

Utilização de rejeitos de mineração na construção de pavimentos rodoviários

Use of mining waste in the construction of road pavements

Sandra Oda¹ , Victor Hugo Souza de Abreu¹, Suzana Dias de Sá Fernandez², Thomas Schatzmayr Welp Sá³

¹Universidade Federal do Rio de Janeiro, Programa de Engenharia de Transportes. Av. Horácio Macedo, 2030, 21941-914, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

²Universidade Federal do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia de Transportes. Av. Athos da Silveira Ramos, 149, 21941-909, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

³Université Gustave Eiffel. 5 Bd Descartes, 77420 Champs-sur-Marne, França.

e-mail: sandroda@pet.coppe.ufrj.br, victor@pet.coppe.ufrj.br, suzana.fernandez@poli.ufrj.br, thomas.sa@coc.ufrj.br

RESUMO

O Brasil se destaca como um dos maiores produtores de minérios do mundo. No entanto, essa atividade tão importante economicamente também acarreta danos significativos ao meio ambiente. O problema da disposição dos rejeitos de mineração em barragens ganhou grande repercussão após os desastres em Mariana, em 2015, e Brumadinho, em 2019, que evidenciou a necessidade de encontrar um novo uso para esses materiais. A pesquisa teve como principal objetivo avaliar a adição de rejeitos de minério de ferro em materiais utilizados nas camadas de pavimentos rodoviários, na produção de solo-cimento. Os resultados dos ensaios mecânicos mostraram que é tecnicamente viável adicionar rejeito de minério de ferro nas misturas de solo-cimento, sendo que, para camada de base, foi encontrado o teor mínimo de 6% de cimento, e de 5% e 4% para a camada de sub-base. Isso indica que o rejeito pode ser uma excelente alternativa para reduzir o consumo de cimento. Além disso, essa incorporação poderia reduzir o consumo de recursos naturais, oferecer um destino alternativo para os rejeitos de mineração e até mesmo diminuir os custos das obras de pavimentação. Com essa pesquisa, busca-se uma solução inteligente e sustentável para os impactos causados pelos rejeitos de mineração no Brasil.

Palavras-chave: Rejeito de minério de ferro; Pavimento rodoviário; Solo-cimento.

ABSTRACT

Brazil stands out as one of the largest mineral producers in the world. However, this economically important activity also causes significant damage to the environment. The disposal of mining waste in dams gained great repercussions after the disasters in Mariana, in 2015, and Brumadinho, in 2019, that the need to find a new use for these materials arose. The main objective of the research was to evaluate the addition of iron ore waste to materials used in the base and sub-base layers of road pavements. The results of the mechanical tests demonstrated that it is technically feasible to introduce iron ore waste into the soil-cement mixtures used in the base and sub-base layers. It was found that a minimum of 6% cement in soil-cement mixtures for the base layer, and 5% and 4% for the sub-base layer, are sufficient for the addition of waste. This indicates that waste can be an excellent alternative to reduce cement consumption. This incorporation could reduce the consumption of natural resources, offer an alternative destination for mining waste and even reduce the costs of paving works. With this research, we seek an intelligent and sustainable solution to the impacts caused by mining tailings in Brazil.

Keywords: Iron ore tailings; Road pavement; Soil-cement.

1. INTRODUÇÃO

Com base nos resultados da Pesquisa CNT de Rodovias 2023 da CONFEDERAÇÃO NACIONAL DOS TRANSPORTES [1], estima-se em R\$ 94,12 bilhões o investimento total necessário para a reconstrução, restauração e manutenção das rodovias avaliadas, sendo R\$ 67,52 bilhões (71,7%) em restauração (R\$ 65,49 bilhões) e reconstrução (R\$ 2,03 bilhões), e R\$ 26,60 bilhões (28,3%) em serviços de manutenção do pavimento. Vale

ressaltar que foram avaliados 111.502 quilômetros (67.659 km da malha federal e 43.843 km dos principais trechos estaduais), o que representa 52,2% do total da malha pavimentada brasileira.

Considerando que os investimentos em rodovias realizados entre 2016 e 2022 na média foi de R\$ 8,94 bilhões, valor que representa menos de 20% da necessidade estimada e que, em 2023, apesar de autorizado o valor de R\$ 15,01 bilhões, apenas 60,3% (R\$ 9,05 bilhões) havia sido efetivamente aplicado, espera-se que em 2024, um valor similar seja disponibilizado. Por esse motivo, é de se esperar que a maioria dos pavimentos não receberá qualquer tipo de manutenção, o que irá acelerar o seu processo de deterioração, aumentando ainda mais os custos necessários para recuperação e manutenção [2].

Além disso, as obras de pavimentação demandam uma grande quantidade de materiais naturais, como solos e materiais granulares, o que também resulta em um alto custo financeiro [3]. Mesmo não construindo novos pavimentos, o consumo anual de alguns materiais é muito alto. Por exemplo, o consumo médio de asfalto na última década é de mais de 2,3 milhões de toneladas por ano (Figura 1) [4], praticamente empregado em serviços de manutenção de pavimentos velhos e desgastados! Essa quantidade de asfalto seria suficiente para construir mais de 40.000 km de novos pavimentos por ano. No entanto, esse número está muito longe de ser atingido, segundo dados da CNT [1], nos últimos 10 anos foram construídos apenas 12.969 km de pavimentos novos (Figura 2), ou seja, 3,2% da quantidade que poderia ser construída (40.000 km/ano × 10 anos = 400.000 km)!

Por esses motivos, é fundamental considerar a utilização de materiais alternativos, como os rejeitos de mineração, na construção de pavimentos, alinhando-se com os princípios da economia circular [5, 6]. Ao incorporar esses materiais secundários em novas aplicações, não apenas se está mitigando o descarte de

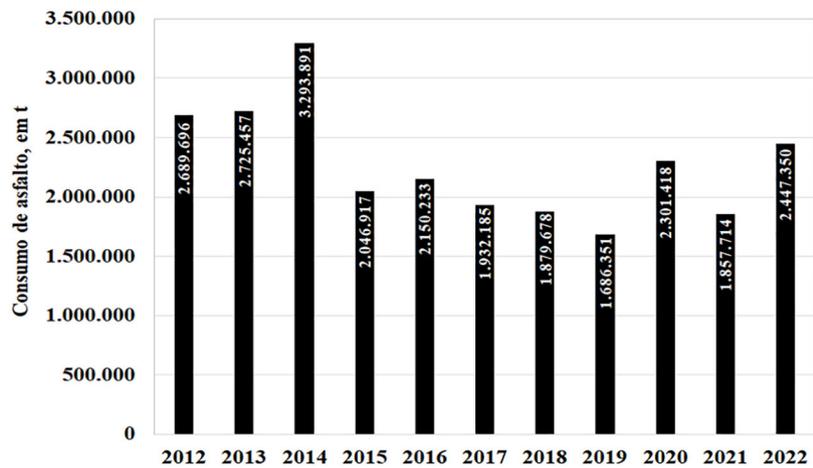


Figura 1: Consumo médio de asfalto no Brasil – Desenvolvido com dados da ABEDA [4].

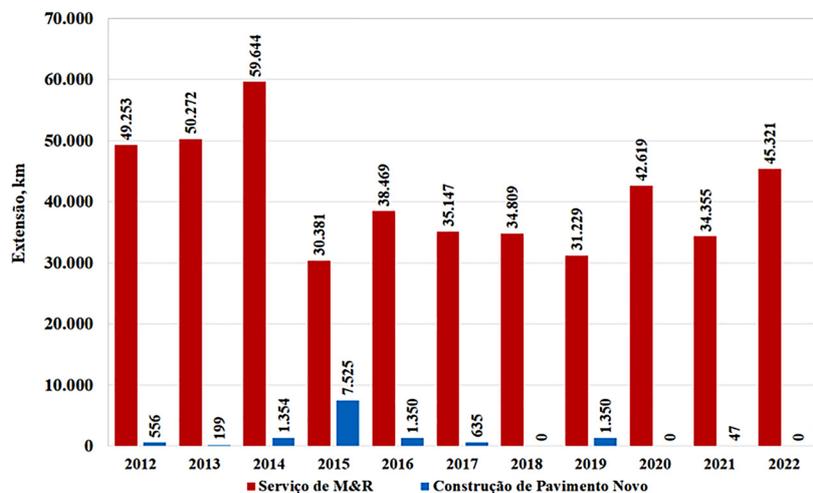


Figura 2: Extensão de pavimentos que receberam serviços de manutenção e reabilitação (M&R) e de novos pavimentos – Desenvolvido com dados da CNT [1].

resíduos, mas também promovendo a transição para um modelo mais sustentável e regenerativo [7, 8]. Essa prática representa um importante avanço rumo à economia circular, onde os recursos são mantidos em ciclos de uso prolongado, minimizando a extração de matéria-prima virgem e reduzindo os impactos ambientais associados [9].

Segundo AGUIAR [10], no ano de 2010, o Estado de Minas Gerais depositou em barragens cerca de 49 milhões de metros cúbicos de rejeito de minério de ferro, resultado da atividade mineradora, gerando danos de grande impacto ambiental. Dado este contexto, torna-se essencial investir em soluções adequadas que reduzam os impactos ao meio ambiente, visando reduzir custos e garantir a segurança operacional para a população e para as empresas do setor.

Portanto, o objetivo desta pesquisa foi avaliar a viabilidade técnica da adição de rejeitos de minério de ferro em misturas de solo-cimento para pavimentação. Para isso, foram produzidas misturas de solo (S), cimento (C) e rejeito (R), variando as proporções de cada material. Os corpos de prova cilíndricos foram submetidos aos ensaios mecânicos e verificou-se se essas misturas atendiam aos critérios de resistência à compressão estabelecidos pelas especificações técnicas para a utilização em pavimentos rodoviários.

Cabe ressaltar que este estudo está alinhado aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da Organização das Nações Unidas [11], mais especificamente aos objetivos:

- ODS 9 – Indústria, Inovação e Infraestrutura: A pesquisa pode contribuir para a inovação no setor de construção de infraestrutura rodoviária, propondo soluções alternativas e sustentáveis para a utilização de rejeitos de mineração.
- ODS 11 – Cidades e Comunidades Sustentáveis: Ao utilizar rejeitos de mineração na construção de pavimentos rodoviários, o estudo pode promover práticas sustentáveis na infraestrutura urbana, contribuindo para cidades mais resilientes e sustentáveis.
- ODS 12 – Consumo e Produção Responsáveis: A pesquisa aborda a utilização responsável de recursos ao explorar uma alternativa sustentável na construção de pavimentos, reduzindo a dependência de materiais convencionais e promovendo o uso eficiente de recursos.
- ODS 13 – Ação Contra a Mudança Global do Clima: Ao reduzir a demanda por materiais convencionais na construção de pavimentos, o estudo pode contribuir para a mitigação das emissões de carbono associadas à produção e transporte desses materiais.
- ODS 15 – Vida Terrestre: A pesquisa aborda diretamente a gestão sustentável dos rejeitos de mineração, evitando impactos negativos no ecossistema e explorando maneiras de reutilizar esses materiais de forma benéfica.
- ODS 17 – Parcerias para as Metas: Colaborações entre instituições acadêmicas, indústria e governos podem ser promovidas para implementar práticas sustentáveis na construção de pavimentos, contribuindo para a realização dos ODS de maneira mais ampla.

1.1. Pavimento

Tecnicamente, “pavimento é uma estrutura composta por camadas construída sobre uma fundação (terreno natural) denominada de subleito”, destinado a resistir aos esforços do tráfego de veículos e do clima, e a propiciar aos usuários boas condições de rolamento, com conforto, segurança e economia [12]. Independentemente do tipo do pavimento, que pode ser flexível (asfáltico) ou rígido (de concreto), este pode ser composto por várias camadas: revestimento, base, sub-base e reforço do subleito. A quantidade e a espessura de cada camada variam de acordo com a qualidade do subleito, com o tráfego que irá solicitar o pavimento e com as características dos materiais que compõem a sua estrutura [6].

Em geral, as camadas do pavimento são compostas por materiais naturais, como solos e agregados. No entanto, nem sempre os materiais disponíveis na região da obra possuem as características adequadas de granulometria e capacidade de suporte necessárias para garantir a durabilidade e a estabilidade do pavimento [13]. Diante disso, torna-se comum recorrer à utilização de aditivos que visam melhorar e otimizar as propriedades dos materiais utilizados [14]. Esses aditivos desempenham um papel fundamental no aumento da resistência do pavimento, contribuindo para sua capacidade de suportar cargas, resistir à deterioração causada pelo tráfego e às variações climáticas, prolongando assim sua vida útil e reduzindo a necessidade de manutenção ao longo do tempo [15, 16]. Um exemplo disso é a adição de cimento na produção de solo-cimento, que é utilizado nas camadas de base e de sub-base dos pavimentos [17]. Essa adição de cimento aumenta a resistência da camada, de forma a atingir as especificações técnicas exigidas. A quantidade de cimento varia de acordo com as características do solo e a resistência desejada. Em geral, pavimentos que demandam menor resistência têm entre

3% a 5% de cimento na mistura, chamada de solo melhorado com cimento. Já para pavimentos que necessitam de maior resistência, a quantidade de cimento pode variar de 5% a 10% e o resultado é o solo-cimento.

Vale ressaltar que solos muito argilosos não são ideais para receber adição de cimento, pois exigem um teor elevado desse material e nem sempre atingem a resistência mínima exigida pela especificação técnica. Nesses casos, é necessário adicionar um material mais arenoso ou granular para melhorar as características do solo. O rejeito de mineração, por possuir uma granulometria mais adequada, é considerado uma boa alternativa e de baixo custo para esse propósito.

1.2. Rejeito de mineração

A atividade de mineração no Brasil desempenha um papel social e econômico de enorme importância para o país, abrangendo uma vasta gama de minerais e recursos naturais [18]. Entre esses recursos, o minério de ferro (Figura 3) se destaca como um dos principais produtos da indústria extrativa brasileira. Além de sua significativa contribuição para a economia nacional, a mineração de minério de ferro desempenha um papel crucial na cadeia produtiva global, fornecendo matéria-prima essencial para a produção de aço, um dos pilares da indústria moderna.

De acordo com SANTOS [20], para obter o ferro, o minério passa por várias etapas, como peneiramento, britagem, moagem, deslamagem e flotação em colunas. Quase todas as etapas envolvem o uso de água, o que resulta em rejeitos de mineração na forma de “polpa”, composta por uma parte líquida e uma sólida com elementos químicos dissolvidos e diferentes minerais em suspensão.

Segundo o INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO [21], em 2019, o Brasil produziu cerca de 410 milhões de toneladas de minério de ferro e, conseqüentemente, gerou uma grande quantidade de rejeitos. Para cada tonelada de minério de ferro produzido é gerada, em média, 0,5 tonelada de rejeitos, geralmente, dispostos em aterros (Figura 4). Assim, estima-se que, em 2019, a geração de rejeito de minério de ferro tenha atingido a marca de 205 milhões de toneladas. Isso torna evidente a necessidade de novas soluções para dar destino a esses rejeitos, sendo que, atualmente, o rejeito de minério de ferro é aquele que possui uma pesquisa mais desenvolvida, devido à sua importância na economia brasileira e à quantidade elevada de mineral extraído por ano [21].

Uma das alternativas para aproveitar os rejeitos de minério de ferro é a aplicação em pavimentação [23], que pode ser feito de diferentes maneiras [18, 24]:

- Mistura de solo e rejeito para camadas de reforço do subleito, sub-base e base,
- Estabilização química por meio de misturas rejeito + cimento ou rejeito + cal para camadas de sub-base e base,



Figura 3: Produção de minério de ferro [19].

- Estabilização granulométrica por meio de misturas agregados + rejeito para camadas de sub-base e base,
- Produção de concreto (concreto + rejeito) para camadas de revestimento e base, e
- Fabricação de blocos de concreto (blocos de rejeito + cimento) para camadas de revestimento de piso intertravado.

Ao integrar rejeitos de mineração na construção de pavimentos, não apenas se está reduzindo o desperdício, mas também aproveitando os recursos disponíveis de forma mais eficiente [20]. Essa abordagem não só preserva os recursos naturais finitos, mas também diminui a necessidade de deposição em aterros (Figura 5) e a consequente ocupação de espaço e impactos ambientais negativos [26].

Além disso, ao fomentar o uso de materiais alternativos, está-se incentivando a inovação e o desenvolvimento de tecnologias que buscam maximizar o valor dos recursos existentes [27]. Isso não apenas impulsiona a economia circular, mas também fortalece a resiliência dos sistemas econômicos ao diversificar as fontes de matéria-prima e reduzir a dependência de recursos escassos.



Figura 4: Rejeito de minério de ferro [22].



Figura 5: Disposição do rejeito de minério de ferro [25].

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta pesquisa, foram utilizados diferentes materiais (solo, rejeito de minério de ferro e cimento), de origens diversas e características específicas. O solo utilizado foi coletado de uma obra de pavimentação de uma avenida, em andamento, no bairro da Praça Seca, na cidade do Rio de Janeiro, e fazia parte de uma camada compreendida entre as profundidades de 1,00 m e 1,50 m. O solo coletado foi armazenado em sacos plásticos de 25 kg [28]. O cimento utilizado é da marca Votorantim e pertence à classe CP-II.

O rejeito de minério de ferro utilizado como objeto de estudo neste contexto foi adquirido através de uma minuciosa operação de dragagem realizada na Usina Hidrelétrica Risoleta Neves, amplamente reconhecida como Candonga (Figura 6). Esta hidrelétrica ocupa uma posição geográfica estratégica na região do Rio Doce, situada entre os municípios de Rio Doce e Santa Cruz do Escalvado, no estado de Minas Gerais [23, 30].

É imprescindível ressaltar que a Usina Hidrelétrica Risoleta Neves foi a segunda infraestrutura do gênero a ser impactada de maneira significativa pela inundação de lama de rejeitos de minério. Este evento traumático se desdobrou após o trágico rompimento da Barragem do Fundão, ocorrido em Mariana no ano de 2015, o que conferiu a Candonga uma relevância histórica e ambiental ainda mais marcante.

Aprofundando a análise, é crucial enfatizar o contexto geográfico específico da Usina Candonga e a importância de compreender a extensão do impacto ambiental na região circunvizinha. A relação entre os eventos de Mariana e as consequências observadas em Candonga destaca a interconexão intrínseca entre diferentes empreendimentos e os desafios enfrentados na gestão responsável dos resíduos de mineração, especialmente no que tange à construção de pavimentos e outras aplicações.

2.1. Preparação dos materiais

Inicialmente, o solo e o rejeito foram submetidos aos processos de secagem, destorroamento, homogeneização e quarteamto. Para a secagem, os materiais foram colocados sobre uma lona plástica, onde ficaram expostos ao sol, sendo o solo mantido por 48 horas e o rejeito por 72 horas. No processo de destorroamento, os materiais foram inseridos em um equipamento (Figura 7a) para que partículas aglomeradas (Figura 7b) fossem desagregadas (Figura 7c).

Para alcançar uma homogeneização eficaz, os materiais, incluindo solo e rejeitos, foram cuidadosamente dispostos em camadas separadas sobre uma lona plástica, utilizando o método de pilhas alongadas, conforme apresentado na Figura 8. Esse processo é essencial para garantir uma distribuição uniforme dos materiais e para promover a integração adequada de suas propriedades. Ao organizar os materiais em pilhas alongadas, permite-se uma melhor mistura e interação entre os componentes, resultando em uma composição mais homogênea e coesa.



Figura 6: Usina Risoleta Neves inoperante devido ao acúmulo de rejeitos próximo à crista da barragem [29].



Figura 7: Destorroamento de materiais [31].

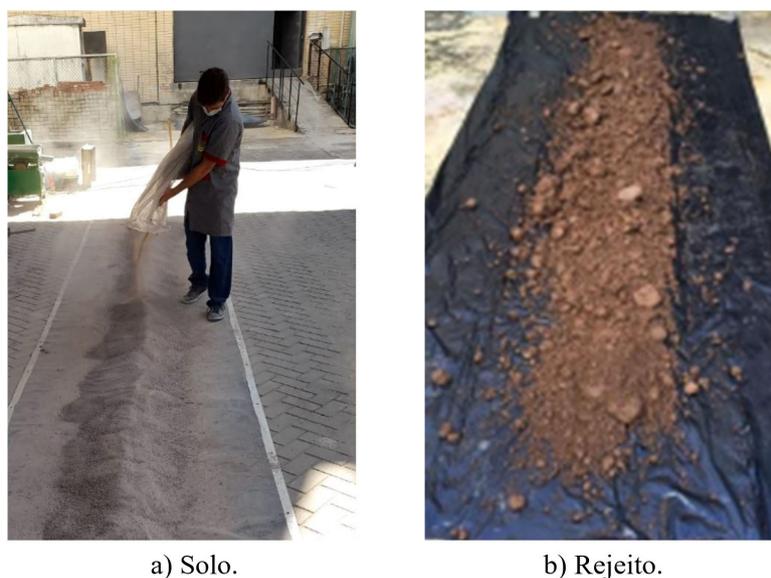


Figura 8: Homogeneização dos materiais [31].

Além disso, a utilização da lona plástica ajuda a conter os materiais durante o processo, evitando dispersões indesejadas e facilitando o controle sobre a operação de homogeneização. Esse cuidadoso procedimento é fundamental em diversos contextos, como na preparação de misturas para construção civil, na reciclagem de resíduos ou em processos industriais, onde a uniformidade e a consistência dos materiais são essenciais para alcançar os resultados desejados.

Para garantir a representatividade das amostras, foi adotado o método de quarteamento (Figura 9) para sua divisão em porções adequadas. Esse procedimento é crucial para obter uma amostragem fiel e significativa do material em questão. O quarteamento consiste em uma técnica sistemática que permite a redução da amostra original em frações menores, mantendo a proporção e as características essenciais do material. Esse processo é especialmente importante em estudos científicos, análises laboratoriais e em diversas áreas da indústria, onde é essencial trabalhar com amostras representativas

Ao dividir as amostras de maneira precisa e controlada, o quarteamento proporciona uma base confiável para análises subsequentes, experimentos ou testes, garantindo resultados mais precisos e confiáveis. Assim, o uso dessa técnica contribui significativamente para a qualidade e a validade dos dados obtidos, possibilitando uma melhor compreensão e interpretação dos fenômenos estudados.

2.2. Caracterização dos materiais

Após a preparação, os materiais foram submetidos aos ensaios para caracterização (análise granulométrica, massas específicas e limites de consistência). A análise granulométrica foi realizada por peneiramento, onde foi possível determinar, além da granulometria (Tabela 1), a composição dos materiais (Tabela 2).



a) Solo.



b) Rejeito.

Figura 9: Quarteamento de materiais [31].

Tabela 1: Granulometria dos materiais [23].

PENEIRA (mm)	% PASSANTE		
	SOLO	REJEITO	SOLO + REJEITO
25,0	100,0	100,0	100,0
19,1	100,0	96,1	99,6
9,52	99,7	78,4	97,6
4,75	99,3	56,1	95,0
2,38	96,7	31,7	90,2
1,18	77,1	17,3	71,1
0,60	53,7	14,9	49,8
0,42	37,9	12,2	35,3
0,30	22,9	10,0	21,6
0,15	9,5	5,6	9,1
0,075	3,9	2,2	3,7

Tabela 2: Composição dos materiais [23].

MATERIAL	SOLO	REJEITO
Pedregulho	3,3%	68,3%
Areia Grossa	43,0%	16,8%
Areia Média	38,7%	6,4%
Areia Fina	12,0%	6,5%
Silte + Argila	3,0%	2,0%

A avaliação das propriedades do solo se baseia nos limites de consistência, representados pelo LL (limite de liquidez) conforme ilustrado na Figura 10a, e pelo LP (limite de plasticidade) apresentado na Figura 10b. Esses parâmetros são cruciais para a determinação do IP (índice de plasticidade), que, em conjunto com o LL, é amplamente utilizado para analisar o comportamento do solo em relação à umidade.

Essa análise torna-se fundamental na avaliação da estabilização do material, desempenhando um papel essencial na formulação e seleção de misturas de solo-cimento ou solo melhorado com cimento para as camadas de base e sub-base de pavimentos. A compreensão aprofundada desses limites proporciona insights valiosos para otimizar não apenas a resistência estrutural, mas também a durabilidade e desempenho das camadas de pavimentação, contribuindo assim para a sustentabilidade e eficiência dos projetos rodoviários.

A análise dos resultados revela que o solo em questão apresenta um LL (limite de liquidez) de 37,6% e um IP (índice de plasticidade) de 16,4%. Esses valores excedem os limites convencionais estabelecidos para solos padrão ($LL \leq 25\%$ e $IP \leq 6\%$). Esta disparidade sinaliza que o solo, em sua forma pura, não atende aos critérios usuais para materiais de pavimentação.

No entanto, essa constatação não apenas destaca a necessidade de intervenção, mas também oferece uma oportunidade valiosa para a aplicação de técnicas de estabilização, como a incorporação de cimento, visando adequar suas características às exigências específicas das camadas de base e sub-base de pavimentos. A compreensão desses parâmetros é crucial para direcionar estratégias de formulação de misturas que busquem otimizar não apenas a resistência, mas também a viabilidade e sustentabilidade do material utilizado em projetos rodoviários.

Também foram realizados ensaios para determinar a massa específica real do solo, a massa específica e a superfície específica do rejeito. A massa específica real do solo foi de $2,597 \text{ g/cm}^3$ e a do rejeito foi de $2,801 \text{ g/cm}^3$. A superfície específica do rejeito foi de $1640 \text{ cm}^2/\text{g}$. A classificação do solo foi realizada empregando dois métodos: HRB (Highway Research Board) e MCT (miniatura, compactado, tropical).

Apesar do método HRB ter sido desenvolvido para classificar solos para pavimentação, os solos de climas tropicais não são considerados nesta classificação. Por isso, também foi realizada a classificação MCT, que é um método específico para solos tropicais para uso em pavimentação. De acordo com o método HRB, o solo é um material granular de classe A 2–6, em que o material predominante é a areia siltosa ou argilosa. Segundo a metodologia MCT, esse solo apresentou perda de massa por imersão de 118%, coeficientes $c' = 1,33$ e $e' = 0,56$, sendo, portanto, de classe LA' – solo arenoso laterítico (Figura 11).

2.3. Dosagem de solo-cimento

Com base nos resultados da caracterização do solo, tornou-se evidente que o solo puro não atende às especificações exigidas para materiais destinados às camadas de pavimentação. Diante dessa constatação, foi adotada a abordagem de mistura com cimento, resultando na composição de solo-cimento. A determinação da quantidade



a) Aparelho utilizado no ensaio de LL.



b) Preparação dos bastões para ensaio de LP.

Figura 10: Ensaios de caracterização dos solos.

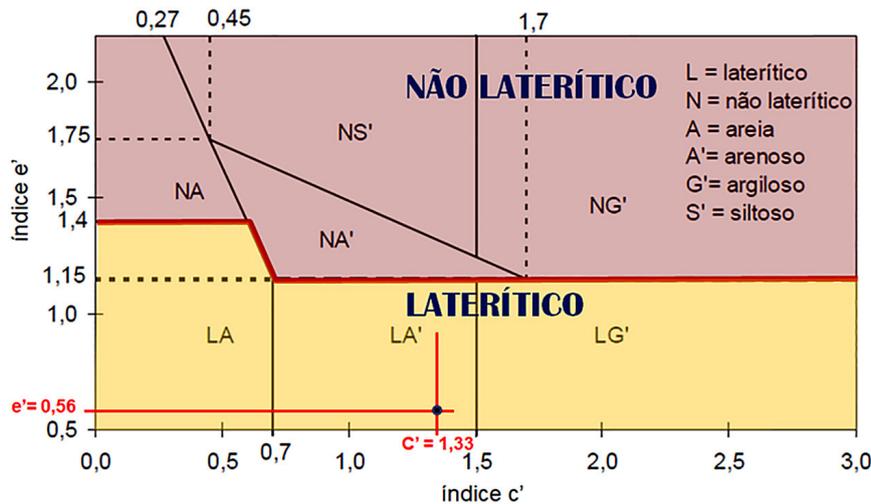


Figura 11: Ábaco da classificação MCT.

de cimento foi realizada através do método preconizado pela ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland), seguindo as diretrizes da norma ABNT NBR 12253 [32].

Inicialmente, o teor estimado de cimento para uma mistura padrão de solo + cimento foi calculado, levando em consideração a composição específica do solo conforme detalhado na Tabela 2. O teor calculado foi de 8%. Esse mesmo teor foi adotado para as formulações das misturas de rejeito + cimento e de solo + cimento + rejeito. Cabe ressaltar que o teor de rejeito utilizado foi de 10%, obtido previamente em experimentos conduzidos no laboratório [30].

Essa abordagem permite não apenas ajustar as propriedades do solo para atender aos requisitos de pavimentação, mas também destaca a importância da pesquisa prévia no laboratório para determinar as proporções ideais, garantindo assim a eficácia e sustentabilidade das misturas empregadas em futuros projetos rodoviários.

2.4. Moldagem e cura dos corpos de prova

Para avaliar a resistência das misturas de solo-cimento, através de ensaios de compressão uniaxial foram moldados 3 corpos de prova, CPs, de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura, de cada mistura. A produção das misturas e a moldagem dos CPs foram feitos da seguinte forma:

- Pesagem das massas dos materiais (Figura 12a),
- Mistura do cimento, solo e rejeito, respectivamente, e homogeneização manual da mistura (Figura 12b),
- Moldagem dos CPs em três camadas, na energia intermediária do ensaio de Proctor (Figuras 13a e 13b),
- Desmoldagem dos CPs, após de 24 horas de cura,
- Armazenamento dos CPs em câmara úmida, por um período de cura de 7 dias, e
- Para assegurar o paralelismo entre as superfícies de topo e da base, antes dos ensaios de resistência à compressão simples (RCS), os CPs foram submetidos ao capeamento com enxofre e cinza volante (Figura 14).

2.5. Procedimentos de ensaios

Os ensaios de resistência à compressão foram realizados no Laboratório de Estruturas (LABEST) da COPPE/UFRJ, em uma prensa com capacidade de 100 toneladas (Figura 15), de acordo com os procedimentos da ABNT NBR 12025:2012 [34]. A velocidade de deslocamento da mesa foi de 0,3 mm/min e os deslocamentos axiais foram medidos por dois transdutores elétricos fixados na zona central do CP. A partir da aquisição dos dados de força e deslocamentos axiais, foi possível determinar a curva tensão por deformação de cada CP.

3. RESULTADOS E ANÁLISE DOS RESULTADOS

A Tabela 3 apresenta os resultados das misturas com 8% de cimento.

Com base nos resultados obtidos, é possível constatar que as combinações de solo e cimento (S + C) e de solo, cimento e rejeito (S + C + R) atenderam aos requisitos de resistência, com valores consideravelmente



a) Pesagem dos materiais.



b) Mistura dos materiais.

Figura 12: Preparação da mistura de solo cimento [33].



a) Compactação.



b) Identificação dos CPs.

Figura 13: Moldagem dos CPs [33].



a) Capeamento dos CPs com enxofre.



b) CPs prontos para o ensaio de RCS.

Figura 14: Preparação dos CPs para o ensaio de RCS [33].



a) Prensa utilizada no ensaio de RCS.



b) CP pronto para o ensaio de RCS.

Figura 15: Ensaio de resistência à compressão simples, RCS – Laboratório de Ensaio Mecânicos – LABEST – PEC/ COPPE/UFRJ.

Tabela 3: Resistência à compressão das misturas com 8% de cimento.

% DE CIMENTO	MISTURA	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES (MPa)			MÉDIA (MPa)	APLICAÇÃO
		CP1	CP2	CP3		
8%	S + C	4,72	5,29	4,67	4,89	BASE
	S + C + R	3,74	3,96	4,90	4,20	BASE
	R + C	1,39	1,64	1,56	1,53	NÃO ATENDE

Fonte: FERNANDEZ *et al.* [35].

altos, atingindo, na média, praticamente o dobro do limite mínimo estabelecido (limite mínimo de 2,1 MPa). A mistura de rejeito e cimento não atendeu ao limite para camada de base, mas poderia ser aplicada em sub-base, pois o limite mínimo é de 1,2 MPa.

Entretanto, frente ao fato de que o cimento figura como o componente mais dispendioso e que sua produção contribui substancialmente para a emissão de poluentes, emerge a constante busca por estratégias que permitam a minimização de seu consumo. Assim, com a intenção de alinhar a eficácia técnica com a sustentabilidade ambiental, empreendeu-se o esforço de determinar a quantidade mínima de cimento essencial para atender aos requisitos das camadas de base e sub-base em pavimentos. Este enfoque meticuloso foi aplicado tanto nas misturas de solo-cimento quanto nas misturas de solo melhorado com cimento, considerando não apenas a otimização do desempenho estrutural, mas também a redução significativa dos impactos ambientais associados à produção e aplicação de cimento.

A combinação de rejeito com apenas 8% de cimento foi capaz de atender às especificações exigidas para a sub-base, alcançando uma resistência de 1,53MPa. No entanto, ao considerar a intenção de reduzir o teor de cimento na mistura, existe uma probabilidade significativa de que uma redução adicional comprometeria a resistência, inviabilizando sua utilização até mesmo como sub-base. Nesse contexto, a decisão foi tomada de não prosseguir com a produção da mistura de rejeito e cimento sem a incorporação de solo. Essa escolha foi feita com o objetivo de garantir a manutenção dos padrões de resistência necessários, evitando quaisquer comprometimentos no desempenho da sub-base. Essa abordagem estratégica visa a assegurar a qualidade e a durabilidade da estrutura, priorizando a conformidade com os requisitos técnicos estabelecidos. Como continuidade da pesquisa foram estudadas oito misturas com as composições apresentadas na Tabela 4. Os resultados de resistência à compressão de cada mistura são apresentados na Tabela 5.

Tabela 4: Teor de cimento das misturas.

Mistura	Teor de cimento			
S + C (solo + cimento)	6%	5%	4%	3%
S + C + R (solo + cimento + rejeito)				

Tabela 5: Resistência à compressão das misturas com 6%, 5%, 4% e 3% de cimento.

	% DE CIMENTO	MISTURA	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES (MPa)			MÉDIA (MPa)	APLICAÇÃO
			CP1	CP2	CP3		
Solo cimento	6%	S + C	2,81	3,00	3,28	3,03	BASE
		S + C + R	3,24	2,80	3,43	3,16	BASE
	5%	S + C	0,57	0,96	1,14	1,05	NÃO ATENDE
		S + C + R	1,10	1,11	1,52	1,24	SUB-BASE
Solo melhorado com cimento	4%	S + C	0,55	1,48	1,48	1,48	SUB-BASE
		S + C + R	1,02	1,03	1,22	1,09	NÃO ATENDE
	3%	S + C	0,62	0,88	1,35	0,75	NÃO ATENDE
		S + C + R	0,76	0,58	0,60	0,65	NÃO ATENDE

Fonte: FERNANDEZ *et al.* [35].

A partir dos resultados da Tabela 5 foi possível verificar que as misturas contendo 6% de cimento atenderam o limite de resistência de 2,1 MPa para uma camada de base. Por outro lado, a mistura S + C com 5% de cimento, que apresentou uma média de resistência de 1,05 MPa, não atendeu ao requisito mínimo de resistência necessário para ser utilizada em camadas de base ou sub-base (1,2 MPa). No entanto, a mistura S + C + R com 5% de cimento obteve um resultado (1,24 MPa) que atende às exigências mínimas de resistência para sub-base.

Para ser considerado solo-cimento, a mistura precisa ter pelo menos 5% de cimento. Mas se for utilizado apenas 4% ou 3% de cimento, a mistura é chamada de solo melhorado com cimento. Das misturas com 4% de cimento, apenas a mistura S + C satisfaz o requisito para ser aplicada na sub-base. Já as misturas com 3% de cimento não atendem os limites das especificações. É importante ressaltar que os resultados dos ensaios CP1 das misturas S + C com 5% e 4%, bem como do CP3 com 3%, foram descartados devido a discrepâncias nos resultados. Além disso, é possível observar que a adição de rejeito às misturas com 4% e 3% de cimento reduziu sua resistência à compressão, ao contrário das misturas com maiores teores de cimento.

4. CONCLUSÕES

A quantidade de resíduos gerados pela mineração, principalmente do minério de ferro, no Brasil é alarmante. Diante disso, é fundamental buscar alternativas para aproveitar esses rejeitos. Atualmente, diversas pesquisas estão sendo realizadas para encontrar aplicações viáveis para esses materiais, como na área da pavimentação. O consumo exorbitante de recursos naturais, como solos e agregados, para a construção de pavimentos chega a impressionantes 10 mil toneladas por quilômetro.

Infelizmente, muitas vezes os materiais disponíveis na região da obra não atendem às exigências técnicas, impedindo seu uso. O transporte desses materiais adequados pode encarecer demais a obra, tornando-a economicamente inviável. Por isso, é essencial procurar por opções alternativas.

Uma alternativa promissora é a estabilização do solo usando uma combinação de cimento e outros materiais, incluindo o rejeito de mineração. Os resultados de experimentos que adicionaram 5% e 6% de cimento nas misturas de solo-cimento com rejeitos de minério de ferro mostraram que essa pode ser um excelente material para as camadas de sub-base e base de pavimentos, respectivamente. Surpreendentemente, as misturas com adição de sedimentos de dragagem apresentaram uma resistência à compressão simples muito acima do mínimo exigido. No entanto, não é recomendável utilizar misturas de solo, rejeitos e teores de cimento inferiores a 5% nas camadas de base ou sub-base de pavimentos.

Conseqüentemente, os resultados desta pesquisa não apenas confirmam a viabilidade do emprego de rejeito de minério de ferro em materiais de pavimentação, mas também ressaltam sua relevância estratégica.

A adoção dessa alternativa não apenas representa uma medida eficaz na redução do consumo de recursos naturais, mas também emerge como uma contribuição significativa para atenuar os impactos ambientais associados à exploração convencional de materiais para pavimentação.

Além de sua eficácia ambiental, é essencial destacar que a incorporação de rejeito de minério de ferro nas obras de pavimentação oferece uma perspectiva econômica vantajosa. A redução dos custos relacionados à aquisição de materiais, aliada à gestão sustentável de resíduos provenientes da mineração, representa um benefício substancial para os projetos de construção civil.

Ao promover a utilização responsável de subprodutos da indústria mineradora, essa abordagem não apenas promove a eficiência na gestão de resíduos, mas também se alinha aos princípios da sustentabilidade. Dessa forma, a pesquisa não apenas valida a aplicação prática do rejeito de minério de ferro em pavimentação, mas também destaca sua importância como uma solução integral que aborda preocupações ambientais, econômicas e sociais na construção civil.

No entanto, para avançar nesse campo, são necessários estudos futuros que abordem questões como viabilidade econômica em larga escala, durabilidade dos pavimentos ao longo do tempo, impacto ambiental do ciclo de vida, desenvolvimento de diretrizes técnicas, aceitação no mercado e exploração de outras possíveis aplicações. Além disso, para continuação da pesquisa, torna-se interessante realizar o ensaio físico-químico para identificar a quantidade mínima de cimento necessária para estabilizar o solo em função das reações químicas do cimento.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico pela bolsa de iniciação científica, ao Laboratório de Estruturas do Programa de Engenharia Civil – PRC/COPPE/UFRJ e ao NUMATS pelo apoio no desenvolvimento deste trabalho.

6. BIBLIOGRAFIA

- [1] CONFEDERAÇÃO NACIONAL DOS TRANSPORTES, *Pesquisa CNT de rodovias 2023*, Brasília, CNT, 2023. Disponível em: <https://pesquisarodovias.cnt.org.br>. Publicado em 29/11/2023. Acesso em 25/02/2024.
- [2] SANTOS, T.A., PINHEIRO, R.J.B., SPECHT, L.P., *et al.*, “Análise do desempenho de subleitos rodoviários à luz de conceitos da mecânica dos pavimentos”, *Matéria*, v. 25, n. 3, e12817, 2020. doi: <http://doi.org/10.1590/s1517-707620200003.1117>.
- [3] SILVA, J.P.S., FARIAS, M.M., “Avaliação química e ambiental de misturas asfálticas rejuvenescidas”, *Matéria*, v. 23, n. 3, e12189, 2018. doi: <http://doi.org/10.1590/s1517-707620180003.0523>.
- [4] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE DISTRIBUIDORAS DE ASFALTO, *Evolução do mercado*, Rio de Janeiro, ABEDA, 2024. Disponível em: <https://abeda.org.br/mercado/?target=id-4>. Acesso em 05/12/2023.
- [5] MANJARREZ, L., ZHANG, L., “Utilization of copper mine tailings as road base construction material through geopolymerization”, *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 30, n. 9, pp. 04018201, 2018. doi: [http://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002397](http://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002397).
- [6] WELP, S., SÁ, T., ODA, S., *et al.*, “Use of iron ore tailings and sediments on pavement structure”, *Construction & Building Materials*, v. 342, pp. 128072, 2022. doi: <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128072>.
- [7] OJURI, O.O., ADAVI, A.A., OLUWATUYI, O.E., “Geotechnical and environmental evaluation of lime-cement stabilized soil–mine tailing mixtures for highway construction”, *Transportation Geotechnics*, v. 10, pp. 1–12, 2017. doi: <http://doi.org/10.1016/j.trgeo.2016.10.001>.
- [8] COSTA, M.G., ABREU, V.H.S., ASSIS, T.F., *et al.*, “Life cycle assessment and circular economy strategies for electric vehicle: a systematic review on mitigating climate change and reducing resource depletion in road transportation”, In: Muthu, S.S. (ed), *Environmental Footprints and Eco-design of Products and Processes (EFEPP)*, Singapore, Springer, pp. 113–137, 2022. doi: http://doi.org/10.1007/978-981-19-7226-3_5.
- [9] ABREU, V.H.S., COSTA, M.G., COSTA, V.X., *et al.*, “The role of the circular economy in road transport to mitigate climate change and reduce resource depletion”, *Sustainability*, v. 14, n. 14, pp. 8951, 2022. doi: <http://doi.org/10.3390/su14148951>.

- [10] AGUIAR, F.L., “*Redução do impacto ambiental através da recuperação dos ultrafinos de minério de ferro: uma revisão*”, Monografia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.
- [11] UNITED NATIONS, *Transforming our world: the 2030 agenda for sustainable development-A/RES/70/1*, New York, 2015. Disponível em: https://www.un.org/en/development/desa/population/migration/generalassembly/docs/globalcompact/A_RES_70_1_E.pdf
- [12] YODER, E.J., WITCZAK, M.W., *Principles of pavement design*, New York, Wiley, 1975. doi: <http://doi.org/10.1002/9780470172919>.
- [13] PIMENTEL, V.F., ABREU, V.H.S., “Um estudo sistemático sobre a incorporação de novas tecnologias na pavimentação”, *Boletim do Gerenciamento*, v. 9, n. 9, pp. 19–26, 2019.
- [14] AHMARI, S., CHEN, R., ZHANG, L., “Utilization of mine tailings as road base material”, In: *Proceedings of the GeoCongress 2012*, Reston, VA, American Society of Civil Engineers, pp. 3654–3661, 2012. doi: <http://doi.org/10.1061/9780784412121.374>.
- [15] SUSANTO, I., FRANSISCO, S., FIRDAUS, Y., *et al.*, “Utilization of tailing waste as aggregate for road pavement”, *IOP Conference Series. Earth and Environmental Science*, v. 802, n. 1, pp. 012020, 2021. doi: <http://doi.org/10.1088/1755-1315/802/1/012020>.
- [16] CAO, L., ZHOU, J., ZHOU, T., *et al.*, “Utilization of iron tailings as aggregates in paving asphalt mixture: a sustainable and eco-friendly solution for mining waste”, *Journal of Cleaner Production*, v. 375, pp. 134126, 2022. doi: <http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134126>.
- [17] DJELLALI, A., LAOUAR, M.S., SAGHAFI, B., *et al.*, “Evaluation of cement-stabilized mine tailings as pavement foundation materials”, *Geotechnical and Geological Engineering*, v. 37, n. 4, pp. 2811–2822, 2019. doi: <http://doi.org/10.1007/s10706-018-00796-8>.
- [18] GALHARDO, D.C., “*Estudo sobre a viabilidade técnica da utilização de rejeitos de mineração de ferro em camadas de pavimentos rodoviários*”, Tese de M.Sc., Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2015.
- [19] GUIMARÃES, F., “China lidera compra de minério da vale no 3º trimestre”, *Exame*, Out. 2014. Disponível em: <https://exame.com/geral/china-lidera-compra-de-minerio-da-vale-no-3o-trimestre/>
- [20] SANTOS, D.A.M., “*Técnicas para a disposição de rejeitos de minério de ferro*”, Tese de M.Sc., Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2007.
- [21] INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO, *Economia mineral*, Brasília, IBRAM, 2020. Disponível em: <http://portaldamineraacao.com.br/wp-content/uploads/2020/02/Econ-mineral-fev2020.pdf> Acesso em 24/04/2020, 2020.
- [22] GEOMZ, *Reaproveitamento de rejeitos e rocha estéril. soluções que visam a sustentabilidade e a lucratividade da operação*, Porto Alegre, 2020. Disponível em: <https://geomz.com.br/servicos/reaproveitamento-de-rejeitos/>
- [23] ODA, S., SÁ, T.S.W., TOLEDO FILHO, R.D., *et al.*, “Uso de rejeitos de mineração em pavimentos rodoviários: um referencial teórico”, In: Oda, S., Sá, T.S.W., Toledo Filho, R.D., *et al.* (eds), *Qualidade e sustentabilidade na construção civil*, São Paulo, Editora Científica Digital, pp. 152–172, 2021.
- [24] AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTE TERRESTRE, *Estudo da viabilidade técnica de utilização de rejeitos de minério de ferro em pavimentos rodoviários*, Brasília, ANTT, 2018.
- [25] LIMA, M., *Barragem de rejeitos de minério da Vallourec transborda em Nova Lima (MG)*, Equipe InfoMoney, 2022. Disponível em: <https://www.suno.com.br/noticias/barragem-de-rejeitos-vallourec-minas-gerais/>
- [26] FERNANDES, G., RIBEIRO, L.F.M., GOMES, R.C., *et al.*, “Estudo de resíduos de minério de ferro para utilização em pavimentos”, In: *Anais do Congresso Brasileiro de Ciência e Tecnologia em Resíduos e Desenvolvimento Sustentável (ICTR 2004)*, Florianópolis, 2004.
- [27] CARVALHO, S.G., “*Estabilização granulométrica de solo com coproduto de mineração de ferro para camada de sub-base em pavimentos rodoviários*”, Monografia, Instituto Federal do Espírito Santo, Vitória, 2022.
- [28] SÁ, T.S.W., TOLEDO FILHO, R.D., ODA, S., *et al.*, “Utilização de rejeitos de minério de ferro em camadas estruturais de pavimentos”, In: *Anais do VI Encontro Nacional sobre Aproveitamento de Resíduos na Construção Civil*, Belém, 2019.

- [29] INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS, *Operação Águas*, Brasília, IBAMA, 2016. Disponível em: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Opera%C3%A7%C3%A3o_%C3%81guas,_Julho-2016_\(29077699023\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Opera%C3%A7%C3%A3o_%C3%81guas,_Julho-2016_(29077699023).jpg)
- [30] XAVIER, L., “Reforço estrutural do barramento principal da usina hidrelétrica Risoleta Neves”, *Concreto & Construções*, v. 112, n. 112, pp. 1, 2023.
- [31] FRYDMAN, A.D., *Análise da adição de rejeito de mineração em materiais para pavimentação*. 2021. Relatório final.
- [32] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *ABNT NBR 12253: Solo-Cimento – Dosagem Para Emprego Como Camada de Pavimento – Procedimento*, Rio de Janeiro, ABNT, 2012.
- [33] FRYDMAN, A.D., ODA, S., TOLEDO FILHO, R.D., “Análise da adição de rejeito de minério de ferro em misturas de solo-cimento para camadas de base e sub-base de pavimentos rodoviários”, In: *Anais da Jornada Giulio Massarani de Iniciação Científica, Tecnológica, Artística e Cultural*, Rio de Janeiro, 2022. Relatório final.
- [34] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *ABNT NBR 12025 – Solo-Cimento – Ensaio de Compressão Simples de Corpos de Prova Cilíndricos – Método de Ensaio*, Rio de Janeiro, ABNT, 2012.
- [35] FERNANDEZ, S.D.S., SÁ, T.S.W., ODA, S., “Análise da viabilidade técnica da adição de rejeito de mineração em materiais para pavimentos rodoviários”, In: *Simpósio Nacional de Gestão e Engenharia Urbana*, Rio de Janeiro, 2023. doi: <http://doi.org/10.46421/singeurb.v4i00.3359>.