

Investigação de uma tendência do comportamento resiliente de solos lateríticos argilosos: uma análise estatística e correlacional

Luigi Tavares Gomes

Discente de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil,
gomes_8@hotmail.com

Paula Taiane Pascoal

Discente de Doutorado em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil,
paulatpascoal@gmail.com

Patricia Rodrigues Falcão

Discente de Doutorado em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil,
falcao.rodrigues.patricia@gmail.com

Leonardo Alberto do Nascimento

Discente de Doutorado em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil,
leo_ladn@yahoo.com.br

Magnos Baroni

Docente na Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil, magnos.baroni@gmail.com

RESUMO: O artigo investiga a relação entre a caracterização, classificação e o comportamento resiliente de solos argilosos lateríticos, com foco na análise de 20 solos compactados na energia intermediária. A caracterização desses solos envolveu a massa específica aparente seca máxima, umidade ótima, granulometria, parâmetros da classificação MCT e o módulo de resiliência, utilizando-se histogramas de frequência e análises estatísticas para a interpretação dos dados. O módulo de resiliência apresenta menor variabilidade com maiores razões de tensões e valores elevados de tensões confinantes. Contudo, nem todos solos lateríticos argilosos seguem esse padrão, podendo exibir desvios padrão em algumas configurações de tensão. A correlação entre características físicas e de deformabilidade foi realizada pelo método de Spearman, indicando que a granulometria e a umidade afetam significativamente a resposta resiliente desses solos. O aumento na fração de areia eleva o módulo de resiliência, enquanto a presença de silte o reduz. Além disso, um aumento na umidade ótima tende a diminuir o módulo de resiliência, evidenciando a complexa relação entre as propriedades do solo e sua deformabilidade elástica. Face ao panorama apresentado, destaca-se a notória importância dessas análises em projetos de pavimentação, mostrando como diferentes características físicas impactam diretamente nas propriedades e na resiliência dos solos.

PALAVRAS-CHAVE: Classificação MCT, Módulo de Resiliência, Método Spearman, Banco de dados.

ABSTRACT: The article investigates the relationship between characterization, classification, and resilient behavior of lateritic clay soils, focusing on the analysis of 20 soils compacted at intermediate energy levels. The characterization of these soils involved maximum dry bulk density, optimum moisture content, particle size distribution, MCT classification parameters, and resilience modulus, using frequency histograms and statistical analyses for data interpretation. The resilience modulus exhibits lower variability with higher stress ratios and elevated confining stresses. However, not all lateritic clay soils follow this pattern, potentially exhibiting standard deviations in certain stress configurations. The correlation between physical and deformability characteristics was conducted using the Spearman method, indicating that particle size distribution and moisture content significantly affect the resilient response of these soils. An increase in the sand fraction enhances the resilience modulus, while the presence of silt reduces it. Furthermore, an increase in optimum moisture content tends to decrease the resilience modulus, highlighting the complex relationship between soil properties and elastic deformability. Given the presented panorama, the notable importance of these analyses in pavement projects is emphasized, demonstrating how different physical characteristics directly impact soil properties and resilience.

KEYWORDS: MCT classification, Resilient Modulus, Spearman Method, Database

1 INTRODUÇÃO

Sendo o Brasil, um país de dimensões continentais e amplamente tropical, os solos tropicais predominam devido às características climáticas, geológicas e pedológicas presentes em grande parte do território nacional. Entre esses solos, os argilosos lateríticos são especialmente proeminentes, amplamente encontrados e constituem uma parte significativa dos materiais utilizados em projetos de infraestrutura (MEDINA E MOTTA, 2015).

A classificação dos solos tropicais é uma etapa fundamental no campo da engenharia geotécnica, pois permite uma compreensão mais precisa de suas características e comportamentos, aspectos cruciais para o planejamento e execução de obras civis. Nesse contexto, a metodologia Miniatura Compactada Tropical (MCT), tem se destacado como uma abordagem eficaz para a avaliação e classificação de solos argilosos lateríticos, especialmente quando se trata de avaliações para a utilização em projetos de pavimentação rodoviária, visto que esses tendem a apresentar, em alguns casos, propriedades satisfatórias para utilização como base, sub-base e subleito (GUIMARÃES, 2009; MEDRADO, 2009; NOGAMI E VILLIBOR, 1995).

Além da classificação, a compactação dos solos é uma etapa crucial na preparação para sua utilização em projetos de engenharia. A energia de compactação aplicada desempenha um papel fundamental na melhoria das propriedades dos solos lateríticos, influenciando diretamente na capacidade de suporte e na estabilidade das estruturas construídas sobre eles. No cenário brasileiro, a energia de compactação intermediária tem sido amplamente adotada em camadas finais de terraplanagem de subleitos rodoviários, devido à sua capacidade de proporcionar uma densificação satisfatória e, por consequência, uma melhoria nas propriedades mecânicas, com maiores módulos de resiliência (MR) e menores deformações permanentes (DP) em comparação com a energia normal (LIMA, 2018; SANTOS, 2020; PASCOAL et al., 2021).

Tais propriedades mecânicas são de suma importância para servirem como parâmetros de entrada do novo Método de Dimensionamento Nacional (MeDiNa), o qual adota uma abordagem mecanicista-empírica e está em desenvolvimento para complementar e/ou substituir o método atual, de natureza empírica, visando aprimorar o dimensionamento de pavimentos asfálticos. Diante de tal, diversos estudos vêm sendo desenvolvidos com o intuito de explorar a relação entre a classificação MCT e os resultados de ensaios triaxiais de cargas repetidas para as propriedades mecânicas de solos lateríticos (MARANGON, 2004; GUIMARÃES, 2001; GUIMARÃES, 2009; NORBACK, 2018).

Nesse contexto, o presente estudo envolve a construção e análise de um banco de dados com solos argilosos lateríticos, os quais foram caracterizados tanto do ponto de vista físico quanto mecânico. Mais especificamente, os solos analisados foram categorizados conforme a classificação MCT como lateríticos argilosos (LG') e compactados sob a energia intermediária de compactação. A partir disso, foram realizadas análises estatísticas focadas nos parâmetros de regressões de MR para o Modelo Composto – modelo utilizado no MeDiNa – desenvolvido por Pezo et al. (1992), para avaliar a influência de diferentes pares de tensões em suas respectivas respostas elásticas. Além disso, os parâmetros físicos e mecânicos que compõem o banco de dados foram correlacionados usando o método de Spearman, a fim de compreender possíveis relações entre parâmetros dentro desse grupo de solos e buscar subvenções para a confiabilidade das análises mecanicistas que venham a utilizar em sua rotina de cálculo os parâmetros de MR.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Módulo de Resiliência

O Módulo de Resiliência é uma propriedade mecânica fundamental utilizada para descrever o comportamento elástico de solos e materiais granulares sob carregamento dinâmico, especialmente na engenharia de pavimentos. Ele representa a capacidade de um material em absorver e dissipar energia sob carga repetida. Essencialmente, mede a capacidade que um material tem de retornar ao seu estado inicial após sofrer deformação temporária sob ação do carregamento repetido. Esse conceito é crucial para avaliar a capacidade estrutural das camadas de base, sub-base e subleito de pavimentos, pois permite entender como essas camadas resistem às cargas repetidas impostas pelo tráfego ao longo do tempo (MEDINA E MOTTA, 2015).

Laboratorialmente, o MR é determinado por meio de ensaios triaxiais de cargas repetidas, nos quais são

aplicadas tensões confinantes e cargas cíclicas em diferentes pares de tensões, replicando possíveis condições dinâmicas encontradas do pavimento (DNIT, 2018). Ao longo dos anos, várias equações foram desenvolvidas para representar o comportamento elástico dos materiais em diversas condições de carga. Dentre essas equações, destaca-se o Modelo Composto, apresentado na Equação 1, desenvolvido por Pezo et al. (1992), que engloba o comportamento dos materiais frente às tensões confinantes (σ_3) e de desvio (σ_d), e mediante isso representa satisfatoriamente o comportamento resiliente de solos aplicados à pavimentação no Brasil (MEDINA E MOTTA, 2015), em que k_1 , k_2 , k_3 são parâmetros de resiliência determinados experimentalmente.

$$M_R = k_1 \sigma_3^{k_2} \sigma_d^{k_3} \quad (1)$$

A partir dos resultados experimentais advindos do equipamento triaxial de cargas repetidas, faz-se a avaliação e obtenção dos parâmetros resilientes a partir do Modelo Composto. Tal modelo é empregado na rotina de cálculo do MeDiNa, utilizado para análises mecanicista-empírica de pavimentos rodoviários. A Tabela 1 apresenta os pares de tensões prescritos na referida normativa para determinação do MR, os quais foram considerados para as análises na presente pesquisa.

Tabela 1. Sequência de tensões para determinação do MR para solos de subleito (DNIT, 2018).

| Tensões | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| σ_3 (MPa) | 0,020 | 0,020 | 0,020 | 0,035 | 0,035 | 0,035 | 0,050 | 0,050 | 0,050 | 0,070 | 0,070 | 0,070 |
| σ_d (MPa) | 0,020 | 0,040 | 0,060 | 0,035 | 0,070 | 0,105 | 0,050 | 0,100 | 0,150 | 0,070 | 0,140 | 0,210 |
| σ_1 / σ_3 | 2 | 3 | 4 | 2 | 3 | 4 | 2 | 3 | 4 | 2 | 3 | 4 |

2.2 Análises estatísticas

2.2.1 Método de Spearman

O método de Spearman é uma técnica estatística amplamente utilizada na análise de correlação entre duas variáveis. Ao contrário da correlação de Pearson, que se concentra na relação linear entre variáveis, o método de Spearman avalia a associação monotônica, ou seja, se a relação entre as variáveis é crescente ou decrescente, sem a necessidade de seguir uma relação linear específica.

A metodologia de Spearman baseia-se na classificação dos valores das variáveis em ordem crescente ou decrescente, atribuindo postos a cada valor. Em seguida, é calculado o coeficiente de correlação de Spearman, representado por ρ , que varia de -1 a 1. Um valor próximo de 1 indica uma correlação positiva forte, enquanto um valor próximo de -1 indica uma correlação negativa forte. Por outro lado, um valor próximo de 0 indica a ausência de correlação linear monotônica entre as variáveis.

Essa técnica estatística é particularmente útil quando a relação entre as variáveis não é linear. Isso possibilita uma análise mais robusta das relações entre as variáveis estudadas, oferecendo *insights* valiosos sobre padrões e associações que podem não ser facilmente detectados por outras análises de correlação linear (MARTINS E DOMINGUES, 2017).

3 METODOLOGIA

Para o presente estudo, a metodologia se concentrou na aquisição de dados – por meio da pesquisa em publicações acadêmicas e científicas – de solos tropicais nacionais submetidos a ensaios de módulo de resiliência e caracterizados pelas normativas do DNIT. Esses dados foram organizados e agrupados, conforme a classe de grupo LG' e energia intermediária de compactação, considerando propriedades físicas como massa específica aparente seca máxima (MEAS), umidade ótima de compactação (w_{ot}), granulometria e parâmetros da classificação MCT (c' , d' , e'). Além disso, foram incluídas as propriedades mecânicas correspondentes aos parâmetros de regressão para o módulo de resiliência (k_1 , k_2 , k_3) para o modelo composto, obtidos por meio de ensaios triaxial de cargas repetidas. Conforme abordado nos próximos tópicos, esses dados foram reunidos de uma série de pesquisas realizadas no território brasileiro.

Com o banco de dados montado e os parâmetros de regressão do MR compilados, foram obtidos módulos de resiliência para as tensões recomendadas pelo DNIT (2018), conforme a Tabela 1, considerando o Modelo Composto. Posteriormente, foram elaborados histogramas de frequência para cada conjunto de dados e realizadas análises de distribuição normal, sob diferentes arranjos de dados, com o intuito de determinar valores mínimos, máximos, médios e de desvio padrão dos módulos de resiliência de 20 solos lateríticos argilosos.

Ademais, um tratamento no banco de dados foi realizado, de modo a possibilitar a aplicação do método de Spearman, que permitiu analisar as relações de correlação entre as diferentes variáveis. Com base nessa análise, foi construída uma matriz de correlação dos dados, proporcionando uma compreensão mais aprofundada das interações e influências mútuas entre as propriedades físicas e mecânicas dos solos tropicais estudados.

4 RESULTADOS E ANÁLISES

Os resultados apresentados neste estudo derivam de um banco de dados composto por 20 solos classificados como LG', oriundos de diversas regiões do Brasil. Este banco de dados abrange uma ampla gama de parâmetros físicos e mecânicos relevantes para estudos geotécnicos aplicados a pavimentação, que influenciam diretamente na deformabilidade dos materiais.

Na Tabela 2, encontram-se detalhadas as características físicas dos solos, incluindo massa específica aparente seca máxima (MEAS), a umidade ótima de compactação ($w_{ót}$) para a energia intermediária a percentagem granulométrica e os índices da classificação MCT (c' , d' , e'). Adicionalmente, são fornecidas as informações sobre os parâmetros mecânicos, expressos pelas regressões do módulo de resiliência (MR) para cada amostra.

Tabela 2. Banco de dados de solos LG'.

| Material | LG' 01 | LG' 02 | LG' 03 | LG' 04 | LG' 05 | LG' 06 | LG' 07 | LG' 08 | LG' 09 | LG' 10 | LG' 11 | LG' 12 | LG' 13 | LG' 14 | LG' 15 | LG' 16 | LG' 17 | LG' 18 | LG' 19 | LG' 20 | |
|----------------------------|----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|
| MEAS (kN/m ³) | 1658 | 1599 | 1625 | 1565 | 1534 | 1434 | 1543 | 1677 | 1775 | 1652 | 1705 | 1665 | 1651 | 1816 | 1759 | 1675 | 1625 | 1685 | 1760 | 1590 | |
| $w_{ót}$ (%) | 19,9 | 20,6 | 20,5 | 22,5 | 22,5 | 28,7 | 23,5 | 21,4 | 17,8 | 21,5 | 21,3 | 22,5 | 20,5 | 11,0 | 17,8 | 20,5 | 25,6 | 20,1 | 18,0 | 26,0 | |
| Granulometria % | areia | 66 | 50 | 41 | 29 | 67 | 24 | 35 | 30 | 36 | 35 | 36 | 27 | 34 | 21 | - | 34 | 33 | 37 | 39 | 30 |
| | silte | 18 | 19 | 12 | 7 | 16 | 24 | 20 | 17 | 4 | 12 | 16 | 17 | 23 | 19 | - | 17 | 26 | 19 | 12 | 24 |
| | argila | 15 | 31 | 47 | 63 | 16 | 51 | 45 | 53 | 60 | 53 | 46 | 56 | 43 | 37 | - | 48 | 41 | 36 | 43 | 46 |
| Classificação MCT | c' | 2,24 | 2,18 | 2,24 | 2,20 | 2,66 | 2,66 | 2,31 | 2,40 | 2,94 | 2,84 | 2,20 | 2,19 | 2,35 | 2,05 | - | - | 2,35 | 2,45 | 1,72 | 1,96 |
| | d' | 60,0 | 85,7 | 102,5 | 68,8 | 291,7 | 142,9 | 75,0 | 40,0 | 89,3 | 49,6 | 37,2 | 54,0 | 38,5 | 51,2 | - | - | 67,0 | 43,8 | 56,3 | 37,7 |
| | e' | 1,2 | 1,1 | 1,1 | 1,2 | 1,0 | 1,0 | 1,1 | 1,1 | 0,6 | 0,7 | 1,0 | 0,9 | 1,1 | 1,0 | - | - | 0,7 | 0,8 | 0,7 | 0,8 |
| Parâmetros de regressão MR | k1 | 315,5 | 207,6 | 310,0 | 147,5 | 370,7 | 123,7 | 283,0 | 268,5 | 424,2 | 363,0 | 153,4 | 118,4 | 122,1 | 109,6 | 531,5 | 109,4 | 739,2 | 826,7 | 1892,5 | 355,8 |
| | k2 | 0,32 | 0,15 | 0,34 | 0,19 | 0,30 | 0,36 | 0,28 | 0,13 | 0,23 | 0,38 | 0,32 | 0,26 | 0,14 | 0,56 | 0,61 | 0,17 | 0,34 | 0,53 | 0,57 | 0,16 |
| | k3 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 0,00 | - | 0,03 | - |
| | R ² | 0,50 | 0,47 | 0,68 | 0,63 | 0,56 | 0,63 | 0,63 | 0,45 | 0,95 | 0,60 | 0,86 | 0,94 | 0,82 | 0,44 | - | 0,90 | 0,90 | 0,88 | 0,87 | 0,71 |

Fonte: LG'01 – LG'07 (DALLA ROZA, 2018); LG'08 (GRASSIOLI, 2021); LG'09 - LG'14 (LIMA, 2020); LG'15 (LIMA et al., 2018); LG'16 (NORBACK, 2018); LG'17 (PASCOAL, 2020); LG'19 - LG'20 (PASCOAL, no prelo, 2024); LG'20 (SANTOS, 2020)

Conforme mencionado na metodologia, os módulos de resiliência (MR) foram obtidos por meio da aplicação da expressão do modelo composto usando os pares de tensões listados na Tabela 1, juntamente com os parâmetros de regressão específicos de cada material. Os resultados de MR foram organizados na Tabela 3, que mostra os valores correspondentes para cada material de acordo com seu respectivo par de tensão. Adicionalmente, a Tabela 3 apresenta as médias dos valores em torno de cada um dos pares de tensões considerados e o MR médio para o material após análise dos 12 pares de tensões.

Ao analisar os resultados de MR para cada material individualmente, foi possível observar uma tendência, em que a maioria dos materiais apresenta maiores valores de MR para a razão (σ_1 / σ_3) de ordem 2

e valores menores para os de ordem 4, enquanto a ordem 3 fica intermediária entre esses extremos. Essa tendência é também percebida ao examinar a coluna correspondente à média dos valores para cada par de tensão. Esses padrões indicam a influência significativa da tensão desvio na resposta resiliente de materiais de granulometria mais fina, apontando para uma sensibilidade específica desses materiais a esse tipo de tensão em relação à sua capacidade de absorver energia e lidar com deformações durante carregamentos dinâmicos. No entanto, ressalta-se que esse comportamento não é absoluto, pois alguns materiais finos podem não seguir essa tendência, como é o caso de LG' 17 e o LG' 19, que tem seus comportamentos norteados pela tensão confinante.

Tabela 3. Valores de MR, em MPa, obtidos para cada par de tensões.

| Material | LG' 01 | LG' 02 | LG' 03 | LG' 04 | LG' 05 | LG' 06 | LG' 07 | LG' 08 | LG' 09 | LG' 10 | LG' 11 | LG' 12 | LG' 13 | LG' 14 | LG' 15 | LG' 16 | LG' 17 | LG' 18 | LG' 19 | LG' 20 | Média do Par |
|-------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------------|
| 1 | 485 | 552 | 496 | 627 | 693 | 400 | 644 | 407 | 793 | 454 | 754 | 504 | 607 | 213 | 850 | 804 | 192 | 161 | 182 | 344 | 508 |
| 2 | 360 | 418 | 360 | 425 | 504 | 253 | 458 | 346 | 605 | 335 | 454 | 325 | 415 | 128 | 512 | 502 | 193 | 149 | 185 | 309 | 362 |
| 3 | 302 | 356 | 299 | 339 | 418 | 194 | 376 | 315 | 517 | 280 | 338 | 252 | 332 | 96 | 381 | 381 | 193 | 143 | 188 | 290 | 299 |
| 4 | 456 | 480 | 463 | 510 | 634 | 338 | 572 | 383 | 725 | 439 | 600 | 409 | 482 | 194 | 795 | 605 | 233 | 204 | 254 | 345 | 456 |
| 5 | 339 | 364 | 337 | 346 | 461 | 214 | 407 | 326 | 553 | 324 | 362 | 265 | 330 | 117 | 479 | 377 | 234 | 189 | 259 | 310 | 330 |
| 6 | 284 | 309 | 280 | 276 | 382 | 164 | 334 | 297 | 473 | 272 | 269 | 205 | 264 | 87 | 356 | 286 | 234 | 180 | 262 | 291 | 275 |
| 7 | 439 | 439 | 444 | 447 | 599 | 304 | 531 | 369 | 685 | 431 | 519 | 359 | 417 | 182 | 761 | 504 | 264 | 236 | 315 | 346 | 430 |
| 8 | 326 | 333 | 323 | 303 | 435 | 192 | 378 | 314 | 523 | 318 | 313 | 232 | 285 | 110 | 459 | 315 | 264 | 219 | 321 | 311 | 314 |
| 9 | 273 | 283 | 268 | 242 | 361 | 147 | 310 | 286 | 446 | 266 | 233 | 180 | 228 | 82 | 341 | 239 | 265 | 209 | 325 | 292 | 264 |
| 10 | 423 | 404 | 426 | 395 | 567 | 275 | 495 | 356 | 649 | 422 | 453 | 317 | 363 | 172 | 731 | 425 | 296 | 272 | 385 | 347 | 409 |
| 11 | 314 | 306 | 310 | 268 | 412 | 174 | 352 | 303 | 495 | 312 | 273 | 205 | 248 | 104 | 441 | 265 | 297 | 252 | 393 | 312 | 302 |
| 12 | 264 | 260 | 257 | 213 | 342 | 133 | 289 | 276 | 423 | 261 | 203 | 159 | 198 | 77 | 328 | 201 | 297 | 241 | 397 | 293 | 256 |
| Média do Material | 355 | 375 | 355 | 366 | 484 | 232 | 429 | 331 | 574 | 343 | 397 | 284 | 347 | 130 | 536 | 409 | 247 | 205 | 289 | 316 | |

Os valores de MR encontrados revelam algumas divergências em seus resultados. Ao considerar um conjunto global de 260 valores apresentados na Figura 2 (a), observou-se um intervalo de dispersão que vai do menor valor para o maior, equivalente a 772,7 MPa, com um valor médio de 350,29 MPa. Por outro lado, ao analisar o conjunto de valores médios de MR para cada par de tensão, conforme a Figura 2 (b), esse intervalo de dispersão diminui para 443,81 MPa, mantendo o valor médio. Essa análise global revela uma grande variação nos resultados, sugerindo que mesmo materiais com a mesma classificação e energia de compactação podem apresentar valores de MR consideravelmente diferentes. Isso ressalta a necessidade de realizar ensaios de caracterização mecânica específicos para cada tipo de solo, ao invés de adotar valores estimados, a fim de garantir uma avaliação mais precisa de suas propriedades de resiliência.

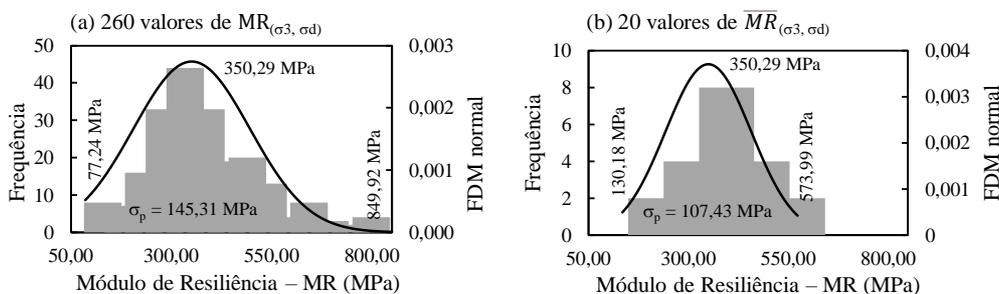


Figura 1. Distribuição de frequência dos valores de MR.

Ao avaliar separadamente os valores de MR obtidos para cada conjunto de pares de tensões (Figura 3), foi possível obter um melhor entendimento da variação dos valores em torno dos pares de tensões aplicados. Observou-se que ao analisar os pares com razão entre tensões (σ_1/σ_3) igual a 2 (1, 4, 7, 10), os valores de desvio

padrão foram consideravelmente maiores do que os pares com razão 3 (2, 5, 8, 11) e razão 4 (3, 6, 9, 12). Além disso, os valores de desvio padrão mostram uma tendência em diminuir à medida que as razões aumentam, evidenciando a tendência de a presente classe de solos apresentarem uma maior variação nos valores de MR quando estão sujeitos a tensões desviadoras próximas às tensões confinantes. À medida que essa ação desviadora aumenta, os valores de MR tendem a apresentar uma menor faixa de variação e, consequentemente, maiores confiabilidades na representação do comportamento resiliente.

Dessa forma, percebe-se que com maiores razões de tensões e valores mais altos de tensões confinantes, a faixa de variação dos valores de MR tende a diminuir. No entanto, é importante destacar que as tensões que atuam nas camadas compostas por solos argilosos lateríticos nem sempre se enquadram nesse comportamento. Pode acontecer de essas camadas apresentarem pares de tensões que resultarão em valores de desvio padrão elevados. Isso ressalta a necessidade de conhecer as tensões que atingirão essas camadas específicas para estabelecer parâmetros de confiabilidade mais precisos, considerando a variabilidade desses materiais diante de diferentes condições de carregamento.

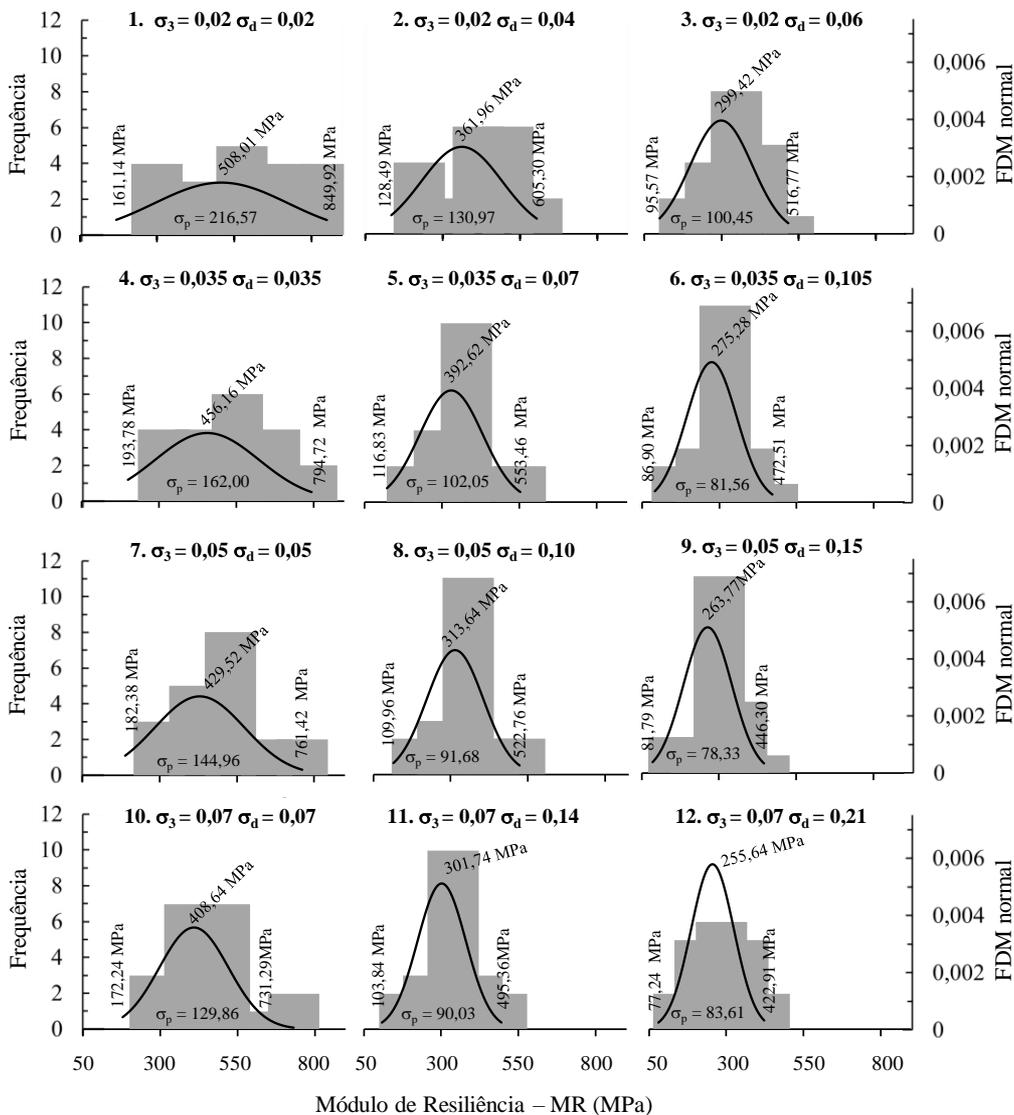


Figura 2. Distribuição de frequência dos valores de MR pelos pares de tensões avaliados

Na Figura 3 (a), são apresentados os valores máximos, médios e mínimos de MR. Nota-se a presença de *outliers*, especialmente para os valores médios e mínimos de MR. *Outliers* são pontos de dados que se diferenciam significativamente da maioria dos outros dados, representando valores atípicos que podem ser resultado de variabilidade na medição, ou indicar um erro experimental ou uma particularidade na amostra.

Na Figura 3 (b), os valores de correlação são determinados pelo método de Spearman. Este método é utilizado para medir a força e a direção da associação entre duas variáveis classificadas.

A análise revela que quanto maior a porcentagem de areia, menor é a porcentagem de argila, e vice-versa, comportamento típico e esperado em solos. Além disso, um aumento na porcentagem de silte está associado a uma diminuição nos valores de MR. Observa-se também que o aumento na MEAS está fortemente relacionado a uma diminuição em $w_{ót}$.

Quanto às variáveis do modelo composto k1 e k3, sugere-se que estas tendem a aumentar ou diminuir juntas. Dessa forma, o comportamento desses solos argilosos é dependente da tensão desvio, conforme elucidado e consolidado na literatura. Adicionalmente, o aumento da fração de silte está relacionado a um aumento em $w_{ót}$. Enquanto uma maior fração de areia tende a aumentar o MR, a presença de silte tende a reduzi-lo. À medida que $w_{ót}$ aumenta, o MR tende a diminuir, reforçando a complexa interação entre as características do solo e suas propriedades mecânicas. Por fim, um aumento na areia está de alguma forma relacionado a um aumento no valor de d' , relacionado a classificação MCT.

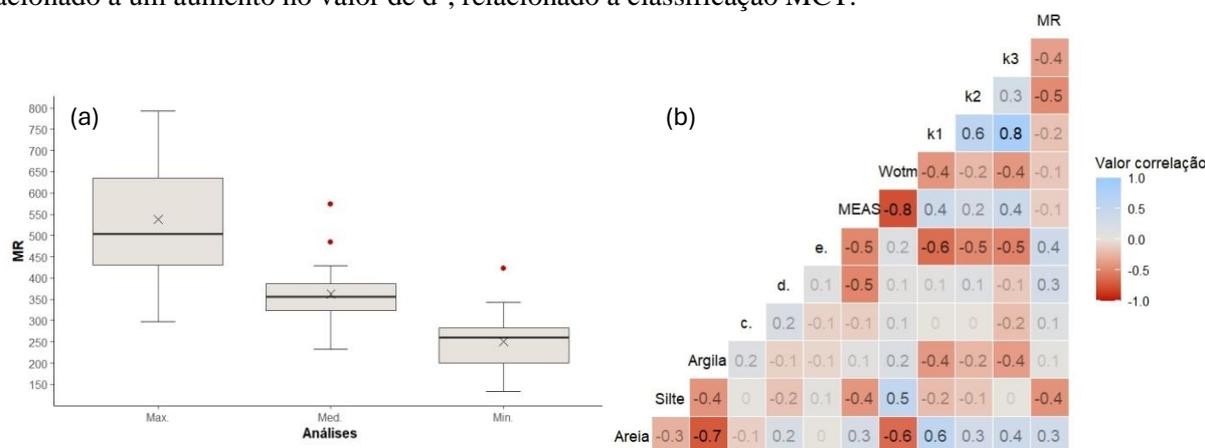


Figura 3. Análises Estatísticas: (a) Box Plot e (b) Correlação entre os parâmetros do solo LG'.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Por meio de uma revisão da literatura científica, foi possível construir um banco de dados com 20 solos argilosos lateríticos compactados sob energia intermediária, que foram caracterizados seguindo as mesmas normativas para a caracterização elástica dos materiais. A integração de informações sobre a caracterização física, classificação MCT e de deformabilidade elástica desses solos proporcionaram percepções importantes sobre suas propriedades.

A análise estatística dos resultados de MR revelaram que maiores razões de tensões e valores mais altos de tensões confinantes estão associadas a uma menor variação nesses parâmetros, aumentando a confiabilidade na representação do comportamento resiliente desses materiais. No entanto, ressalta-se que nem todos os solos argilosos lateríticos seguem um padrão uniforme de comportamento, como evidenciado pelas variações nos resultados de MR, mesmo para solos classificados na mesma classe de MCT e submetidos à mesma energia de compactação.

Além disso, as correlações utilizando o método de Spearman revelaram padrões importantes nas propriedades dos solos argilosos lateríticos, como a relação entre a porcentagem de areia, argila e silte com os valores de MR. Isso ressalta a complexidade das interações entre as características físicas do solo e suas propriedades.

Dessa forma, embora o banco de dados seja muito relevante, é imprescindível realizar a caracterização do comportamento resiliente e deformabilidade de todos os materiais. Nesse contexto, o banco de dados se consagra como uma ferramenta que gera um indicativo do comportamento dos solos lateríticos. Entretanto, salienta-se que embora os materiais apresentem parâmetros semelhantes e a mesma classificação MCT, as pequenas divergências entre eles, resultam em comportamentos resilientes diferentes, denotando a importância dos ensaios laboratoriais.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES, CNPq e UFSM pelo fomento às pesquisas realizadas. Também agradecem a Owntec Soluções em Engenharia pelo apoio e projetos desenvolvidos em conjunto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Dalla Roza, A. E. (2018). *Contribuição para projeto mecanístico-empírico de pavimentos asfálticos na região norte do estado do Mato Grosso*. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro/COPPE, Rio de Janeiro.
- Departamento Nacional De Infraestrutura De Transportes (2018). DNIT ME 134: Pavimentação – Solos – Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 18p.
- Guimarães, A. C. R. (2009). *Um Método Mecanístico-Empírico para a Previsão da Deformação Permanente em Solos Tropicais Constituintes de Pavimentos*. Tese de Doutorado. Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro.
- Guimarães, A. C. R. (2001). *Estudo de Deformação Permanente em Solos e Teoria do Shakedown Aplicada a Pavimentos Flexíveis*. Tese de Mestrado. Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro.
- Lima, C. D. A. (2020) *Avaliação da deformação permanente de materiais de pavimentação a partir de ensaios triaxiais de cargas repetidas*. Tese (doutorado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE), Rio de Janeiro.
- Lima, C. D. A. et al. (2018). Contribution to the study of Brazilian tropical soils as pavement materials. In: *13th ISAP (International Society for Asphalt Pavements) Conference on Asphalt Pavements*, ISAP 2018, Proceedings..., Fortaleza, CE.
- Martins, G. A.; Domingues, O. (2017). *Estatística Geral e Aplicada*, 6ª edição. Grupo GEN, 2017. E-book. ISBN 9788597012682.
- Marangon, M. (2004). *Proposição de Estruturas Típicas de Pavimentos para Região de Minas Gerais Utilização Solos Lateríticos Locais a Partir da Pedologia, Classificação MCT e Resiliência*. Tese de Doutorado. Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro.
- MEDINA, J., MOTTA, L.M.G. *Mecânica dos Pavimentos*. Rio de Janeiro, RJ. Editora Interciência. 3ª ed., 2015.
- Medrado, W. A. (2009). *Caracterização geotécnica de solo da região norte de Minas Gerais para aplicação em obras rodoviárias*. Tese de Mestrado Profissional em Engenharia Geotécnica. UFOP. Ouro Preto, MG.
- Nogami, J. S. e Villibor, D. F. (1995). *Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos*. Ed. Villibor. São Paulo.
- Norback, C. (2018). *Caracterização do módulo de resiliência e da deformação permanente de três solos e misturas solos-brita*. Tese de Mestrado. Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro.
- Pascoal, P. T. (2020). *Estudo da influência da compactação no comportamento resiliente e deformação permanente de solo laterítico do Rio Grande do Sul*. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria. Rio Grande do Sul.
- Pascoal, P. T., Sagrilo, A. V., Baroni, M., Specht, L. P., Pereira, D. S. (2021). *Evaluation of the influence of compaction energy on the resilient behavior of lateritic soil in the field and laboratory*. *Soils & Rocks*, 44 (4).
- Pezo, R. F., Claros, G, Hudson, W. R., Stokoe Ii, K. H. (1992). *Development of reliable resilient modulus test for subgrade and non-granular subbase materials for use in routine pavement design*. Research Report.
- Santos, T. A. dos. (2020). *A influência da sucção na deformabilidade de subleitos rodoviários: efeitos da variação de umidade, método de compactação e gênese dos solos*. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Santa Maria, RS.