



26° Encontro Nacional de Conservação Rodoviária (ENACOR) 49ª Reunião Anual de Pavimentação (RAPv)

UTILIZAÇÃO DA ESTATÍSTICA MULTIVARIADA PARA ANÁLISE DOS PARÂMETROS GEOTÉCNICOS DOS SOLOS TROPICAIS E PREDIÇÃO DA CLASSIFICAÇÃO MCT

*Whilison M. Mendonça¹; Felício G. Oliveira²; Geraldo L. O. Marques³; Diogo R. S. Baudson¹,
Marco Antônio G. Antunes⁴ & Gustavo F. Teixeira¹*

RESUMO

A avaliação dos materiais utilizados na pavimentação envolve a execução de ensaios geotécnicos que contemplam diversos parâmetros. A interpretação isolada de cada um dificulta a decisão de utilização ou exclusão do material. Além disso, ainda hoje, muitos laboratórios de geotecnia não possuem os equipamentos necessários ou o conhecimento técnico para realização dos ensaios da metodologia MCT (miniatura, compactado, tropical) e dessa forma, classificar os solos tropicais. Nesse contexto, esse trabalho tem como objetivo principal utilizar técnicas estatísticas multivariadas a fim de analisar um conjunto de diferentes variáveis geotécnicas. De forma complementar, foi comparada a eficiência dos ensaios de equivalente de areia e adsorção do Azul de Metileno para avaliar avaliara fração fina dos solos tropicais. Para tanto, foram consideradas 20 propriedades geotécnicas (variáveis numéricas) de 12 solos tropicais (medidas). Os resultados mostraram vantagem na utilização da adsorção do Azul de Metileno frente ao equivalente de areia para avaliação da fração fina. As análises estatísticas evidenciaram fortes correlações entre os parâmetros da metodologia MCT e outros de ensaios mais simples, como a análise granulométrica e os limites de consistência. Foram gerados dois modelos para prever os coeficientes c' e e' (MCT), a partir de outras variáveis numéricas, que apresentaram assertividade de 83% na previsão da classificação MCT para as doze amostras analisadas. Ressalta-se, que os modelos obtidos são estudos estatísticos iniciais que devem ser ampliados, principalmente em número de amostras, para que seja possível classificar os solos tropicais em casos que não há recursos para execução dos ensaios ou a nível de pré-projeto.

PALAVRAS-CHAVE: Solo tropical; Classificação MCT; Estatística Multivariada; Regressão Linear Múltipla.

ABSTRACT

The evaluation of materials used in pavement construction involves conducting geotechnical tests that encompass various parameters. Interpreting each parameter in isolation complicates the decision to use or exclude a material. Moreover, many geotechnical laboratories still lack the necessary equipment or technical expertise to perform tests using the MCT (Miniature, Compacted, Tropical) methodology and thus classify tropical soils. In this context, the primary objective of this study is to employ multivariate statistical techniques to analyze a set of different geotechnical variables. Additionally, the efficiency of the Sand Equivalent and Methylene Blue Adsorption tests was compared to evaluate the fine fraction of tropical soils. The study considered 20 geotechnical properties (numerical variables) of 12 tropical soils (samples). The results demonstrated the superiority of Methylene Blue Adsorption over the Sand Equivalent test for evaluating the fine fraction. Statistical analyses revealed strong correlations between the parameters of the MCT methodology and simpler tests, such as particle size analysis and consistency limits. Two models were developed to predict the coefficients c' and e' (MCT) based on other variables. The models demonstrated an accuracy of 83% in predicting the MCT classification of the twelve samples. The presented models are preliminary statistical studies that need more soil samples to predict the MCT classification of tropical soils when testing is unavailable or for preliminary project stages.

KEY WORDS: Tropical soil; MCT classification; Multivariate statistic; Multiple linear regression.

¹ Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP, Núcleo de Geotecnia, Escola de Minas, whilison@ufop.edu.br; diogo.baudson@ufop.edu.br; gustavo.ft@aluno.ufop.edu.br

² Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – DNIT, Superint. Reg. de MG, felicio.gerald@dnit.gov.br

³ Universidade Federal de Juiz de Fora – UFJF, Departamento de Transportes e Geotecnia, geraldo.marques@ufjf.br

⁴ Ministério Público do Estado de Minas Gerais, marcoantonioantunes56@gmail.com



INTRODUÇÃO

O estudo e aplicação de solos tropicais lateríticos em estradas no Brasil teve início na década de 1950, quando uma base de rodovia foi construída com argila laterítica e permaneceu em boas condições por mais de 20 anos (NOGAMI; VILLIBOR, 1995). O avanço no conhecimento sobre o uso desses solos em pavimentação de baixo custo foi impulsionado, principalmente, pelo Prof. Job Shuji Nogami, ao longo da segunda metade do século XX. Atualmente, além das metodologias tradicionais e estrangeiras de classificação de materiais para pavimentação, a metodologia MCT é amplamente utilizada para entender as características e o comportamento dos solos em climas tropicais úmidos. A importância de diferenciar solos tropicais lateríticos de saprolíticos reside no comportamento favorável dos primeiros para pavimentação, ao passo que os últimos frequentemente apresentam desempenho inferior (NOGAMI; VILLIBOR, 1995). Os ensaios utilizados internacionalmente para classificar os solos e pedregulhos quanto ao comportamento esperado na pavimentação não refletem com eficiência as características dos solos tropicais. A classificação HRB-AASHTO classifica os materiais em sete grupos, considerando sua granulometria, limite de liquidez (LL), índice de plasticidade (IP) e Índice de Grupo (IG). Os solos tropicais lateríticos geralmente são classificados no grupo 6 ou 7, sendo considerados de qualidade regular a pobre para pavimentação. Contudo, a prática no Brasil confirmou que essa classificação leva à subutilização de muitos solos tropicais com excelentes propriedades (BALBO, 2007).

A metodologia MCT consiste em grupos de ensaios realizados em corpos de prova compactados em miniatura, dos quais são obtidos os coeficientes de argilosidade (c') e laterização (e'), possibilitando classificar o solo em um dos 7 grupos (quatro não lateríticos e três lateríticos) do ábaco. Apesar da consolidação dessa metodologia no Brasil, alguns critérios normativos ainda citam exigências de outros parâmetros que os solos não conseguem atingir, como, por exemplo, o equivalente de areia.

A norma DNIT 098/2007 trata da execução de base estabilizada granulometricamente com utilização de solo laterítico. Segundo os critérios normativos, os solos lateríticos de granulação fina devem possuir equivalente de areia (EQA) mínimo de 30% (DNIT, 2007). Tal valor dificilmente é alcançado pelos solos lateríticos argilosos, embora apresentem boas características para aplicação em pavimentos. Conforme relatado por Oliveira *et al.* (2023), o EQA não é eficiente para avaliar a nocividade dos solos tropicais para as estruturas dos pavimentos. Os autores sugerem que a classificação MCT deve ser tomada como referência e recomendam a utilização do ensaio de adsorção de Azul de Metileno para verificar a atividade da fração argila.

Os resultados obtidos a partir dos inúmeros ensaios geotécnicos de laboratório existentes precisam ser avaliados e interpretados para uma escolha adequada do material que irá compor as camadas de uma rodovia. A decisão deve ser baseada na avaliação do conjunto de resultados das variáveis independentes que representam o comportamento do material. As técnicas de estatística multivariada permitem organizar os dados de forma a criar conhecimento e melhorar a tomada de decisões, permitindo analisar as múltiplas características do material sob investigação. Dessa forma, o objetivo da análise multivariada é medir, explicar e prever o grau de relação entre as variáveis estatísticas e combinações ponderadas das variáveis (HAIR JR *et al.*, 2009).

O presente trabalho tem por objetivo analisar estatisticamente os resultados de diversos ensaios realizados em dois grupos de solos: um de comportamento laterítico e outro não laterítico. Além da estatística básica descritiva, também foram utilizadas técnicas de análise multivariada de dados, como a análise de componentes principais (ACP) e a regressão linear múltipla (MLR). De forma



complementar, foram analisados a efetividade dos ensaios de equivalente de areia e adsorção de Azul de Metileno para prever o comportamento nocivo da fração fina dos solos tropicais.

MATERIAIS E MÉTODOS

Materiais

Para realização dessa pesquisa foram utilizados 12 solos de diferentes localidades do estado de Minas Gerais. Os solos foram escolhidos de forma a constituir dois conjuntos de amostras, um de comportamento laterítico e outro de comportamento não laterítico. A Figura 1 ilustra as amostras dos solos utilizadas na pesquisa, que apresentaram grande heterogeneidade de cores. Os solos escolhidos fazem parte do banco de amostras do Centro Tecnológico de Geotecnia Aplicada, pertencente ao Núcleo de Geotecnia da Universidade Federal de Ouro Preto, e foram previamente estudados por outros autores. A Tabela 1 apresenta a descrição dos solos utilizados e os autores que trabalharam em pesquisas anteriores com esses materiais. A Figura 2 exibe um mapa de Minas Gerais e identifica as cidades nas quais os solos foram coletados.



Figura 1. Amostras dos solos de diferente coloração utilizados nessa pesquisa

Tabela 1. Identificação, descrição, local de coleta e pesquisa de origem das doze amostras de solos

| Identificação | Descrição | Cidade (localidade) | Pesquisa de origem |
|---------------|---------------------------------|----------------------------------|--------------------|
| S1 | Laterita argilosa verm. amarela | Monte Alegre (Rural) | Oliveira (2023) |
| S2 | Areia argilosa vermelha | Monte Alegre (Urbano) | Oliveira (2023) |
| S3 | Silte argiloso verm. amarelo | Ouro Branco | Mendonça (2020) |
| S4 | Latossolo vermelho amarelo 1 | Esmeraldas | Silva (2019) |
| S5 | Latossolo vermelho amarelo 2 | Betim | Silva (2019) |
| S6 | Podzólico vermelho amarelo 1 | Juatuba | Silva (2019) |
| S7 | Podzólico vermelho amarelo 2 | Ribeirão das Neves | Silva (2019) |
| S8 | Argiloso laterítico marrom | Ouro Preto (Antônio Pereira) | Couto (2020) |
| S9 | Argiloso laterítico vermelho | Congonhas | Couto (2020) |
| S10 | Latossolo vermelho amarelo 3 | Mariana (Camargos) | Baudson (2023) |
| S11 | Silte amarelo horizonte C | Ouro Preto (S. Antônio do Leite) | Hernandez (2020) |
| S12 | Saprólito cinza intemperizado | Ouro Preto (Saramenha) | Magalhães (2022) |

Os resultados dos ensaios de caracterização geotécnica (análise granulométrica, massa específica real dos grãos e limites de consistência) foram obtidos das pesquisas de origem dos solos, cujos autores estão indicados na Tabela 1. Os parâmetros c' , d' e P_i para a classificação MCT das amostras também foram retirados dos trabalhos citados, à exceção dos solos S11 e S12, cujos autores não realizaram a classificação MCT. Para esses dois solos foram executados os ensaios de compactação mini-MCV e perda de massa por imersão, conforme a norma DNIT – ME 258 (DNIT, 2023a), e realizada a classificação MCT, segundo a norma DNIT – CLA 259 (DNIT, 2023b). A fim de sintetizar a apresentação do banco de dados dos solos, todos os resultados utilizados nas análises estatísticas



serão apresentados na próxima seção (Tabela 2), incluindo os que foram obtidos especificamente para essa pesquisa e aqueles oriundos de trabalhos anteriores.

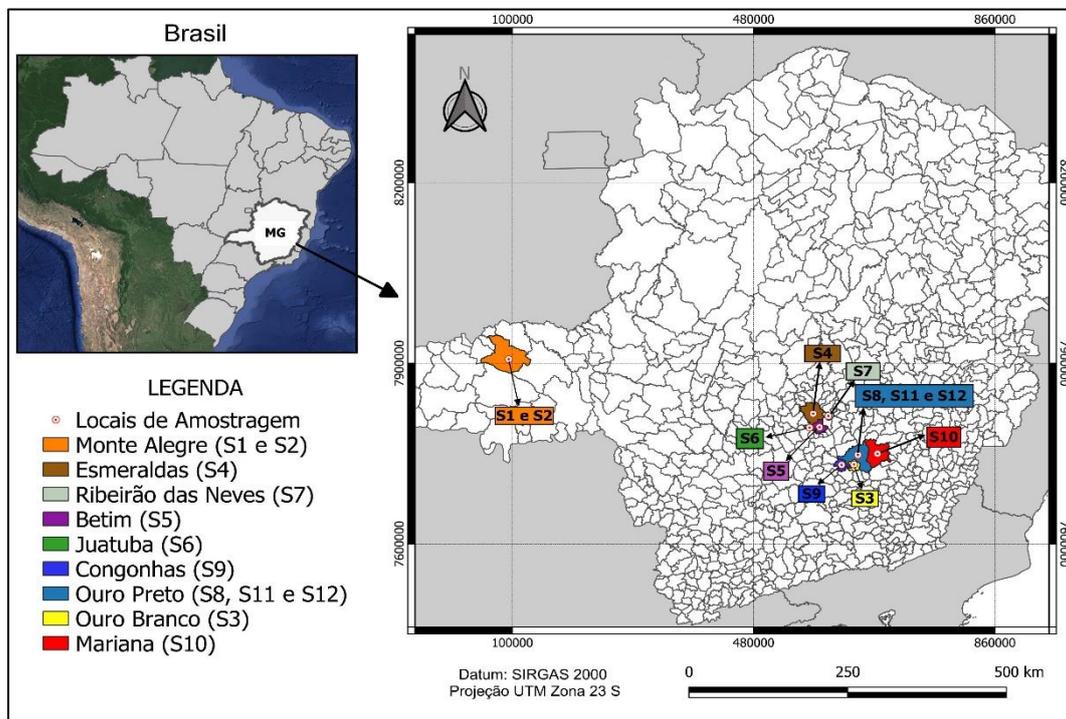


Figura 2. Localização das amostras de solo

Métodos

Os métodos experimentais aplicados nessa pesquisa podem ser divididos em três etapas principais: i) seleção das amostras de solo e levantamento dos dados existentes; ii) execução dos ensaios geotécnicos em laboratório para obtenção dos dados complementares dos solos (incluindo o equivalente de areia e a adsorção do Azul de Metileno); iii) análises estatísticas do banco de dados das doze amostras de solo.

Ensaio de Laboratório (2ª etapa)

Além dos ensaios necessários para a classificação MCT dos solos S11 e S12, foram executados os ensaios de equivalente de areia (EQA) e adsorção de Azul de Metileno para todas as amostras. O ensaio de EQA é tipicamente realizado para analisar a relação volumétrica entre as partículas de tamanho argila (finos plásticos e material pulverulento) e a fração grossa (areia e pedregulho) presentes nos solos e agregados utilizados na pavimentação. A norma DNIT 141/2022 exige que os materiais tenham EQA maior que 30% quando os limites de consistência do material forem ultrapassados, no caso de dimensionamento de base pelo método empírico. O mesmo limite é exigido para solos finos lateríticos, conforme a norma DNIT 098/2007. Nesse estudo, o ensaio de EQA foi realizado para cada uma das doze amostras, em triplicata, adotando a média dos resultados, conforme o procedimento normativo DNER – ME 054 (DNER, 1997).

O ensaio de adsorção de Azul de Metileno visa analisar a atividade da fração argila, que representa a nocividade que essa fração pode apresentar quando utilizada em obras geotécnicas. As partículas de



solo com maior atividade, nocividade ou expansão, ou ainda maior contaminação com matéria orgânica, possuem maior potencial de adsorção do corante. O efeito contrário é apresentado por partículas não nocivas e de estrutura não expansiva (FABBRI, 1994; AASHTO, 2019).

Os ensaios realizados nessa pesquisa foram executados de acordo com o método da mancha, conforme apresentado na norma T 330-07 (AASHTO, 2019). O resultado do ensaio de adsorção do Azul de Metileno pode ser expresso pelo Valor de Azul (V_a), em miligrama do soluto (Azul de Metileno) por grama de solo passante na peneira #200 (0,075 mm), ou pelo coeficiente de atividade (CA) da fração argila, calculado pela razão entre o V_a e a porcentagem de argila presente no solo.

Análises de Estatística Multivariada (3ª etapa)

Nesse estudo, foram utilizadas as técnicas de análise de componentes principais (ACP) e regressão linear múltipla (RLM) para análise dos dados. A ACP tem por objetivo condensar as informações contidas em várias variáveis (medidas) em um conjunto menor de variáveis estatísticas, expressas pelos fatores, com perda mínima de informação.

Já a RLM é uma técnica que permite prever a resposta de uma variável dependente em relação às medidas de duas ou mais variáveis independentes do banco de dados. O processamento é geralmente realizado por meio do estimador dos mínimos quadrados, que minimiza a soma dos quadrados dos resíduos da regressão, maximizando o grau de ajuste do modelo aos dados medidos. Nessa pesquisa, a RLM foi realizada para predição da classificação MCT dos solos tropicais. Para tanto, diversos modelos foram gerados a fim de obter os valores de c' e e' , sendo adotado aquele que apresentaram os maiores coeficientes de determinação (R^2) e R^2 ajustado.

Além da ACP e RLM, outras ferramentas estatísticas foram utilizadas, incluindo a estatística básica descritiva dos dados. A sequência de operações estatísticas compreendeu as ferramentas de *bloxplot* e histograma das variáveis, matriz de correlação e covariância dos dados (com verificação da dispersão com *scatter plot*) e teste de esfericidade de Bartlett (para verificar a existência de correlação suficiente para aplicação das técnicas). Para aplicação da técnica de ACP, as variáveis foram reduzidas de 20 para 11, tornando o número de variáveis menor que o número de medidas (12 solos). Posteriormente, foram gerados os modelos de RLM, avaliados pelo teste de significância ANOVA, linearidade dos dados, homoscedasticidade e normalidade dos resíduos.

As análises foram realizadas com o software Rstudio, versão 2023.12.1, (R Core Team, 2024), sendo um software livre de ambiente de desenvolvimento integrado e linguagem R, que possui um conjunto de ferramentas voltadas para cálculos estatísticos e geração de gráficos.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Resultados dos Ensaios Geotécnicos e Banco de Dados

O conjunto de dados das doze amostras de solos utilizadas está apresentado na Tabela 2. Ressalta-se que os dados referentes aos coeficientes c' , d' , P_i e e' dos solos S11 e S12, bem como o EQA, Vol. Azul, V_a e CA de todos os solos, foram obtidos por ensaios realizados especificamente para esse trabalho. Todos os demais dados foram obtidos dos trabalhos citados na Tabela 1. As identificações das variáveis foram simplificadas para facilitar o tratamento no Rstudio e, para melhor compreensão, estão discriminados na Tabela 3.

Alguns dos solos utilizados, principalmente os de caráter não laterítico, não possuem plasticidade (LP) e não possuem liquidez (LL) determinável pelo aparelho de Casagrande. Para fins geotécnicos, esses solos são denominados não líquidos (NL) e não plásticos (NP). Entretanto, para que fosse



possível realizar as análises estatísticas das medidas, foi necessário atribuir valor 0 às variáveis LL, LP e IP das amostras que não possuíam valores numéricos definidos.

Tabela 2. Banco de dados de ensaios geotécnicos dos doze solos utilizados na pesquisa

| ID | Ped | Agr | Ame | Afi | Are | 200 | Sil | Arg | Gs | LL |
|-------|------|-----|------|--------|-------|------|------|----------|-------|-------|
| S1* | 41,4 | 9,2 | 4,6 | 28,5 | 39,7 | 18,9 | 4,1 | 12,2 | 2,537 | 23 |
| S2* | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 74,8 | 74,8 | 25,2 | 8,3 | 6,5 | 2,682 | 23 |
| S3** | 0,5 | 3,2 | 12,1 | 5,3 | 20,6 | 78,8 | 43,7 | 35,2 | 2,710 | 58 |
| S4* | 2,0 | 3,0 | 16,0 | 13,0 | 32,0 | 68,3 | 14,0 | 52,0 | 2,652 | 59 |
| S5** | 0,0 | 7,0 | 33,0 | 23,0 | 63,0 | 38,4 | 20,0 | 17,0 | 2,687 | 0 |
| S6* | 20,0 | 2,0 | 4,0 | 6,0 | 12,0 | 68,8 | 20,0 | 48,0 | 2,705 | 48 |
| S7** | 0,0 | 7,0 | 30,0 | 25,0 | 62,0 | 39,6 | 23,0 | 15,0 | 2,662 | 0 |
| S8* | 1,2 | 5,2 | 11,8 | 8,0 | 25,0 | 75,6 | 10,0 | 63,8 | 2,997 | 30 |
| S9* | 0,7 | 3,4 | 8,8 | 7,0 | 19,2 | 83,5 | 7,6 | 72,5 | 2,782 | 57 |
| S10* | 1,0 | 0,5 | 11,5 | 6,0 | 18,0 | 82,0 | 15,5 | 65,5 | 2,757 | 68 |
| S11** | 0,0 | 0,8 | 11,7 | 13,5 | 26,0 | 76,0 | 60,0 | 14,0 | 2,578 | 44 |
| S12** | 27,3 | 0,7 | 9,0 | 14,5 | 24,2 | 51,5 | 39,7 | 8,8 | 2,884 | 40 |
| ID | LP | IP | c | d | Pi | e | EQA | Vol.Azul | Va | CA |
| S1* | 15 | 8 | 0,92 | 27,59 | 45,0 | 1,06 | 17 | 5,70 | 1,08 | 8,83 |
| S2* | 16 | 7 | 0,74 | 40,35 | 81,0 | 1,09 | 9 | 15,35 | 4,53 | 69,66 |
| S3** | 0 | 0 | 1,23 | 40,50 | 270,5 | 1,47 | 1 | 8,50 | 6,70 | 19,03 |
| S4* | 31 | 18 | 2,26 | 47,67 | 30,0 | 0,90 | 2 | 9,00 | 6,15 | 11,82 |
| S5** | 0 | 0 | 1,21 | 20,53 | 116,0 | 1,29 | 10 | 6,20 | 2,38 | 14,02 |
| S6* | 13 | 10 | 1,94 | 27,50 | 60,0 | 1,10 | 2 | 9,50 | 6,54 | 13,62 |
| S7** | 0 | 0 | 1,15 | 8,48 | 160,0 | 1,58 | 16 | 9,50 | 3,76 | 25,09 |
| S8* | 21 | 9 | 2,17 | 129,05 | 5,0 | 0,59 | 16 | 1,25 | 0,94 | 1,48 |
| S9* | 33 | 24 | 2,07 | 19,64 | 40,1 | 1,12 | 7 | 6,95 | 5,80 | 8,00 |
| S10* | 35 | 33 | 2,31 | 25,00 | 5,0 | 0,95 | 3 | 9,25 | 7,58 | 11,58 |
| S11** | 0 | 0 | 1,13 | 6,20 | 326,0 | 1,86 | 2 | 7,75 | 5,89 | 42,06 |
| S12** | 0 | 0 | 0,92 | 9,82 | 302,0 | 1,72 | 12 | 3,00 | 1,54 | 17,55 |

*: solos de comportamento laterítico; **: solo de comportamento não laterítico.

Tabela 3. Descrição das variáveis

| Nº Variável | Variável | Descrição | Nº Variável | Variável | Descrição |
|-------------|----------|---|-------------|-----------|--|
| 1 | Ped | Fração de pedregulho (%) | 11 | LP | Limite de Plasticidade (%) |
| 2 | Agr | Fração de Areia Grossa (%) | 12 | IP | Índice de Plasticidade (%) |
| 3 | Ame | Fração de Areia Média (%) | 13 | c | Coeficiente de argilosidade c' - MCT |
| 4 | Afi | Fração de Areia Fina (%) | 14 | d | Coeficiente de compactação d' - MCT |
| 5 | Are | Fração de Areia (%) | 15 | Pi | Perda de massa por imersão (%) |
| 6 | 200 | Fração passante na peneira #200 - 0.075mm (%) | 16 | e | Coeficiente de laterização e' - MCT |
| 7 | Sil | Fração de silte - 0.06mm (%) | 17 | EQA | Equivalente de Areia (%) |
| 8 | Arg | Fração de Argila - 0.002mm (%) | 18 | Vol. Azul | Miligrama de Azul de Metileno consumido por grama de solo passante #200 (mg/g) |
| 9 | Gs | Massa específica real dos grãos (g/cm³) | 19 | Va | Miligrama de Azul de Metileno consumido por grama de solo (mg/g) |
| 10 | LL | Limite de Liquidez (%) | 20 | CA | Coeficiente de atividade da fração argila (mg/g*%Arg) |



Embora os parâmetros c' , d' , P_i e e' da classificação MCT tenham sido analisados, a classificação em si não foi utilizada, por não se tratar de um dado numérico. Os solos S1 e S2 são arenosos lateríticos (LA'), os solos S4, S6, S8, S9 e S10 são argilosos lateríticos (LG'), o solo S5 é arenoso não laterítico (NA') e os solos S3, S7, S11 e S12 são siltosos não lateríticos (NS'). Dessa forma, o conjunto de dados é composto por sete solos de comportamento laterítico e cinco não laterítico.

Os dados da Tabela 2 mostram que os solos utilizados apresentaram heterogeneidade nos parâmetros. O percentual de argila variou de 6,5 a 65,5 %, enquanto o índice de plasticidade variou de não plástico a 33%. Estabelecer regressões com um conjunto de solos heterogêneos favorece a replicação dos modelos para diversos tipos de solos, não restringindo a materiais de comportamento semelhante.

Os resultados do ensaio de EQA foram abaixo de 30%, para todas as amostras, variando de 1 a 17% e com média de 8%. Nota-se, para o resultado do EQA, que os baixos valores obtidos desqualificam os solos para uso em camada de base (mínimo de 30%), segundo as normas do DNIT, embora alguns solos lateríticos sejam de comportamento conhecidamente favorável para emprego na pavimentação. Este resultado corrobora as análises realizadas por Oliveira *et al.* (2023), que demonstraram a ineficácia do ensaio de EQA para analisar os solos tropicais.

Por outro lado, os resultados do ensaio de Azul de Metileno mostraram-se mais coerentes com o comportamento dos solos. Maiores coeficientes de atividade (CA) da fração argila estão associados a solos de comportamento não laterítico, à exceção do S2, que é um solo laterítico com alta porcentagem de areia.

Análises Estatísticas

Para o conjunto de dados, foram geradas as matrizes de covariância e correlação entre as vinte variáveis numéricas. As componentes obtidas a partir da matriz de covariâncias são influenciadas pelas variáveis de maior variância, sendo recomendado a análise da matriz de correlações quando as variáveis são muito heterogêneas. Conforme já discutido anteriormente, o conjunto de dados é heterogêneo e os valores podem variar de unidades, como o coeficiente c' , a centenas de unidades, como o P_i .

A Figura 3 apresenta o *boxplot* das variáveis padronizadas pela média e desvio-padrão. Em cada variável, os traços inferiores e superiores indicam os valores mínimos e máximos, desconsiderando os *outliers*, que são indicados pelos círculos vazios. O início e o fim da caixa indicam o primeiro e o terceiro quartis, que delimitam os valores 25% e 75% menores. O traço de maior espessura dentro da caixa é a mediana dos dados, ou segundo quartil, que separa os valores 50% menores dos 50% maiores.

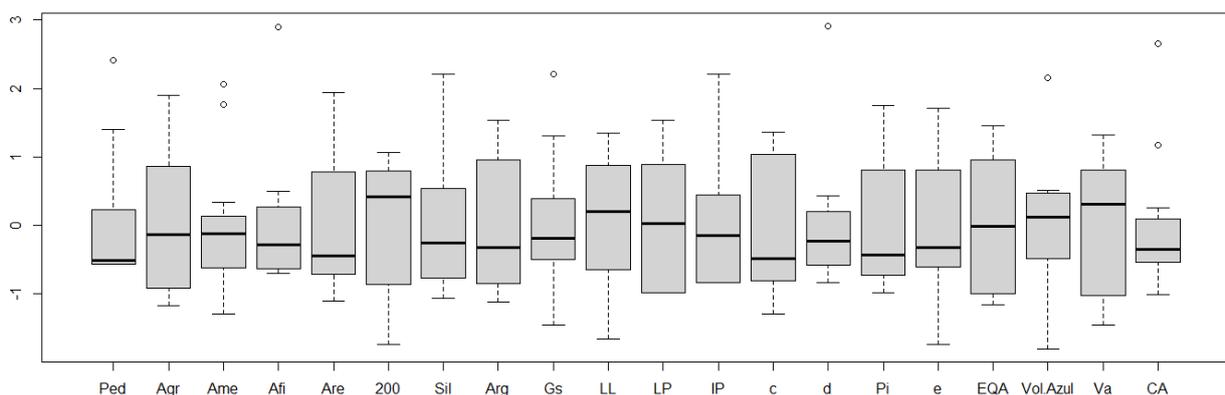


Figura 3. *Boxplot* das variáveis padronizadas



Algumas variáveis como “200”, “c”, “EQA” e “Va” possuem alta dispersão dos dados. A maioria das variáveis possuem distribuição assimétrica dos dados, com a mediana tendendo ao primeiro ou ao terceiro quartil. Algumas variáveis apresentaram valores discrepantes (*outliers*), identificados acima ou abaixo do limite de detecção. Os *outliers* detectados foram mantidos no banco de dados, pois eles refletem as características das amostras de solo e são importantes para avaliar as propriedades heterogêneas.

Os gráficos de dispersão (*scatter plot*), apresentados abaixo da diagonal principal da matriz exibida na Figura 4, mostram a tendência de relação entre as variáveis descritas na própria diagonal principal. Essa tendência é expressa numericamente pelas correlações entre as variáveis dispostas acima da diagonal principal. O coeficiente de correlação (Pearson – r) mede o grau pelo qual duas variáveis aleatórias tendem a mudar juntas, em correlação linear. Os valores variam de -1 a 1, sendo que os valores negativos indicam correlação inversa.

Quanto à magnitude dos valores, é comum entender que coeficientes de correlação menores que 0,30 são fracos ou pequenos, enquanto valores maiores são moderados a fortes. Algumas fortes correlações apresentadas são óbvias, devido ao próprio cálculo da variável, como o LP e IP, que apresentaram correlação de 0,95. De maneira análoga, as variáveis “200” e “Arg” também apresentaram forte correlação (0,77).

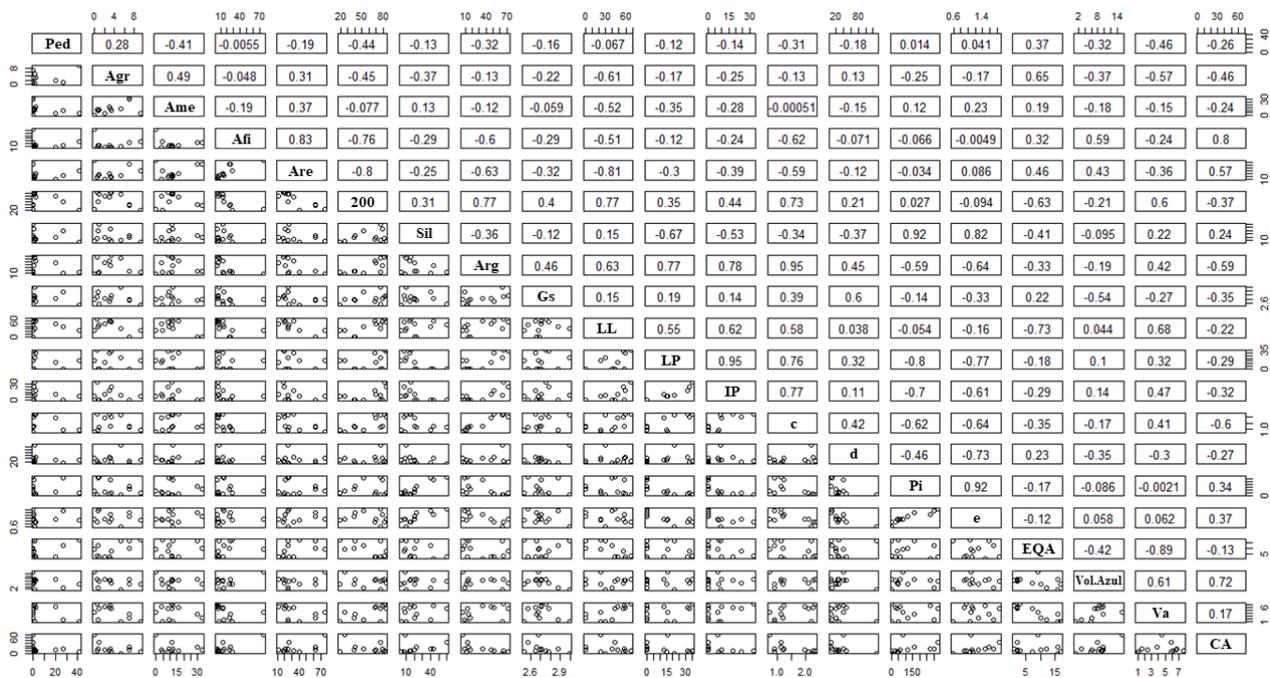


Figura 4. Gráficos de dispersão (*scatter plot*) e matriz de correlação das variáveis

Entretanto, outras correlações altas indicam boas evidências a serem interpretadas. O coeficiente c' (MCT) apresentou correlação de 0,95 com a porcentagem de argila. Esse dado vai ao encontro da teoria proposta pelos criadores da metodologia MCT, pois o c' é um coeficiente que explica a argilosidade do solo. De forma similar, o Pi apresentou correlação de 0,92 com “Sil”, ratificando a associação entre a perda de massa por imersão e falta de coesão dos materiais siltosos.



Ainda analisando os coeficientes da classificação MCT, o e' apresentou baixa correlação com a porcentagem de areia (0,086), alta correlação positiva com a porcentagem de silte (0,82) e boa correlação negativa com a porcentagem de argila (-0,64). Esses valores sugerem que o índice de laterização do solo está mais relacionado às frações finas, que incluem os argilominerais e óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio, do que às frações grossas, que geralmente incluem fragmentos de rocha e grãos estáveis de quartzo.

Para execução da análise de componentes principais (ACP) o número de variáveis foi reduzido de 20 para 11, excluindo as variáveis que são calculadas a partir de outras. As variáveis mantidas foram: Are, Sil, Arg, GS, LL, LP, c, d, Pi, EQA e Va. O teste de Bartlett apresentou p.valor menor que 0,05 ($1,93E^{-6}$), possibilitando a aplicação das técnicas multivariadas.

A Tabela 4 apresenta as medidas de cada componente principal (CP). A CP1 é responsável pela explicação de 43,7% da variância dos dados, enquanto a soma das três primeiras CPs, retidas pelo critério de *Kaiser* (autovalor maior que 1), explica 87,4% do conjunto de dados. Dessa forma, o conjunto de variáveis analisadas dos solos podem ser reduzidas em três componentes principais, explicando 87,4% da variabilidade das propriedades.

Tabela 4. Medidas estatísticas resultantes da ACP

| Medida | CP1 | CP2 | CP3 | CP4 | CP5 | CP6 | CP7 | CP8 | CP9 | CP10 | CP11 |
|----------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Desvio padrão | 2,192 | 1,793 | 1,264 | 0,711 | 0,588 | 0,541 | 0,330 | 0,285 | 0,179 | 0,116 | 0,054 |
| Proporção da variância explicada | 0,437 | 0,292 | 0,145 | 0,046 | 0,031 | 0,027 | 0,010 | 0,007 | 0,003 | 0,001 | 0,000 |
| Proporção acumulada | 0,437 | 0,729 | 0,874 | 0,920 | 0,952 | 0,978 | 0,988 | 0,996 | 0,999 | 1,000 | 1,000 |

A Figura 5 apresenta os gráficos *Scree Plot* e *Biplot* obtidos com as análises. O primeiro mostra a variância explicada para cada componente principal, em que a linha vermelha delimita o autovalor igual a 1, resultando na retenção de 3 componentes principais, destinadas a redução a dimensionalidade dos dados. O *Biplot* exibe as observações (números de 1 a 12) e as variáveis (vetores) no espaço, considerando as duas primeiras componentes principais. É possível perceber a sobreposição dos vetores “Arg” e “c” com grande influência no CP1. Já as variáveis “EQA” e “Sil”, apresentaram maior influência na CP2, porém em direções opostas. As demais variáveis mostraram influência significativa tanto na CP1 quanto na CP2.

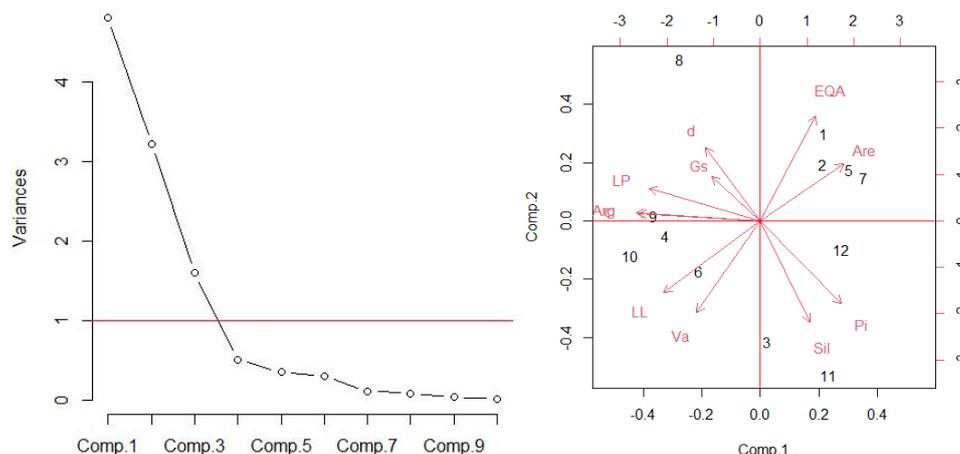


Figura 5. Análise de Componentes Principais: i) à esquerda, *Scree plot* e critério de *Kaiser*; ii) à direita, *Biplot* dos escores para CP1 e CP2



Após verificação da possibilidade de redução da dimensionalidade dos dados, foi dada sequência às técnicas de análise multivariada, sendo gerados uma série de modelos para previsão dos parâmetros da classificação MCT pela RLM, a partir das outras variáveis. Inicialmente, foram gerados modelos para previsão dos coeficientes c' , d' e P_i . Entretanto, considerando os coeficientes de determinação calculados, percebeu-se que eliminar os modelos para prever o d' e P_i e gerar um único modelo para previsão do e' foi mais efetivo, visto que o e' é calculado a partir desses dois.

Dentre os modelos gerados, foram adotados aqueles que apresentaram os maiores coeficientes de determinação (R^2) e R^2 ajustado pelo número de variáveis. O modelo para previsão do c' é representado pela Equação 1, cujo R^2 foi igual a 0,915 e o R^2 ajustado igual a 0,844. Foram utilizadas 5 variáveis, sendo as variáveis Arg e Va associadas às maiores cargas multiplicativas.

Já a Equação 2, representa o modelo de previsão do e' , que utilizou 6 variáveis para obter um melhor coeficiente de determinação, cujo R^2 foi de 0,863 e o R^2 ajustado igual a 0,698. Em nenhum dos dois modelos o EQA contribuiu para melhoria do ajuste. Já os parâmetros Va e CA tiveram comportamento contrário, contribuindo para melhor acurácia do modelo e confirmando que o ensaio de EQA explica menos o comportamento dos solos tropicais em relação ao ensaio de adsorção de Azul de Metileno.

$$c' = 1,157 - 7,238E^{-3} * Are + 1,810E^{-2} * Arg - 8,991E^{-3} * LL + 9,954E^{-3} * LP + 4,092E^{-2} * Va \quad (1)$$

$$e' = 1,614 + 1,183E^{-2} * Sil - 5,546E^{-3} * Arg - 1,469E^{-1} * Gs - 2,012E^{-2} * LP + 2,365E^{-2} * IP + 2,949E^{-5} * CA \quad (2)$$

Embora o teste ANOVA tenha indicado significância (p .valor < 0,05) apenas para duas variáveis de cada modelo, as demais foram mantidas por aumentarem o coeficiente de determinação R^2 . Por meio da análise gráfica dos resíduos, foi verificada a homoscedasticidade, ou seja, a dispersão dos resíduos é constante ao longo do espectro dos valores da variável independente. O teste de Shapiro apresentou p .valor de 0,313 e 0,058 para os modelos de c' e e' , respectivamente, indicando normalidade dos resíduos (valores maiores que 0,05).

A partir das Equações 1 e 2 dos modelos gerados, foram calculados os valores preditos (P) dos coeficientes c' e e' . Os valores foram inseridos no ábaco de classificação MCT (Figura 6), sendo representados por um triângulo com a descrição do respectivo solo seguido da letra “P”. Os valores originais (O) obtidos pelos ensaios também foram plotados no ábaco, representados pela letra “x” mais a identificação do solo, seguido da letra “O”. Dessa forma, foi possível comparar visualmente o desempenho dos modelos.

Foi observado que apenas em duas amostras (dentre as doze utilizadas) a classificação predita pelos modelos diferiu da classificação original, obtida a partir dos ensaios de laboratório, configurando uma taxa de acerto de 83%. Ainda assim, para os dois solos que os modelos não obtiveram a classificação correta (S6 e S7), a localização no ábaco ficou próxima dos valores originais, situando-se nos limites de classificação.

Sabendo que o coeficiente e' é calculado por meio de outros dois (d' e P_i) e que o P_i é altamente correlacionado com outras variáveis, a exemplo da porcentagem de silte, pode-se inferir que o coeficiente d' (calculado pela inclinação das curvas de compactação mini-MCV), apresentou baixa correlação com as variáveis adotadas. Sendo assim, sugere-se para trabalhos futuros, a inserção dos dados referentes à compactação Proctor como uma das variáveis do modelo de predição do e' na tentativa de melhorar o R^2 e assertividade na classificação MCT.

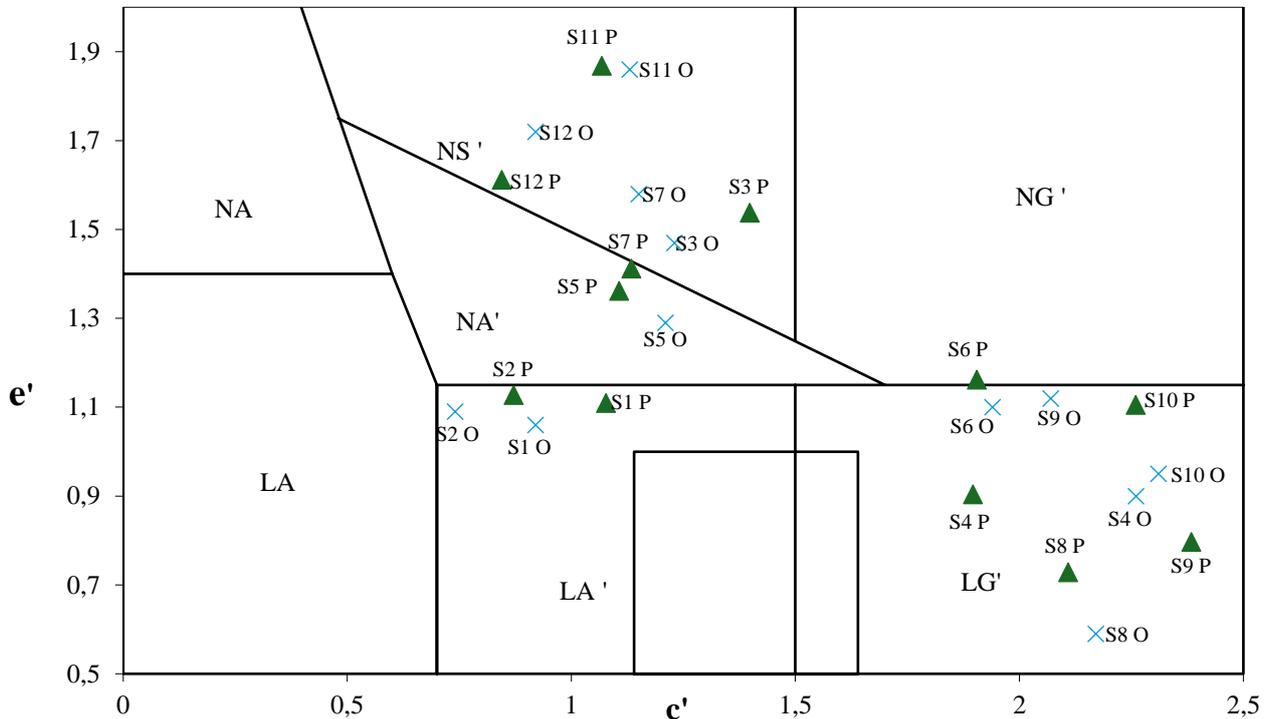


Figura 6. Classificação MCT das amostras de solo por meio dos dados de ensaios (O) e por meio dos modelos estatísticos preditivos dos coeficientes c' e e' (P)

CONCLUSÕES

As análises estatísticas evidenciaram uma baixa relação do ensaio de equivalente de areia com os parâmetros da classificação MCT, ao passo que os dados do ensaio de adsorção de Azul de Metileno tiveram melhor desempenho. Tais resultados indicam que a utilização dos parâmetros do ensaio de Azul de Metileno para analisar o comportamento da fração fina dos solos tropicais é mais efetivo que o ensaio de equivalente de areia.

A análise das correlações entre as variáveis indicou alta relação entre o coeficiente de argilosidade (c') e a porcentagem de argila, bem como entre o P_i e a porcentagem de silte, ratificando a metodologia MCT. Entretanto, não foi possível obter alta correlação entre o d' e as outras variáveis utilizadas.

A análise de componentes principais (ACP) mostrou que o conjunto de variáveis analisadas das amostras de solo podem ser reduzidas em três componentes principais, explicando cerca de 87,4% da variabilidade dos dados. Considerando que as análises geotécnicas envolvem muitos ensaios e parâmetros, a utilização de técnicas estatísticas para tomada de decisão se apresenta com uma alternativa relevante, pois, como evidenciado nesta pesquisa, muitas variáveis podem ser reduzidas em poucas componentes para explicar as propriedades.

Utilizando a técnica de regressão linear múltipla (RLM), foram gerados modelos preditivos que apresentaram uma assertividade de 83% na classificação MCT dos solos utilizados, com desvio de classificação apenas em solos cuja disposição gráfica estava no limite dos quadrantes. Embora o estudo tenha utilizado um banco de amostras com solos de comportamento heterogêneo, o número de amostras (12) ainda é limitado, demandando estudos futuros com um maior número de amostras, permitindo assim ampliar a precisão dos modelos e aplicar em diferentes situações



AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001 e da Universidade Federal de Ouro Preto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AASHTO. Standard Method of Test for The Qualitative Detection of Harmful Clays of the Smectite Group in Aggregates Using Methylene Blue. T 330-07. Washington D.C, USA, 2019.
- Balbo, J. T. Pavimentação Asfáltica: materiais, projetos e restauração. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.
- BAUDSON, D. R. S. Análise geotécnica da erodibilidade do rejeito proveniente do rompimento da barragem de Fundão: um estudo de caso na Bacia do Rio Gualaxo do Norte. Dissertação. Prog. Pós-Graduação em Geotecnia da UFOP, 2023.
- COUTO, B. O. C. Estudo da erodibilidade em horizontes de taludes de corte rodoviário por meio de procedimentos de laboratório e de campo. Tese. Prog. Pós-Graduação em Geotecnia da UFOP, 2020.
- DNER. Equivalente de areia. Rio de Janeiro: DNER-ME 054/97: 1997.
- DNIT. Pavimentação - Base estabilizada granulometricamente com utilização de solo laterítico. Rio de Janeiro: DNIT 098/2007- ES: 2007.
- _____. Classificação de solos finos tropicais para finalidades rodoviárias utilizando corpos de prova compactados em equipamento miniatura. Brasília: DNIT-CLA 259/2023: 2023b.
- _____. Compactação em equipamento miniatura – Ensaios Mini-MCV e perda de massa por imersão: Brasília: DNIT-ME 258/2023: 2023a.
- FABBRI, G. T. P., Caracterização da fração fina de solos tropicais através da adsorção de Azul de Metileno. 1994. 162 f. Tese de Doutorado. USP, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 1994.
- HAIR JR, J. F. *et al.* Análise multivariada de dados [recurso eletrônico]. 6ª Ed. Porto Alegre: Bookman, 2009.
- HERNANDEZ, Y. M. R. Influência da sazonalidade climática na estabilidade de taludes em voçorocas no Complexo Metamórfico do Bação. Prog. Pós-Graduação em Geotecnia da UFOP, 2020.
- MAGALHÃES, T. P. Avaliação geotécnica de solos compactados para recuperação do aterro controlado de Ouro Preto, MG. TCC: Engenharia Civil. UFOP, 2022.
- MENDONÇA, W. M. Estabilidade de taludes em solo não saturado. TCC: Engenharia Civil. UFSJ, 2020.
- NOGAMI, J. S., VILLIBOR, D.F., Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos, São Paulo: Editora Villibor, 1995.
- OLIVEIRA, F. G. Estudo da estabilização granulométrica de lateritas com uso de solos do triângulo mineiro. Tese. Prog. Pós-Graduação em Geotecnia da UFOP, 2023.
- OLIVEIRA, F. G. *et al.* Linear shrinkage and the methylene blue spot test in the analysis of plasticity of granulometrically stabilized laterites. REM - International Engineering Journal, Fundação Gorceix, v. 76(3), p. 255–263, 2023.
- R Core Team. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.
- SILVA, B. O. Estudo comparativo entre metodologias de classificação e caracterização mecânica de solos da Região Metropolitana de Belo Horizonte para fins rodoviários. Dissertação. Prog. Pós-Graduação em Geotecnia da UFOP, 2019.