

Reutilização de Rejeitos de Minerio de Ferro em Camadas de Pavimentação: Análise de Viabilidade

Letícia Alves Arantes
Engenheira Civil, UFOP, Ouro Preto, Brasil, leticia_alves9@hotmail.com

Ingrid Belcavello Rigatto
Mestre em Geotecnia, UFOP, Ouro Preto, Brasil, ingridbrigatto@gmail.com

Lucas Deleon Ferreira
Doutor em Geotecnia, UFOP, Ouro Preto, Brasil, lucas@ufop.edu.br

RESUMO: Os minérios desempenham um papel fundamental em diversas indústrias, no entanto, a atividade mineradora acarreta a produção de rejeitos que demandam grandes áreas para disposição, ocasionando impactos ambientais e sociais significativos. Este estudo propôs investigar a viabilidade de utilizar rejeitos de minério de ferro, combinados com solo laterítico, para aproveitamento em camadas de pavimento rodoviário. Foram conduzidos ensaios laboratoriais de caracterização, compactação e CBR, utilizando a metodologia MCT, considerada a mais adequada para solos tropicais. Utilizaram-se três misturas de solo laterítico com rejeito de minério de ferro em porcentagens de 20%, 30% e 40% e avaliou-se a compatibilidade dos parâmetros obtidos com aqueles exigidos pela normativa (DNIT) para camadas estruturais de pavimentos asfálticos rodoviários. Os resultados revelaram que as misturas de rejeito de minério de ferro com o solo laterítico estudado não atenderam aos requisitos estabelecidos pelo DNIT para pavimentação, inviabilizando sua aplicação direta. No entanto, esta conclusão não exclui completamente a possibilidade de uso desses materiais, sendo necessários estudos complementares, que avaliem proporções variadas de rejeito com solos de diferentes origens. Além disso, explorar métodos de estabilização com ajuste granulométrico e estabilização química, (empregando cal, cimento ou outros materiais cimentantes) pode abrir alternativas viáveis para atender às especificações normativas.

PALAVRAS-CHAVE: Rejeitos, Pavimentação Rodoviária, Estabilização de Solos, Reutilização, Impacto Ambiental.

ABSTRACT: Ores play a fundamental role in several industries; however, mining activities result in the production of waste that requires large areas for disposal, causing significant environmental and social impacts. This study proposed to investigate the feasibility of using iron ore waste, combined with laterite, in road pavement layers. Laboratory characterization, compaction and CBR tests were conducted using the MCT methodology, considered the most suitable for tropical soils. Three mixtures of laterite with different percentages of iron ore waste (20%, 30% and 40%) were used and the compatibility of the parameters obtained with those required by regulations (DNIT) for structural layers of asphalt road pavements was evaluated. The results revealed that the mixtures of iron ore waste with the laterite studied did not meet the requirements established by DNIT for paving, making their direct application unfeasible. However, this conclusion does not completely exclude the possibility of using these materials, and additional studies are needed to evaluate varying proportions of waste with soils of different origins. Furthermore, exploring stabilization methods with particle size adjustment and chemical stabilization (using lime, cement or other cementing materials) can open up viable alternatives to meet regulatory specifications.

KEYWORDS: Tailings, Road Paving, Soil Stabilization, Reuse, Environmental Impact.

1 INTRODUÇÃO

Uma das grandes forças da economia brasileira, o setor mineral é essencial e imprescindível para o mundo, essa área de atividade desempenha um papel importante no avanço e representa um símbolo do crescimento nacional. De acordo com Alexandre Mello, IBRAM (2023), diretor de Relações com Associados e Municípios, a produção mineral brasileira em 2022 alcançou a marca de US\$ 48 bilhões em valor. As exportações minerais totalizaram 12% das exportações totais brasileiras, representando US\$ 41,67 bilhões, enquanto prevê-se um investimento de US\$ 50 bilhões até 2027 a mineração no Brasil.

Apesar dos benefícios econômicos da mineração e seu impacto positivo sobre a balança comercial nacional dos países produtores, a indústria também responde pela produção simultânea de um volume significativo de material residual. Quando gerido de forma adequada, a mineração pode criar empregos, estimular a inovação e trazer investimentos e infraestrutura pública em uma escala de mudanças de longo prazo, impactando positivamente sobre os indicadores sociais e os ODS. No entanto, quando ocorrem falhas na gestão, podem levar a degradação do meio ambiente, deslocamento de populações, aumento das desigualdades e conflitos sociais, entre outros processos deletérios à sociedade (Silva e Freitas, 2020).

Nos últimos anos, diversos desastres ligados a barragens de armazenamento de rejeitos ocorreram no Brasil gerando impactos socioambientais extremos (Salvador et al., 2020). Assim, este trabalho buscou alternativas sustentáveis para a utilização dos rejeitos e maneiras de diminuir suas áreas de armazenamento.

Com o objetivo de avaliar a utilização de rejeitos de minérios de ferro em camadas estruturais de pavimentos asfálticos rodoviários, algumas misturas desse material com solo laterítico foram estudadas, variando suas porcentagens. Isso permitiu comparar os os parâmetros de cada mistura com os exigidos pelas normas de pavimentação.

Os solos tropicais apresentam características mecânicas e hidráulicas associadas ao processo de "laterização", que ocorre em ambientes úmidos e faz com que as frações argilosas sejam constituídas por argilominerais caulíníticos e hidróxidos/óxidos de ferro e/ou alumínio (Santos e Parreira, 2015). Nogami e Villibor (1995) destacam que os solos lateríticos podem ser residuais (originados pela degradação da rocha matriz) ou de origem sedimentar (transportados pela ação da gravidade, por exemplo, no caso de colúvios) que passaram por processos pedogenéticos, tais como a laterização.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Este estudo foi realizado a partir de algumas misturas entre rejeito de mineração e solo laterítico (laterita). As atividades foram conduzidas no laboratório de mecânica dos solos da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), em Minas Gerais.

O rejeito utilizado possui de baixo teor de ferro, proveniente do processo de beneficiamento mineral para obtenção de ferro concentrado. Já a laterita é proveniente da mesma mina, sendo estéril da mineração.

Para preparação do estudo, a laterita e o rejeito foram coletados direto da mina e posteriormente espalhados sobre uma lona por 2 dias para secagem ao ar (Figura 1). Após esse processo, as duas amostras foram homogeneizadas e dispostas em sacos plásticos de 60 kg, estando prontas para realização dos ensaios.



Figura 1. Processo de secagem das amostras de laterita e rejeito.

Misturas de solo e rejeito foram realizadas variando suas porcentagens, visando encontrar a que melhor atendia os requisitos para utilização como camada de base de pavimentos rodoviários. A Tabela 1 destaca o material e as misturas realizadas, seguidas da nomenclatura adotada para sua identificação.

Tabela 1. Identificação dos materiais e misturas pesquisados.

Descrição	Identificação
Laterita	L
Rejeito	R
Mistura 80% de Laterita + 20% de Rejeito	M8020
Mistura 70% de Laterita + 30% de Rejeito	M7030
Mistura 60% de Laterita + 40% de Rejeito	M6040

Uma vez que os rejeitos de mineração não possuem normas específicas, utilizou-se as metodologias e normas aplicadas na mecânica dos solos para a realização dos ensaios laboratoriais.

Foram realizados os ensaios de limite de liquidez (ABNT NBR 6459:2017), limite de plasticidade (ABNT NBR 7180:2016), análise granulométrica por peneiramento e sedimentação (ABNT NBR 6458:2017 e ABNT NBR 6502:2022) e massa específica dos grãos (NBR 6458), conforme mostra a Figura 2.



Figura 2. Ensaios realizados: a) limite de liquidez b) limite de plasticidade c) granulometria por sedimentação d) massa específica dos grãos.

Para a laterita e as misturas laterita/rejeito, foram realizados ensaios por meio da Metodologia MCT (Miniatura, Compactada, Tropical), a criação desta metodologia fez-se necessária devido à dificuldade de enquadrar os solos de ambiente tropical nas classificações americanas, que foram desenvolvidas para regiões de clima temperado e frio. Segundo Barroso (2002), o desenvolvimento do método MCT ofereceu uma solução para inúmeros problemas atrelados ao emprego de solos em obras de engenharia, já que este método leva em consideração o clima e os materiais predominantes em regiões tropicais.

A metodologia MCT (Miniatura, Compactada, Tropical) engloba um conjunto de ensaios executados em corpos de prova de dimensões reduzidas, os principais ensaios deste método são: ensaio de mini-MCV, perda de massa por imersão, mini-CBR, expansão e contração (Barroso, 2002).

No presente trabalho, os ensaios realizados foram a compactação mini-MCV, normalizado pela ME 258 (DNER, 1994b) e perda de massa por imersão, normalizado pela ME 256 (DNER, 1994c), como mostra a Figura 3.

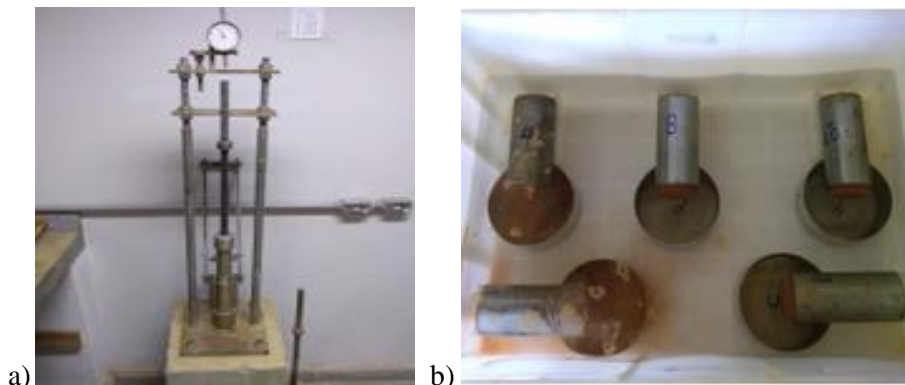


Figura 3. Metodologia MCT: a) ensaio de compactação Mini-MCV b) ensaio de perda de massa por imersão.

Também foram realizados ensaios de compactação, seguindo os procedimentos descritos na ABNT NBR 7182:2016 e ensaios para a determinação do CBR (*California Bearing Ratio*) seguindo a norma ABNT NBR 9895:2017. Foram moldados corpos de prova para 5 pontos, coincidentes com a curva de compactação, cujo ensaio foi realizado em três diferentes energias: normal, intermediária e modificada, tais energias foram escolhidas de acordo com a possibilidade de aplicação nas camadas do pavimento.

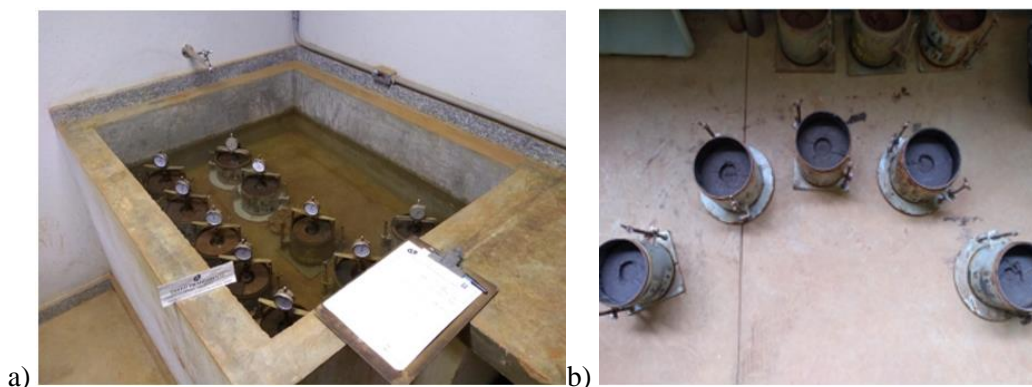


Figura 4. a) ensaio de resistência a penetração b) etapa de imersão para verificação da expansão.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com os resultados dos ensaios, realizou-se a classificação das misturas pelos métodos TRB (*Transportation Research Board*) e MCT (Miniatura, Compactada, Tropical). As classificações tradicionais como a TRB foram criadas em regiões de climas temperados e passaram a ser incorporados para os solos tropicais brasileiros. A incompatibilidade entre essas duas regiões fez com que fosse criado um método próprio para regiões tropicais, o método MCT. Onde antes os solos eram classificados como materiais impróprios para a utilização em pavimentação através de métodos como TBR, passaram a ser classificados como um material bom para a utilização em pavimentos brasileiros com o método de classificação para solos tropicais, tendo suas propriedades geotécnicas reavaliadas.

O método TRB utiliza-se da granulometria, limite de liquidez e índice de Plasticidade para classificar o solo, tendo o intuito de analisar materiais para base e sub-base de pavimentos. Já o método MCT permite retratar as peculiaridades dos solos quanto ao seu comportamento laterítico e saprolítico, quantificando características importantes para o uso em obras de pavimentação.

3.1 Ensaios de Caracterização

Após a realização dos ensaios de caracterização apresentados no item anterior para as 5 amostras, os resultados foram consolidados na Tabela 2.

Tabela 2. Resultados dos ensaios realizados nos materiais e misturas estudados.

Identificação		L	R	M8020	M7030	M6040
Limites de consistência	LL (%)	58	NL	35	NL	NL
	LP (%)	39	NP	26	NP	NP
	IP (%)	19	-	9	-	-
Granulometria	Argila (%)	45	6	34	28	31
	Silte (%)	21	57	34	32	31
	Areia (%)	25	37	23	34	32
	Pedregulho (%)	9	0	9	6	6
Massa específica dos grãos	ps (g/cm ³)	2,978	2,783	2,897	2,867	2,835

Ao analisar os resultados dos limites de consistência observa-se que a laterita possui características de plasticidade, influenciando significativamente na mistura M8020, a única que apresentou essa característica, devido à alta porcentagem de laterita presente. Conforme o aumento da porcentagem de rejeito na mistura foi ocorrendo, a plasticidade foi reduzindo, fato explicado pela composição do rejeito de minério de ferro, que possui majoritariamente grãos de sílica e ferro (parte mais fina) não apresentando plasticidade.

A norma DNIT 141:2010 aplicada para solos aceita 25% como a porcentagem máxima do limite de liquidez e 6% para o índice de plasticidade, valores não condizentes com os resultados apresentados. Porém esta norma foi desenvolvida com base em solos americanos, de forma que há incompatibilidade de comportamento nos solos tropicais, esta divergência possibilita a busca de outros métodos para realizar a atual avaliação.

3.2 Classificação TRB

A partir dos percentuais obtidos na análise granulométrica e dos limites de consistência, fez-se uma classificação inicial pelo TRB (*Transportation Research Board*), como mostrado na Tabela 3, para realizar uma comparação dos grupos adequados para a utilização em pavimentos.

Tabela 3. Características e classificação TRB dos materiais e misturas estudados.

Características e Classificação		L	R	M8020	M7030	M6040
(% passante)	Peneira #10 (2,00mm)	91	100	91	94	95
	Peneira # 40 (0,42mm)	85	99	85	89	90
	Peneira # 200 (0,074mm)	74	74	75	74	75
Limites de consistência	LL (%)	58	NL	35	NL	NL
	LP (%)	39	NP	26	NP	NP
	IP (%)	19	-	9	-	-
Classificação TRB		9	A-7-5	A-4	A-4	A-4
Índice de grupo		2,978	15	8	8	8

Segundo a classificação TRB, todos os materiais estudados são considerados “sofrível a mau”, sendo assim, descartados da utilização em pavimentos.

3.3 Classificação MCT

O MCT possui duas classes, definidas pelo prefixo L, para solos com comportamento laterítico e N para não laterítico e sete subclasses correspondentes (DNIT 2006). Os solos de comportamentos lateríticos (L) são subdivididos em 3 grupos, sendo eles LA (areia laterítica quartzosa), LA' (solo arenoso laterítico) e LG' (solo argiloso laterítico). Já os solos de comportamento não laterítico (N) possuem 4 grupos, NA (areias, siltes e misturas de areias e siltes com predominância de grão de quartzo e/ou mica, não laterítica; NA' (misturas de areias quartzosa com finos de comportamento não laterítico (solos arenosos)); NG' (solos argilosos não lateríticos) e NS' (solo siltoso não laterítico).

A realização dos ensaios de Compactação Mini-MCV e Perda de Massa por Imersão permite determinar os coeficientes c' e e' , conforme apresentado na Tabela 4.

Tabela 4. Classificação MCT da laterita e misturas.

Identificação	Parâmetro c'	Parâmetro e'	Classificação
L	1,94	0,88	LG'
M8020	1,33	0,70	LA'G'
M7030	1,25	0,84	LA'G
M6040	0,77	1,06	LA'

Analisando os valores apresentados, nota-se uma queda do valor do parâmetro c' conforme o teor de rejeito é acrescentado a mistura, isso é decorrente da elevação do teor de areia na composição, ocorrendo então uma transição de um solo laterítico argiloso (referente a laterita pura) para um solo laterítico arenoso (referente a mistura M6040 que possui a maior porcentagem de rejeito). Solos denominados LG' são classificados como latossolos de textura argilosa e os denominados LA' não classificados como latossolos de textura arenosa. A Figura 5 apresenta onde a laterita e as misturas se encontram no Ábaco classificatório MCT.

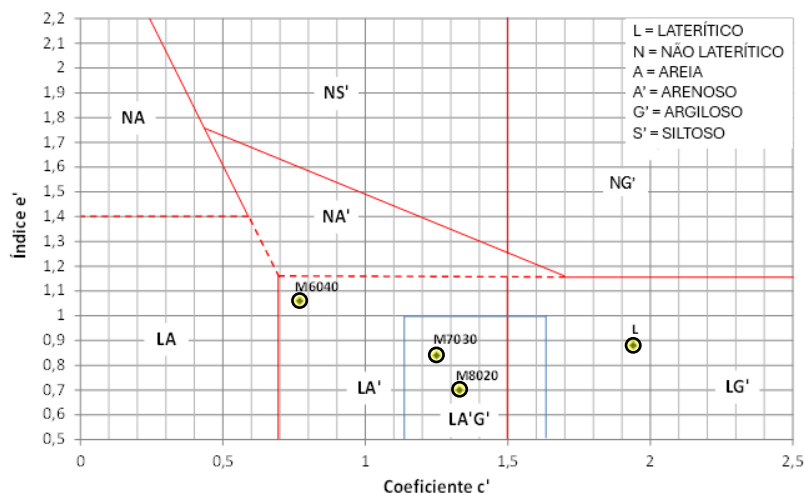


Figura 5. Curva c' versus e' para a laterita e misturas laterita/rejeito.

Solos pertencentes aos grupos lateríticos possuem as propriedades necessárias para serem aplicados em pavimentação, sendo assim, as misturas estudadas estão aptas para a finalidade do estudo, até o momento.

3.4 Compactação e CBR

O ensaio CBR (California Bearing Ratio) tem como objetivo avaliar a capacidade de suporte e expansibilidade dos solos de subleito visando o dimensionamento de pavimentos rodoviários. O resultado é dado em porcentagem e representa a comparação entre a pressão necessária para penetrar um pistão cilíndrico padronizado em um corpo de prova de um certo solo e a pressão necessária para penetrar o mesmo pistão em

uma brita graduada padrão. Ou seja, um resultado de CBR=20% significa que aquele solo representa 20% da resistência à penetração da brita padronizada.

Os resultados dos ensaios de compactação e CBR estão evidenciados na Tabela 5 e Tabela 6. São apresentados os valores de massa específica seca máxima (ρ_{dmax}), e umidade ótima (w_{ot}).

Tabela 5. Parâmetros de compactação.

Identificação	Energia Normal		Energia Intermediária		Energia Modificada	
	ρ_{dmax} (g/cm ³)	w_{ot} (%)	ρ_{dmax} (g/cm ³)	w_{ot} (%)	ρ_{dmax} (g/cm ³)	w_{ot} (%)
L	1,620	26,8	1,658	25,2	1,731	23,7
R	1,843	14,6	1,833	13,9	1,913	12,2
M8020	-	-	1,804	21,3	1,819	20,5
M7030	-	-	1,855	19,9	1,908	18,7
M6040	-	-	1,894	18,4	1,94	16,8

Tabela 6. Resultados de ensaio de CBR (resistência à penetração e expansão) para os materiais e misturas estudadas.

Identificação	Energia Normal		Energia Intermediária		Energia Modificada	
	CBR (%)	Expansão (%)	CBR (%)	Expansão (%)	CBR (%)	Expansão (%)
L	32	0	29,3	0	32,1	0,05
R	25,1	0	17,5	0,38	26,4	0,38
M8020	-	-	30,0	0,04	31,3	0,02
M7030	-	-	33,0	0,04	37,6	0,04
M6040	-	-	23,4	0,03	56,3	0,03

Ao analisar os ensaios de compactação para as misturas, observa-se que a massa específica seca aumenta conforme o teor de rejeito é elevado. Isso ocorre pois o rejeito atribui à mistura um caráter arenoso, que também pode ser observado na redução da umidade ótima a medida que se eleva o teor de rejeito. Materiais arenosos tendem a ter maior peso específico seco e menor umidade ótima quando comparados aos argilosos.

Em termos de CBR, apesar apresentar bons resultados, as misturas estudadas não apresentam propriedades adequadas para a aplicação em camadas de base de pavimentos rodoviários, por serem materiais muito finos e apresentar CBR inferior a 80%, valor mínimo exigido pelo DNIT para tal finalidade.

4 CONCLUSÕES

Neste trabalho foram conduzidas algumas análises para validar a aplicação de rejeito de minério com algumas proporções de mistura com laterita em camadas de pavimento rodoviário, visando reaproveitar esse material e contribuir para a sustentabilidade da mineração. Apesar de não terem sido executados todos os estudos necessários em uma validação, os realizados já demonstraram que as misturas envolvendo apenas a laterita e o rejeito de minério de ferro não são aplicáveis para essa finalidade.

Contudo, este resultado não exclui totalmente a utilização do rejeito de minério de ferro para tal propósito, sugerindo a realização de novos estudos avaliando diferentes proporções de rejeito com solos de outras jazidas e avaliando aplicação de métodos de estabilização associados, tais como estabilização granulométrica (desenvolvida neste trabalho) e estabilização química (com a associação de cal, cimento ou outros materiais cimentantes).

Estudos de correção granulométrica permitem a utilização de materiais que, por si só, não apresentam características satisfatórias para serem utilizados em pavimentos, mas, ao adicionar a eles agregados de boa qualidade, ou até mesmo outros solos que também não possuem isoladamente os traços prescritos em norma, podem alcançar bons resultados, atendendo os requisitos pedidos em norma.

Assim, considera-se que o estudo trouxe um avanço ao pesquisar tais materiais e trazer para a discussão novas possibilidades de aplicação de rejeitos em prol da sociedade.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP) para elaboração deste estudo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT (2016a). NBR 7180. *Solo – Solo – Determinação do limite de plasticidade*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT (2016b). NBR 7182. *Solo – Solo – Ensaio de compactação*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT (2017a). NBR 6459. *Solo – Determinação do limite de liquidez*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT (2017b). NBR 7181. *Solo – Solo – Análise granulométrica*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT (2017c). NBR 9895. *Solo – Solo – Índice Suporte Califórnia – ISC*. Rio de Janeiro.
- Barroso, S. H. A. (2002) Estudo dos solos da região metropolitana de Fortaleza para aplicação na engenharia rodoviária. Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos / USP, 181 p. <https://doi.org/10.11606/T.18.2016.tde-01062016-112348>
- Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1994a). *Solos – compactação em equipamento miniatura*. ME – 228. Rio de Janeiro, 14 p.
- Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1994b). *Solos compactados em equipamento miniatura – Mini-MCV*. ME – 258. Rio de Janeiro, 14 p.
- Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1994c). *Solos compactados em equipamento miniatura – determinação da perda de massa por imersão*. ME – 256. Rio de Janeiro. 6 p.
- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes - Instituto de Pesquisas Rodoviárias (2006). *Manual de Pavimentação – DNIT*. Publicação IPR – 719.
- Instituto Brasileiro de Mineração – IBRAM (2023). *Panorama do Setor Mineral Brasileiro no ENIC*.
- Nogami, J. S., Villibor, D. F. (1995) *Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos*. Cap. 7: Erosão na faixa marginal. Editora Villibor, São Paulo – SP, 169 – 196 p.
- Salvador, G. N., Leal, C. G., Brejão, G. L., Pessali, T. C., Alves, C. B. M., Rosa, G. R., Ligeiro, R., L. F. A. (2020). Mining activity in Brazil and negligence in action. *Perspectives in Ecology and Conservation*, 18 (2), p. 139-144. <https://doi.org/10.1016/j.pecon.2020.05.003>
- Santos, E. F. E., Parreira, A. B. (2015). Estudo Comparativo De Diferentes Sistemas De Classificações Geotécnicas Aplicadas Aos Solos Tropicais. 44^a RAPV Reunião Anual de Pavimentação e 18^o ENACOR – Encontro Nacional de Conservação Rodoviária ISSN 1807-5568 RAPV Foz Do Iguaçu, PR – de 18 a 21 de agosto de 2015.