

Influência da Variação de Umidade Pós-Compactação nos Módulos de Resiliência de Solos de Subleito do Distrito Federal

Josiene Chrystina Ribeiro Cardoso ¹

Universidade de Brasília (UnB), Brasília, DF, Brasil, josychrystina@gmail.com

Mateus Ribeiro Caetano ²

UnB, Brasília, DF, Brasil, mateusribeirocaetano@gmail.com

Gisandra Faria de Paula ³

Engenheira, Departamento de Estradas de Rodagem do DF (DER-DF), Brasília, DF, Brasil, gisandrafp@gmail.com

Rafael Cerqueira Silva ⁴

Docente, UnB, Brasília, DF, Brasil, rafael.silva@unb.br

Paulo Costa Fernandes ⁵

Engenheiro, DER-DF, Brasília, DF, Brasil, paulocostaf@gmail.com

RESUMO: Ao projetar pavimentos, é essencial considerar fatores ambientais, como a pedologia do solo e o clima, em conjunto com a estimativa do tráfego idealizado. Ademais, a sensibilidade às variações de umidade das camadas granulares é um fator crucial a ser considerado. Estas variações representam um desafio prático, uma vez que a água pode penetrar nas camadas do pavimento de várias maneiras, incluindo infiltração por fissuras preexistentes, percolação e aumento inesperado do lençol freático. Este estudo buscou avaliar o impacto da variação do teor de umidade pós-compactação nos parâmetros de deformabilidade elástica em camada de subleito por meio de ensaios triaxiais para determinar o módulo de resiliência (MR). Foram analisados dois solos de subleito de uma rodovia distrital, apresentando características distintas, sendo um de comportamento laterítico e outro não laterítico. Os ensaios foram conduzidos em corpos de prova compactados em moldes tripartidos, na umidade ótima e, em seguida, submetidos a variações de umidade e depois aos ensaios triaxiais. Os resultados indicam a sensibilidade do MR em relação à variação do teor de umidade, contribuindo para um melhor entendimento de seu comportamento e discussões sobre o efeito da variação de umidade no desempenho de pavimentos construídos com solos de pedologia existente no Distrito Federal.

PALAVRAS-CHAVE: Módulo de resiliência; Teor de umidade; Subleito; Compactação; Solo tropical

ABSTRACT: When designing pavements, it is essential to consider environmental factors such as soil pedology and climate, along with the estimation of anticipated traffic. Moreover, sensitivity to variations in moisture content of granular layers is a crucial factor to be considered. These variations pose a practical challenge, as water can penetrate pavement layers in various ways, including infiltration through preexisting cracks, percolation, and unexpected rise in the water table. This study aimed to assess the impact of post-compaction moisture content variation on elastic deformability parameters in subgrade layers through triaxial tests to determine the resilient modulus (RM). Two subgrade soils from a district highway with distinct characteristics, one exhibiting lateritic behavior and the other non-lateritic, were analyzed. The tests were conducted on compacted specimens in tripartite molds at optimum moisture content, then subjected to moisture variations before triaxial testing. The results indicate the sensitivity of RM to moisture content variation, contributing to a better understanding of its behavior and discussions on the effect of moisture variation on the performance of pavements constructed with soils typical of the existing pedology in the Federal District.

KEYWORDS Resilience modulus; Moisture content; Subgrade; Compaction; Tropical soil.

1 INTRODUÇÃO

Diversas causas podem influenciar e diminuir a capacidade estrutural ou funcional dos pavimentos, por exemplo, a água. A presença de água nos pavimentos pode ser causada por vários fatores como capilaridade, infiltração, percolação e seu acúmulo contribui para a saturação do solo. A saturação implica em redução do índice de vazios, o que acarreta no surgimento de patologias.

A infiltração de água no pavimento, proveniente da precipitação pluviométrica ou do entorno, pode atingir o subleito através de acostamentos, infiltrações não drenadas e fissuras. As variações na umidade do subleito, especialmente em profundidades rasas, podem ser influenciadas pelo lençol freático. Embora a evaporação intensa em climas quentes possa atenuar os danos causados pela água, a implementação de um sistema de drenagem adequado é fundamental para a manutenção eficaz dos pavimentos (Silva, 2009).

De acordo com Gheling *et al.* (2015), a estabilidade da estrutura do pavimento em uma obra de pavimentação é altamente dinâmica, sendo influenciada por vários fatores como topografia, geologia, sazonalidade climática e orientação do terreno em relação à insolação e ao vento, sendo importante considerar as variações regionais e do projeto geométrico no comportamento mecânico do solo, pois as umidades de equilíbrio do solo atmosférico variam de acordo com as condições climáticas, inclusive em microclimas.

Guimarães (2009) destaca que o teor de umidade do solo em camadas de pavimento é influenciado pelo processo de compactação e suas variações subsequentes, incluindo o umedecimento e homogeneização no campo, que são caracterizados por dispersões significativas. Após a construção, espera-se que o teor de umidade do solo sofra ajustes até atingir o equilíbrio hídrico. Em pavimentos bem projetados, a umidade de equilíbrio tende a se assemelhar ao teor ótimo determinado pelo ensaio Proctor, embora em regiões como a Amazônia e parte do Centro-Oeste brasileiro, este aspecto seja menos estudado (Medina e Motta, 2015).

O Módulo de Resiliência (MR) é o parâmetro que descreve o comportamento elástico (resiliente) dos materiais sujeitos a carregamentos cíclicos como o tráfego sobre o pavimento. O MR também fornece uma indicação da rigidez elástica do material, em que quanto maior a deformação, menor será o MR. Em laboratório, o MR é obtido por meio de ensaios triaxiais de carga repetida, simulando as condições de carregamento cíclico encontradas *in situ*, e é expresso como a relação entre a tensão desvio aplicada (σ_d) e a deformação resiliente axial resultante (ϵ_d), sendo crucial para a mecânica dos pavimentos (Serra, 2020).

No contexto dos solos tropicais, especialmente os lateríticos, a abundância destes materiais no Brasil e seu bom desempenho resiliente os tornam adequados para uso em pavimentação. Assim, para o subleito, o MR é considerado um parâmetro de solo mais adequado em comparação com o valor de suporte do solo ou módulo de reação do subleito e, portanto, é comumente aplicado para a estimativa da deformação resiliente do subleito sob tráfego (Yang *et al.*, 2005). Portanto, o MR pode ser usado para investigar e prever o desempenho de um pavimento rodoviário em várias condições de umidade, densidade e tensões.

Pesquisas conduzidas em solos de natureza laterítica indicaram que esses solos geralmente demonstram um desempenho favorável em condições de campo, revelando-se mais suscetíveis à influência da umidade. Uma possível explicação reside na configuração da curva de compactação e sua relação com o grau de saturação dos solos, dado que estes se encontram em proximidade com a saturação (Jing *et al.*, 2018).

A variação no teor de umidade é um fator determinante no comportamento dos materiais, podendo tanto melhorar sua resistência mecânica, quanto aumentar sua suscetibilidade ao acúmulo de deformações permanentes (DP). Resultados de pesquisas (Edil e Motan, 1979; Takeda, 2006; Kern, 2017; Santos, 2020) mostram que um teor de umidade mais elevado está associado a um aumento nas DP e a uma redução no MR. Contudo, uma diminuição no conteúdo de umidade resulta em uma redução significativa nas DP. Assim, este estudo avalia a influência da umidade pós-compactação no comportamento resiliente de dois solos utilizados como subleito em uma rodovia distrital na região Centro-Oeste do Brasil, Distrito Federal.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

As amostras de solo analisadas correspondem ao subleito de uma rodovia distrital (DF-440), sob a supervisão do Departamento de Estradas de Rodagem do Distrito Federal (DER-DF), localizadas nas seguintes coordenadas: solo SL-1, latitude 15°41'35.47''S e longitude 47°49'31.37''O, caracterizado como Latossolo Vermelho, e solo SL-2, latitude 15°43'09.03''S e longitude 47°47'13.59'' de classificação Latossolo Vermelho-Amarelo, distantes 6,1 km, nos pontos extremos da rodovia.

As amostras foram coletadas nas camadas superficiais (até 1,5 m de profundidade), sendo os locais pré-determinados por meio de análise geoespacial, identificando as características pedológicas dos locais e estabelecendo pontos de coletas. Uma vez coletadas as amostras, estas foram acondicionadas e encaminhadas para laboratório para os ensaios de caracterização e comportamento mecânico.

Os dados dos ensaios convencionais de caracterização física e da Classificação MCT empregados neste estudo foram extraídos de Paula *et al.* (2022), que analisaram estes mesmos solos e encontram-se dispostos na Tabela 1, sendo o solo SL-1 classificado, no ábaco MCT, com comportamento laterítico argiloso (LG') e o solo SL-2 não laterítico arenoso (NA').

Tabela 1. Parâmetros de caracterização física e classificação MCT (Paula *et al.*, 2022).

Parâmetro	SL-1	SL-2
% Pedregulho	0	0
% Areia grossa	1	1
% Areia média	11	59
% Areia fina	4	29
% Silte	55	16
% Argila	29	10
LL (w_L - %)	41	NL
LP (w_p - %)	30	NP
IP (IP - %)	11	NP
Classificação TRB ¹	A-7-5	A-2-4
Índice de Suporte Califórnia (ISC - %)	15	24
Expansão (%)	0,06	0,00
Classificação MCT	LG'	NA'

¹ *Transportation Research Board*

Destaca-se que estes solos originam-se de um elevado processo de intemperismo e lixiviação, gerando uma estrutura extremamente porosa, instável, com elevada porosidade e, conseqüentemente, reduzida densidade, oriundos de rochas metamórficas, como ardósias, metarritmitos e quartzitos. Apresentam tonalidade avermelhada, bastante profundos, boa drenagem, porcentagem de argila que varia, usualmente, de 15% a 80%, sendo encontrados em regiões de relevo plano a ligeiramente ondulado (Lima, 2003).

2.1 Procedimento de Pós-Compactação

Os valores de w_{ot} e da Massa Específica Aparente Seca Máxima do Solo (MEAS) são apresentados na Tabela 2. Estes dados foram obtidos por meio do ensaio de compactação Proctor, realizado com energia intermediária, conforme prática do DER-DF para a execução desta camada *in situ*, seguindo as diretrizes do cilindro tripartido, onde as especificações quanto ao número de golpes e camadas foram feitas conforme estabelecido na norma de MR (DNIT 134/2018) (DNIT, 2018). Este procedimento recomenda o uso do mesmo molde tripartido empregado na confecção das amostras para os ensaios triaxiais de cargas repetidas, visando garantir consistência nos resultados.

Tabela 2. Valores de MEAS e w_{ot} obtidos a partir de ensaios em moldes tripartidos.

	SL-1	SL-2
MEAS (g/cm ³)	1,630	1,918
w_{ot} (%)	24,3	12,5

A determinação da faixa de variação da umidade foi fundamentada nos limites estabelecidos por órgãos públicos executivos rodoviários, como o Dep. Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) e o Dep. Autônomo de Estradas de Rodagem do Rio Grande do Sul (DAER-RS), para a compactação das camadas de aterro e a camada final de terraplanagem dos subleitos rodoviários. Portanto, foi estabelecida uma variação de $\pm 2\%$ na w_{ot} dos solos, com corpos de prova aceitos com um grau de compactação de 100% e variação de $\pm 1\%$. Este critério de aceitação foi padronizado para todas as amostras moldadas nesta pesquisa. A

abordagem empregada para induzir variações na umidade dos corpos de prova (CP) seguiu o método descrito por Oliveira e Motta (2021) e visualizado na Figura 1. Os CP foram inicialmente compactados na w_{ot} e, posteriormente, foram sujeitos a variações controladas na umidade. Para atingir um nível de umidade -1% e -2% abaixo da ótima, os CP foram expostos ao ar, enquanto seu peso era monitorado em intervalos de tempo pré-determinados. Os demais CP foram submetidos a um processo de umedecimento por capilaridade para alcançar níveis de umidade superiores de +1% e +2% em relação à w_{ot} . Estes CP foram colocados sobre pedras porosas dentro de um recipiente contendo água e mantidos nestas condições até atingirem a umidade desejada, sendo monitorados por meio de pesagens periódicas. Para evitar a evaporação da água, os CPs foram envoltos em filme plástico, com um papel filtro úmido posicionado na parte superior. Após este procedimento, os CP foram cuidadosamente embalados em filme plástico e deixados em repouso, por um período mínimo de 48 horas, antes de serem submetidos aos ensaios triaxiais de MR.

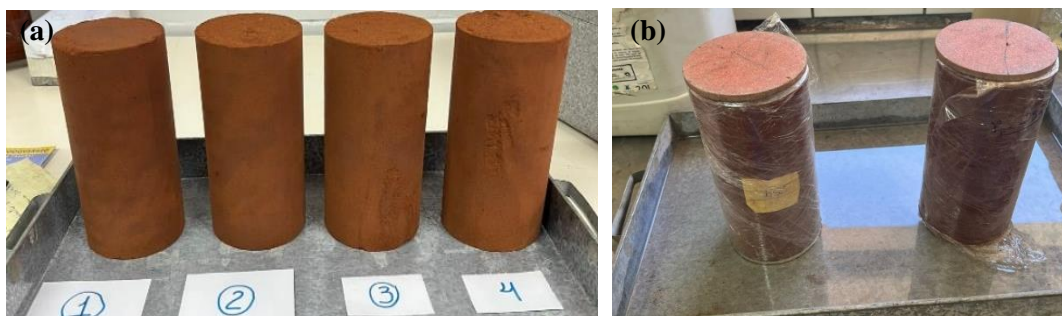


Figura 1. Variação de umidade pós-compactação por (a) secagem ao ar e (b) umedecimento por capilaridade.

2.2 Módulo de Resiliência (MR)

Foi realizada uma análise para compreender a resposta resiliente dos solos SL-1 e SL-2 sob uma carga vertical aplicada, representada pela tensão desvio (σ_d), a uma frequência de 1 Hz, que corresponde a um pulso de carga de 0,1 segundo seguido de um tempo de repouso de 0,9 segundo (ou 60 ciclos por minuto), simulando o efeito da passagem dinâmica de um veículo sobre a estrutura do pavimento. Os valores do MR em diferentes níveis de tensões (σ_3 e σ_d) para ambos os solos foram determinados por meio de ensaios triaxiais de carga repetida, conforme especificado na norma DNIT 134/2018-ME (DNIT, 2018). Considerando que estes solos são do subleito de uma rodovia, a sequência de tensões aplicada consistiu em 12 pares de tensões (4 tensões confinantes σ_3 , cada uma combinada com 3 tensões desvio σ_d). O comportamento resiliente do solo foi analisado por meio do modelo composto, conforme Equação 1, proposta por Pezo *et al.* (1992).

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

Indicado para todos os tipos de solos, o modelo considera a influência conjunta da tensão confinante e da tensão desvio no valor do módulo de resiliência do material, sendo considerado aquele que melhor descreve o comportamento resiliente de solos utilizados no âmbito da pavimentação no Brasil (Ferreira, 2002).

Após obter os valores de MR para cada amostra testada, foram realizadas análises com o auxílio do *software* de métodos estatísticos *Statistica 13.2*, por meio de ferramentas de modelagens preditivas, baseadas em regressões não lineares múltiplas, proporcionando a obtenção dos parâmetros experimentais resilientes (k_1 , k_2 e k_3) e a representação gráfica tridimensional. O critério considerado para avaliação dos modelos foi o coeficiente de correlação, também denominado coeficiente de determinação (R^2).

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os valores médios do MR, os parâmetros experimentais resilientes k_1 , k_2 e k_3 e os coeficientes de determinação (R^2) para as diferentes umidades analisadas estão dispostos na Tabela 3 e os gráficos tridimensionais nas Figuras 2 e 3. Os módulos de resiliência lineares médios dos solos em estudo compactados no mesmo teor de umidade (teor de umidade ótimo - w_{ot}) e submetidos às variações de umidade e as taxas de variações do MR em relação aos valores dos MR w_{ot} estão dispostos na Figura 4.

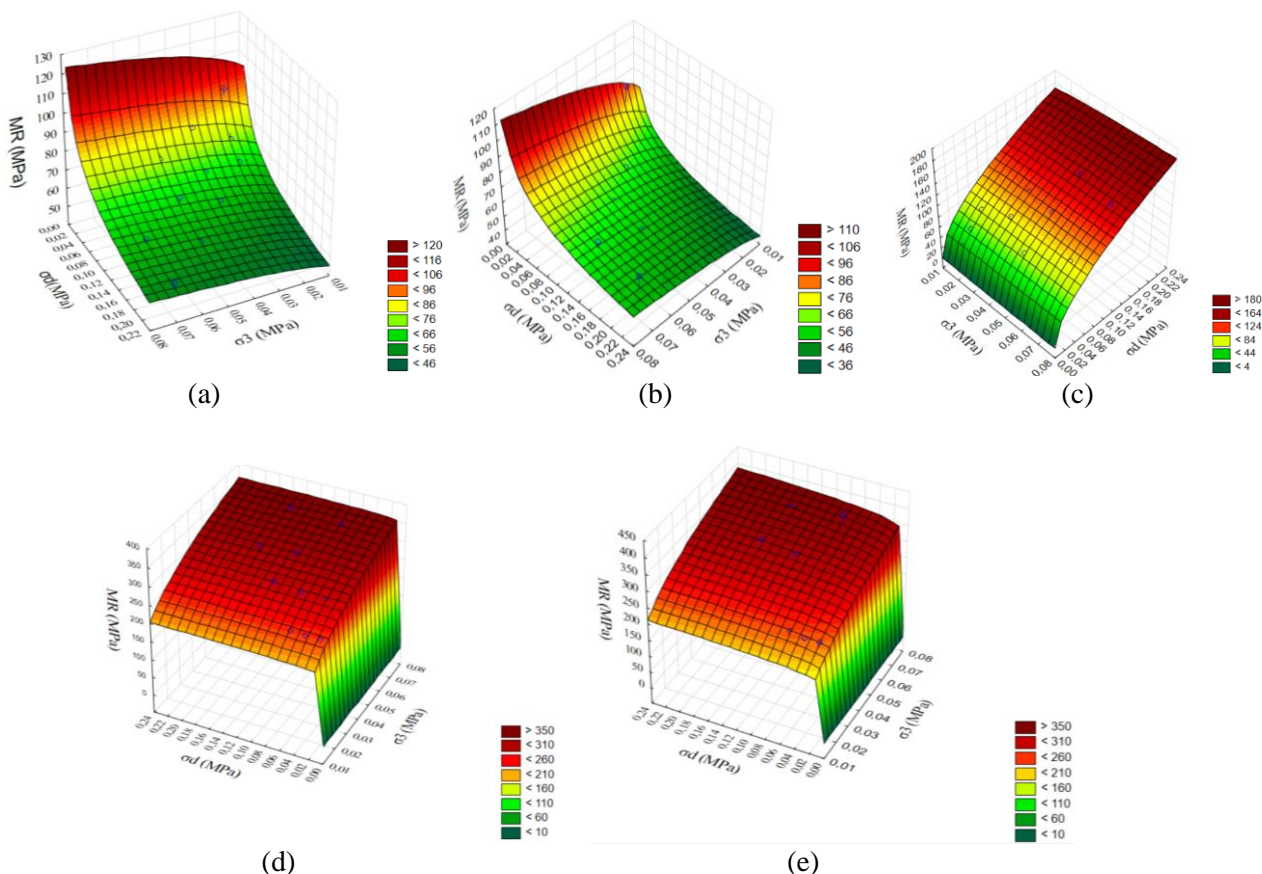


Figura 2. MR SL-1: (a) -2% w_{ot} ; (b) -1% w_{ot} ; (c) w_{ot} ; (d) +1% w_{ot} ; e (e) +2% w_{ot} .

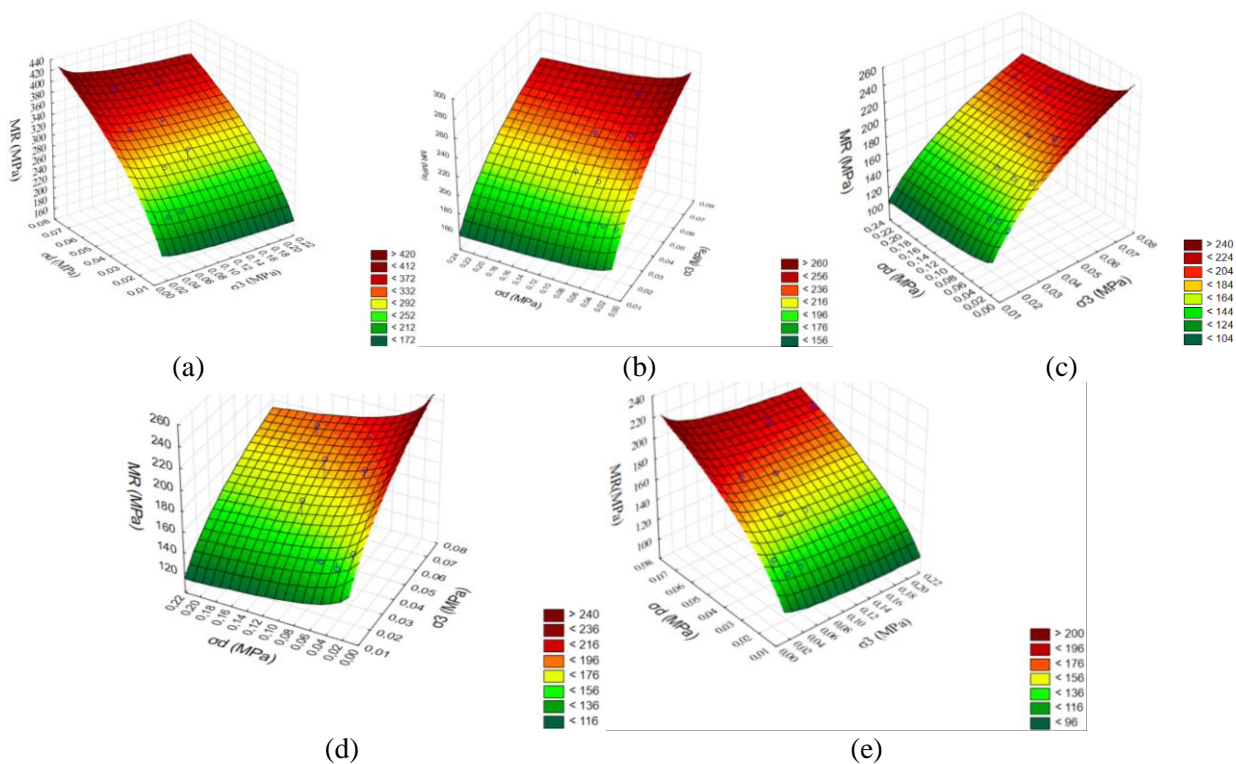


Figura 3. MR SL-2: (a) -2% w_{ot} ; (b) -1% w_{ot} ; (c) w_{ot} ; (d) +1% w_{ot} ; e (e) +2% w_{ot} .

Tabela 3. Parâmetros do modelo composto e valores médios de MR para diferentes umidades.

SL-1				SL-2				
Umidade %	MR(MPa)	Parâmetros	R ²	Umidade %	MR(MPa)	Parâmetros	R ²	
19,36 (-1% w _{ot})	303,46	k ₁	844,295	0,9450	14,5 (-2% w _{ot})	k ₁	941,4223	0,9717
		k ₂	0,2862			k ₂	-0,0388	
		k ₃	0,0425			k ₃	0,3859	
21,78 (-1% w _{ot})	297,16	k ₁	746,55	0,9825	13,5 (-1% w _{ot})	k ₁	426,2495	0,9487
		k ₂	0,2789			k ₂	0,2296	
		k ₃	0,0108			k ₃	-0,0343	
24,3 (w _{ot})	99,13	k ₁	414,725	0,9981	12,5 (w _{ot})	k ₁	462,0266	0,9789
		k ₂	0,0368			k ₂	0,3435	
		k ₃	0,507			k ₃	-0,0576	
26,6 (+1% w _{ot})	70,83	k ₁	45,1022	0,9719	11,5 (+1% w _{ot})	k ₁	355,5919	0,9500
		k ₂	0,09302			k ₂	0,2445	
		k ₃	-0,2832			k ₃	-0,0595	
29,04 (+2% w _{ot})	63,76	k ₁	54,4452	0,9899	10,5 (+2% w _{ot})	k ₁	406,9273	0,9590
		k ₂	0,17805			k ₂	-0,0476	
		k ₃	-0,2767			k ₃	0,33	

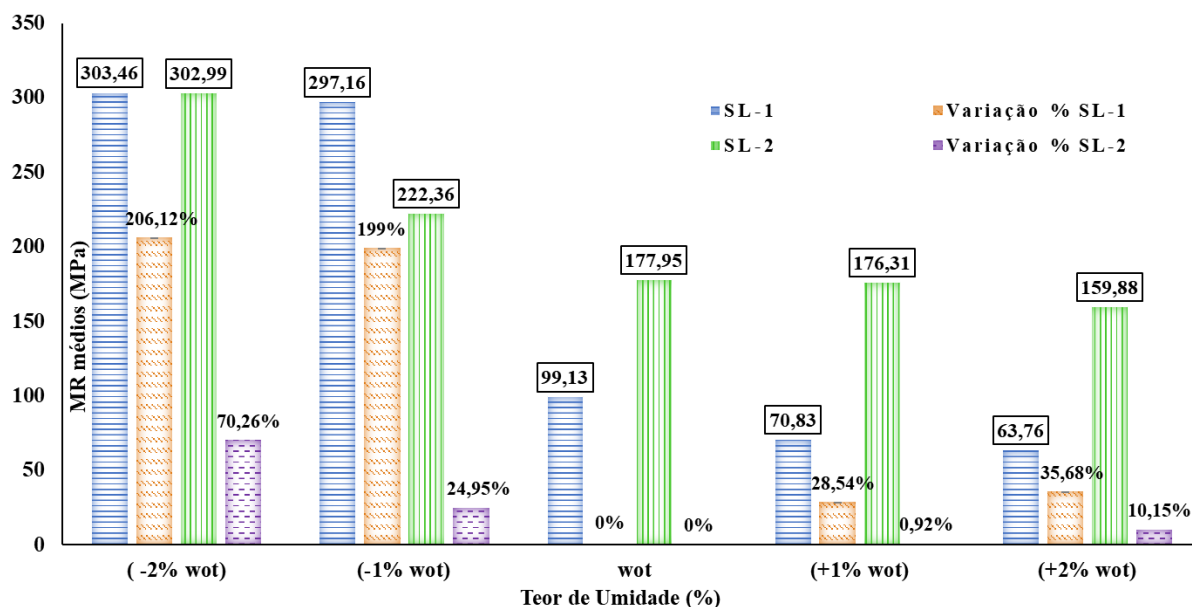


Figura 4. Comparação entre os MR médios obtidos em diferentes umidades de pós-compactação e sua variação (%) em relação ao MR w_{ot} para os solos SL-1 e SL-2.

Constata-se que, para toda a faixa de tensões simuladas em laboratório, MR tendem a aumentar com a redução do teor de umidade e a reduzir com o umedecimento pós-compactação. Estes resultados estão em conformidade com a literatura, uma vez que comportamentos análogos foram observados por Edil e Motan (1979), Yang *et al.* (2005), Takeda (2006), Bastos (2013), Salour *et al.* (2015), Kern (2017) e Santos (2020).

Analisando os dados referentes à compactação no teor de w_{ot}, verifica-se, de imediato, o proeminente comportamento do solo SL-1 frente ao processo de secagem, onde a perda na umidade resultou em acréscimos de MR bastante significativos, da ordem de até 206,12% para -2% w_{ot}. Em contrapartida, o solo SL-2 apresentou menores ganhos de rigidez nesta condição, com acréscimos no valor de MR, para a condição de redução de umidade, de 24% a 70%, para secagens de -1% e -2% em relação à w_{ot}, respectivamente.

Destaca-se o comportamento do solo SL-2, que apresentou valor médio de MR muito próximo do valor de MR w_{ot} frente a umidade de pós-compactação +1%, onde ocorreu uma variação de apenas 0,92% em relação ao resultado do MR para a condição de w_{ot}. Ao comparar os resultados desta pesquisa com os obtidos no estudo de Cardoso *et al.* (2023), feito para o mesmo solo SL-2 e submetido à variações de umidade em processo de compactação na mesma faixa de variação de umidade, nota-se que a variação do MR em relação à w_{ot} no

segmento de pós-compactação foi diferente. No estudo, os autores não evidenciaram variação média de valores de MR acima de 30%, tanto para amostras acima ou abaixo de w_{ot} . Já nas amostras pós-compactadas, a porcentagem de variação em espécimes mais secos apontaram uma alta porcentagem de variação, da ordem de 24% a 70%.

Outra evidência significativa demonstrada pelos resultados foi a associação do comportamento dos MR pela mudança de umidade em relação à composição do solo. Percebe-se para o solo SL-1, de classificação argilosa laterítica (LG'), maior influência da variação de umidade no desempenho dos MR, quando comparados ao solo SL-2, de classificação arenosa (NA'). Assim, a influência do diâmetro das partículas, com superfícies específicas distintas perante a água, no comportamento do MR é muito diferenciada.

No caso do solo SL-1, para umidades +1% e +2% w_{ot} , observam-se valores positivos do parâmetro experimental k_2 , relacionado à σ_3 , e negativos do parâmetro k_3 , que se conecta à σ_d . Esta oposição de indicadores revela que o aumento de σ_d contribui para a diminuição no MR. Ou seja, o aumento do teor de umidade provoca um determinado efeito de lubrificação entre as partículas, mais célere em solos argilosos, que deslizam entre si, acomodando-se em um arranjo com maior deformabilidade plástica quando sujeitas a tensões mais elevadas de σ_d . Porém, quando se compacta com umidades inferiores à w_{ot} , o atrito entre as partículas é relevante, o que dificulta o deslizamento entre grãos, contribuindo, desta forma, para uma maior influência da deformabilidade resiliente no desempenho do solo, o que pode ser constatado pelos valores positivos de k_2 e k_3 . Ou seja, para um aumento de σ_3 e σ_d , há um acréscimo no MR (Figuras 2a e 2b).

Para o solo SL-2, de classificação arenosa, evidencia-se uma mudança de comportamento nos parâmetros k_2 e k_3 , quando se transita de 1% para 2%, em ambas as situações, passando a ter um valor negativo. Isso acarreta em menores índices de MR para maiores valores de σ_3 (Figuras 3a e 3e), levando a considerar, portanto, que para esta situação de pós-compactação, os valores limítrofes para a variação do teor de umidade seja em +1% em torno de w_{ot} . Destaca-se que no estudo de Cardoso *et al.* (2023), o solo SL-2, em condição de variação de umidade durante a compactação, apresentou um padrão de comportamento constante para os parâmetros k_2 (+) e k_3 (-) de -2% a +2% w_{ot} , onde o grau de compactação e o teor de umidade estão agindo conjuntamente, mantendo a mesma tendência de comportamento do MR nos níveis de tensões e pontos de compactação ensaiados.

4 CONCLUSÕES

Destaca-se a importância da classificação MCT para os solos tropicais brasileiros, tendo em vista que não se baseia nas propriedades índices como as classificações tradicionais (TRB e outras internacionais), possibilitando inferir a gênese dos solos tropicais, lateríticos (L) ou não (N), que cobrem grande parte do Brasil, e averiguar efetivamente as potencialidades genéticas de utilização destes solos a partir de conceitos mecanicistas de tensão-deformação nas análises de pavimentos, sejam rodovários ou ferroviários.

Para os solos analisados, verificou-se a atuação da variação do teor de umidade em relação à w_{ot} , para mais ou menos, e diferentes classes texturais de solos (LG' e NA'), no comportamento resiliente pós-compactação de solos utilizados no subleito de pavimentos. Como o subleito é compactado na condição não saturada, o efeito da sucção influencia as propriedades mecânicas do solo. Quando a quantidade de água diminui, a sucção aumenta e as forças de coesão entre as partículas se elevam, levando a um aumento na rigidez do solo. Isto ocorre porque a sucção aumenta a tensão efetiva no solo, melhorando sua capacidade de resistir às deformações. Contudo, com aumento do teor de umidade, a presença de água lubrifica as partículas, diminuindo a aderência entre elas e, com isto, reduzindo a rigidez do solo, podendo resultar em um menor MR.

Observa-se a sensibilidade do MR em relação à variação do teor de umidade e esta alteração em relação à w_{ot} e ao tipo de solo, que afetou o MR de forma desproporcional em termos de valores médios. Logo, pode-se inferir que o comportamento resiliente dos solos está diretamente ligado à umidade e à classe textural, sendo importante aprofundar estudos que viabilizem um modelo de comportamento que leve em consideração a influência da umidade, sucção e do tipo de solo.

Sobre as práticas de engenharia evidencia-se a importância da execução de dispositivos de drenagem em obras de pavimentação, para o melhor desempenho do pavimento. A redução do MR do subleito pelo aumento do grau de saturação afeta seu comportamento mecânico, podendo resultar em um menor tempo de vida útil. Assim, deve-se dar continuidade aos estudos sobre o comportamento mecânico dos solos do DF na perspectiva métodos mecanístico-empíricos, levando em consideração suas particularidades, frente as variações em que estes podem se encontrar nos pavimentos.

AGRADECIMENTOS

Ao DER-DF pelo suporte, especialmente aos técnicos e colaboradores da Diretoria de Estudos Tecnológicos/Superintendência Técnica (DITEC/SUTEC). À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro. Ao Laboratório de Infraestrutura (INFRALAB/UnB). Ao Programa de Pós-Graduação em Geotecnia (PPGG) da UnB.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bastos, J.B.D.S. 2013. *Influência da variação da umidade no comportamento de pavimentos da região metropolitana de Fortaleza*. Dissertação de Mestrado, UFCE, Fortaleza, 164 p.
- Cardoso, J.C.R., Caetano, M.R., Paula, G.F., Fernandes, P.C., Silva R.C 2023. *Efeito da variação da umidade de compactação nos módulos de resiliência de solos de subleito do Distrito Federal*. 25º ENACOR/48ª RAPv. Foz do Iguaçu/PR.
- DNIT 2018. 134/2018 - ME – Pavimentação – Solos – *Determinação do módulo de resiliência* -Método de ensaio. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Instituto de Pesquisas Rodoviárias – IPR.
- Edil, T.B., & Motan, S. E. 1979. Soil-water potential and resilient behavior of subgrade soils. *Transportation Research Record*, (705).
- Gheling, W.Y.Y., Rezende, L. R., Lucena, L. C. F. L. 2015. Estrutura de pavimento no contexto dos solos não saturados. In: Neves, F. M., Solos não saturados no contexto geotécnico. 1 ed., São Paulo, ABMS.
- Guimarães, A.C.R. 2009 *Um método mecanístico-empírico para a previsão da deformação permanente em solos tropicais constituintes de pavimentos*. Tese de Doutorado. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 367 p.
- Jing, P., Nowamooz, H., Chazallon, C. 2018. Permanent deformation behaviour of a granular material used in low-traffic pavements. *Road Materials and Pavement Design*, 19(2), 289-314.
- Kern, C. 2017. Análise de desempenho de pavimentos da rede temática de asfalto no Rio Grande do Sul: a avaliação de um pavimento submetido à oscilação do lençol freático. Dissertação de Mestrado, UFRGS, Porto Alegre, 166 p.
- Lima, M. C. 2003. Degradação físico-química e mineralógica de maciços junto às voçorocas. Tese de Doutorado em Geotecnia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, FT, UnB, Brasília, DF, 364 p.
- Medina, J., Motta, L. M. G. 2015. Mecânica dos pavimentos. Ed. Interciência, Rio de Janeiro.
- Oliveira, N., Motta, L. 2021. *Influência da variação de umidade pós-compactação na deformação permanente de dois solos típicos de subleitos rodoviários brasileiros*. In: 35º ANPET.
- Paula, G. F., Fernandes, P. C., Silva, R. C. 2022. *Modelos tensão-deformação e parâmetros de solos tropicais de subleito do Distrito Federal*. 10º Congresso Rodoferroviário Português. Lisboa, Portugal.
- Pezo, R. F.; Claros, G.; Hudson, W. R.; Stokoe II, K. H.. Development of a reliable resilient modulus test for subgrade and non-granular subbase materials for use in routine pavement design. *Research Report 1177-4F*. Austin: Center for Transportation Research, 1992.
- Takeda, M. D. 2006. *A influência da variação da umidade pós-compactação no comportamento mecânico de solos de rodovias do interior paulista*. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, USP, São Paulo, 276 p.
- Salour, F., Erlingsson, S., Zapata, C.E. 2015. Model for seasonal variation of resilient modulus in silty sand subgrade soil: evaluation with falling weight deflectometer. *Transportation Research Record*, 2510(1).
- Santos, T.A.D. 2020. *A influência da sucção na deformabilidade de subleitos rodoviários: efeitos da variação de umidade, método de compactação e gênese dos solos*. Tese de Doutorado, UFSM, 408 p.
- Serra, G. A. 2020. *Análise de influência da umidade na deformação permanente de solos finos da ilha de São Luís para emprego em camadas de pavimento*. Dissertação de Mestrado. Instituto Militar de Engenharia. Rio de Janeiro.
- Silva, B.H. 2009. *Análise mecânica de um pavimento rodoviário submetido à oscilação do lençol freático simulada em modelo físico de verdadeira grandeza*. Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 304 p.
- Yang, S. R., Huang, W. H., & Tai, Y. T. 2005. Variation of resilient modulus with soil suction for compacted subgrade soils. *Transportation Research Record*, 1913(1), 99-106.