

Análise do Comportamento Mecânico do Solo Saprolítico em Mato Grosso Adicionado do Resíduo da Mineração de Agregados

João Pedro de Oliveira Alves Neto

Universidade Federal de Mato Grosso, Várzea Grande, Brasil, joao.neto8@sou.ufmt.br

Juliana Ritter

Universidade Federal de Mato Grosso, Várzea Grande, Brasil, julianaritter@sou.ufmt.br

Lucas Rodrigues Santos

Universidade Federal de Mato Grosso, Várzea Grande, Brasil, lucas.santos12@sou.ufmt.br

Fabiani Maria Dalla Rosa Barbosa

Universidade Federal de Mato Grosso, Várzea Grande, Brasil, fabiani.barbosa@ufmt.br

Marina Donato

Universidade Federal de São João del-Rei, São João del-Rei, Brasil, donato@ufsj.edu.br

RESUMO: Este estudo teve como objetivo analisar a resistência e a expansão de diferentes dosagens de resíduo proveniente da mineração de agregados da Caieira Nossa Senhora da Guia Mineração Ltda, conhecido como "bica corrida", no solo do Câmpus de Várzea Grande da Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT/CUVG). Foram examinadas dosagens de resíduo de 20, 35 e 50% em relação à massa de solo, com o intuito de investigar as propriedades de expansão e resistência. Realizaram-se ensaios de caracterização e Índice de Suporte Califórnia (CBR). Os resultados permitiram comparar os valores encontrados para o solo em seu estado natural e para o solo com adição do resíduo. Constatou-se que a adição do resíduo reduz a resistência do solo. Quanto à expansão, verificou-se que o solo sem adição apresenta baixa expansibilidade; entretanto, a adição de 35% de resíduo reduziu ainda mais os valores de expansão do solo.

PALAVRAS-CHAVE: Solo; Resíduo "Bica corrida"; Expansão; CBR (Índice de Suporte Califórnia).

ABSTRACT: This study aimed to analyze the strength and expansion of different dosages of waste from the aggregate mining of Caieira Nossa Senhora da Guia Mineração Ltda, known as "bica corrida," in the soil of the Várzea Grande Campus of the Federal University of Mato Grosso (UFMT/CUVG). Dosages of 20%, 35%, and 50% waste relative to the soil mass were examined to investigate the expansion and strength properties. Characterization and California Bearing Ratio (CBR) tests were conducted. The results allowed for comparing the values found for the soil in its natural state and the soil with the addition of the waste. It was found that the addition of the waste reduces the soil's strength. Regarding expansion, it was observed that the soil without addition has low expansibility; however, the addition of 35% waste further reduced the soil's expansion values.

KEYWORDS: Soil; "Bica corrida" residue; Expansion; CBR (California Bearing Ratio).

1 INTRODUÇÃO

A extensa malha viária do Brasil desempenha um papel crucial no transporte, incluindo a construção de estradas rurais e ruas urbanas, facilitando o rápido deslocamento de bens e produtos (CNT, 2018). Projetos de infraestrutura envolvem altos custos, com despesas variando dependendo de fatores como tipo de pavimento, terreno e classe da via, representando investimentos significativos, na região Centro-Oeste, os custos de aquisição e transporte de materiais variam de R\$ 425.376,00 a R\$ 5.435.709,00 por quilômetro de rodovia (DNIT, 2023).

Em áreas carentes de solo com características geotécnicas adequadas, o transporte de solo apropriado pode aumentar os custos do projeto. Para enfrentar esse desafio, enquanto se mantém a sustentabilidade e o cumprimento dos requisitos, o uso de técnicas de estabilização do solo é uma opção atraente (Guimarães,

2002). Os métodos de estabilização podem incluir abordagens granulométricas, mecânicas ou químicas (Carvalho et al., 2022).

Este artigo investiga o comportamento mecânico do solo do campus da UFMT/CUVG quando adicionado de resíduos provenientes da mineração de agregados. Amostras de solo foram coletadas do subleito, onde provavelmente estará localizada a pista principal de tráfego do campus, e misturadas com resíduos da Caieira Nossa Senhora da Guia Mineração Ltda, visando à destinação adequada do resíduo, à redução do impacto ambiental e ao reaproveitamento eficiente do material.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 SOLOS

Segundo Sartori (2015), o solo é um dos materiais mais difundidos dentro da construção civil, presente na maioria das obras de engenharia, utilizado como suporte para estruturas de fundações. Por isso, se faz necessário o conhecimento a respeito das suas propriedades diante das solicitações previstas.

De acordo com o DNIT (2006), no âmbito da engenharia rodoviária, o solo é descrito como todo tipo de material orgânico ou inorgânico, encontrado na superfície terrestre, podendo ser escavado sem necessidade de explosivos.

Segundo Queiroz (2016), os solos que ocorrem na superfície da crosta terrestre são os produtos do processo de intemperismo sobre os minerais das rochas. Conforme relata o autor, na engenharia interessa, além da gênese, também o comportamento físico dos solos, tratado pela mecânica dos solos.

2.2 SOLOS SAPROLÍTICO

De acordo com Carvalho et al. (2023), os solos saprolíticos possuem uma evolução recente, a alteração da rocha proporciona a criação de um material inconsolidado, conservando a estrutura da rocha, entretanto, com baixa coesão.

Segundo Carvalho et al. (2023), os argilominerais primários presentes nesse solo possuem um alto potencial de expansão e ao serem expostos às intempéries, esses solos liberam as tensões que continham as suas partículas, o que ocasiona tensões de expansão no solo.

A erodibilidade é um fator importante nos solos saprolíticos. Os mesmos argilominerais que geram a expansão servem, também, para facilitar o destacamento das partículas. O processo é mais intenso se os solos são expostos à chuva. Nesse caso, a água atua como agente que promove o destacamento e o transporte das partículas. É comum que taludes rodoviários exibam uma capa dura mais próxima ao topo que resista à erosão. Contudo, logo abaixo dessa capa, ocorrem solos residuais jovens e saprólitos, que são erodíveis e mostram profundas escavações pela ação de chuvas e ventos (Ferreira et al., 2023).

Os solos saprolíticos, genuinamente residuais, com distintos graus de intemperização se manifestam com granulometria muito variável. Alguns estudos conduzidos com esses solos mostram fácil defloculação, ao mesmo tempo em que os ensaios realizados nesses materiais com o uso do defloculante hexametáfosfato de sódio e sem esse defloculante indicam curvas relativamente coincidentes, revelando que os grumos existentes nesses solos se desfazem facilmente, diferente, do que ocorre nos solos lateríticos com agregações cimentícias resistentes (Ferreira et al., 2023).

2.3 PROCESSO DE COMPACTAÇÃO

Souza Junior (2005), define a compactação como um procedimento destinado a melhorar as características de um material específico, empregando compressão por meio de uma energia mecânica específica. Entre os benefícios mais significativos em termos de propriedades geotécnicas alcançados por meio do processo de compactação, incluem-se o aumento da densidade, da resistência ao cisalhamento e da capacidade de suporte. A compactação reduz o índice de vazios, a permeabilidade, a contração e a compressibilidade.

O DNIT (2006) descreve a compactação como a operação que resulta no aumento da massa específica aparente seca aparente de um solo, por meio da aplicação de pressão, impacto ou vibração,

resultando na aglomeração das partículas do material e na redução dos vazios de ar. Esse processo também contribui para reduzir a variação nos teores de umidade do solo. A NBR 7182 (ABNT, 2020) detalha o método para determinar o teor de umidade e a massa específica aparente seca dos solos por meio da compactação e estabelece três energias de compactação: normal, intermediária e modificada.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAIS

Para caracterização dos solos, procedeu-se conforme é descrito a NBR 6457 (ABNT, 2016), a qual trata da preparação de amostras de solo para ensaios de compactação e ensaios de caracterização, inclusive a determinação da umidade gravitacional.

Quanto ao ensaio de sedimentação, este foi realizado com e sem a utilização da solução de hexametáfosfato e com e sem dispersão, conforme estabelecido na NBR 7181 (ABNT, 2016). Essa abordagem possibilita a observação das variações nas curvas granulométricas e a inferência de características do solo, como a presença de concreções e comportamento laterítico ou não laterítico.

O solo estudado foi classificado conforme a TRB (Transportation Research Board), onde os solos são reunidos em grupos e subgrupos, em função de sua granulometria, limites de consistência e do índice de grupo e por meio da classificação SUCS (Sistema Unificado de Classificação de Solos) fundamenta-se na identificação das características dos solos, incluindo textura, plasticidade, porcentagens de pedregulhos, areia e materiais finos, bem como na análise da distribuição granulométrica.

O solo estudado foi coletado na cidade de Várzea Grande, no Estado de Mato Grosso, precisamente na área do Campus da Universidade Federal do Mato Grosso e transportado para o Laboratório Multidisciplinar em Geotecnia e Infraestrutura de Transportes (GEOINFRA), pertencente à FAENG - UFMT. Já o resíduo utilizado nos ensaios foi doado pela Caieira Nossa Senhora da Guia Mineração Ltda, e constitui-se de materiais remanescentes do processo de mineração de agregados. A Figura 1, apresenta o solo adicionado de 20% de resíduo.



Figura 1. (a) Amostra de solo + 20% resíduo no teor de umidade higroscópica;
(b) Amostra de solo no teor de umidade ótima.

Conforme Nogueira e Riccomini (2006), a Caieira Nossa Senhora da Guia Mineração Ltda, origem do resíduo em questão, está situada em uma área da Formação Guia, caracterizada pela ausência de crostas e cristais, com predominância de calcários finos e folhelhos, ocasionalmente dolomitizados.

A camada mais basal da Formação Guia é formada por pelitos vermelhos com até 10 cm de espessura recobertos por calcários finos, cinzentos a pretos e betuminosos, que formam camadas de 10 a 20 cm de espessura, com partições de lâminas de folhelho, formando uma sucessão de dezenas de metros, lateralmente contínuas por centenas de metros. Grãos terrígenos (quartzo, feldspato, mica e minerais pesados), subarredondados, de tamanho silte a areia fina, ocorrem disseminados ou concentrados na base das camadas (Nogueira; Riccomini, 2006).

3.2 MÉTODOS

Os parâmetros e normas adotadas para a caracterização do solo e do resíduo são as especificadas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) e quando não abrangidas por estes órgãos são frutos de pesquisas científicas, como o MCT expedito - Método das Pastilhas. Na tabela 1, apresentam-se os ensaios realizados e as respectivas normas ou parâmetros.

Tabela 1. Ensaios realizados para caracterização do solo e do resíduo.

Parâmetros avaliados	Normas de Referência	Parâmetros avaliados	Normas de Referência
Preparação das amostras	NBR 6457 (ABNT, 2024)	Limite de Plasticidade	NBR 7180 (ABNT, 2016)
Granulometria	NBR 7181 (ABNT, 2018)	Compactação	NBR 7182 (ABNT, 2020)
Classificação expedita MCT-Método das Pastilhas	(Fortes et. al., 2002)	CBR	NBR 9895 (ABNT, 2017)
Limite de Liquidez	NBR 6459 (ABNT, 2017)		

4. RESULTADOS

De acordo com a classificação TRB (DNIT, 2006), a amostra de solo pertence ao grupo de solos A-2-4. Conforme as diretrizes do DNIT (2006), esse grupo compreende solos que apresentam 35% ou menos de passagem na peneira nº 200, com uma fração menor retida na peneira nº 40, e exibem características dos grupos A-4 ou A-5. Seguindo o Sistema Unificado de Classificação de Solos – SUCS (DNIT, 2006), a amostra foi designada como GM, indicando a possibilidade de ser um solo de graduação grossa, com a presença de cascalhos ou areias contendo uma proporção significativa de finos.

Por meio do Método das Pastilhas, após a realização do ensaio, obteve-se a contração de 0,7 mm, o que implicou no $c' = 1,10$ e penetração de 2,1. O solo foi classificado como NA' - NS', ou seja, arenoso não laterítico a siltoso não laterítico. As curvas de granulometria do solo com e sem o uso de defloculante apresentam pouca variação, conforme apresentado na Figura 2, o que confirma o resultado do Método das Pastilhas, indicando um solo não laterítico, ou seja, saprolítico.

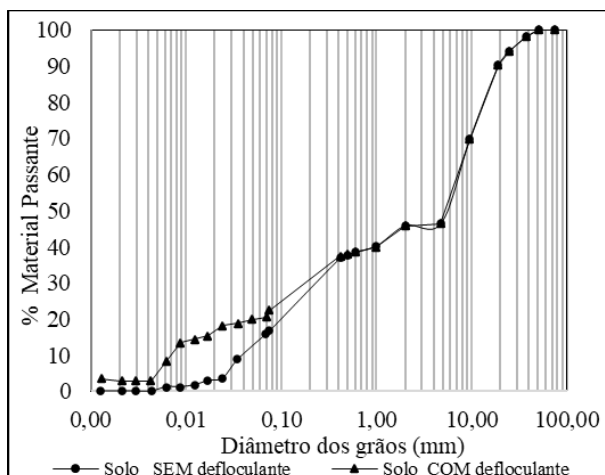


Figura 2. Curvas granulométricas do solo, com e sem o uso de defloculante.

Considerando que a norma NBR 7181 (ABNT, 2016) estabelece o ensaio de granulometria apenas com o uso de defloculante, as curvas granulométricas dos dois materiais, solo e resíduo, estão apresentadas na Figura 3.

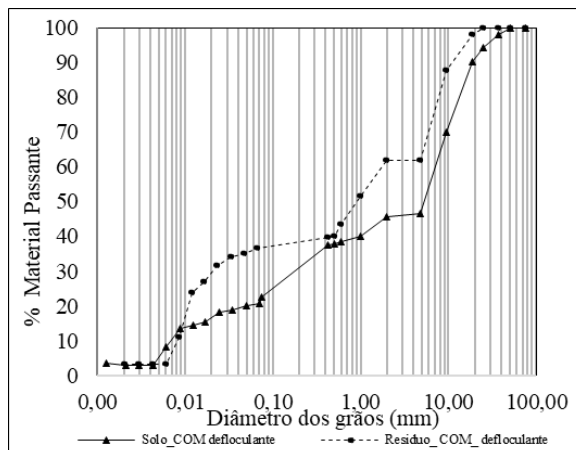


Figura 3. Curvas granulométricas do solo e do resíduo, com o uso de defloculante.

Na sequência, procedeu-se ao ensaio de compactação do solo com amostras sem reutilização, nas energias normal e intermediária. Os ensaios seguiram as recomendações da norma NBR 7182 (ABNT, 2020). Para estes ensaios, optou-se pelo uso do cilindro grande, uma vez que a amostra de solo preparada não passou integralmente pela peneira de 4,8 mm, para compactar as amostras destinadas ao ensaio de compactação e CBR.

O ensaio foi realizado sem reuso de material e as amostras foram preparadas com 24 horas de antecedência, com a finalidade de homogeneizar a umidade em toda a amostra. As amostras ficaram armazenadas na câmara úmida.

Conforme relatam Ferreira et al. (2023), em solos saprolíticos com agentes cimentantes, o ensaio de compactação com reuso do material, a adição da água e a aplicação da energia de compactação pode levar à mudança da granulometria do solo para cada ponto de umidade e peso específico aparente seco obtido na curva de compactação. Os valores de peso específico aparente seco ($\gamma_{dm\max}$) e a umidade ótima (w_{otm}) dos ensaios realizados na energia normal e na energia intermediária, estão descritos na Tabela 2.

Tabela 2. Resultados dos ensaios de compactação nas energias normal e intermediária.

Propriedades	Energias	
	Normal	Intermediária
$\gamma_{d\max}$ (kN/m ³)	17,6	18,4
w_{otm} (%)	16,3	16,4

As curvas de compactação obtidas nos ensaios com solo realizados nas energias normal e intermediária estão apresentadas na Figura 4. As curvas de compactação apresentam dois picos. O primeiro, menos acentuado, no início do ramo seco e o pico com decréscimo de massa específica acentuado quando o valor da massa específica do solo decresce. Cabe destacar que essa forma de curva senoidal de compactação foi identificada por Santos (2003) ao analisar os solos saprolíticos da Baixada Cuiabana.

Para a compactação na energia normal, Santos (2003), sugere a utilização dos valores obtidos no primeiro pico. O autor observou que quanto mais manuseado o solo, mais partículas finas. Além disso Santos (2003) também observou que quanto maior a energia de compactação maior será a expansão sofrida pela amostra quando esta for inundada.

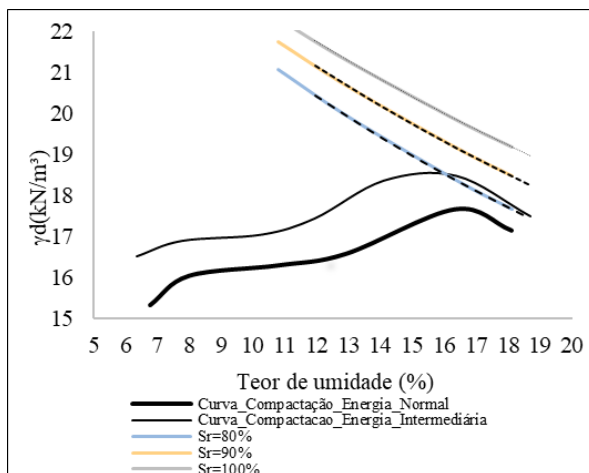


Figura 4. Curvas de compactação do solo na energia normal e intermediária.

Para o ensaio de CBR, foram ensaiados 12 Corpos de Prova (CP), sendo 3 CP de solo e 3 CP para cada adição proposta, 20, 35 e 50 % de resíduo. Os resultados das medidas de expansão e CBR de cada amostra estão descritos nas Tabelas 3 e 4, respectivamente.

Tabela 3. Medidas de expansão do solo e do solo adicionado de resíduo.

Cilindro N°	Expansão (%)	Amostras
1-A	0,2	Solo
14-A	0,1	Solo
3-A	0,2	Solo
1	0,1	Solo + 20% de Resíduo
14	0,1	Solo + 20% de Resíduo
3	0,2	Solo + 20% de Resíduo
5	0,04	Solo + 35% de Resíduo
9	0,04	Solo + 35% de Resíduo
7	0,08	Solo + 35% de Resíduo
2	0,1	Solo + 50% de Resíduo
6	0,1	Solo + 50% de Resíduo
4	0,2	Solo + 50% de Resíduo

O solo do câmpus demonstrou não ser expansivo. A expansão média medida foi de 0,15%. Conforme definido pelo critério do DNIT (2006), o subleito deve apresentar uma expansão medida no ensaio CBR menor ou igual a 2%.

O solo adicionado de 20 ou 50% de resíduo manteve a expansão semelhante ao solo sem adição. No entanto, na mistura de solo com 35% de resíduo, a expansão foi muito inferior, variando entre 0,04 e 0,08%.

A partir dos resultados de expansão e CBR para efeitos comparativos, observou-se que a adição do resíduo "bica corrida" ao solo natural do câmpus resultou em redução na resistência, quando comparado aos resultados do solo sem adição.

Tabela 4. Valores do CBR do solo e das misturas.

Cilindro N°	I.S.C ou C.B.R (%)	Amostras
1A	11	Solo
14A	17	Solo
3A	19	Solo
1	17	Solo + 20% de Resíduo
14	10	Solo + 20% de Resíduo
3	13	Solo + 20% de Resíduo
5	7	Solo + 35% de Resíduo
9	5	Solo + 35% de Resíduo
7	11	Solo + 35% de Resíduo
2	6	Solo + 50% de Resíduo
6	5	Solo + 50% de Resíduo
4	6	Solo + 50% de Resíduo

O valor de CBR adotado para o solo foi de 18%, calculado como a média dos valores dos cilindros 14A e 3A. Para as misturas, optou-se por adotar de forma conservadora o menor dos três valores obtidos, devido à falta de informações detalhadas sobre as propriedades mineralógicas, físicas e mecânicas do resíduo.

O resíduo contém uma grande quantidade de finos, o aumento da dosagem deste na mistura resulta em um aumento proporcional na quantidade de finos, o que, provavelmente, levou à redução do valor de resistência.

Conforme verificado, esses resultados indicam que a adição de resíduo ao solo resultou em uma diminuição dos valores de CBR, refletindo uma redução na resistência do solo conforme a porcentagem de resíduo aumenta. A adição de 20% de resíduo resultou em uma leve redução na resistência, enquanto a adição de 35% e 50% de resíduo resultou em uma queda mais acentuada nos valores de CBR.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com o intuito de analisar o comportamento mecânico do solo e de suas misturas estabilizadas com resíduo proveniente da mineração de agregados, este estudo conduziu análises físicas do solo e do resíduo, além de testes de resistência e expansibilidade usando o método CBR.

A adição do resíduo em diferentes proporções resultou em uma redução da resistência em comparação com o solo natural. No entanto, observou-se que o solo original do local atende aos requisitos de expansão e resistência para aplicação em pavimentação, com uma expansão inferior a 2% e um CBR acima de 2% para o material de subleito.

A dosagem do resíduo teve um impacto significativo na expansibilidade do solo. Embora as condições de expansão fossem inicialmente favoráveis, a adição de 35% de resíduo reduziu ainda mais essa expansão. No entanto, o CBR das misturas contendo 35% de resíduo diminuiu significativamente em comparação com o solo original do local.

Este estudo sugere que a utilização do resíduo pode ser uma alternativa promissora para mitigar a expansão dos solos que apresentam características expansivas na Baixada Cuiabana. Além disso, oferece uma opção de descarte viável para esse material, tanto do ponto de vista econômico quanto ambiental. Portanto, é crucial continuar a pesquisa com novos ensaios, explorando diferentes dosagens, realizando uma uniformização por peneiramento do resíduo e considerando a adição do resíduo em conjunto com algum outro aglomerante, como cal ou cimento.

6. REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6502: *Solos e rochas — Terminologia*. Rio de Janeiro: ABNT: 2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6457: *Amostras de Solo - Preparação para ensaios de compactação, caracterização e determinação do teor de umidade*. Rio de Janeiro: ABNT: 2024.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6459: *Solo - Determinação do Limite de Liquidez*. Rio de Janeiro: ABNT: 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7180: *Solo - Determinação do Limite de Plasticidade*. Rio de Janeiro: ABNT: 2016
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7181: *Solo - Análise Granulométrica*. Rio de Janeiro: ABNT: 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7182: *Solo – Ensaio de Compactação*. Rio de Janeiro: ABNT: 2020.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9895: *Solo - Índice de suporte Califórnia (I.S.C) - Método de ensaio*. Rio de Janeiro: ABNT: 2017.
- CARVALHO, J. C et al. (org). (2023) *Solos não saturados no contexto geotécnico*. 2 ed. – São Paulo: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica – ABMS.
- DNIT (2006). *Manual de pavimentação*. Ministério dos Transportes. Departamento Nacional De Infraestrutura De Transportes.
- DNIT. *Manual de custos médios gerenciais – Implantação - Modal rodoviário*. Ministério dos Transportes. Departamento Nacional De Infraestrutura De Transportes. Fundação Getulio Vargas – Instituto Brasileiro de Economia, 2023.
- FERREIRA, S. R. de M., OLIVEIRA, J. T. R. de, GONZÁLEZ, Y. V. Técnicas de amostragem e preparação de amostras. Capítulo 8. (p. 215-264). CAMAPUM DE CARVALHO, J., GITIRANA JUNIOR, G. de F. N., MACHADO, S. L., MASCARENHA, M. M. dos A., SILVA FILHO, F. C. da, RODRIGUES, R. A. (Organizadores). *Solos não saturados no contexto geotécnico*. 2ª Ed. (p. 39–78). ABMS (Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica), São Paulo. 2023. <https://doi.org/10.4322/978-65-992098-3-3.cap08>
- FORTES, R. M.; MERIGHI, J. V.; ZUPPOLINI NETO, A. *Método das pastilhas para identificação expedita de solos tropicais*. In: Congresso Rodoviário Português, 2002, Lisboa. Anais do Congresso Rodoviário Português, 2002.
- GUIMARÃES, J. E. P. (2002) *A cal: fundamentos e aplicações na engenharia civil*. 2. ed. São Paulo: PINI.
- NOGUEIRA, A. C. R.; RICCOMINI, C. *O Grupo Araras (Neoproterozóico) na parte norte da Faixa Paraguai e sul do Craton Amazônico, Brasil*. Revista Brasileira de Geociências, v. 36, n. 4, p. 576-587, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.25249/0375-7536.2006364576587>. Acesso em: 11 abr. 2024.
- SANTOS, Antônio Cezar da Costa. *Estudo da influência da energia e do reuso de amostras na compactação em solo saprolítico*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro de Ciência e Tecnologia. UFCG – Universidade Federal de Campina Grande, PB, 2003.
- SARTORI, Guilherme. *Estudo de estabilização de solos para fins de pavimentação na região de Campo Mourão*. 2015. 54 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, 2015.
- SOUZA JUNIOR, J. D. *O efeito da energia de compactação em propriedades dos solos utilizados na pavimentação do Estado do Ceará*. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia de Transportes) – Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, CE, 2005.