

Análise da Influência da Variação de Umidade de Compactação no Módulos de Resiliência de um Subleito do Distrito Federal

Mateus Ribeiro Caetano

Engenheiro Civil, Universidade de Brasília (UnB), Brasília, Brasil, mateusribeirocaetano@gmail.com

Josiene Chrystina Ribeiro Cardoso

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

Gisandra Faria de Paula

Engenheira Civil, Departamento de Estradas de Rodagem do Distrito Federal (DER/DF), Brasília, Brasil, gisandrafp@gmail.com

Rafael Cerqueira Silva

Docente, Universidade de Brasília, Brasília (UnB), Brasil, rafael.silva@unb.br

Paulo Costa Fernandes

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

RESUMO: A mecânica dos pavimentos no Brasil tem avançado significativamente nas últimas décadas, fortemente influenciada pelos estudos do professor Jacques de Medina e o lançamento pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), do Método de Dimensionamento Nacional (MeDiNa), para pavimentos flexíveis, que incorpora em suas análises conceitos mecanísticos de tensão-deformação, permitindo dimensionar uma estrutura de pavimento com as propriedades elásticas e plásticas dos materiais que a compõe. Deste modo, buscando caracterizar as propriedades mecânicas de resiliência dos solos de maior abrangência no Distrito Federal, procedeu-se com a verificação do módulo de resiliência de um solo classificado pedologicamente como Cambissolo, com característica granulométrica de solo siltoso. Este tipo de solo é normalmente desprezado em estruturas de pavimentos por apresentar baixa capacidade de suporte ao tráfego de veículos. Mesmo com essa perspectiva, conhecer as propriedades desses materiais constitui uma importante etapa na caracterização de comportamento mecânico de solos tropicais, buscando abrangência de dados que possam contribuir para estudos de melhoramento e viabilidade ambiental do uso destes materiais, os resultados apresentados demonstraram que o estado de tensões influencia na resposta elástica do solo, bem como a umidade associada à compactação. Foi observado que um solo mais seco apresenta maior rigidez, mas um grau de compactação inferior.

PALAVRAS-CHAVE: Silte, Teor de Umidade, Grau de Compactação, Módulo de Resiliência.

ABSTRACT: Pavement mechanics in Brazil have advanced significantly in recent decades, strongly influenced by the studies of Professor Jacques de Medina and the launch by the National Department of Transportation Infrastructure (DNIT) of the National Design Method (MeDiNa) for flexible pavements, which incorporates mechanistic stress-strain concepts in its analyses, allowing the design of a pavement structure with the elastic and plastic properties of the materials that compose it. Thus, seeking to characterize the resilient mechanical properties of the most widespread soils in the Federal District, the resilient modulus of a soil pedologically classified as Cambisol, with the granulometric characteristic of silty soil, was verified. This type of soil is normally disregarded in pavement structures due to its low bearing capacity for vehicle traffic. Despite this perspective, understanding the properties of these materials is an important step in characterizing the mechanical behavior of tropical soils, aiming to gather data that can contribute to studies on the improvement and environmental viability of using these materials. The results presented showed that the stress state influences the soil's elastic response, as well as the moisture associated with compaction. It was observed that drier soil presents greater stiffness but a lower degree of compaction.

KEYWORDS: Silt, Moisture Content, Degree of Compaction, Resilience Modulus.

1 INTRODUÇÃO

A mecânica dos pavimentos foi implementada no Brasil por volta da década de 70 pelo Professor Jacques de Medina, então professor da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) (Motta & Medina, 2006). E com isto, iniciou-se um processo contínuo de discussão e aperfeiçoamento de estudos, técnicas e práticas associadas aos métodos mecanísticos de análise de pavimentos, aliadas à sua evolução em outros países. Ainda na mesma década, Preussler (1978), publicou o primeiro trabalho de mestrado com o emprego de equipamento triaxial para análise de camadas de pavimentos, com estudos desenvolvidos na UFRJ.

O comportamento mecânico de solos aplicados em estruturas de pavimentos necessita de uma profunda compreensão, especialmente no que se refere à condição de deformações elásticas (resiliente), bem como aos conceitos associados a estes materiais, que podem apresentar diferentes desempenhos de rigidez associados não somente à estrutura física, como também ao estado de tensão ao qual o material está submetido.

O comportamento resiliente dos solos são notavelmente impactados pela densidade do solo, teor de partículas finas, formato das partículas e diâmetro máximo do agregado (Preussler, 1978). O estado de tensão e a quantidade de água também desempenham funções consideráveis na resposta mecânica do material.

A abordagem mecanística permite uma compreensão aprofundada de como as interações entre os constituintes do solo, como partículas minerais, bem como a influência de fatores externos, como chuvas intensas e altas temperaturas, influenciam no desempenho dos elementos presentes em camadas de pavimentos, sendo mais eficiente que métodos como o Índice de Suporte Califórnia (ISC).

Ao verificar as propriedades mecânicas, com destaque para o comportamento elástico avaliado por meio do módulo de resiliência de um solo tropical de aspecto silteoso de subleito de pavimento, é possível desenvolver estratégias mais eficazes que possam avaliar a influência do terreno natural composto por este tipo de material, uma vez que o subleito é considerado a fundação da estrutura de pavimento e suas características intrínsecas de caráter silteoso podem prejudicar o desempenho desta estrutura, caso as tensões provocadas pelo tráfego de veículos atinjam a camada deste material de subleito.

Diversos trabalhos nacionais como os de Gonçalves (1999), Weber (2013), Freitas, Rezende & Giritana (2020), dos Santos *et al.* (2019), Cardoso *et al.* (2023), abordam em seus estudos a relação de variação de umidade e o seu efeito no comportamento mecânico de solos, demonstrando a sua forte influência no comportamento de tensão-deformação dos materiais avaliados, este aspecto está associado ao comportamento da água entre as partículas do material granular, cujo objetivo é atuar como um agente lubrificante que permita o deslocamento de partículas durante a compactação alcançando o máximo valor de densidade.

Além deste aspecto, Cardoso *et al.* (2023), ao analisar solo de subleito do Distrito Federal, verificou que essa umidade também influencia na relação de resiliência do material quando submetido a um estado de tensão, com o qual pode haver maiores deformações elásticas e plásticas, levando a uma condição de dano que pode comprometer o desempenho da estrutura desejada.

Nesse contexto da mecânica dos pavimentos e com base nos conceitos abordados pelo MeDiNa, buscou-se avaliar a influência da umidade de compactação na resposta elástica de um solo silteoso do Distrito Federal, uma etapa crucial na execução de uma estrutura de pavimento. Para isso, foram realizados ensaios triaxiais dinâmicos com o objetivo de aferir as deformações elásticas e avaliar o comportamento do módulo de resiliência desse tipo de solo, buscando resultados que possam contribuir para a compreensão das propriedades mecânicas do solo silteoso, assim como subsidiar pesquisas futuras voltadas ao melhoramento e à viabilidade ambiental do uso desses materiais em obras de pavimentação rodoviária.

2 ÁREA DE ESTUDO

Para a seleção do local de coleta no DF, procedeu-se à utilização de análises geoespaciais para a identificação das características pedológicas específicas. No Distrito Federal, os solos predominantes são os Latossolos, abrangendo aproximadamente 60% da extensão territorial, e os Cambissolos, que cobrem cerca de 31% do território do DF. No mapa pedológico apresentado na Figura 1, é ilustrada a distribuição desses solos na região, cujo ponto de coleta está destacado com indicação de uma seta. O local de coleta foi às margens de uma rodovia do Distrito Federal sob circunscrição do DER/DF.

A predominância dos Cambissolos motivou a escolha do solo em estudo, tendo em vista a existência de poucos estudos sobre este tipo de solo. O objetivo é investigar as características deste material e entender seus comportamentos em situações de uso como camada de subleito de pavimentos rodoviários. Esta

abordagem possibilita uma análise mais aprofundada das propriedades e desempenho deste solo em contextos específicos de umidade e do comportamento mecânico deste material.

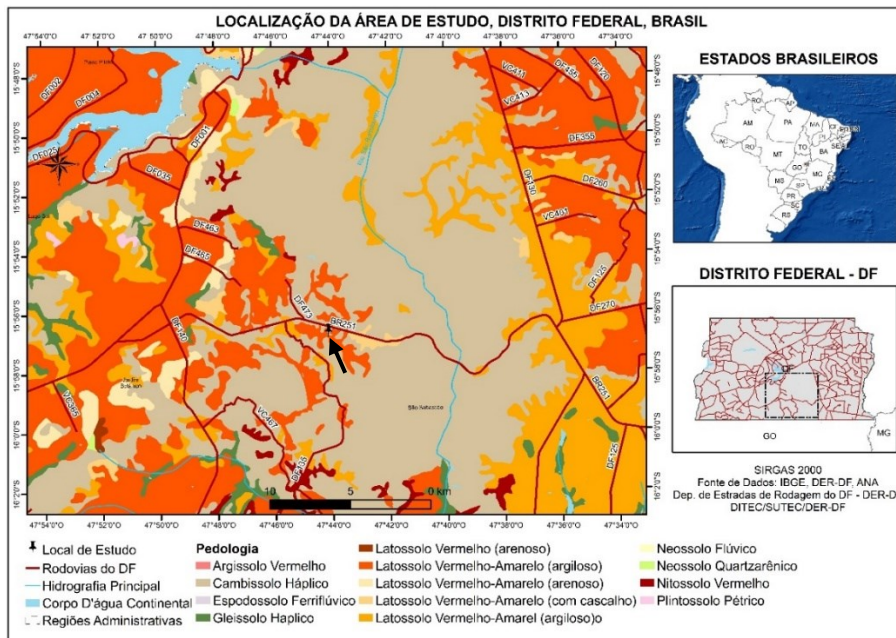


Figura 1. Mapa pedológico da área de estudo e entorno.

3 METODOLOGIA

Foram extraídas amostras deformadas de aproximadamente 150 kg, coletadas nas camadas superficiais do local determinado, abrangendo profundidades de até 1 metros. O método de coleta adotado seguiu o que determina o procedimento DNER-PRO 003/94 (DNER, 1994).

Os ensaios de caracterização foram conduzidos com base nos procedimentos estabelecidos na norma DNER-ME 041/94 (DNIT, 1994). Esta norma define os passos iniciais para a caracterização da amostra de estudo, abrangendo desde a aferição da umidade higroscópica até a separação granulométrica dos solos finos e granulares.

O método utilizado para determinar a densidade real dos grãos na amostra de solo seguiu os procedimentos estabelecidos pela norma DNER-ME 093/94 (DNER, 1994).

Com o objetivo de obter dados relacionados aos tamanhos das partículas do solo e sua distribuição, adotou-se o procedimento normatizado para a realização do ensaio de granulometria, abrangendo as diferentes faixas granulométricas presente no solo, como cascalho, areia, silte e argila. Este processo segue as diretrizes estabelecidas pelo método de ensaio DNER-ME 051/94 (DNER, 1994), passando pelas etapas normativas subsequentes da DNER-ME 080/94 (DNER, 1994). Para uma classificação mais precisa da fração de finos do solo, torna-se imprescindível conduzir o ensaio de granulometria por sedimentação, conforme normatizado pelo método de ensaio DNER-ME 051/94 (DNER, 1994). A mesma foi realizada com e sem o uso de defloculante.

Devido a localização da área de estudo estar situada em região de clima tropical, torna-se imperativo empregar uma classificação que melhor represente as particularidades d solos encontrado neste local. Neste sentido, foram conduzidos ensaios de compactação Mini-MCV (*Moisture Condition Value* – miniatura), conforme preconizado pela norma DNIT 258/2023 – ME (DNIT, 2023).

Para a obtenção da curva de compactação, no cilindro tripartido, seguiram-se as especificações quanto ao número de golpes e número de camadas, conforme determinado pela DNIT 443/2023 – ME (DNIT, 2023).

Para a realização do ensaio de determinação do módulo de resiliência, adotou-se a norma DNIT 134 – ME (DNIT, 2018). Este padrão normativo foi escolhido devido a sua reconhecida aplicabilidade e adequação ao contexto geotécnico de pavimentos no Brasil, sendo também adotado pelo MeDiNa.

No que diz respeito a outros aspectos metodológicos, como os ciclos de condicionamento e os parâmetros técnicos de compactação, foram estritamente seguidas as diretrizes estabelecidas pela norma DNIT

134/2018. Esta conformidade garante a uniformidade e comparabilidade dos resultados, assegurando que o procedimento experimental seja conduzido de maneira padronizada e confiável, contribuindo para a validação dos dados obtidos.

Para a análise dos dados de MR, foi empregado o modelo composto proposto por Pezo *et al.* (1992), para o módulo de resiliência, conforme equação 1, sendo este o que melhor representa os diferentes valores de MR para diferentes estados de tensões, sendo também o modelo adotado pelo MeDiNa.

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

Onde:

MR = Módulo de Resiliência, em MPa;

σ_3 = Tensão confinante, em MPa;

σ_d = Tensão desvio, em MPa;

k_1, k_2, k_3 = parâmetros de regressão do modelo matemático.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados da granulometria da amostra estão representados na Figura 2(a), onde se evidenciou a ocorrência de um solo siltoso com a predominância de, aproximadamente, 57% de silte, 30% de areia, 5% de pedregulho e 8% de argila, tendo em vista a curva granulométrica sem o uso de defloculante no ensaio de sedimentação. Ao empregar a solução de hexametáfosfato, para defloculação do material, nota-se que o solo se torna mais fino, além de haver uma maior suavidade nas transições granulométricas. Na Figura 2(b), observa-se uma imagem de um corpo de prova (CP) do material compactado. Após o processo de homogeneização e compactação, o material apresentou uma coloração esbranquiçada.

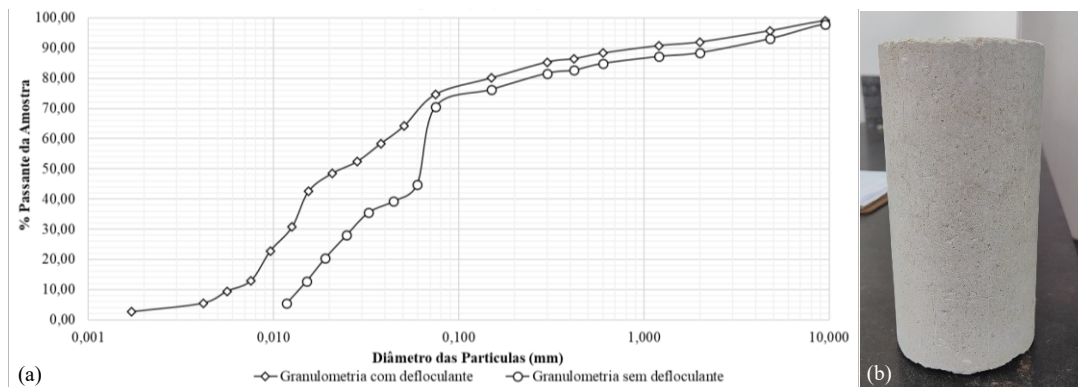


Figura 2. (a) Granulometria com e sem defloculante da amostra. (b) Aspecto do solo moldado em CP de 200 mm x 100 mm.

A classificação MCT, obtida por meio do ensaio de compactação Mini-MCV, indicou a ocorrência de um solo classificado como Laterítico Argiloso (LG'), mas ressaltando que o material se apresentou próximo ao limite da classificação NG' (não laterítico argiloso), conforme demonstrado na Figura 3(a).

Outras classificações MCT, como a proposta por Vertamatti (1988), chamada MCT-M, colocaria a amostra em uma categoria de transição entre não laterítico argiloso e laterítico argiloso. Esta classe tem por nomenclatura TG', conforme figura 3(b). Paula *et al.* (2022) em estudo sobre a classificação MCT-M de solos de subleito de uma rodovia do DF evidenciaram o caráter transitório que os solos apresentam entre as gêneses laterítica e saprolítica, passando, portanto, a identificar solos parcialmente evoluídos, cujo entendimento é importante para a avaliação do comportamento geotécnico esperado em estudos, projetos e execução de obras de infraestrutura viária, cabendo, portanto, estudos mais aprofundados para a verificação da relação do grau de intemperismo com a classificação MCT-M.

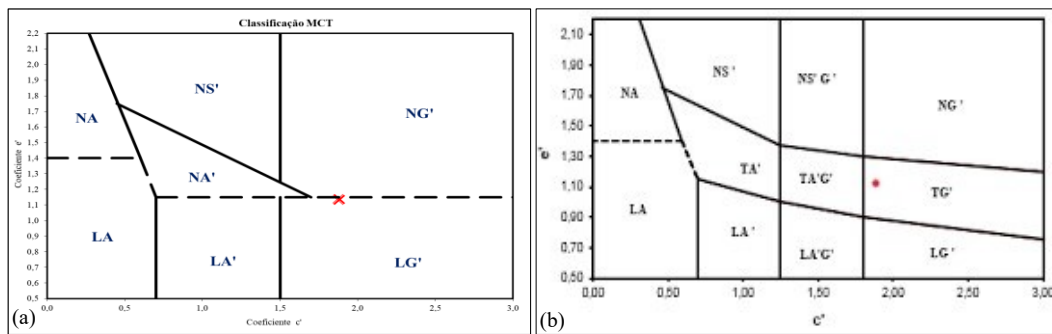


Figura 3. (a) classificação MCT; (b) classificação MCT-M.

Ao traçar a curva de compactação em cilindro destinado ao ensaio de ISC, verificou-se umidade ótima de 11,2% e máxima MEAS de 1,838 g/cm³. Para este mesmo parâmetro, observou-se que o ISC foi de 3,8%, tido como baixo para aplicações em pavimentos segundo DNIT (2006), o qual considera ISC mínimo de 6% para solos de subleito. Outro aspecto que chama a atenção neste solo do estudo, refere-se à expansão, a qual foi de 3,05%, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros obtidos pelo ensaio de compactação para ISC.

Energia de compactação AASHO Intermediária						
Pontos de Compactação	1º	2º	3º	4º	5º	Condição Ótima
M.E.A.S. (g/cm ³)	1,656	1,797	1,813	1,836	1,765	1,838
Umidade (%)	5,3	7,4	9,4	11,4	13,4	11,2
ISC (%)	0,9	1,7	1,9	3,9	3,3	3,8
Expansão (%)	2,99	3,71	3,72	3,05	3,02	3,05

Quanto à compactação no molde tripartido e seu respectivo MR, este solo teve o comportamento apresentado na Tabela 2. A máxima MEAS obtida de 1,817 g/cm³ ocorreu em condição de umidade ótima de 13,4%, sendo 2,2% maior que a observada na compactação de ISC, enquanto a MEAS foi 0,021 g/cm³ menor. Esta característica pode estar associada não somente aos métodos de compactação, como também à influência da estrutura granulométrica do solo, uma vez que solos de classificação siltosa apresentam grande variabilidade na definição de umidade ótima.

Tabela 2. Propriedades da curva de compactação em cilindro tripartido.

Energia de Compactação Intermediária						
Pontos de Compactação	1º	2º	3º	4º	5º	Condição Ótima
M.E.A.S. (g/cm ³)	1,690	1,708	1,751	1,814	1,763	1,817
Umidade (%)	9,4	10,2	11,4	13,4	16,6	13,4
MR (MPa)	77,9	78,8	75,4	69	55,7	69
G _s (g/cm ³)				2,581		
e	0,50	0,49	0,45	0,40	0,42	0,40
n	0,33	0,33	0,31	0,28	0,30	0,28
S _r (%)	52	53	64	87	97	87

Nota-se também, ao analisar os aspectos relacionados aos vazios dos corpos de prova (CP) ensaiados, que o índice de vazios (*e*), assim como a porosidade (*n*), diminuem à medida em que se aumenta a densidade do CP ensaiado, característica esperada devido à condição ideal de umidade para a compactação, enquanto o grau de saturação (*S_r*) aumenta. A medida em que se alcança maiores valores de MEAS no ramo seco, menor o índice de vazios (*e*, conseqüentemente, a porosidade), tendendo a obter MR maiores. Quando observado no ramo úmido da curva de compactação, o MR diminui, enquanto a saturação aumenta e, por sua vez, diminui a rigidez do solo, obtendo assim uma queda nos valores de MR.

Ao traçar a curva de compactação em relação a MEAS, conforme observado na Figura 4, tem-se uma relação de MR maior para condições de menor umidade, até um certo limite (redução abaixo de 10% MR). Isso pode ser associado à maior rigidez do CP, já que uma maior porosidade parece não afetar na condição do

retorno elástico quando carregado para essa condição de umidade no ramo seco. E, à medida em que se aumenta o teor de umidade, o MR tende a diminuir. Destaca-se ainda que o maior valor de MR não ocorre no teor de umidade ótimo (13,4%). E, na condição ótima, o valor de MR foi de 69 MPa.

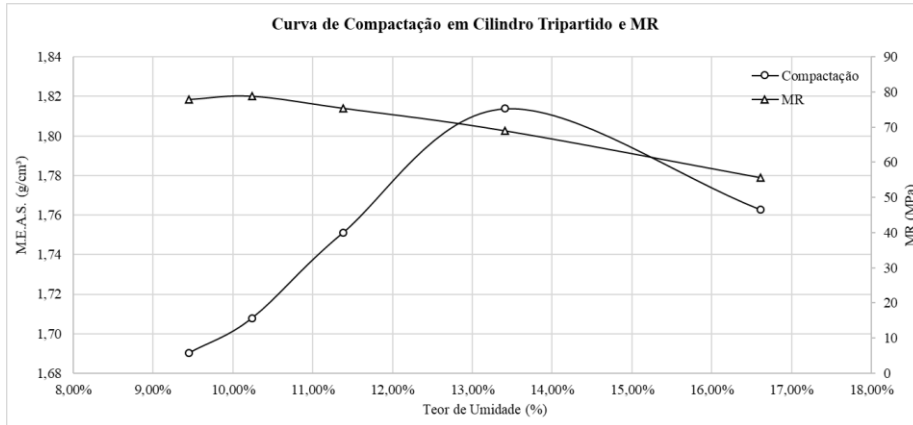


Figura 4. Curva MEAS e MR.

Com estes resultados, foi possível observar uma significativa diferença entre os resultados do método de compactação para ISC, comparado ao método de compactação no molde tripartido, onde a umidade ótima aumenta, enquanto a MEAS diminui, respectivamente, evidenciando a importância de se realizar a curva de compactação para a realização de ensaios triaxiais de MR em moldes tripartidos, a fim de garantir maior conformidade nos resultados.

De modo geral, o valor médio do MR foi baixo para índices de subleito, indicando um comportamento do solo compactado com elevado valor de deformações elásticas durante o carregamento cíclico. Em estudos realizados por Paula *et al.* (2022) e Caetano (2024) em solos tropicais de subleito do DF, de pedologia latossolo vermelho, predominância argilosa e classificação MCT – LG', foram encontrados valores médios de MR entre 99 MPa a 146 MPa, respectivamente, o que pode estar associado ao grau de intemperismo e alteração das partículas, bem como ao comportamento laterítico do solo.

Ao observar o comportamento do gráfico de MR, conforme Figura 5, nota-se que, à medida em que a tensão desvio aumenta, os valores de MR tendem a diminuir, enquanto o aumento da tensão confinante leva a um MR crescente. Em outras palavras, este solo tem sua rigidez influenciada de forma significativa pela tensão confinante.

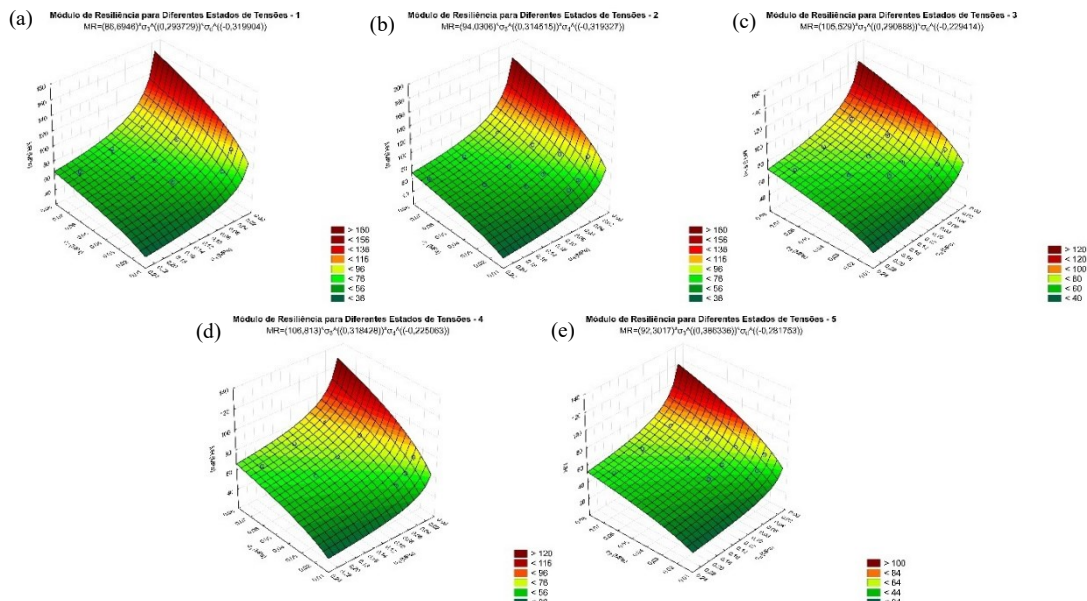


Figura 5. MR dos pontos de compactação: (a) ponto 1; (b) ponto 2; (c) ponto 3; (d) ponto 4 e (e) ponto 5.

Quanto ao modelo matemático aplicado à análise do MR para diferentes estados de tensões da condição “ótima” com máxima MEAS, têm-se os resultados apresentados na Tabela 3, onde foi possível aferir os coeficientes de regressão k_1 , k_2 e k_3 , além dos limites de confiança superior e inferior dos coeficientes, bem como os parâmetros estatísticos relacionados ao teste de hipótese do método empregado.

Os resultados apresentaram um valor de R^2 de 0,948, podendo ser considerado satisfatório, o que indica um bom ajuste do modelo matemático de Pezo *et al.* (1992) para a representação do comportamento elástico do solo observado por meio do ensaio triaxial cíclico.

Tabela 3. Parâmetros de regressão e estatísticos do MR.

Resultado da análise estatística para aplicação do Modelo Composto de previsão de comportamento do MR							
Parâmetros	Valor Estimado	Erro Padrão	Valor T-Student	Significância - p	Lim. Inferior de Confiança	Lim. Superior de Confiança	R^2
k_1	129,6884	8,2609	15,6991	0,000000	111,0009	148,3758	0,972
k_2	0,3380	0,0276	12,2559	0,000001	0,2756	0,4004	
k_3	-0,2017	0,0197	-10,2094	0,000003	-0,2464	-0,1570	

5 CONCLUSÕES

É incontestável que muitas das abordagens tradicionalmente empregadas no Brasil para o dimensionamento de pavimentos estão desatualizadas e carecem da devida adequação ao cenário local, principalmente devido às particularidades do clima e das características pedológicas regionais.

Neste contexto, é essencial progredir na aplicação de metodologias consolidadas, como a classificação MCT e expandir a adoção de técnicas mecanísticas, como a exemplificada pelo MeDiNa, para projetos de pavimentos flexíveis, em substituição a antigas práticas de adoção do ISC e dimensionamento puramente empíricos ou semi-empíricos, que não refletem verdadeiramente o comportamento tensão-deformação de cada camada de solo, que verdadeiramente garantem as respostas estruturais do pavimento. Somente por meio destes avanços será possível assegurar a autonomia tecnológica e a excelência técnica no contexto das obras geotécnicas rodoviárias no país.

O baixo percentual de argila (8%) frente à predominância de silte (57%) na granulometria deste solo, isoladamente, não permitiria inferir o comportamento verificado. Entretanto, por meio do ensaio de compactação mini-MCV, os resultados indicaram uma classe de característica argilosa, mas bem próxima da classe de solo arenoso. Isto chama atenção para situações de classificações próximas ao limite de mudança de comportamento, ensejando, portanto, em estudos mais aprofundados sobre o assunto.

O solo em estudo demonstrou desempenho mecânico abaixo do desejado para aplicações rodoviárias, com um MR de 69 MPa. Porém, em um dimensionamento mecanístico-empírico, o mesmo não está descartado em ser utilizado como subleito, a depender de outras soluções de estabilização química e características de projeto, como volume de tráfego (número N) e materiais que integrarão as demais camadas da estrutura. Solos siltosos sofrem com a umidade em excesso na compactação, e devido a poucos estudos sobre esse tipo de material, e a sua elevada ocorrência no DF, torna-se importante o entendimento do seu comportamento visando a busca de soluções que possam torná-lo viável de aplicação rodoviária e ambientalmente responsável.

O modelo matemático proposto por Pezo *et al.* (1992) revelou-se eficaz na representação do comportamento deste solo na condição de máxima densidade. Além disso, verificou-se que o solo siltoso apresentado neste estudo apresenta alta variabilidade dos parâmetros obtidos no procedimento de compactação, como foi evidenciado pelos resultados de MEAS quando empregado o cilindro de ISC em comparação com o cilindro tripartido para MR, demonstrando a importância da utilização do cilindro tripartido para a obtenção dos parâmetros de compactação.

AGRADECIMENTOS

Ao Departamento de Estradas de Rodagens do Distrito Federal (DER/DF), por meio da Diretoria de Estudos Tecnológicos (DITEC/SUTEC) pelo apoio fornecido na coleta do solo e realização dos ensaios. Ao Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília (PPGG/UnB). À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Caetano, M. R. (2024). Estudo do comportamento mecânico de solos tropicais e materiais britados de pavimentos rodoviários do Distrito Federal e do Estado de Roraima. Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil, Brasília, DF, 264 p.
- Cardoso, J. C. R., Caetano, M. R., de Paula, G. F., Fernandes, P. C., Silva, R. F. (2023). Efeito da variação de umidade de compactação nos módulos de resiliência de solos de subleito do Distrito Federal. 25º ENACOR & 48º RAPv. Foz do Iguaçu. DOI: 10.29327/1304307.48-17
- DNER (1994). DNER-ME 041 – Solos – preparação de amostras para ensaio de caracterização. Departamento Nacional de Estradas e Rodagem. Método de Ensaio. Departamento Nacional de Estradas e Rodagem. DNER/DrDTc (IPR).
- DNER (1994). DNER-ME 051 – Solos – análise granulométrica. Método de Ensaio. Departamento Nacional de Estradas e Rodagem. DNER/DrDTc (IPR).
- DNER (1994). DNER-ME 080 – Solos – análise granulométrica por peneiramento. Departamento Nacional de Estradas e Rodagem. Método de ensaio. DNER/DrDTc (IPR).
- DNER (1994). PRO 003/94 – Coleta de amostras deformadas de solos. Método de ensaio. Departamento Nacional de Estradas e Rodagens. Rio de Janeiro.
- DNER (1994). PRO 093/94 – Solos – Determinação da densidade real. Método de ensaio. Departamento Nacional de Estradas e Rodagens. Rio de Janeiro.
- DNIT (2006). Manual de pavimentação. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Diretoria de Planejamento e Pesquisa, Coordenação de Pesquisas Rodoviárias. 3.ed. 274 p. Rio de Janeiro.
- 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.
- DNIT (2023). 258/2023 – ME – Pavimentação – Solos – Compactação em equipamento miniatura – Ensaio Mini-MCV e perda de massa por imersão – Método de ensaio – Método de ensaio. Instituto de Pesquisas em Transportes. Brasília.
- DNIT (2023). 443/2023 – ME Pavimentação – Solos – Ensaio de compactação utilizando moldes tripartidos – Método de ensaio. Instituto de Pesquisas em Transportes. Brasília.
- dos Santos, T. A., Specht, L. P., Pinheiro, R. J. B., Ceratti, J. A. P., & Brito, L. A. T. (2019). Avaliação da resistência e da deformação resiliente de quatro solos de subleitos rodoviários no estado do Rio Grande do Sul. *Transportes*, 27(1), 48-64.
- Freitas, J. B.; Rezende, L. R.; Gitirana Jr., G. F. N. (2020). Prediction of the resiliente modulus of two tropical subgradesoils considering unsaturated conditions. *Engineering Geology*, vol. 270, 2020. DOI: 10.1016/j.enggeo.2020.105580
- Gonçalves, R. F. (1999). Estudo da influência da variação do teor de umidade no valor do módulo de resiliência de um solo argiloso encontrado em subleito de rodovias no interior paulista (Doctoral dissertation), Universidade de São Paulo
- Motta, L. M. G. & de Medina, J. (2006). Investigação e desenvolvimento em Mecânica dos Pavimentos na COPPE-Brasil.
- Paula, G. F., Teixeira, D. I. B., Fernandes, P. C., Pereira, J. I. S., Camapum de Carvalho, J. 2022. Classificação MCT-M: Estudo de Caso para um Solo Tropical do Distrito Federal. XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (COBRAMSEG), Campinas, SP.
- Paula, G. F.; Fernandes, P. C.; Silva, R. C. (2022). Estudo comparativo entre os métodos de dimensionamento de pavimentos: DNER e mecanístico-empírico (MeDiNa) no DER/DF. 24º Encontro Nacional de Conservação Rodoviária (ENACOR) / 47ª Reunião Anual de Pavimentação (RAPv), Bento Gonçalves, RS.
- Pezo, R. F., Carlos G., Hudson W. R., & Stokoe K. H. II. (1992). *Development of a Reliable Resilient Modulus Test for Subgrade and Non-Granular Subbase Materials for Use in Routine Pavement Design*. Report II 77-4 F. Center for Transportation Research, University of Texas at Austin, 1992.
- Preussler, E. S. (1978). Ensaio Triaxiais Dinâmicos de um solo arenoso. Dissertação (Mestrado). COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- Vertamatti, E. (1988). Contribuição ao conhecimento geotécnico de solos da Amazônia com base na investigação de aeroportos e metodologias MCT e resiliente. Tese de Doutorado, Divisão de Pós-Graduação do Instituto Tecnológico de Aeronáutica, Área de Transporte Aéreo do Curso de Pesquisa Operacional e Transporte, Instituto Tecnológico de Aeronáutica / ITA, São José dos Campos, SP, 300 p.
- Weber, R. C. (2013). Avaliação das trajetórias de umedecimento e secagem na deformabilidade elástica de solos compactados. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre, 139p.