



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR
www.rapvenacor.com.br



25º Encontro Nacional de Conservação Rodoviária (ENACOR) 48ª Reunião Anual de Pavimentação (RAPV)

EFEITO DA VARIAÇÃO DA UMIDADE DE COMPACTAÇÃO NOS MÓDULOS DE RESILIÊNCIA DE SOLOS DE SUBLEITO DO DISTRITO FEDERAL

DOI: (a ser preenchido após o envio do código DOI da publicação)

Josiene Chrystina Ribeiro Cardoso¹; Mateus Ribeiro Caetano²; Gisandra Faria de Paula³; Paulo Costa Fernandes⁴; Rafael Cerqueira Silva⁵

RESUMO

No dimensionamento de pavimentos, é essencial considerar as características geotécnicas dos solos, as condições ambientais e a previsão de solicitações de tráfego. Os solos utilizados no subleito são estabilizados por compactação e geralmente encontram-se em condição de não saturação. A compactação adequada das camadas inferiores do pavimento, com o teor de umidade ideal, é de extrema importância. Erros no teor de umidade podem acarretar problemas como baixa densidade, resistência insuficiente, instabilidade do solo e deterioração prematura do pavimento, resultando em deformações permanentes, fissuras e desgastes precoces. Devido à importância do subleito na estrutura do pavimento, o presente estudo buscou avaliar o impacto da variação do teor de umidade nos parâmetros de deformabilidade dos solos representativos desta camada, a qual é considerada a fundação do pavimento. Foram realizados ensaios triaxiais de cargas repetidas para determinar o módulo de resiliência (MR). Os ensaios foram conduzidos em corpos de prova (CPs) compactados na umidade ótima (w_{ot}) e em CPs compactados com variações de umidade $\pm 2\%$ em relação à w_{ot} . O solo analisado contempla o subleito de uma rodovia distrital não pavimentada (DF-440), de classificação Latossolo Vermelho-Amarelo, o qual origina-se de um alto grau de intemperismo e lixiviação. Os resultados são preliminares, pois ainda serão realizadas mais campanhas de ensaios, incluindo outros tipos de solos. Para a amostragem considerada, verificou-se que, em geral, houve um aumento no módulo de resiliência a medida que o teor de umidade diminuía. Assim, é importante concentrar os estudos no desenvolvimento de modelos de previsão do comportamento resiliente do solo que considerem a influência do ambiente físico/teor de umidade nos métodos de dimensionamento mecanístico-empíricos atuais, incluindo o MeDiNa.

PALAVRAS-CHAVE: módulo de resiliência; teor de umidade; subleito; compactação.

ABSTRACT

In pavement design, it is essential to consider the geotechnical characteristics of soils, environmental conditions, and traffic load predictions. The soils used in the subgrade are stabilized through compaction and are typically in a non-saturated condition. Proper compaction of the lower pavement layers, with the ideal moisture content, is of utmost importance. Errors in moisture content can lead to issues such as low density, insufficient strength, soil instability, and premature pavement deterioration, resulting in permanent deformations, cracks, and early wear. Due to the importance of the subgrade in the pavement structure, this study aimed to evaluate the impact of moisture content variation on the deformability parameters of representative soils in this layer, which is considered the foundation of the pavement. Triaxial tests under repeated loading were conducted to determine the resilient modulus (MR). The tests were performed on specimens compacted at the optimum moisture content (w_{ot}) and on specimens compacted with moisture content variations of $\pm 2\%$ relative to w_{ot} . The analyzed soil corresponds to the subgrade of an unpaved district road (DF-440), classified as Red-Yellow Latosol, which originates from a high degree of weathering and leaching. The results are preliminary, as further test campaigns will be conducted, including other types of soils. For the considered sampling, it was generally observed that there was an increase in the resilient modulus as the moisture content decreased. Therefore, it is important to focus on the development of predictive models for the resilient behavior of soil that consider the influence of the physical environment/moisture content in current mechanistic-empirical design methods, including the MeDiNa method.

KEYWORDS: resilient modulus, moisture content, subgrade, compaction.

^{1, 2, 5} Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília (UnB): Campus Universitário Darcy Ribeiro, CEP 70910-900, Brasília, DF, Brasil, josychrystina@gmail.com; mateusribeirocaetano@gmail.com; rafael.silva@unb.br

^{3, 4} Departamento de Estradas de Rodagem do Distrito Federal (DER/DF): SAM Bloco C, Setor Complementares, Ed. Sede do DER/DF, CEP 70.620-030, Brasília, DF, Brasil, gisandrafp@gmail.com; paulocostaf@gmail.com



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



INTRODUÇÃO

A umidade desempenha um papel significativo na deterioração das estruturas de pavimentos flexíveis (SALOUR, 2015), afetando as propriedades do subleito e das demais camadas do pavimento, bem como sua resposta mecânica sob o carregamento dinâmico do tráfego.

As camadas inferiores do pavimento devem ser compactadas em condições não saturadas e com o teor de umidade ótimo previsto em ensaio. O processo de compactação, que envolve fatores como energia, umidade e método, influencia a estrutura do solo. Essas variáveis, quando mudam isoladamente ou em conjunto, podem reduzir a capacidade de suporte do pavimento e acelerar sua degradação.

Durante a construção dos pavimentos, quando o controle tecnológico na obra não é eficiente, a umidade das camadas e do subleito pode variar. Essas variações em relação à umidade ótima podem ter um impacto significativo nas propriedades resilientes dos materiais (BASTOS, 2013).

Parreira e Gonçalves (2000) alertam que para a melhor aplicação dos métodos mecanísticos há a necessidade do estudo da influência da umidade sobre o módulo de resiliência, tendo em vista que esse parâmetro é susceptível às variações climáticas. Portanto, é crucial aprofundar o conhecimento sobre o comportamento dos materiais de pavimentação sujeitos a variações no teor de umidade e concentrar os estudos no desenvolvimento de modelos de previsão mais abrangentes, que considerem a influência do ambiente físico nos métodos de dimensionamento mecanísticos-empíricos atuais (SANTOS, 2020), incluindo o Método de Dimensionamento Nacional (MeDiNa).

Vários estudos foram conduzidos para investigar o impacto da variação de umidade no módulo de resiliência do subleito. Dentre os autores que abordaram esse tema estão Gonçalves (1999), Houry *et al.* (2003), Ceratti, Gehling & Núñez (2004), Sawangsuriya, *Edil & Bosscher* (2009), Weber (2013), Salour, Erlingsson, & Zapata (2014), Freitas, Rezende & Giritana (2020), Souza (2020). Estas pesquisas destacam a variação da umidade no subleito como um fator significativo que pode afetar a capacidade de suporte do pavimento.

Dada a grande diversidade e particularidades existentes nos solos tropicais brasileiros, existe a necessidade de aprofundar o conhecimento no comportamento resiliente x teor de umidade destes materiais, bem como seu desempenho na estrutura do pavimento. Assim, este estudo avalia a influência da umidade no comportamento resiliente de um solo utilizado como subleito em uma rodovia distrital na região Centro-Oeste do Brasil, Distrito Federal.

REFERENCIAL TEÓRICO

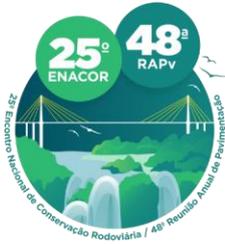
Módulo de Resiliência em Pavimentos

De acordo com a explicação de Balbo (2007), a resiliência é a capacidade de um corpo deformado elasticamente armazenar energia e restituí-la quando as tensões aplicadas são removidas, sem reter deformações. O módulo de resiliência (MR) é um parâmetro que descreve o comportamento elástico dos materiais e desempenha um papel crucial na abordagem mecanicista dos pavimentos.

Segundo Li e Selig (1994), o módulo de resiliência é o parâmetro que caracteriza o comportamento dos materiais que estão sofrendo ação de um carregamento cíclico. Ele pode dar uma noção da rigidez elástica dos materiais, pois quanto mais deformável, menor será o módulo de resiliência.

O MR do solo do subleito é considerado um parâmetro de solo mais racional 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 em movimento (YANG, HUANG & TAI, 2005).

O comportamento não linear do módulo de resiliência dos solos é influenciado por diversos fatores, como a natureza do solo, composição granulométrica, estado físico, condição de carregamento,



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



histórico e estado de tensões, número de repetições da tensão desvio, grau de saturação, densidade e umidade de compactação, método de compactação, umidade de equilíbrio, entre outros (TAKEDA, 2006; BASTOS, 2013; LIMA *et al.*, 2018; SANTOS, 2020; KERN, GEHLING & NÚÑEZ, 2021). O estado de tensão e o teor de umidade desempenham papéis significativos no comportamento resiliente dos solos utilizados na construção de pavimentos, em especial do subleito por ser considerado a fundação desta estrutura (TAKEDA, 2006). Segundo Lekarp, Isacsson & Dawson (2000), a relação complexa entre o módulo de resiliência, teor de umidade, estado de tensão e tipo de material requer a avaliação da estrutura por meio de abordagens mecânicas. O ensaio triaxial é uma técnica que possibilita a medição do módulo de resiliência e a caracterização do subleito em diversas condições de umidade, densidade e tensão. Este parâmetro é considerado fundamental para a análise e projeto de pavimentos, sendo amplamente empregado nos métodos de dimensionamento internacionais (GUIMARÃES, 2009).

A Influência da Variação do Teor de Umidade no MR

Durante a execução das camadas do pavimento, incluindo o subleito, a umidade pode variar quando o controle tecnológico na obra não é eficiente. Variações na umidade em relação ao valor ótimo (wot) podem resultar em alterações significativas das propriedades resilientes, como ocorre em solos argilosos, que podem apresentar curvas de compactação mais fechadas (BASTOS, 2013). Assim, é importante garantir um controle adequado da umidade durante a execução do pavimento, a fim de preservar suas propriedades e desempenho ao longo do tempo de serventia da estrutura.

Parreira e Gonçalves (2000) alertam que para a melhor aplicação dos métodos mecânicos há a necessidade do estudo da influência da umidade sobre o módulo de resiliência, tendo em vista que esse parâmetro é susceptível às variações climáticas.

Bastos (2013) ressalta que a degradação dos pavimentos asfálticos ocorre devido à deformação plástica e às deflexões elásticas repetidas. A capacidade de recuperação da deflexão em um pavimento de camadas múltiplas está diretamente ligada às propriedades elásticas das camadas e do subleito. O MR é uma medida utilizada para estudar a deformabilidade resiliente (elástica) dos materiais granulares que compõem a estrutura dos pavimentos, tanto na condição ideal de umidade (wot) quanto em condições que não são recomendadas pela norma DNIT-ME 134/2018.

Alguns estudos foram realizados para avaliar a influência da variação do teor de umidade no módulo de resiliência e revelaram a importância crucial do teor de umidade no subleito e seu impacto significativo na capacidade de suporte do pavimento. Durante o processo de umedecimento do solo, observa-se uma diminuição considerável no módulo de resiliência à medida que a tensão desvio aumenta. Essa tendência de redução do módulo de resiliência com o aumento do teor de umidade no solo é consistente com outros estudos. Estas descobertas ressaltam a importância de considerar cuidadosamente o teor de umidade durante o projeto e na etapa de construção de pavimentos, com o objetivo de assegurar um desempenho adequado e duradouro (BERNUCCI *et al.*, 1995; BASTOS, 2013; KERN, 2017; LIMA *et al.*, 2018; SANTOS, 2020).

MATERIAIS E MÉTODOS

O solo analisado neste estudo contempla o subleito de uma rodovia distrital não pavimentada (DF-440), sob a circunscrição do Departamento de Estradas de Rodagem do Distrito Federal (DER/DF), de classificação Latossolo Vermelho-Amarelo, de acordo com a Figura 1. Este solo origina-se de um alto grau de intemperismo e lixiviação, formando uma estrutura bastante porosa, metaestável e com alto índice de vazios (LIMA, 2003).



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br

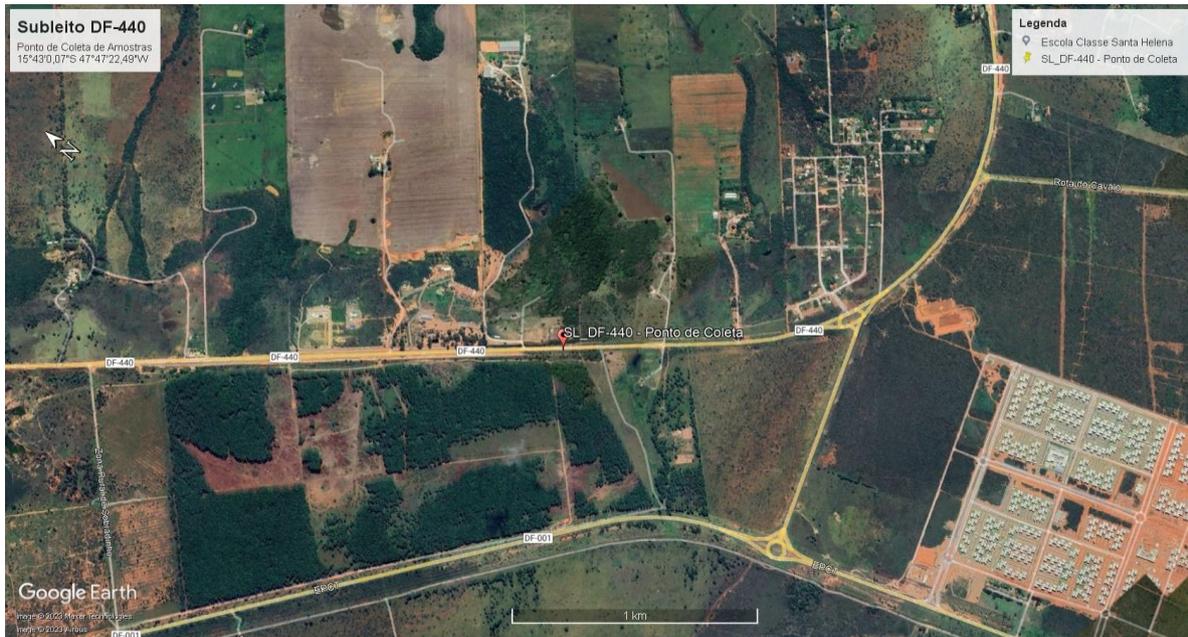


Figura 1. Localização da rodovia distrital DF-440 e do ponto de coleta de amostras (GOOGLE EARTH, 2023).

A caracterização física dos materiais foi realizada por meio dos ensaios de granulometria – NBR 7181/2018, limite de liquidez (w_l) – NBR 6459/2017, limite de plasticidade (w_p) – NBR 7180/2016 e densidade real do solo – DNER-ME 093/1994. Além desses ensaios, foram realizados os ensaios mecânicos convencionais, como o Índice de Suporte Califórnia (ISC) e a expansão – DNER-ME 049/94, na energia intermediária, assim como ensaios de compactação.

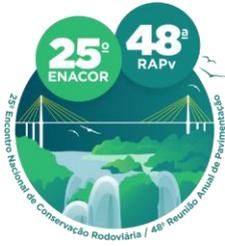
Para o procedimento de compactação dos solos, foi realizada a preparação das amostras de acordo com as diretrizes estabelecidas na norma DNER-ME 041/1994. Este ensaio foi conduzido em duas etapas. Na primeira etapa, utilizou-se o cilindro de compactação e o soquete proctor para obter amostras destinadas ao Índice de Suporte Califórnia (ISC – ou *California Bearing Ratio* – CBR), seguindo o que está estabelecido na norma DNER-ME 129/1994. Na segunda etapa, obteve-se a curva de compactação com referência ao cilindro tripartido, seguindo as determinações da norma de MR – DNIT 134/2018-ME.

Como a área de estudo situa-se em um local de clima tropical, torna-se necessário utilizar uma classificação que melhor represente as características e a evolução pedogenética dos solos brasileiros, bem como suas propriedades mecânicas e hidráulicas, conforme estudos realizados por Nogami e Villibor (1980) que resultaram na metodologia MCT (Miniatura Compactado Tropical), a qual possibilita avaliar, de maneira bastante confiável, a gênese dos solos tropicais, principalmente os lateríticos de textura fina que cobrem grande parte do território nacional, quando comparada com os ensaios e os sistemas de classificação oriundos de normas americanas.

Desta forma, foram realizados ensaios de compactação Mini-MCV (*Moisture Condition Value* – miniatura), seguindo o estabelecido pela norma DNER-ME 258/1994 e a classificação MCT, de acordo com as normas DNER-ME 256/1994 e DNER-ME 259/1994.

Variação do Teor de Umidade na Compactação

Para este estudo, adotou-se a energia de compactação intermediária, a qual é utilizada pelo DER/DF para a realização da camada de subleito em obras do órgão. As especificações quanto ao número de golpes e número de camadas seguiram as determinações da norma de MR – DNIT 134/2018. Esse



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



procedimento foi baseado em experiências práticas dos autores deste estudo e pesquisas anteriores, como o trabalho de Lima *et al.* (2022), que abordou esses aspectos de compactação em diferentes moldes cilíndricos para um solo laterítico.

A delimitação da faixa de amplitude da umidade de compactação baseou-se nos limites estabelecidos pelo Departamento Nacional de Infraestrutura em Transportes (DNIT) para a compactação das camadas de aterro e camada final de terraplanagem nos subleitos de estradas. Embora haja margem para pequenas variações na umidade de compactação, as regulamentações rodoviárias exigem que a densidade seca máxima atingida no ensaio de compactação seja mantida. Portanto, estabeleceu-se uma variação da umidade acima e abaixo do teor ótimo, incluindo cinco diferentes teores: -2%, -1%, teor ótimo, +1% e +2%, conforme ilustrado na Figura 2. O objetivo foi simular, em laboratório, a fase de construção dos pavimentos flexíveis com controle tecnológico ineficiente.



Figura 2. CPs com diferentes umidades de compactação.

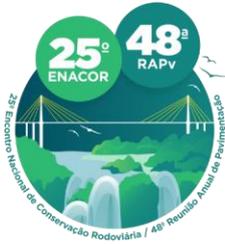
Ensaio Triaxiais de Carga Repetida – Módulo de Resiliência

Os valores do MR do solo foram obtidos por meio de ensaios triaxiais de carga repetida (ETCR), seguindo a norma DNIT 134/2018-ME. A deformação axial do corpo de prova é medida por um transdutor de deslocamento do tipo LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*). O LVDT transforma as deformações do corpo de prova em um potencial elétrico que é transmitido ao *software* de leitura, que recebe como dados de entrada a tensão confinante (σ) e desvio (σ_d), calculando automaticamente o MR para cada sequência de pares de tensões estipulados na norma.

Por se tratar de um estudo de subleito, esta pesquisa adotou a sequência de pares de tensão reduzida, conforme descrita na norma. Quanto aos demais aspectos, como os ciclos de condicionamento e os aspectos técnicos de compactação, foram realizados os descritivos estabelecidos na norma DNIT 134/2018-ME.

A partir da aquisição dos valores de MR obtidos para cada uma das amostras, foram realizadas análises individuais na amostra e análises para o conjunto das amostras em duplicata.

Os resultados foram expressos por meio de relações matemáticas (modelos de comportamento elástico não linear) entre o módulo de resiliência e as tensões aplicadas, obtidas por regressão não linear. O *software* utilizado para realizar os cálculos e determinar o modelo que melhor representou o solo ensaiado foi o *Statistica*. O ajuste adequado do modelo aos dados reais de deformação elástica obtidos no ensaio foi avaliado por meio do coeficiente de determinação, representado por (R^2).



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR
www.rapvenacor.com.br



Diversas equações são encontradas na literatura para determinação do comportamento resiliente dos solos. Na tabela 1, constam os modelos comumente empregados na maioria dos estudos.

Tabela 1. Modelos de MR .

Modelo	Tipos de solo
$MR = k_1 \sigma_3^{k_2}$	Solos arenosos
$MR = k_1 \sigma_d^{k_2}$	Solos argilosos
$MR = k_1 \sigma_3^{k_2} \sigma_d^{k_3}$	Composto – para qualquer tipo de solo ou brita

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados da classificação do solo são estão dispostos na Tabela 2, revelando sua tipologia. Adicionalmente, por meio da metodologia MCT, foi possível identificar que o solo apresenta um comportamento não laterítico de natureza arenosa, conforme demonstrado na Tabela 3. Estas informações são de suma importância para compreender as características e propriedades do solo investigado no âmbito deste estudo.

Tabela 2. Resultados dos parâmetros das caracterizações dos solos.

% Pedregulho	0,4
% Areia grossa	2,5
% Areia fina	65,8
% Silte + Argila	31,3
Limite de liquidez (w_L - %)	23,2
Limite de plasticidade (w_p - %)	17,8
Índice de plasticidade (IP - %)	5,5
Classificação TRB	A-2-4
Densidade máxima (g/cm^3)	1,75
Umidade ótima (w_{ot} - %)	12,5
Índice suporte (ISC - %)	16,7
Expansão (%)	0,16

Tabela 3. Parâmetros da Metodologia MCT.

Parâmetro	c'	d'	e'	Pi (%)
NA'	0,85	24,56	1,25	115

O comportamento resiliente do solo foi analisado por meio do modelo composto, conforme equação proposta por Pezo *et al.* (1992). Este é o modelo adotado pelo MeDiNa, por ser genérico e não depender do conhecimento *a priori* se o comportamento predominante é o granular ou o argiloso.



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br

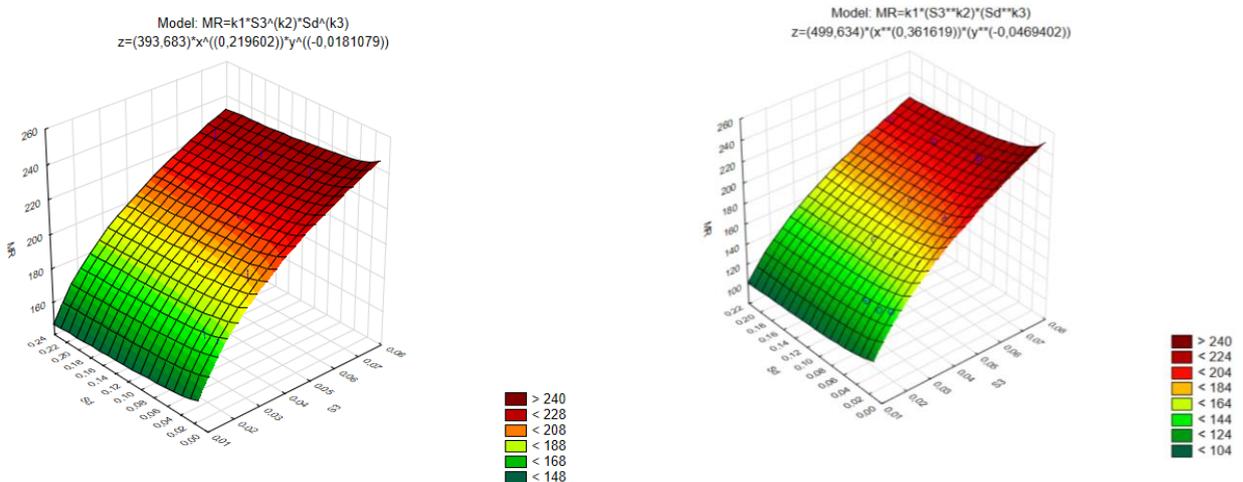


Os parâmetros experimentais obtidos nos ensaios triaxiais, k_1 , k_2 e k_3 , são apresentados na Tabela 4, sendo obtidos ótimos coeficientes de determinação (R^2) por meio deste modelo, da ordem de 0,94.

Tabela 4. Parâmetros experimentais obtidos nos ensaios triaxiais.

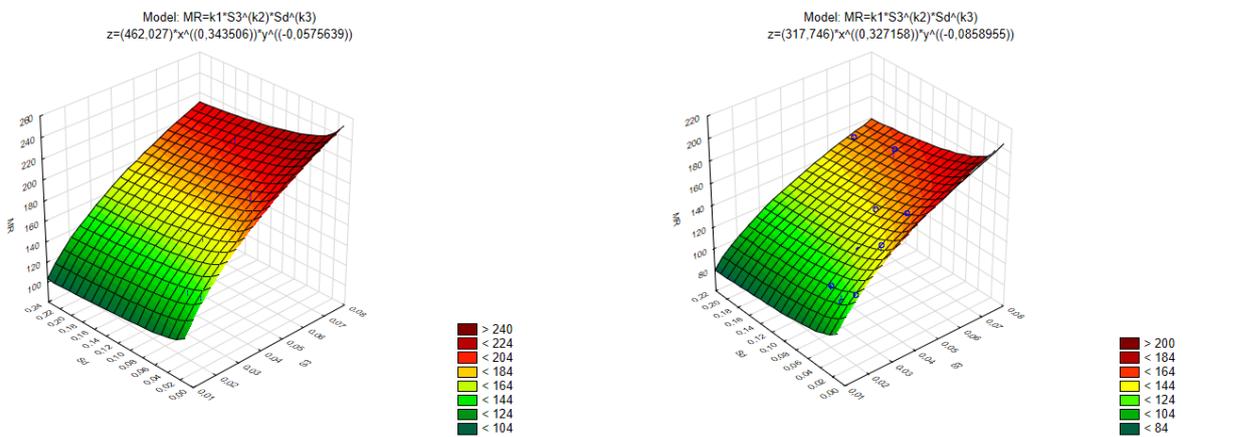
Parâmetros	$w_{ot} - 2\%$	$w_{ot} - 1\%$	w_{ot}	$w_{ot} + 1\%$	$w_{ot} + 2\%$
k_1	393,68	499,93	462,027	317,746	257,503
k_2	0,219602	0,3616	0,34351	0,327158	0,266495
k_3	-0,0181	-0,0469	-0,0576	-0,0859	-0,06468
R^2	0,9482	0,9494	0,9789	0,9576	0,9637

Em seguida, foram elaborados os gráficos tridimensionais que representam o comportamento resiliente do solo no teor de umidade ótima e com variação $\pm 2\%$ em função das tensões confinante e desvio (Figuras 3a a 3e).



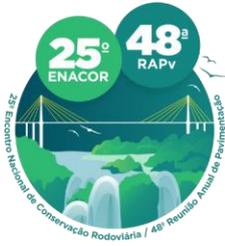
a) Gráfico tridimensional do modelo composto MR umidade 10,5% ($w_{ot} - 2\%$)

b) Gráfico tridimensional do modelo composto MR umidade 11,5% ($w_{ot} - 1\%$)



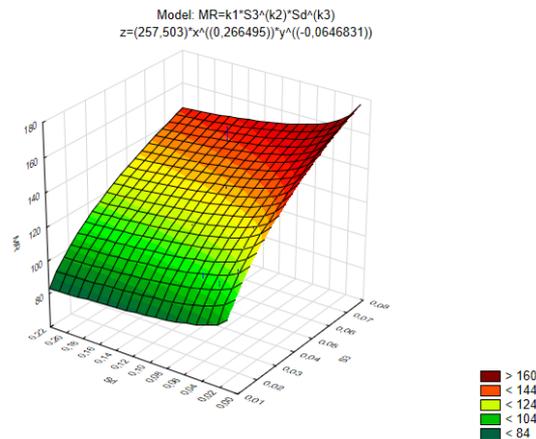
c) Gráfico tridimensional do modelo composto MR umidade 12,5% (w_{ot})

d) Gráfico tridimensional do modelo composto MR umidade 13,5% ($w_{ot} + 1\%$)



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



e) Gráfico tridimensional do modelo composto MR umidade 14,5% ($w_{ot} + 2\%$)

Figura 3. Modelo composto do MR em diferentes umidades.

A representação gráfica permite visualizar a variação não linear do módulo de resiliência, dada a superfície irregular obtida e evidencia a mudança no comportamento resiliente do solo frente às tensões atuantes, uma vez que, na umidade ótima, o valor de MR aumenta com o acréscimo da tensão desvio, embora em menor magnitude do que com a tensão confinante.

Prosseguiu-se a análise por meio da comparação entre os valores dos módulos de resiliência médios estimados para os diferentes teores de umidade de compactação. Na Tabela 5, constam a média do MR a qual foi calculada utilizando a abordagem da média aritmética dos valores obtidos. Essa média foi derivada dos resultados individuais do MR obtidos para cada combinação de tensão confinante e tensão de desvio no ETCR.

Na Figura 4, apresenta-se uma comparação entre os módulos resilientes médios dos solos em estudo considerando cada um dos teores de umidade avaliados. Destaca-se que nesse item optou-se por apresentar os módulos médios ao invés dos módulos típicos, em virtude das correlações a serem realizadas com outros trabalhos da literatura.

Tabela 5. Valores médios e taxa de variação do MR.

w%	MR (MPa)	Varição do MR em relação ao valor de referência (%)
10,5	203,504	14,35
11,5	184,901	4,5
12,5 (w_{ot})	177,953	-
13,5	138,981	-21,9
14,5	129,351	-27,31



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br

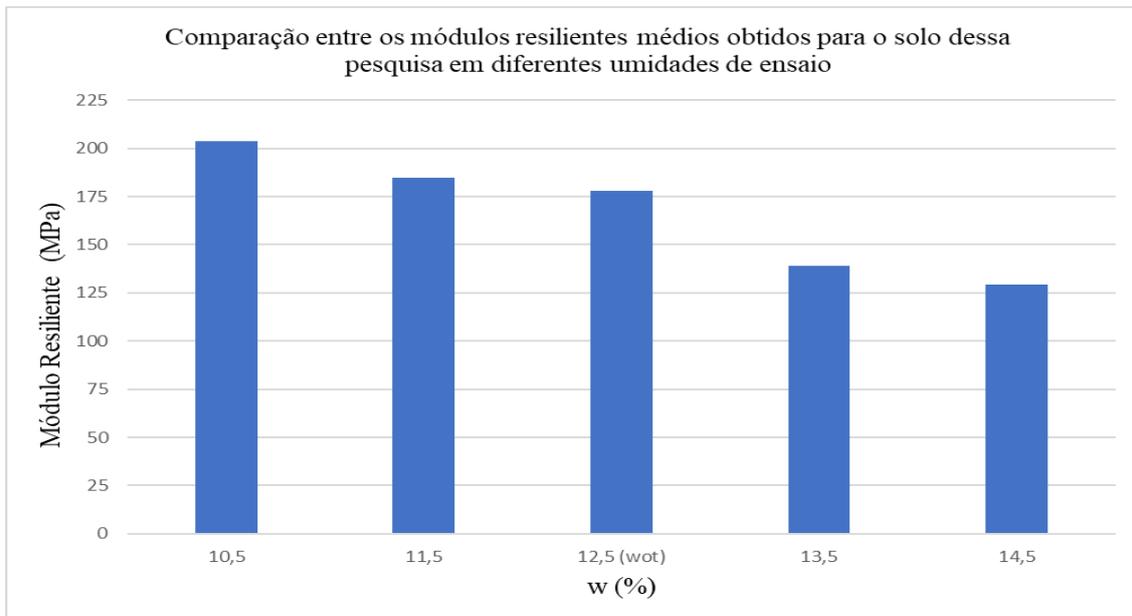


Figura 4. Comparação dos MR obtidos em diferentes umidades.

Ao comparar os efeitos da variação de umidade de compactação, tomando-se como referência o teor de umidade ótimo, verifica-se que para um decréscimo de 2% no teor de umidade ótimo resulta em acréscimos de 14,35% no módulo de resiliência. Em contrapartida, 2% acima do teor de umidade ótimo, notou-se uma redução na rigidez dos materiais da ordem de 27,31%. Ressalta-se que a variação do MR não reduz de forma proporcional, pois o acréscimo de 1% no teor de umidade de compactação reduziu em 21,9% o valor do MR. Esse resultado também indica a sensibilidade do MR em relação ao teor de umidade, em que um acréscimo de 1%, aumentou o MR em 4,5%.

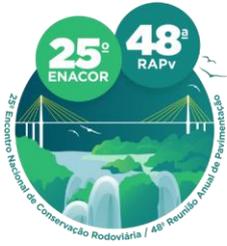
De maneira geral, os resultados apontam que as diferenças entre os teores de umidade em relação ao ótimo (w_{ot}) durante a compactação podem ter efeitos tanto positivos quanto negativos na rigidez dos solos. É importante ressaltar que, mesmo sendo favorável ao comportamento resiliente dos solos, a compactação abaixo do teor de umidade ótimo pode resultar em solos mais propensos à infiltração e ao fenômeno de expansão. Estes solos estão mais suscetíveis aos danos causados pela penetração da água em sua rigidez, ou seja, os impactos do umedecimento após a compactação.

CONCLUSÕES

Muitos aspectos influenciam no desempenho dos pavimentos e a compreensão dos efeitos das variações destes é importante para minimizar processos de degradação prematuros ou até mesmo promover maior tempo de vida útil ao pavimento.

O teor de umidade é um fator importante que influencia o comportamento do solo e, conseqüentemente, o módulo de resiliência do subleito do pavimento. Existe um teor de umidade ótimo para o solo, no qual o material apresenta a máxima densidade e um comportamento mecânico ideal. Nesse ponto, espera-se que o solo tenha um módulo de resiliência ótimo. Valores de teor de umidade acima ou abaixo do ótimo podem resultar em variações no módulo de resiliência.

No artigo, buscou-se avaliar a influência do teor de umidade em relação ao w_{ot} , seja para mais ou menos, no comportamento resiliente dos solos utilizados no subleito de pavimentos. Como o subleito é compactado na condição não saturada, as propriedades mecânicas do solo são afetadas pela sucção. Quando a quantidade de água diminui, a sucção aumenta e as forças de coesão entre as



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



partículas aumentam, levando a um aumento na rigidez do solo. Isso ocorre porque a sucção aumenta a tensão efetiva no solo, melhorando sua capacidade de resistir a deformações. Por outro lado, com aumento do teor de umidade, a presença de água lubrifica as partículas, reduzindo a aderência entre elas e diminuindo a rigidez do solo. Isso pode resultar em um módulo de resiliência menor.

Tendo em vista a predominância de solos porosos no Distrito Federal (DF), comumente os pavimentos possuem subleitos nesse tipo de solo. Entretanto, estudos sobre a deformabilidade dos solos do DF são escassos, principalmente no que se refere às variações em que estes podem se encontrar durante as diferentes fases de vida, indo desde a construção e operação até perda de serventia do pavimento.

Os resultados indicam a sensibilidade do módulo de resiliência em relação à variação do teor de umidade. Pequenos acréscimos do teor de umidade, conduziram à diminuição no MR. Os resultados também indicam que o acréscimo de teor de umidade em relação w_{ot} não aumentou o MR proporcionalmente.

Em resumo, o teor de umidade do solo de subleito do pavimento influencia o módulo de resiliência, sendo que no ramo seco da curva de compactação o módulo de resiliência tende a ser maior, enquanto que no ramo úmido o módulo de resiliência é menor, sendo a variação do MR maior neste ramo. Destaca-se assim a importância do controle de qualidade da execução das camadas e compactação do subleito, seja por desvios no teor de umidade na compactação da camada ou por infiltração durante a operação 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, em comparação com o previsto pelo dimensionamento.

Por fim, é importante destacar que este estudo ainda está em andamento, constituindo uma das etapas de dissertação da primeira autora junto à Universidade de Brasília (UnB), onde serão analisados outros tipos de solos por meio de ensaios de módulo de resiliência com variação na umidade após a compactação, bem como ensaios de sucção, deformação permanente em multiestágios e uma possível relação entre o MR e a classificação MCT, a fim de obter uma compreensão mais aprofundada do comportamento mecânico x teor de umidade de solos do Distrito Federal.

AGRADECIMENTOS

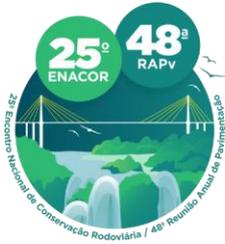
Ao DER/DF pelo apoio na pesquisa, especialmente aos técnicos/colaboradores da Diretoria de Estudos Tecnológicos/Superintendência Técnica (DITEC/SUTEC) do órgão, sempre dispostos para a realização dos ensaios. À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro ao desenvolvimento desta pesquisa. À Universidade de Brasília (UnB) pelos conhecimentos técnicos-científicos oportunizados por meio do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia (PPGG).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). NBR 6459. Solo – Determinação do Limite de Liquidez. Rio de Janeiro, RJ.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). NBR 7180. Solo – Determinação do Limite de Plasticidade. Rio de Janeiro, RJ.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2018). NBR 7181 – Solo – Análise Granulométrica. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ.



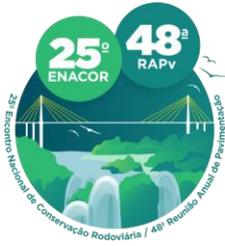
19 a 22 de Setembro de 2023

Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



- Balbo, J. T. (2007). Pavimentação asfáltica: materiais, projetos e restauração. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 558p.
- Bastos, J. B. S. (2013). Influência da variação de umidade no comportamento de pavimentos da região metropolitana de Fortaleza. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, 164p.
- Bernucci, L. L. B., & Balduzzi, F. (1995). Considerações sobre o dimensionamento de pavimentos utilizando solos lateríticos para rodovias de baixo volume de tráfego.
- Ceratti, A. J., Gehling, W. Y. Y., & Núñez, W. P. (2004). Variações sazonais do módulo de resiliência de um subleito no sul do Brasil. Registro de Pesquisa de Transporte, 1874 (1), 165-173.
- 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 (1994). DNER-ME 093 – Solos – determinação da densidade real. Departamento Nacional de Estradas e Rodagem. Método de ensaio.
- DNER (1994). DNER-ME 129 – Solos – compactação utilizando amostras não trabalhadas. Método de Ensaio. Departamento Nacional de Estradas e Rodagem. DNER/DrDTc (IPR).
- DNER (1994). DNER-ME 256/94 – Solos – compactados com equipamento miniatura – Determinação da perda de massa por imersão. DNER/DrDTc (IPR).
- DNER (1994). DNER-ME 258/94 - Solos compactados em equipamento miniatura – Mini-MCV. Departamento Nacional de Estradas e Rodagem. Classificação. Método de Ensaio. DNER/DrDTc (IPR).
- DNER (1996). DNER-ME 259/94 - Classificação dos Solos Tropicais para finalidades rodoviárias utilizando corpos-de-prova compactados em miniatura. Departamento Nacional de Estradas e Rodagem. Classificação. DNER/DrDTc (IPR).
- 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.
- Freitas, J. B.; Rezende, L. R.; Gitirana Jr., G. F. N. (2020). Prediction of the resilient modulus of two tropical subgrade soils considering unsaturated conditions. Engineering Geology, vol. 270, 2020. DOI: [10.1016/j.enggeo.2020.105580](https://doi.org/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.
- 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.
- GOOGLE EARTH (2022). Disponível em: <<http://www.earth.google.com/>>. Acessado em: 25/05/2023.
- 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 (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre, 166p
- Kern, C., Gehling, W. Y. Y., & Núñez, W. P. (2021). Analysis of the resilience modulus of a subgrade soil front of humidity variations. In MATEC Web of Conferences (Vol. 337, p. 03013). EDP Sciences.
- Khoury, N. N., Musharraf, Z. M., Nevels, J. B., & Mann, J. (2003). Effect of soil suction on resilient modulus of subgrade soil using the filter paper technique. In 82nd Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, DC.
- Lekarp, F., Isacsson, U., & Dawson, A. (2000). State of the art. II: Permanent strain response of unbound aggregates. *Journal of transportation engineering*, 126(1), 76-83.



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



- Li, D., & Selig, E. T. (1994). Resilient modulus for fine-grained subgrade soils. *Journal of geotechnical engineering*, 120(6), 939-957.
- 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. NBR, A. (2016). 7182: Solo-Ensaio de compactação. Rio de Janeiro.
- Lima, C. D. A., Motta, L. M. G., Guimarães, A. C. R., & Aragão, F. T. S. (2018). Contribution to the study of Brazilian tropical soils as pavement materials. In *Proceedings of the 13th Conference on Asphalt Pavements-ISAP*.
- Lima, L. B. F.; Melo, K. P.; Silva, J. P. S; Rezende, L. R. (2022). Comparação entre metodologias de compactação para um solo granular laterítico: Proctor versus cilindro tripartido usado nos ensaios mecânicos. 36º Congresso de Pesquisa e Ensino em transportes – ANPET. Fortaleza-CE
- Parreira, A. B., & Gonçalves, R. F. (2000). The influence of moisture content and soil suction on the resilient modulus of a lateritic subgrade soil. In *ISRM International Symposium (pp. ISRM-IS)*. ISRM.
- Pezo, R. F., Claros, G., & Hudson, W. R. (1992). An Efficient Resilient Modulus Testing Procedure for Subgrade and Subbase Material. In *71st Annual Meeting of the Transportation Research Board*, Washington, DC.
- Salour, F. (2015). Influência da umidade no comportamento estrutural de pavimentos: Investigações de campo e de laboratório (dissertação de doutorado, KTH Royal Institute of Technology).
- Salour, F., Erlingsson, S., & Zapata, C. E. (2014). Modelling resilient modulus seasonal variation of silty sand subgrade soils with matric suction control. *Canadian Geotechnical Journal*, 51(12), 1413-1422.
- 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 (Doctoral dissertation), Universidade Federal de Santa Maria.
- Sawangsurriya, A., Edil, T. B.; & Bosscher, P. J. (2009). Relação módulo-sucção-umidade para solos compactados em estado pós-compactação. *Jornal de engenharia geotécnica e geoambiental*, 135 (10), 1390-1403.
- Takeda, M. D. (2006). A influência da variação da umidade pós-compactação no comportamento mecânico de solos de rodovias do interior paulista (Doctoral dissertation, Dissertação (Mestrado)–Escola de Engenharia de São Carlos–Universidade de São Paulo–São Paulo).
- 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.
- 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.