XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/118

Revisão Sistemática do Reaproveitamento de Resíduos de Mineração de Ferro para Aplicação em Pavimentação

Gabrieli Guterres de Jesus
Mestranda em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil, gguterresdejesus@gmail.com

Rinaldo José Barbosa Pinheiro
Professor, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil, rinaldo@ufsm.br

Larissa De Brum Passini
Professora, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil, larrisa.passini@ufsm.br

RESUMO: A produção brasileira de minério de ferro gera grandes volumes de rejeitos, cujo manejo inadequado pode causar impactos ambientais, sociais e econômicos significativos. Nesse contexto, o reaproveitamento desses materiais em pavimentação apresenta-se como alternativa sustentável. Este estudo tem como objetivo realizar uma revisão sistemática da literatura acerca da utilização dos rejeitos de minério de ferro em pavimentação. A metodologia consistiu na busca de publicações nas bases de dados Scopus, Scielo e BDTD, com aplicação de critérios de inclusão e exclusão previamente definidos. Os estudos selecionados foram analisados quanto ao tipo de rejeito, forma de aplicação, ensaios realizados e principais resultados obtidos. Observou-se predominância de pesquisas com rejeitos finos e em misturas com outros materiais, especialmente solos e cimento. A maioria dos trabalhos concentra-se na aplicação em camadas estruturais, com maior incidência de ensaios físicos e mecânicos. Conclui-se que, embora o desempenho técnico seja amplamente investigado, há menor enfoque nos aspectos ambientais da aplicação. Ainda assim, o reaproveitamento demonstra potencial para reduzir impactos ambientais e o consumo de agregados naturais, configurando-se como alternativa tecnicamente viável e ambientalmente promissora.

PALAVRAS-CHAVE: Minério de Ferro, Rejeito de Mineração, Sustentabilidade, Reutilização, Pavimento.

ABSTRACT: Brazilian iron ore production generates large volumes of tailings, whose inadequate management may cause significant environmental, social, and economic impacts. In this context, the reuse of these materials in pavement applications presents itself as a sustainable alternative. This study aims to conduct a systematic literature review on the use of iron ore tailings in pavement construction. The methodology consisted of searching for publications in the Scopus, Scielo, and BDTD databases, applying previously defined inclusion and exclusion criteria. The selected studies were analyzed regarding the type of tailings, application method, tests performed, and main results obtained. A predominance of studies involving fine tailings and mixtures with other materials, especially soils and cement, was observed. Most studies focus on applications in structural pavement layers, with a higher incidence of physical and mechanical tests. It is concluded that, although technical performance has been widely investigated, less emphasis has been given to the environmental aspects of the application. Nevertheless, the reuse of these materials demonstrates potential to reduce environmental impacts and the consumption of natural aggregates, representing a technically feasible and environmentally promising alternative.

KEYWORDS: Iron Ore, Mining Tailings, Sustainability, Reutilization, Pavement.

1 INTRODUÇÃO

No ano de 2024, o Brasil beneficiou 278,4 milhões de toneladas de minério de ferro, de acordo com a Agência Nacional de Mineração (Brasil, 2025), sendo este o mineral mais explorado, o que evidencia a importância econômica do setor mineral. O crescimento da atividade mineradora está diretamente associado à

geração de grandes volumes de rejeitos. Conforme apresentado por Carmignano *et al*. (2021), a porcentagem de rejeitos gerados pode variar entre 20% e 40% de material beneficiado, dependendo de características do minério e dos processos de beneficiamento adotados.

Tradicionalmente, os rejeitos de mineração têm como destino final a disposição em barragens. Contudo, a ocorrência de rompimentos de barragens de rejeitos em Mariana e Brumadinho, no Brasil, acentuou a necessidade de alternativas mais seguras para a destinação desses materiais. Nesse contexto, surgiram diversos estudos voltados à reutilização dos rejeitos de mineração para diferentes finalidades, entre as quais se destaca a aplicação em pavimentação.

Com o objetivo de minimizar os riscos e impactos ambientais associados às formas convencionais de disposição, o reaproveitamento apresenta-se como uma alternativa promissora. Entretanto, conforme destacado por Dantas (2019), a complexidade do comportamento geotécnico dos rejeitos evidencia a importância de sua adequada caracterização. Além disso, o aumento contínuo da geração desses materiais intensifica as preocupações ambientais, reforçando a necessidade de soluções técnicas que viabilizem sua reutilização de forma segura.

Diante desse cenário, o presente trabalho tem como objetivo realizar uma revisão sistemática da literatura, abrangendo o período de 2015 a 2025, com foco em estudos que avaliem a aplicação de rejeitos de minério de ferro em pavimentação. A pesquisa busca identificar as principais formas de incorporação desses materiais, os ensaios laboratoriais empregados para sua caracterização e os critérios utilizados na avaliação de desempenho. Apesar do número crescente de estudos, ainda não há uma sistematização consolidada das principais abordgens metodológicas e dos critérios de avaliação empregados. Pretende-se analisar as tendências de aplicação e as lacunas existentes na literatura fornecendo subsídios para o desenvolvimento de futuras pesquisas.

2 METODOLOGIA

O presente estudo adota como procedimento metodológico a revisão sistemática da literatura, a qual consiste na busca, seleção e análise de produções científicas relacionadas com o tema investigado. Para a realização da pesquisa foram utilizadas as bases de dados Scopus, SciELO e BDTD (Biblioteca Digital de Teses e Dissertações) delimitando-se o período entre 2015 e 2025.

A busca foi realizada por meio da utilização e combinação de palavras-chave específicas em cada base de dados, conforme apresentado na Tabela 1, na qual também se encontram as quantidades de resultados obtidos. Após essa etapa, foi realizada a triagem dos estudos com base em critérios de inclusão e exclusão, previamente definidos.

Tabela 1. Procedimento de busca nas base de dados.

Bases de dados	**Palavras-chave e Combinações**	**Quantidade de resultados obtidos**
Scopus	iron ore tailings + pavement	170
	mining waste + iron ore + pavement	233
Scielo	iron ore tailings	53
BDTD	rejeito de minério de ferro + pavimento	12

Como critérios de inclusão, consideraram-se estudos que abordassem o uso de rejeito de minério de ferro aplicados à pavimentação, seja em camadas estruturais do pavimento ou na misturas asfálticas, bem como pesquisas que apresentassem ensaios laboratoriais e dados quantitativos possíveis de comparação. Os critérios de exclusão, por sua vez, envolveram estudos fora do período estabelecido, pesquisas com rejeitos distintos do minério de ferro, aplicação em áreas não relacionadas à pavimentação e trabalhos que não se enquadrassem nas categorias de dissertação, teses, artigos de conferência ou artigos de periódicos científicos. Após a aplicação dos critérios, a Tabela 2 apresenta a quantidade de estudos selecionados por base de dados.

Tabela 2. Quantidade de pesquisas selecionadas por base de dados.

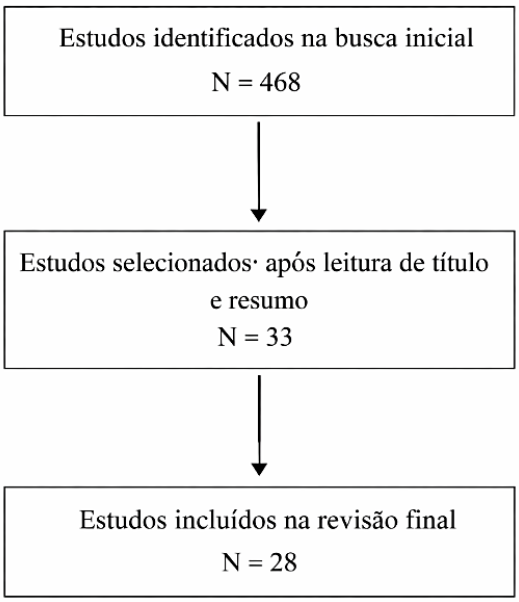
Bases de dados	**Quantidade de pesquisas selecionadas**
Scopus	27
Scielo	2*
BDTD	6

* as pesquisas selecionadas também foram encontradas na base de dados Scopus

As etapas metodológicas compreendem: definição do tema e delimitação do escopo da pesquisa, seleção das bases de dados e período de busca, realização das buscas, triagem dos estudos, leitura dos resumos e seleção dos estudos e seleção dos trabalhos relevantes, seguida da extração e tabulação dos dados e, por fim, análise comparativa e discussão.

Na etapa de extração e tabulação dos dados foram considerados como parâmetros: classificação do rejeito, a natureza da amostra, composição e condição de mistura (quando aplicável), ensaios físicos, químico-mineralógicos, ambientais e mecânicos realizados, bem como os principais resultados obtidos. Durante o processo de extração de dados, com a leitura dos artigos, um total de 5 estudos, obtidos do Scopus, foram descartados por não possuírem ensaios laboratoriais e se tratarem de revisões bibliográficas, desta forma o total de pesquisas da base de dados Scopus foi de 22. A Figura 1 apresenta o fluxograma das etapas de busca e seleção dos estudos, com a quantidade de trabalhos identificados, triados e incluídos na revisão.

Figura 1. Fluxograma de seleção dos estudos.



Dessa forma, o procedimento metodológico adotado permitiu a organização sistemática das informações e a padronização dos dados extraídos dos estudos selecionados, possibilitando uma análise comparativa consistente entre as diferentes abordagens. A partir dessa estrutura metodológica, torna-se viável a identificação de tendências, lacunas e desempenhos observados na literatura, os quais são apresentados e discutidos na seção seguinte. De forma auxiliar, foi feito uso da ferramenta Chat gpt com a finalidade de revisão do texto.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os dados extraídos dos estudos elegíveis, totalizando 28 trabalhos, foram organizados em categorias de

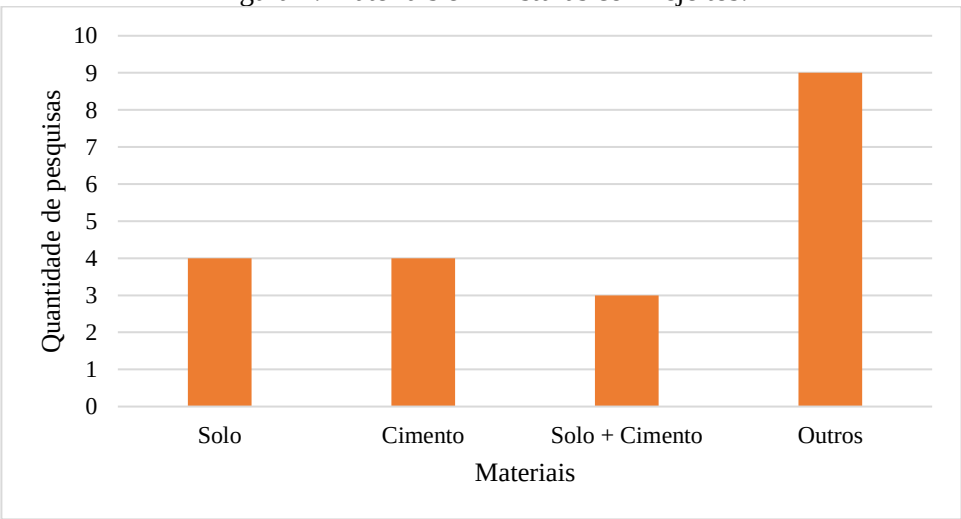
análise previamente definidas e apresentadas, possibilitando a sistematização das informações e a identificação de tendências relacionadas à aplicação de resíduos de minério de ferro em camadas de pavimentação. O objetivo central desta etapa consistiu em compreender o panorama das pesquisas desenvolvidas no âmbito da reutilização dos rejeitos de minério de ferro em diferentes camadas do pavimento.

Inicialmente, analisou-se o tipo de rejeito empregado em cada estudo, sendo identificadas quatro classificações: ultrafino, fino, grosseiro e variado. Verificou-se predominância significativa dos rejeitos finos, presentes em 20 pesquisas. Em menor proporção, quatro estudos utilizaram materiais com granulometria variada, três empregaram rejeitos grosseiros e apenas um investigou rejeito ultrafino. A predominância de rejeitos finos está associada, principalmente, aos processos de beneficiamento empregando etapas cada vez mais modernas, procurando recuperar mais ferro, o que favorece a substituição parcial dos agregados miúdos por esse material residual.

Quanto à finalidade de aplicação, os estudos foram agrupados em duas categorias: uso em camadas estruturais do pavimento e uso em revestimento asfáltico. Observou-se que a maioria das pesquisas concentrou-se na aplicação em camadas estruturais, totalizando 19 estudos, enquanto nove abordaram o emprego em revestimento asfáltico. Em conjunto com essa etapa, avaliou-se a utilização do rejeito de minério de ferro em substituição total aos agregados ou em misturas para substituições parciais. Apenas oito pesquisas empregaram o rejeito como substituição total do agregado, enquanto 20 realizaram misturas com outros materiais, com a finalidade de estabilização e melhoria de desempenho.

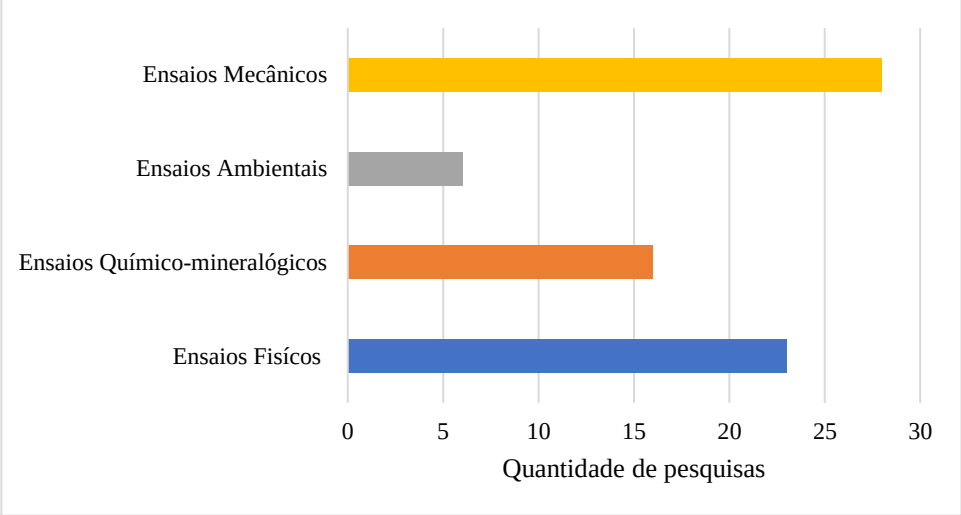
Dentre as pesquisas que utilizaram o rejeito em misturas com outros materiais, foi possível identificar alguns componentes com maior recorrência de análise. Na Figura 2, observa-se que a maioria dos estudos avalia a mistura do rejeito com solo (geralmente solo local da própria pesquisa), cimento ou a combinação de solo e cimento. As demais investigações envolvem misturas com outros resíduos, como cinzas de incineração de resíduos sólidos, apresentadas no estudo de Jing *et al.* (2023a), ou ainda o emprego de resíduo de escavação de túneis conforme Jing *et al.* (2023b). Grande parte das pesquisas que utilizam materiais alternativos contém a combinação de mais de um componente juntamente ao rejeito.

Figura 2. Materiais em misturas com rejeitos.



Em seguida, realizou-se a análise dos ensaios laboratoriais executados em cada estudo, os quais foram divididos em quatro grupos: ensaios físicos, químico-mineralógicos, ambientais e mecânicos. Na Figura 3 está apresentada a quantidade de pesquisas que realizaram ao menos um ensaio pertencente aos grupos mencionados. Os ensaios ambientais configuram-se como os menos recorrentes, estando presentes em apenas seis estudos, em todos eles foi realizado o ensaio de lixiviação e, em alguns casos, o ensaio de solubilização apareceu de forma complementar à análise.

Figura 3. Quantidade de ensaios realizados por grupo.



Em sequência dos ensaios menos recorrentes, destacam-se os ensaios químico-mineralógicos, presentes em dezesseis pesquisas. Dentre eles, os ensaios de difração de raios X (DRX) e fluorescência de raios X (FRX) foram os mais frequentes, estando ao menos um desses procedimentos presentes em todos os estudos que contemplaram essa categoria. Em seguida, os ensaios físicos aparecem em quase a totalidade das investigações, sendo identificados em 23 trabalhos, com predominância das análises de granulometria, limites de Atterberg e densidade. Em alguns casos, especialmente em pesquisas voltadas ao uso em pavimentação asfáltica, observam-se ainda ensaios como penetração, ponto de amolecimento e viscosidade.

Por fim, os ensaios mecânicos foram encontrados em todas as pesquisas, ensaios como resistência à compressão, resistência a tração, compactação Proctor, CBR (*California Bearing Test*) e módulo de resiliência, foram os mais recorrentes, da mesma forma que nos ensaios físicos, em alguns casos aparecem ensaios de *creep* estático e *creep* dinâmico, e também ensaio de MSCR (*Multiple Stress Creep and Recovery*).

Quanto aos resultados obtidos pelas pesquisas analisadas, de modo geral os estudos reportaram desempenho satisfatório dentro dos parâmetros normativos avaliados. Em estudos que avaliaram substituições parciais em diferentes proporções, observou-se que determinadas porcentagem apresentaram desempenho superior as demais. Como exemplo, destaca-se a substituição de 40% do agregado graúdo na pesquisa de Gayana e Ram Chandar (2018); no estudo de Babatude *et al.* (2020), verificou-se maior resistência com 8% de substituição; e, na investigação conduzida por Guimarães *et al.* (2024), as porcentagens de 17% e 20% apresentaram os melhores resultados quanto ao módulo de resiliência e à resistência à fadiga em comparação à mistura referência (sem rejeito).

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente revisão sistemática permitiu analisar o panorama das pesquisas voltadas ao reaproveitamento de rejeitos de minério de ferro na pavimentação, evidenciando tendências quanto aos tipos de materiais empregados, formas de incorporação e métodos de avaliação utilizados. Verificou-se a predominância de estudos que utilizam rejeitos finos, majoritariamente aplicados em camadas estruturais e incorporados por meio de substituições parciais associadas a outros materiais, como solo e cimento.

De modo geral, os resultados apresentados indicam desempenho técnico satisfatório, atendendo a requisitos normativos e, em alguns casos, melhorias mecânicas com proporções específicas de substituição, reforçando o potencial de aplicação desses resíduos como alternativa viável aos agregados convencionais. Contudo, observa-se que a maioria das pesquisas se concentra na análise mecânica, sendo menos frequentes as análises ambientais, o que evidencia uma lacuna de investigação que necessita de avaliação tanto a curto como a longo prazo.

As pesquisas que abordaram as análises ambientais apontaram positivamente para o uso do rejeito na pavimentação, não indicando a possibilidade de contaminação do solo. Contudo, observa-se que as poucas análises ambientais, foram realizadas em condições de curto prazo, não possuindo avaliações que considerem

o comportamento ambiental a longo prazo. Essa limitação demonstra a existência de uma lacuna cientifica nas análises para a investigação ambiental, o que é apontado nos estudos considerados. Embora, a preocupação principal das pesquisas esteja relacionada ao desempenho mecânico do material, por se tratar de um resíduo, é imprescindível que as análises ambientais, e químicas também, sejam realizadas, para garantir a aplicação do mesmo.

Observa-se que, embora os resultados técnicos sejam promissores, a baixa incidência de análises ambientais representa uma lacuna relevante. A avaliação do comportamento ambiental, tanto a curto quanto a longo prazo, é fundamental para assegurar a segurança e a sustentabilidade da aplicação desses materiais. Dessa forma, recomenda-se que futuras pesquisas integrem de maneira mais consistente os aspectos mecânicos e ambientais.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo suporte financeiro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Andalicio, A. F., Pereira, E. L., Oliveira, T. M. (2022) Flexible pavement with mining waste proposal - execution and analysis of an experimental section. *REM - Revista Internacional de Engenharia*, vol. 75, no. 4, pp. 297–305.

Apaza, F. R. A. *et al.* (2021) Evaluation of the performance os iron ore waste as potential recycled aggregate for micro-surfacing type cold asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*, vol. 266, 2021.

Babatunde, A. Q. *et al.* (2020) Effect of elapsed time after mixing on the strength properties of lime–iron ore tailings treated black cotton soil as a road construction material. *Infrastructures*, vol. 5, no. 11, p. 89.

Brasil, Agência Nacional de Mineração. (2025) *Anuário Mineral Brasileiro: Principais Substâncias Metálicas*. Brasília, DF. Disponível em: www.anm.gov.br. Acesso at: 22 Feb. 2026.

Cao, L. *et al.* (2022) Utilization of iron tailings as aggregates in paving asphalt mixture: A sustainable and eco-friendly solution for mining waste. *Journal of Cleaner Production*, vol. 37.

Carmignano, O. R. *et al.* (2021) Iron Ore Tailings: Characterization and Applications. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, vol. 32, no. 10, p. 1895–1911.

Dantas, A. A. N. (2019) *Avaliação do comportamento mecânico, geoquímico, mineralógico e geoambiental de um rejeito de minério de ferro incorporado a um solo laterítico para fins rodoviários*. Tese de Doutorado em Geotecnia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 226 p.

Dong, Y. *et al.* (2021) Study on mechanical properties of recycled mixture with high content of iron tailings sand. *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2021, p. 12, 2021.

Galhardo, D. C. *et al.* (2024) Influence of iron mining waste addition as a sustainable alternative on the resilient and physical properties of soils for pavement design. *Sustentability*, vol. 16, no. 23.

Gayana, B. C., Ram Chandar, K. (2018) A study on suitability os iron ore overburden waste rock for partial replacement os coarse aggregates in concrete pavements. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, v. 431, n. 10, Institute of Physics Publishing.

Guimarães, A. C. R. *et al.* (2024) Evaluation of the Mechanical Behavior of Asphaltic Mixtures Utilizing Waste of the Processing of Iron Ore. *Mining*, vol. 4, no. 4, pp. 889–903.

Jahanshahi, F. S., Ghanizadeh, A. R. (2024) Compressive strength, durability, and resilient modulus of cement-treated magnetite and hematite iron ore tailings as pavement material. *Construction and Building Materials*, vol. 447.

Jahanshahi, F. S., Ghanizadeh, A. R. (2025) Machine learning approaches for resilient modulus modeling of cement-stabilized magnetite and hematite iron ore tailings. *Scientific Reports*, vol. 15, no. 1.

Jiang, P. *et al.* (2022) Study on compressive properties and dynamic characteristics of polypropylene-fiber-and-cement-modified iron-ore tailing under traffic load. *Polymers***,** vol. 14, no. 10, p. 1995.

Jing, C. *et al.* (2023a) Experimental study on iron ore tailings sand and municipal solid waste incineration fly ash used in semi-rigid base of asphalt pavement. *Construction and Building Materials*, vol. 393.

Jing, C. *et al.* (2023b) Laboratory investigation of solid wastes combined with tunnel slag in cement stabilized base of asphalt pavement. *Construction and Building Materials*, vol. 392.

Kong, Y. *et al.* (2024) Investigation on utilization and microstructure of fine iron tailing slag in road subbase construction. *Construction and Building Materials*, vol. 447.

Li, Y. *et al.* (2025) Application of composite cementitious materials and mine wastes in pavement concrete: Mechanical properties, durability, application examples. *Construction and Building Materials*, vol. 469.

Lopes, M. M. (2022) *Análise Mecânica e Microestrutural de um Rejeito de Minério de Ferro Ultrafino Estabilizado Com Solução Polimérica*. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 67 p.

Martinez, J. G. B. (2017) *Asfaltos e Misturas Modificadas com Materiais Alternativos*. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 206 p.

Narciso, M. M. *et al.* (2025) Optimizing the Thermal Treatment of Mining-Waste-Amended Clays for Ceramic Aggregates in Pavement Applications. *Materials*, vol. 18, no. 13.

Oda, S. *et al.* (2024) Utilização de resíduos de mineração na construção de pavimentos rodoviários. *Revista Matéria*, vol. 29, no. 2.

Ren, Q. *et al.* (2024) Effect of Iron Ore Tailings Replacing Porous Basalt on Properties of Cement Stabilized Macadam. *Korean Journal of Materials Research*, vol. 34, no. 6, pp. 291–302.

Rodrigues, K. H. P. (2018) *Estudo de Estabilização Granulométrica de Solos Utilizando Rejeitos de Mineração.* Dissertação de Mestrado, Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, 108 p.

Sá, T. S. W. *et al.* (2022) Use of iron ore tailings and sediments on pavement structure. *Construction and Building Materials*, vol. 342.

Santos, D. D. C. (2024) *Estudo da Utilização de Rejeito de Minério de Ferro em Pavimento de Acessos de Mina*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 90 p.

Satheesh, A., Gangaputhiran, S. (2025) Avaliação abrangente de rejeitos de minério de ferro e solo litomárgico tratado com cimento para aplicação em pavimentação. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, vol. 11, no. 2.

Silva, R. G. O. (2017) *Caracterização de Concreto Asfáltico Elaborado com Rejeitos de Minério de Ferro do Quadrilátero Ferrífero*. Tese de Doutorado, Núcleo de Geotecnia de Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, 207 p.

Wei, Z. *et al.* (2022) Utilization of iron ore tailing as an alternative mineral filler in asphalt mastic: High-temperature performance and environmental aspects. *Journal of Cleaner Production*, vol. 335.

Xin, Y. *et al.* (2025) Effects of different dosages of iron ore tailings on the fatigue performance of high-strength modified AC asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*, vol. 494.