ore tailings; Urban furniture; Sustainability; Circular economy; Green economy.

1 INTRODUÇÃO

A busca por soluções sustentáveis na produção de materiais de construção tem se tornado uma prioridade global diante dos desafios ambientais e das demandas por um desenvolvimento urbano mais responsável. Nesse contexto, o presente estudo aborda a produção de mobiliário urbano de concreto, investigando a substituição total do agregado miúdo por rejeito de minério de ferro (RMF) como uma alternativa inovadora e ecoeficiente. A produção de mobiliário urbano desempenha um papel crucial na configuração estética e funcional das cidades, sendo frequentemente associada ao consumo significativo de recursos naturais e à geração de resíduos.

Diante desse cenário, a indústria da construção civil enfrenta o desafio de repensar suas práticas, incorporando abordagens mais sustentáveis que promovam a preservação do meio ambiente e a redução na emissão de CO_2. Um dos principais componentes utilizados para produção de mobiliário urbano é o concreto, material amplamente utilizado devido à sua durabilidade e versatilidade. Contudo, a produção convencional de concreto envolve a extração intensiva de recursos naturais não renováveis, como a areia utilizada como agregado miúdo, contribuindo para a degradação ambiental.

O RMF, proveniente do beneficiamento mineral, é geralmente descartado em grandes quantidades, representando um problema ambiental (Guo *et al.,* 2022; Vilaça *et al.,* 2022). Nos últimos anos, incidentes de ruptura de barragens de rejeitos têm ocorrido, resultando em consequências ambientais e socioeconômicas significativas. No Brasil, na cidade de Mariana (MG), no ano de 2015, duas barragens se romperam, liberando 62 milhões de metros cúbicos de rejeitos (Islam; Murakami, 2021; Lima, 2024; SILVA *et al.,* 2022).Outra tragédia ocorreu em Brumadinho (MG), em 2019, quando o rompimento de uma barragem despejou 12 milhões de metros cúbicos, resultando na perda de 249 vidas (Lima, 2024; Mendes *et al.,* 2023). A gestão das barragens são verdadeiros desafios aos gestores das mineradoras e empresas públicas. Muitos esforços têm sido feitos para contenção, segregação e monitoramento destes resíduos, visando prevenir acidentes ecológicos e prejuízos ao meio-ambiente (Otieno; Shukla, 2023). Nesse cenário, o RMF, um subproduto do processo de beneficiamento do minério de ferro que é comumente depositado em barragens de contenção ou em pilhas, emerge como potencial fonte de material alternativo para construção (Fu *et al.,* 2023; Kong *et al.,* 2023).

Desta forma, surge uma combinação promissora tendo de um lado um grande volume de RMF sem uma destinação adequada e por outro lado a necessidade premente de desenvolvimento de infraestrutura urbana sustentável. Nesse contexto, emerge uma aplicação que atende às demandas de sustentabilidade, alinhando-se com a agenda 2030 e contribuindo para o desenvolvimento social e sustentável.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

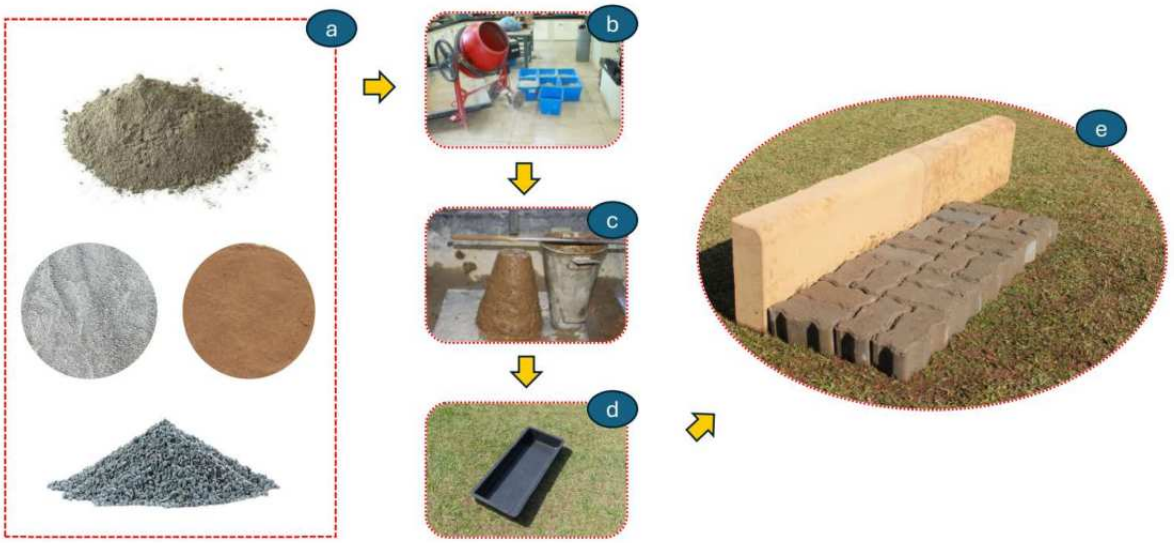
Os materiais empregados nesta pesquisa incluíram o Rejeito de Minério de Ferro in natura (RMF) e areia grossa industrial como agregado miúdo, brita 1 (gnaisse) como agregado graúdo, Cimento Portland de alta resistência inicial (CPV-ARI) como aglomerante e água fornecida pela concessionária de abastecimento (COPASA). O RMF utilizado apresenta massa específica de 3723 Kg/m³, massa unitária de 1950 Kg/m³, módulo de finura 0,09, área superficial específica 9,248 (m²/g). Sua composição química apresenta como principais componentes o óxido de silício (50,58%) e o óxido de ferro (42,92%). Não foram empregados plastificantes e nem adições para evitar influências externas e permitir uma análise da produção de concretos utilizando RMF como agregado miúdo para produção de mobiliário urbano. O RMF foi obtido de uma mina localizada na cidade de Itabirito, na região do quadrilátero ferrífero do estado de Minas Gerais, Brasil. As amostras de RMF foram coletadas ao longo das pilhas, seguindo os parâmetros estabelecidos pela norma NBR 10007 (ABNT,2004), no período entre os anos de 2021 e 2022. É importante salientar que o rejeito utilizado não passou por nenhum tipo de tratamento, sendo empregado em sua forma natural. Para investigar melhor as diferenças de desempenho do concreto de referência (TR1_Referência) e do concreto contendo RMF (TR2_RMF) com o mesmo consumo de cimento foram dosados concretos conforme proporções da mistura apresentadas na Tabela 1. As proporções adotadas foram obtidas pelo método de dosagem ABCP, desenvolvido pela associação Brasileira de cimento Portland.

Tabela 1 - Consumo de material por m³ de concreto

Traço	Cimento (Kg)	RMF (Kg)	Areia (Kg)	Brita 1 (Kg)	Água (Kg)	a/c
TR1_Referência	396	-	668	1126	158	0,5
TR2_RMF	396	668	-	1126	158	0,5

Para alcançar os objetivos da pesquisa foi proposto a produção de peças que compões o mobiliário urbano tal como meio-fio, seguindo as etapas de dosagem do material (a), pesagem e mistura dos materiais (b), ensaio de consistência e análise visual do concreto em estado fresco, (d) moldagem das peças, (e) análise visual, ensaios de resistência à compressão e de durabilidade conforme fluxograma apresentado na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**.

Figura 1 - Fluxograma da produção do mobiliário urbano



Na Tabela 2 é apresentado os ensaios que compõe o planejamento experimental desta pesquisa realizados com o concreto no estado fresco e endurecido assim como a referência bibliográfica utilizada.

Tabela 2 - Planejamento experimental

Ensaio	Referência	Tipo de corpo de prova	Amostra	Tamanho (mm)
Consistência - Abatimento do tronco de cone	NBR 16889 (ABNT,2020)	NA	NA	NA
Preparo da mistura de concreto	NBR 12655:2022	NA	NA	NA
Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova	NBR 5738: 2016	Cilíndrico	6	100 (d) x 200 (a)
Resistência à compressão aos 28 e 360 dias	NBR 6118 (ABNT,2023)	Cilíndrico	6	100 (d) x 200 (a)
Absorção de água e índice de vazios	NBR 9778 (ABNT,2009)	Cilíndrico	6	100 (d) x 200 (a)
Análise visual da seção transversal	(Gu et al., 2021)	Cilíndrico	2	100(d) x 10(a)
Ataque ácido, solução de ácido sulfúrico concentração de 5%, tempo de exposição de 24 horas.	(Bessa et al., 2022)	Cilíndrico	3	100 (d) x 200 (a)

3 RESULTADOS

Nesta seção são apresentados alguns resultados. Na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** é apresentado uma foto do momento da execução do ensaio do traço TR01. O abatimento do traço TR1_Referência foi de 7,8 cm e do traço TR2_RMF foi de 5,2 cm. Pesquisas utilizando o RMF para produção de concreto apresentaram resultados similares ao da pesquisa, constatando a redução do abatimento das misturas contendo RMF(Mendes Protasio *et al.,* 2021; Ruidong *et al.,* 2021).

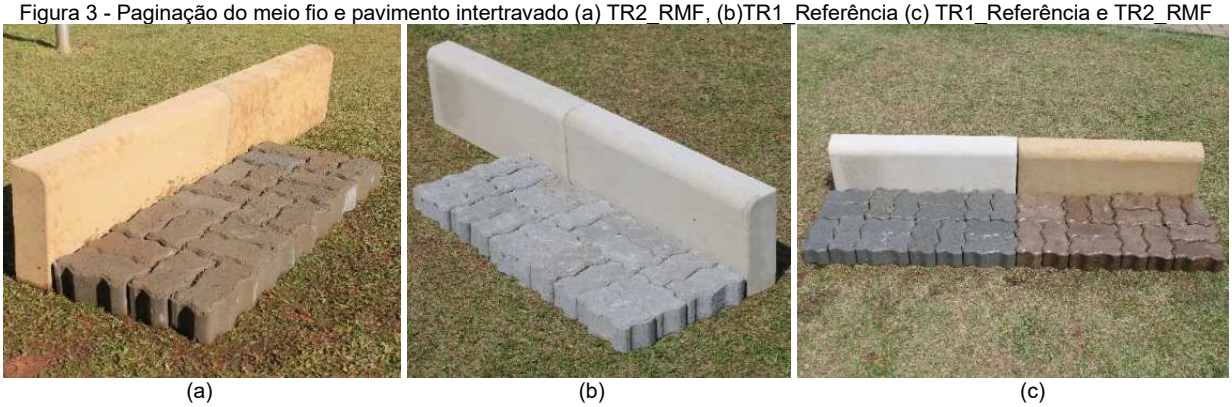
Na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** é apresentado fotos do meio fio dos traços TR1_Referência e TR2_RMF paginados com pavimento de 16 faces simulando uma situação real de instalação. Pode ser observado uma superfície com aspecto homogêneo, arestas regulares e ângulos retos livres de rebarbas, defeitos e descamação. Observa-se que as peças, do traço TR2_RMF, apresentam um tom de cor marrom claro devido a presença dos óxidos de ferro presentes no RMF **Erro! Fonte de referência não encontrada.** (a). Pode ser observado uma superfície com aspecto homogêneo, arestas regulares e ângulos retos livres de rebarbas, defeitos e descamação com um tom cinza claro para as peças do TR1_Referência apresentado na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** (b).

Na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** são apresentadas fotografias da seção transversal dos corpos de prova cilíndricos dos dois traços analisados, na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** (a) é apresentado o corpo de prova do traço de referência e na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** (b) é apresentado o corpo de prova do traço de concreto contendo RMF. Observa-se que a argamassa envolve adequadamente os grãos de brita 01, apresentando uma distribuição homogênea dos agregados no interior da matriz. Para o concreto desenvolvido com RMF, **Erro! Fonte de referência não encontrada.** (b), é observado uma coloração em um tom marrom devido a presença dos óxidos de ferro presentes no RMF. Além disso, é possível perceber que a aderência entre a argamassa e os grãos de brita é eficiente, o que contribui para a coesão do material e melhora as propriedades mecânicas do concreto. Não é possível observar a presença de poros ou falhas na argamassa do concreto.

Figura 2 - Abatimento concreto TR2_RMF

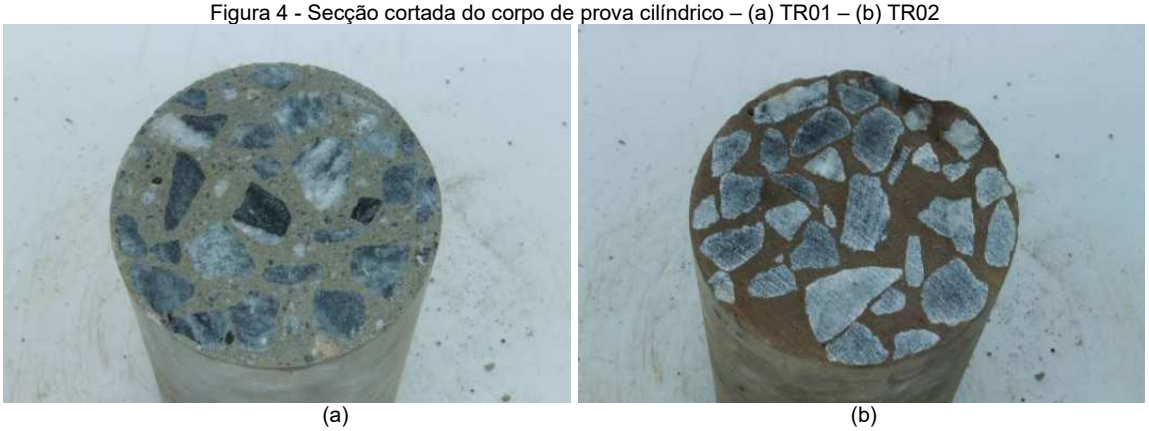


Figura 3 - Paginação do meio fio e pavimento intertravado (a) TR2_RMF, (b)TR1_Referência (c) TR1_Referência e TR2_RMF



(a) (b) (c)

Figura 4 - Secção cortada do corpo de prova cilíndrico – (a) TR01 – (b) TR02



(a) (b)

Na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** é apresentado o gráfico de resistência à compressão versus absorção de água e índice de vazios dos traços TR1_Referência e TR2_RMF. Pode ser observado que o traço contendo RMF (TR2_RMF), apresenta maior percentual de absorção de água e índice de vazios, 6,099% e 14,167% do que o TR1_Referência com 4,599% e 10,349% respectivamente.

Os resultados obtidos após o ataque ácido indicam que perda de massa dos corpos de prova contendo RMF foram menores se comparadas ao traço referência (Figura 6). Embora a adição de RMF tenha aumentado a absorção de água e índice de vazios ela contribui para a redução da perda de massa, evidenciando sua capacidade de melhorar a resistência do concreto frente a agentes agressivos, como os ácidos. Isso ocorre devido à sua atuação na microestrutura do material, proporcionando uma maior densificação que dificulta a ação de substâncias agressivas e, consequentemente, retarda os processos de degradação do concreto.

Figura 5 - Absorção de água e índice de vazios x Resistência à compressão

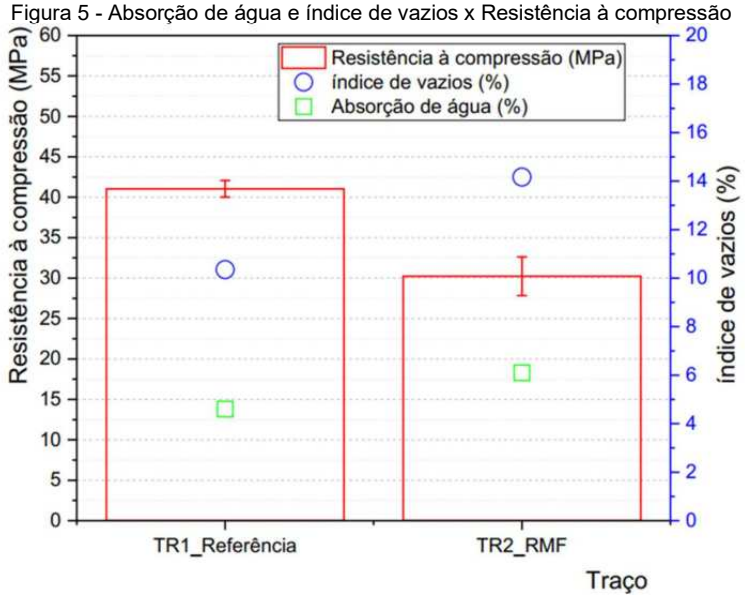
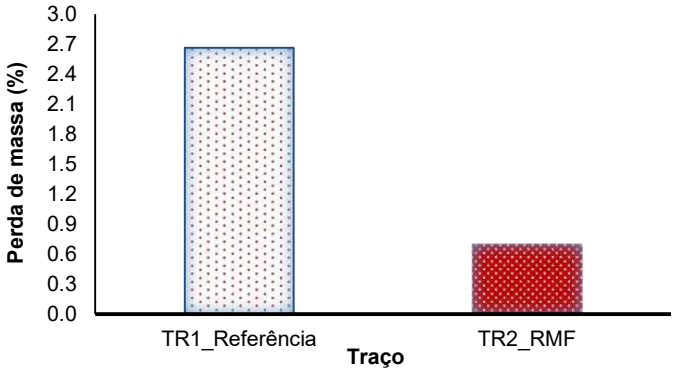


Figura 6 - Perda de massa após ataque ácido



4 CONCLUSÕES

Este trabalho foi desenvolvido para avaliar o potencial da aplicação do RMF em substituição total do agregado miúdo para a produção de mobiliário urbano. Os resultados mostram que:

(1) a utilização do RMF em substituição total da areia comercial se mostrou satisfatório do ponto de vista técnico e do ponto de visto estético, apresentando potencial de utilização para a produção de mobiliário urbano de concreto.
(2) a superfície das peças de concreto contendo RMF apresentam acabamento adequado para suportar o trânsito de pessoas e veículos, conforme sua respectiva categoria de resistência mecânica.
(3) a utilização de RMF implica em uma redução da consistência do concreto, em um aumento da absorção de água e índice de vazios em uma redução na resistência à compressão, aumento na massa específica real (ρr), na massa específica da amostra seca (ρs) e na massa específica da amostra saturada (ρsat).
(4) Embora o traço contendo RMF tenha apresentado resultado de resistência à compressão inferior ao traço referência, seus resultados ainda se encontram dentro da classe de resistência C30, conforme estabelecido pela NBR 6118 (ABNT, 2023).
(5) A utilização do RMF no concreto reduziu a perda de massa, evidenciando sua capacidade de melhorar a resistência do concreto frente a agentes agressivos, como os ácidos.
(6) A substituição total da areia comercial pelo RMF, incorpora uma quantidade significativa de rejeito em sua composição em relação à sua massa total, cerca de 668 Kg de RMF para cada metro cúbico de concreto produzido.
(7) A utilização do RMF para a produção de concretos para mobiliário urbano pode ser uma alternativa sustentável para destinação do RMF e para a redução do consumo de materiais naturais não renováveis.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12655.** Concreto de cimento Portland – Preparo, controle, recebimento e aceitação – Procedimento. Rio de Janeiro, 2022

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**. Concreto – Procedimento para moldagem e cura dos corpos de prova. Rio de Janeiro, 2016

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Amostragem de resíduos sólidos: NBR 10007**. Rio de Janeiro. p. 16, 2004.

BESSA, S. A. L. *et al.* Produção e avaliação de microconcretos com rejeito de minério de ferro para a fabricação de componentes construtivos. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 27, n. 2, 2022.

FU, C. *et al.* Prediction of the Frost Resistance of Iron Ore Tailings Concrete Based-BP Neural Network. **Journal of Sensors**, v. 2023, 2023.

GU, X. *et al.* Effects of HPMC on Workability and Mechanical Properties of Concrete Using Iron Tailings as Aggregates. **Materials**, v. 14, n. 21, p. 6451, 27 out. 2021.

GUO, D. *et al.* Underestimated environmental benefits of tailings resource utilization: Evidence from a life cycle perspective. **Environmental Impact Assessment Review**, v. 96, n. 38, 2022.

ISLAM, K.; MURAKAMI, S. Global-scale impact analysis of mine tailings dam failures: 1915–2020. **Global Environmental Change**, v. 70, n. March, p. 102361, 2021.

KONG, L. *et al.* Effect of Iron Tailings as Fine Aggregate and Mineral Admixture on Strength and Microstructure of Cement Mortar. **International Journal of Concrete Structures and Materials**, v. 17, n. 1, p. 24, 11 abr. 2023.

LIMA, L. R. Exploring Fallacies and Environmental Responsibilities in the Socio-Environmental Reports of the Brazilian Company Vale S . A .: A Case Study on the Dam Disasters in Mariana and Brumadinho. v. 16, n. 1, p. 1–14, 2024.

MENDES PROTASIO, F. N. et al. The use of iron ore tailings obtained from the Germano dam in the production of a sustainable concrete. **Journal of Cleaner Production**, v. 278, 1 jan. 2021.

MENDES, R. G. *et al.* Scenarios of environmental deterioration in the Paraopeba River, in the three years after the breach of B1 tailings dam in Brumadinho (Minas Gerais, Brazil). **Science of The Total Environment**, v. 891, n. May, p. 164426, set. 2023.

OTIENO, F.; SHUKLA, S. K. An insight into failure of iron ore mine tailings dams. **International Journal of Mining, Reclamation and Environment**, v. 37, n. 2, p. 127–147, 7 fev. 2023.

RUIDONG, W. *et al.* Effect of Iron Tailings and Slag Powders on Workability and Mechanical Properties of Concrete. **Frontiers in Materials**, v. 8, n. July, p. 1–9, 2021.

SILVA, G. J. *et al.* Statistical process control in assessing water quality in the Doce river basin after the collapse of the Fundão dam (Mariana, Brazil). **Journal of Environmental Management**, v. 317, n. November 2021, p. 115402, set. 2022.

VILAÇA, A. S. I. *et al.* Waste valorization of iron ore tailings in Brazil: Assessment metrics from a circular economy perspective. **Resources Policy**, v. 75, n. October 2021, p. 0–10, 2022.