



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

INFLUÊNCIA DA UMIDADE DE COMPACTAÇÃO NO COMPORTAMENTO RESILIENTE DE TRÊS MATERIAIS GRANULARES NÃO LATERÍTICOS

Nádgyla Layana Tófolo Silva¹; Raquel Silva Ramos¹; Jaime Pinheiro Campos Sobrinho¹; Lucas Araújo da Silva¹; Mário Sérgio de Souza Almeida¹ & Weiner Gustavo Silva Costa¹

RESUMO

O conceito de resiliência em materiais refere-se à capacidade de retornar à sua forma original após sofrer deformações elásticas decorrentes de influências externas. Esta capacidade pode ser impactada por diversos fatores, incluindo a umidade, que pode afetar diretamente a rigidez do material. Diante desse contexto, torna-se relevante compreender como as variações de umidade podem influenciar na durabilidade de pavimentos. Neste estudo, objetivou-se avaliar o efeito da variação da umidade de compactação sobre o comportamento resiliente de três solos tropicais de granulação grossa, não lateríticos, coletados no leito da BR 030, no município de Boa Nova, Bahia. Como na fase de construção dos pavimentos admite-se uma variação da umidade de compactação, em relação ao teor de umidade ótimo obtido em laboratório, a análise realizada busca avaliar os impactos dessa variação na rigidez de cada solo, representada pelo módulo de resiliência (MR). De posse dos valores de MR dos solos ensaiados em diferentes umidades foi possível realizar análises tensão-deformação e estimar a variação de vida útil de um pavimento de referência idealizado. Os resultados indicam que a variação de umidade de compactação promove variação na rigidez do material e, conseqüentemente, na expectativa de vida útil de pavimentos asfálticos flexíveis. Em suma, este trabalho reforça a importância de um controle rigoroso de compactação durante a construção de pavimentos, visando prolongar a vida útil das rodovias e o desenvolvimento de pavimentos mais resistentes e duráveis, beneficiando a infraestrutura rodoviária e reduzindo custos de manutenção a longo prazo.

PALAVRAS-CHAVE: Solos tropicais; G-MCT; Pavimentação.

ABSTRACT

The concept of resilience in materials refers to the ability to return to their original shape after undergoing elastic deformations due to external influences. This ability can be impacted by various factors, including humidity, which can directly affect the stiffness of the material. In this context, it becomes relevant to understand how variations in humidity can influence the durability of pavements. This study aimed to evaluate the effect of compaction moisture variation on the resilient behavior of three coarse-grained tropical soils, non-lateritic, collected from the bed of BR 030, in the municipality of Boa Nova, Bahia. Since a variation in compaction moisture is allowed during the pavement construction phase, relative to the optimal moisture content obtained in the laboratory, the analysis conducted seeks to assess the impacts of this variation on the stiffness of each soil, represented by the resilient modulus (MR). With the MR values of the soils tested at different moisture levels, it was possible to perform stress-strain analyses and estimate the variation in the service life of an idealized reference pavement. The results indicate that the variation in compaction moisture promotes changes in the material's stiffness and, consequently, in the expected service life of flexible asphalt pavements. In summary, this work reinforces the importance of strict compaction control during pavement construction, aiming to prolong the service life of roadways and develop more resistant and durable pavements, benefiting road infrastructure and reducing long-term maintenance costs.

KEYWORDS: Tropical soils; G-MCT; Pavement.

¹ Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, tofolo.nadgyla@hotmail.com; raquelsilvamos855@gmail.com; jaimecampos8811@gmail.com; lucas_araujo1999@hotmail.com; mario.almeida@ufrb.edu.br; weiner@ufrb.edu.br.



INTRODUÇÃO

A investigação sobre o Módulo de Resiliência (MR) é de fundamental importância, pois fornece uma análise minuciosa das propriedades mecânicas do pavimento. Para tanto, utiliza-se um carregamento vertical cíclico, que simula a resposta a carregamentos repetitivos aos quais os pavimentos são submetidos (LEVAY, 2023).

Conforme Bastos (2013), o comportamento resiliente de materiais granulares pode ser diretamente afetado por diversos fatores, como a umidade e o clima. Durante o período de construção dos pavimentos, suas camadas, incluindo a do subleito, podem apresentar desvios no teor umidade, o que pode influenciar diretamente o comportamento mecânico dos materiais. Desta forma, para garantir a qualidade da execução, são definidos os parâmetros de controle em que são estipuladas tolerâncias em relação ao teor de umidade ótimo. Essas observações mostram a importância de manter a umidade ótima do material dentro dos limites estabelecidos durante o processo de construção dos pavimentos, a fim de garantir sua durabilidade e desempenho adequados. Além disso, segundo Kern (2017) a granulometria e o grau de compactação são fatores que também podem interferir na qualidade do pavimento.

Nesse contexto, é válido observar que os processos geológicos e pedológicos que ocorrem nas zonas tropicais têm um impacto significativo nas propriedades e comportamento mecânico dos solos, resultando em características distintas em comparação com os solos de regiões não tropicais. A classificação de um solo como tropical não depende apenas de sua formação em áreas tropicais ou de clima úmido tropical, mas também de peculiaridades geotécnicas específicas (TAKEDA, 2006).

De acordo com Nogami e Villibor (1995) citado por Santos (2006), os solos lateríticos são uma tipologia de solos superficiais pedogenéticos, comumente encontrados em regiões tropicais úmidas de áreas bem drenadas. Uma das principais diferenças fundamentais entre os solos lateríticos e não lateríticos reside na estabilidade dos agregados argilosos diante das variações do teor de umidade (FREITAS *et al.*, 2020). Estes autores identificaram, em pesquisas realizadas, valores de MR significativamente maiores, mas o comportamento resiliente mais sensível a variações no teor de umidade quando comparado aos solos não lateríticos.

Considerando estes aspectos, o presente trabalho visa avaliar como a variação da umidade de compactação afeta o comportamento resiliente de três solos tropicais não lateríticos, a partir de ensaios de módulo de resiliência. Dessa forma, pretende-se facilitar a implementação de práticas de engenharia que garantam a longevidade e eficiência das estruturas de pavimento.

MATERIAL E MÉTODOS

O material a ser estudado foi coletado em um trecho não pavimentado da BR-030, no município de Boa Nova, Bahia, localizado em uma região de granulitos indiferenciados e coberturas detrito-lateríticas, onde as coordenadas de início e fim são $-14^{\circ}22'59''$ S, $-40^{\circ}11'31''$ O e $-14^{\circ}23'6''$ S, $-40^{\circ}11'13''$ O. As amostras do solo fazem parte do revestimento primário da rodovia e foram retiradas do leito em profundidades entre 0 e 60 cm da superfície (Figura 1), totalizando cerca de 120 kg de cada material. As amostras foram identificadas como Solo 1, 2 e 3.



Figura 1. Coleta dos solos.

Caracterização dos Solos

No que tange ao estudo de análise comportamental do solo, se faz necessário a realização de ensaios para caracterizá-lo. Assim, o primeiro passo no processo consistiu no quarteamento das amostras com o intuito de dividi-las em partes representativas e homogêneas. Por conseguinte, foram realizados diversos ensaios conforme normas específicas para avaliar as características dos materiais.

A distribuição granulométrica foi determinada conforme NBR 7181 (2016), limites de consistência, de acordo com o ME DNER 82 (DNER, 1994c) e ME DNER 122 (DNER, 1994e) e determinação da massa específica dos grãos de acordo com a NBR 6458 (ABNT, 2016).

Os materiais também foram classificados segundo o Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS) e a classificação AASHTO.

Classificação pela Metodologia MCT e G-MCT

Foi realizada a classificação para solos tropicais de granulação grossa (G-MCT), para finalidades rodoviárias, com base nos grupos “tipo granulométricos” e na metodologia MCT (Miniatura, Compactado, Tropical) segundo a norma DNIT 444/2023 – CLA (DNIT, 2023c). Se a porcentagem retida na peneira de abertura 2,0 mm for maior do que 10 %, prossegue-se com a classificação em um dos grupos de classificação G-MCT e, se for menor, segue-se com a classificação MCT, conforme norma DNIT 259 – CLA (DNIT, 2023a).

A classificação pela metodologia MTC é realizada por meio dos ensaios de Compactação mini-MCV e a Perda de Massa por Imersão (PI), em conformidade com a norma DNIT 258 (DNIT, 2023a) (Figura 2).

Após esse ensaio, a classificação dos materiais granulares foi realizada pelo método G-MCT, conforme a norma DNIT 444/2023 – CLA (DNIT, 2023c). Este processo envolve a análise do percentual de materiais que passam pelas peneiras de 2 mm e 0,075 mm.

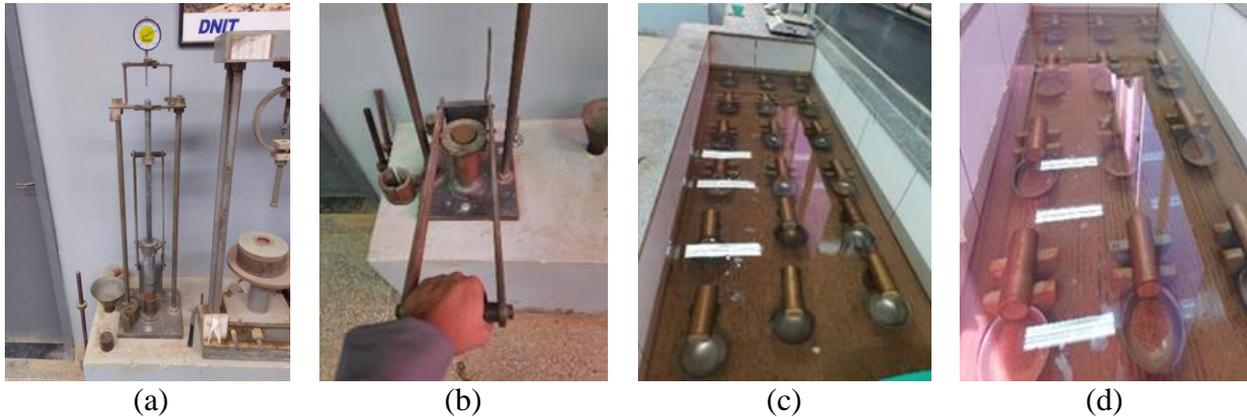


Figura 12. Procedimento experimental da metodologia MCT: (a) Compactação; (b) extrusão do corpo de prova (CP) do molde; (c) CP imersos em água; (d) CP após imersão em água (SANTOS *et al.*, 2022).

Preparação e Compactação dos Materiais

Para avaliação do comportamento mecânico desses materiais quando compactados, foi realizado o ensaio de compactação, compreendendo a seleção e preparação de cinco amostras de 4 kg de cada material, conforme a norma ME DNIT 443 (DNIT, 2023b). Estas amostras foram umedecidas com diferentes teores de umidade. Cada porção do solo foi então compactada em um cilindro tripartido de 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura, na energia de Proctor intermediária.

Ensaio de Módulo de Resiliência

O comportamento mecânico dos solos foi avaliado por intermédio do ensaio de Módulo de Resiliência (MR), conforme as diretrizes estabelecidas pela ME DNIT 134 (DNIT, 2018), os materiais previamente compactados foram submetidos a séries de pares de combinações de tensões aplicadas. Os corpos de prova da curva de compactação tiveram o ensaio iniciado pela fase de condicionamento feito apenas com o primeiro par de tensões ($\sigma_3 = 0,07$ MPa e $\sigma_d = 0,07$ MPa), aplicando 500 repetições para materiais de subleito como proposto pela norma ME DNIT 134 (DNIT, 2018). Em seguida foi determinado o MR aplicando a sequência de tensões para determinação do módulo de resiliência para materiais de subleito como proposto pela norma ME DNIT 134 (DNIT, 2018). Essas tensões foram aplicadas a uma frequência de 1 Hz, que consiste em um pulso de carga de 0,1 segundo, seguido por um intervalo de repouso de 0,9 segundo (equivalente a 60 ciclos por minuto).

Ao término do ensaio, o corpo de prova foi pesado, e então colocado em uma estufa com temperatura controlada em torno de 110 °C, por um período de 48 horas.

Foi avaliado o efeito da umidade de compactação no comportamento resiliente dos solos. Os ensaios de Módulo de Resiliência (MR) foram realizados nos 3 materiais conforme a norma ME DNIT 134 (DNIT, 2018). Cada corpo de prova compactado para determinação da curva de compactação no cilindro tripartido de 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura foi ensaiado na sua respectiva umidade de compactação.

A relação entre a tensão (σ_d) e a deformação resiliente (ϵ_r) determina o módulo de resiliência para cada par de tensões aplicada, conforme a Equação 1.



$$MR = \frac{\sigma_d}{\epsilon_r} \quad (1)$$

De posse dos MR calculados, para diferentes pares de tensões testados foi possível determinar as constantes de k_1 , k_2 e k_3 do modelo de variação do módulo de resiliência, de acordo com a equação 2 con.

$$MR = k_1 \sigma_3^{k_2} \sigma_d^{k_3} \quad (2)$$

Em que:

MR: módulo de resiliência [MPa];

k_1 , k_2 e k_3 : coeficientes de regressão constantes;

σ_3 : tensão confinante [MPa];

σ_d : tensão desvio [MPa].

Análise Mecanicista de um Pavimento de Referência

Para avaliar a consequência da variação de rigidez causada pela compactação de cada solo em teores de umidade distintos do teor de umidade ótimo de cada solo, realizou-se análises tensão-deformação para avaliação estrutural de um pavimento de referência (Figura 3a). Estas análises tensão-deformação foram realizadas no software Análise Elástica de Múltiplas Camadas (AEMC), sub-rotina do Método Nacional de Dimensionamento de pavimentos asfálticos (MeDiNa), para os diferentes solos quando utilizados como camada de base. Nas análises realizadas no AEMC a interface entre as camadas do pavimento foi considerada como aderida e os módulos foram utilizados com variação não linear e, conseqüentemente, foram adotadas as respectivas constantes de regressão determinadas a partir dos ensaios de MR (Equação 2) para cada solo e cada condição de umidade.

Nestas análises aplicou-se uma pressão de pneu de 0,56 MPa em um raio de atuação de 10,8 cm (representando a carga de uma roda do eixo padrão de 80 kN, ou 8,2 t), para obtenção dos valores de: (i) deslocamento vertical no topo do revestimento (D); (ii) deformação horizontal de tração na fibra inferior do revestimento (ϵ_t); (iii) deformação vertical no topo do subleito (ϵ_v). Todas as análises foram realizadas entre as duas rodas e sob a roda do semi-eixo padrão, ou seja, nos pontos A, B, D, E, F e G da Figura 3b, respectivamente. Em todas as análises, a resposta elástica mais crítica (embaixo da roda ou entre as rodas) foi levada em consideração para a avaliação do comportamento do pavimento.

Após a realização da análise estrutural, foi calculado o número equivalente de operações de eixo simples de rodas duplas de 8,2 t acumulado máximo (N_{adm}), o qual o pavimento é capaz de suportar (N_{tr} , N_{ir} e N_{sub}). Foram utilizadas as equações 3 a 5 (DER-SP, 2006) e os valores de k e n , conforme Tabela 1. É importante ressaltar que, das equações apresentadas na Tabela 1, a Equação 4 faz referência aos fatores de equivalência de carga (FEC) da AASHTO, para a determinação do N_{adm} , e as Equações 3 e 5 fazem referência aos FEC da USACE.

Os valores de MR e coeficiente de Poisson das camadas de revestimento, sub-base e subleito foram os mesmos adotados por Carvalho *et al.* (2020) e estão apresentados na Tabela 2.

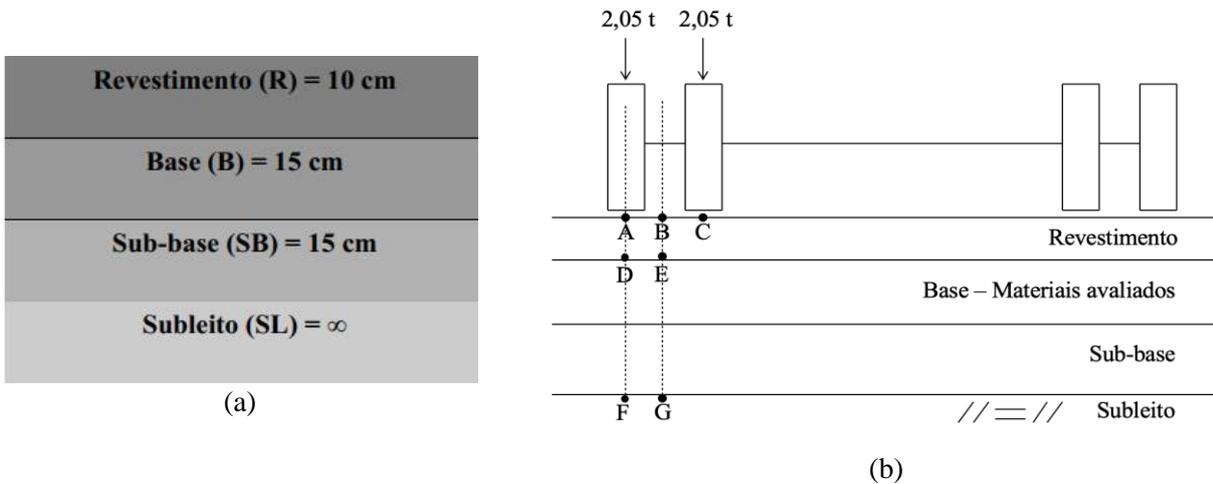


Figura 3. (a) Pavimento de Referência (adaptado de Carvalho et al., 2020); e (b) Pontos de aplicação de carga e determinação das respostas elásticas.

Tabela 1. Equações e parâmetros utilizados para o cálculo do número Nadm (N_{tr} , N_{ir} e N_{sub})

Local de Análise	Equação	k	n	Autoria
Topo do revestimento Equação 3	$N_{tr} = \sqrt[n]{\frac{10^k}{D}}$	3,01	0,176	DNER PRO 11 (DNER, 1979)
Fibra inferior do revestimento Equação 4	$N_{ir} = k \times \left(\frac{1}{\epsilon_t}\right)^n$	$1,092 \times 10^{-6}$	3,512	FHWA (1976)
Topo do subleito Equação 5	$N_{sub} = k \times \left(\frac{1}{\epsilon_v}\right)^n$	$6,069 \times 10^{-10}$	4,762	Dormon e Metcalf (1965)

Fonte: DER-SP (2006)

Em que:

N_{tr} : N_{adm} para o topo do revestimento a ser comparado com o N_{USACE} ;

N_{ir} : N_{adm} para a fibra inferior do revestimento a ser comparado com o N_{AASHTO} ;

N_{sub} : N_{adm} para o topo do subleito a ser comparado com o N_{USACE} ;

D: deslocamento vertical/deflexão (mm) no topo do revestimento;

ϵ_t : deformação específica horizontal de tração para a camada de revestimento;

ϵ_v : deformação específica vertical de compressão no topo do subleito;

k e n: coeficientes determinados por regressões lineares, particulares para cada tipo de mistura asfáltica, e modificados para refletir o desempenho no campo.

Tabela 2. Valores de MR e ν das camadas (CARVALHO et al., 2020).

Camada	MR (MPa)	ν
Revestimento	3500	0,30
Sub-base	225	0,35
Subleito	132	0,40



RESULTADOS E DISCUSSÃO

Caracterização dos Solos

Os resultados apresentados na Tabela 3 referem-se às características físicas e à classificação dos solos, evidenciando semelhanças e diferenças entre os três furos analisados. Observa-se um maior teor de pedregulho do Solo 1, de finos no Solo 2 e de plasticidade do Solo 3. Há variação significativa no índice de plasticidade e granulometria, indicando diferentes comportamentos do solo.

Tabela 3. Características físicas e classificação das amostras de solos.

Características e Classificação	Solo 1	Solo 2	Solo 3
Argila (%)	5,0	15,6	14,7
Silte (%)	11,4	15,9	12,0
Areia (%) Fina	13,4	16,0	15,2
Média	12,3	11,4	11,4
Grossa	14,0	24,3	20,7
Pedregulho (%)	44,0	16,9	25,9
Limite de liquidez (%)	22	26	30
Limite de plasticidade (%)	17	21	17
Índice de plasticidade (%)	5	5	13
Massa específica dos sólidos (g/cm ³)	2,63	2,67	2,66
w _{ót} (%)	7,19	10,55	6,65
ρ _{dmáx} (g/cm ³)	2,146	2,030	2,200
Classificação AASHTO	A-1-b (0)	A-2-4 (0)	A-2-6 (0)
Classificação SUCS	SC-SM	SC-SM	SC

O elevado teor de pedregulho sugere que o Solo 1, com menor índice de plasticidade e baixo teor de argila, é menos coeso. O Solo 3 tem uma maior tendência à plasticidade devido ao teor de argila. O Solo 2 apresentou comportamento intermediário entre os outros dois materiais.

Essas diferenças na composição granulométrica e nas propriedades físicas dos solos afetam diretamente sua classificação. Pela classificação AASHTO, as amostras foram classificadas como A-1-b, A-2-4 e A-2-6, que indicam materiais granulares com a presença de pedregulhos, areia siltosa ou argilosa. Já pela classificação SUCS, o Solo 1 e o Solo 2 são classificados como SC-SM, uma mistura de areia e silte com argila; e o Solo 3 é SC, caracterizando uma composição predominantemente de areia argilosa.

Com relação aos parâmetros ótimos de compactação o maior valor de umidade ótima foi observado para o Solo 2, que é o material com maior teor de finos (silte e argila). A maior massa específica seca máxima foi observada para o Solo 3. O Solo 1 é o material com maior teor de material retido na peneira de abertura 2 mm (pedregulho).

Classificação do solo por MCT e G-MCT

Os resultados da classificação G-MCT estão apresentados na Tabela 4. É possível concluir que, conforme o ensaio MCT, todos os três solos estudados se classificam como arenosos não lateríticos (NA'). Este grupo inclui areias quartzosas que possuem finos, mas com comportamento não laterítico, com a possibilidade de conter mica na fração areia. Os solos apresentaram um coeficiente de argilosidade c' médio, indicando um equilíbrio entre a presença de argila e outros componentes



granulométricos (VILIBOR e ALVES, 2019).

Além disso, a análise da fração granular grosseira pelo método G-MCT apresentou variações significativas nos três solos estudados. O Solo 1 e o Solo 3 foram classificados como um material classificado como solo com pedregulho (Sp), enquanto o Solo 2 foi classificado como granular com finos (Gf). Essa diversidade na composição granulométrica sugere diferenças nas propriedades mecânicas e comportamentais dos solos.

Tabela 4. Classificação das amostras conforme MCT e G-MCT.

Amostra	Classificação MCT	Classificação G-MCT
Solo 1	NA'	Sp
Solo 2	NA'	Gf
Solo 3	NA'	Sp

Módulo de Resiliência

A relação entre a MR médio e a massa específica seca *versus* a umidade das duas misturas, bem como do solo puro, são mostradas na Figura 5a. Na Figura 5b a variação do MR médio em função do desvio da umidade ótima. Para o Solo 2 (SC-SM, A-2-4 e Gf-NA') observa-se comportamento de variação do MR semelhante ao comportamento da massa específica seca na curva de compactação com um valor de MR máximo próximo da umidade ótima. Para o Solo 1 (SC-SM, A-1-b e Sp-NA'), o comportamento foi semelhante, mas com um valor de MR máximo para umidade cerca de 1,6% abaixo da ótima. Já para o Solo 3 (SC, A-2-6 e Sp-NA'), houve um aumento do MR médio com o decréscimo no teor de umidade de compactação. Esse comportamento mostra a importância do controle de compactação frente ao comportamento tensão-deformação destes materiais quando utilizados com camadas de pavimentos.

Ressalta-se que pontos no ramo úmido ou seco que não foram ensaiados se deve ao fato de o material não suportar o ensaio visto que a DNIT 134 recomenda que durante o condicionamento, ou em qualquer outra fase do ensaio, se for alcançada uma deformação permanente acumulada igual ou maior que 5% da altura do corpo de prova, o ensaio deve ser interrompido e o resultado desconsiderado.

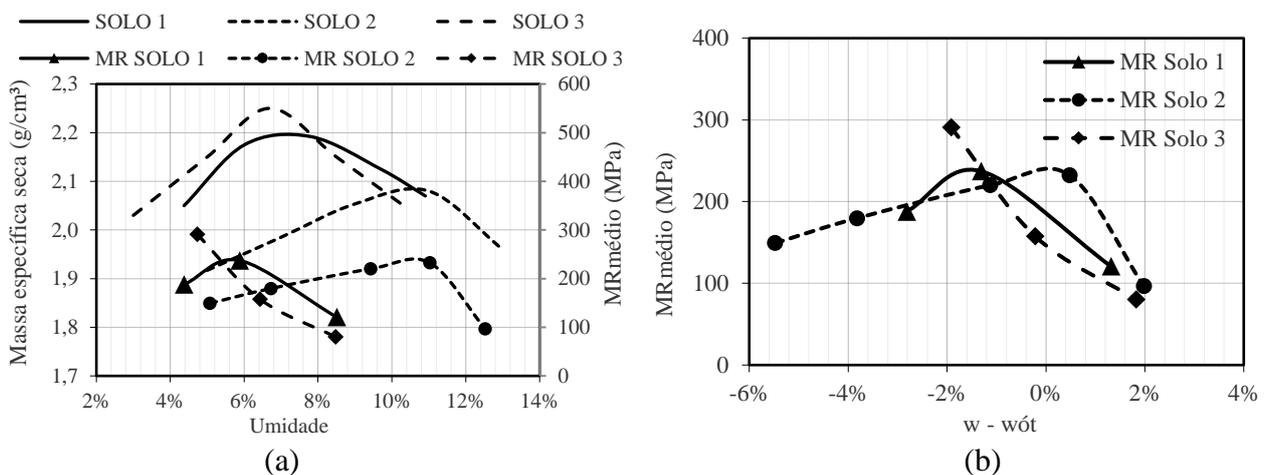


Figura 5. (a) Relação entre a MR e a massa específica seca versus a umidade e curvas de compactação; e (b) Relação entre a MR e o desvio da umidade ótima.



Na Figura 6 são apresentados resultados de MR para diferentes umidades de compactação em função da tensão confinante e tensão desvio. Para o Solo 1 observa-se que com a elevação da umidade de compactação, uma variação da dependência do MR em relação às tensões desvio (σ_d) e uma maior variação do MR com a tensão confinante (σ_3). Já para o Solo 2 ocorre uma maior variação do MR com as tensões desvio (σ_d) com um comportamento semelhante entre os ensaios com umidades diferentes. Isso pode ser explicado pelo maior teor de finos desse material em relação aos demais. Estes comportamentos também podem ser observados a partir da Tabela 5.

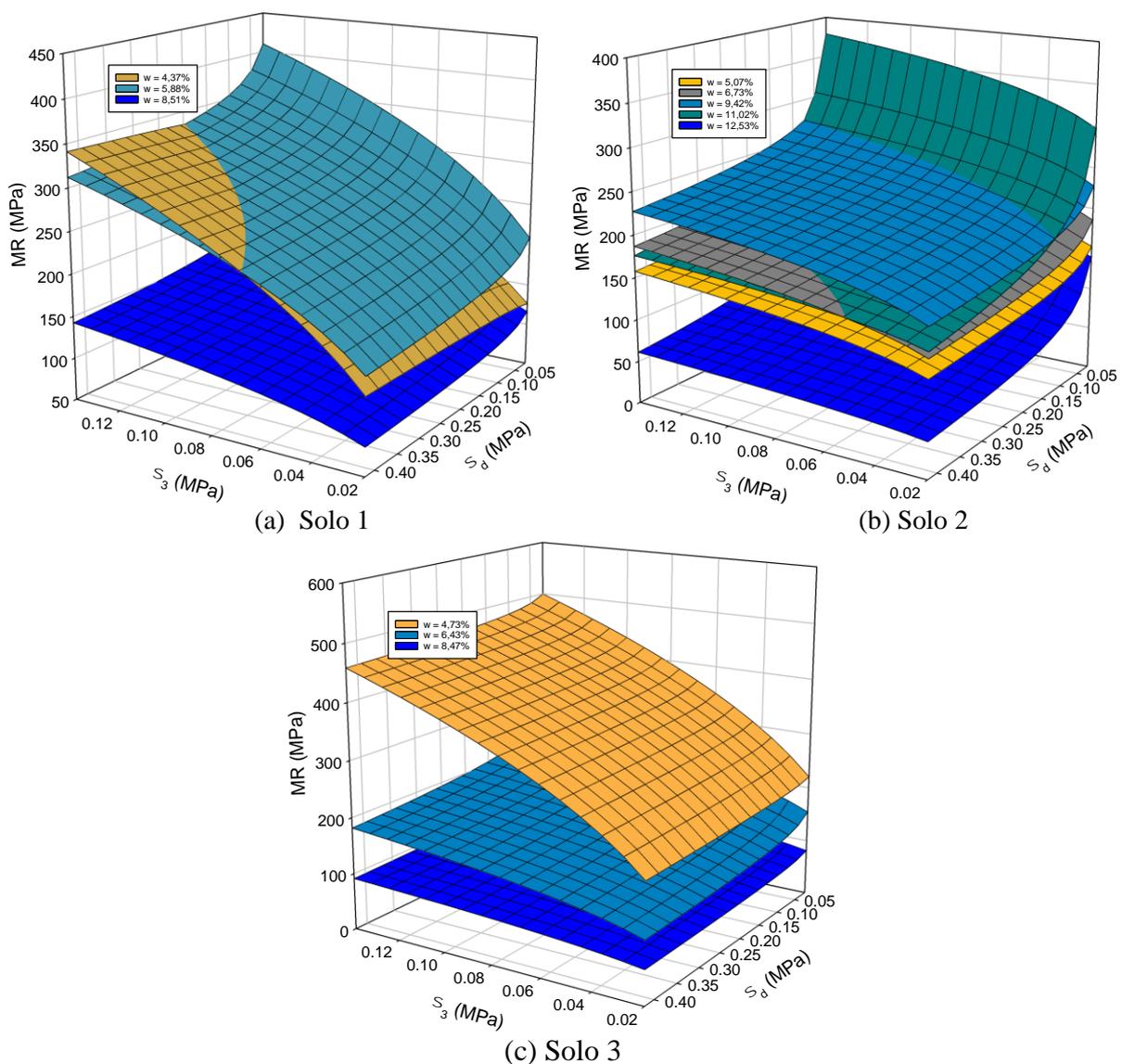


Figura 6. MR x tensões desvio e confinante para diferentes umidades de compactação de cada Solo.

Para o Solo 3 o que é mais nítido é a elevada redução do MR do ramo seco para o ramo úmido da curva de compactação.

Outro ponto importante que pode ser notado é com relação ao grau de compactação dos corpos de prova. O caso do Solo 1, por exemplo, mostra que mesmo com um elevado grau de compactação uma



umidade cerca de 1 % acima da ótima leva a redução do $MR_{\text{médio}}$ a metade de um ponto cerca de 1% abaixo da ótima.

Tabela 5. Ajuste do modelo combinado de MR para os solos.

	Umidade (%)	GC (%)	$MR_{\text{médio}}$ (MPa)	k_1	k_2	k_3	R^2
Solo 1	4,37	93,2	187,77	875,81	0,468	0,027	0,99
	5,88	98,9	237,24	570,63	0,347	-0,090	0,98
	8,51	98,9	120,69	223,92	0,280	-0,112	0,93
Solo 2	5,07	91,9	149,27	207,17	0,189	-0,111	0,55
	6,73	94,5	179,65	242,01	0,183	-0,115	0,58
	9,42	99,1	219,99	286,49	0,165	-0,106	0,62
	11,02	99,8	232,33	180,25	0,124	-0,252	0,93
	12,53	95,4	96,50	63,52	0,196	-0,397	0,93
Solo 3	4,73	93,7	290,78	1022,11	0,420	-0,038	0,99
	6,43	99,9	157,74	277,79	0,268	-0,118	0,93
	8,47	95,1	80,166	127,45	0,214	-0,098	0,95

Para os casos dos corpos de prova com R^2 mais baixos do Solo 2 o que se observou foi que o MR não sofre influência das tensões confinante e desvio, oscilando em torno de um valor médio.

Estimativa de vida útil do pavimento de referência

A Tabela 6 apresenta os resultados obtidos nas simulações realizadas no software AEMC, para o cálculo da deflexão (D) no topo do revestimento, das deformações de tração na fibra inferior do revestimento em concreto asfáltico (ϵ_t) e vertical no topo do subleito (ϵ_v) e das solicitações admissíveis utilizando as equações listadas na Tabela 1. Cabe ressaltar que para cada solo utilizou-se no AEMC seu comportamento não linear caracterizado nos ensaios de MR em cada condição de umidade, utilizando valores de k_1 , k_2 e k_3 obtidos experimentalmente (Tabela 5).

Tabela 6. Pavimento de referência: Resultado da análise tensão-deformação dos subleitos.

Solo	w (%)	D (10^{-2} mm)	ϵ_t (10^{-4})	ϵ_v (10^{-4})	N_{tr}	N_{ir}	N_{sub}
Solo 1	4,37	39,8	2,71	3,79	$1,03 \times 10^8$	$3,68 \times 10^6$	$1,19 \times 10^7$
	5,88	38,0	2,52	3,76	$1,34 \times 10^8$	$4,75 \times 10^6$	$2,24 \times 10^7$
	8,51	42,8	2,98	3,81	$6,80 \times 10^8$	$2,63 \times 10^6$	$1,16 \times 10^7$
Solo 2	9,43	37,7	2,47	3,75	$1,40 \times 10^8$	$5,09 \times 10^6$	$1,25 \times 10^7$
	11,02	37,5	2,47	3,74	$1,44 \times 10^8$	$5,09 \times 10^6$	$1,27 \times 10^7$
	12,53	46,1	3,23	3,78	$4,46 \times 10^7$	$1,99 \times 10^6$	$1,21 \times 10^7$
Solo 3	4,73	37,6	1,64	1,64	$1,42 \times 10^8$	$2,15 \times 10^6$	$6,43 \times 10^8$
	6,43	40,5	2,77	3,80	$9,31 \times 10^7$	$3,41 \times 10^6$	$1,18 \times 10^7$
	8,47	46,6	3,26	3,77	$4,20 \times 10^7$	$1,90 \times 10^6$	$1,22 \times 10^7$

A partir dos resultados apresentados na Tabela 6, obtidos das análises tensão-deformação do pavimento de referência, observa-se que os três solos avaliados, o N_{adm} (N_{tr} , N_{ir} , N_{sub}) sofreu variação



com a alteração da umidade de compactação. Considerando-se que em pavimentos asfálticos flexíveis a deformação de tração na fibra inferior do revestimento (ϵ_t) é a resposta elástica que proporciona os maiores impactos na expectativa de vida útil, no Solo 1, de umidade ótima de 7,19% (Tabela 3) duas umidades ensaiadas ficaram 1,31% abaixo e 1,32% acima da ótima, culminando com o maior valor de Nir para a umidade abaixo da ótima ($4,75 \times 10^6$), com redução de 45% deste parâmetro na umidade acima da ótima ($2,63 \times 10^6$).

O Solo 2, cuja umidade ótima é de 10,55% (Tabela 3), apresentou grande variação de ϵ_t quando compactado em diferentes umidades, com $2,47 \times 10^{-4}$, nas umidades, cerca de 0,5% acima e 1% abaixo da ótima (11,02% e 9,43%), para $3,23 \times 10^{-4}$ na umidade cerca de 2% acima da ótima (12,53%). Dessa forma, o Nir estimado deste solo variou de $5,09 \times 10^6$ para $1,99 \times 10^6$, respectivamente, correspondendo a uma redução de aproximadamente de 61%.

Por fim, o Solo 3, de umidade ótima de 6,65%, foi o único em que um dos pontos ensaiados foi praticamente coincidente com a umidade ótima (6,43%). Para este solo o ponto ensaiado 1,92% abaixo da ótima (4,73%) foi o que apresentou o maior valor de Nir ($5,09 \times 10^6$), com queda no valor deste parâmetro com aumento da umidade para 6,43% e 8,43%, de 33% e 63%, respectivamente, sendo este solo o que apresentou maior variação percentual de Nir entre os materiais testados.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Foram caracterizados materiais provenientes do revestimento primário da BR 030. Esses materiais tiveram sua fração fina classificada como de comportamento não laterítico e foram classificados como granular com finos (Gf) e solo com pedregulho (Sp). Ao se avaliar o efeito da umidade de compactação no comportamento resiliente desses materiais, observaram-se respostas diferentes no ensaio de Módulo de Resiliência desses materiais em função das suas características. Além disso, observou-se que a influência das tensões desvio e confinante também sofrem influência do material e da umidade de compactação. O material com maior teor de finos sofre maior variação do MR com as tensões desvio (σ_d), enquanto os materiais com menor teor de finos dependem mais da tensão confinante (σ_3). Em termos da relação entre umidade de compactação e módulo de resiliência, observa-se que a condição de maior rigidez varia entre os materiais.

As análises tensão-deformação indicaram que variações de umidade de compactação, mesmo abaixo de 2% em relação ao teor de umidade ótimo do solo, pode ocasionar reduções significativas na expectativa de vida útil dos pavimentos asfálticos, com risco de ocorrência precoce de patologias, sobretudo aquelas relacionadas ao fenômeno de fadiga.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6458 – Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm — Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. 2 ed. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2016. 10 p.

Bastos, J. B. S. Influência da variação da umidade no comportamento de Pavimentos da região metropolitana de Fortaleza. Dissertação de Mestrado, Curso de Engenharia de Transporte, Universidade do Ceará, 2013.

Carvalho, A. I. S.; Almeida, M. S. de S.; Pedreira, W. J. P.; Costa, W. G. S.; São Mateus, M. do S. C. Influência da Densificação do Solo de Subleito no Desempenho de Pavimentos Flexíveis. Anuário do Instituto de Geociências, [S.L.], v. 43, n. 4, p. 253-262, 18 dez. 2020. Instituto de Geociências - UFRJ.

Confederação Nacional dos Transportes (CNT) Anuário CNT do Transporte 2022. Anuário CNT do transporte 2022. Disponível em <https://anuariodotransporte.cnt.org.br/2022/>. Acesso em: 10 setembro de 2023.



- Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo. DER-SP - Projeto de Pavimentação. IP- DE-P00/001. São Paulo, 53 p., 2006.
- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. DNIT 258 - Solos - Compactação em equipamento miniatura - Ensaios Mini-MCV e perda de massa por imersão - Método de ensaio. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Rio de Janeiro. 2023a.
- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. DNIT 443 ME - Solos – Ensaio de compactação utilizando moldes tripartidos. Brasília-DF, 12 p. 2023b.
- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. DNIT 444 - Classificação de solos tropicais de granulação grossa - Classificação. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Rio de Janeiro. 2023c.
- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. DNIT 051 - Solos - Análise granulométrica. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Rio de Janeiro. 1994a.
- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. DNIT 082 - Solos - determinação do limite de plasticidade. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Rio de Janeiro. 1994b.
- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. DNIT 122 - Solos-determinação do limite de liquidez - método de referência e método expedito. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Rio de Janeiro. 1994c.
- Freitas, J. B. de; Rezende, L. R. de; Gitirana Jr., G. de F. N. Prediction of the resilient modulus of two tropical subgrade soils considering unsaturated conditions. *Engineering Geology*. V. 270, p. 105580. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105580>.
- INSTITUTO DE PESQUISAS RODOVIÁRIAS, DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. Execução de estudos e pesquisa para elaboração de método mecânico – empírico de dimensionamento de pavimento asfáltico. Manual de Utilização do programa MeDiNa. COPPE/UFRJ. 2020. Disponível em < <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-epesquisa/ipr/medina/medina-1-1-4-manual-de-utilizacao.pdf>>. Acesso em: 30 de maio de 2024.
- Kern, C. 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, 2017.
- Levay, V. S. Influência do teor de umidade no módulo de resiliência de solos da BR-319/AM e BR-156/AP para aplicabilidade em pavimentação. Dissertação de Mestrado, Curso de Engenharia Civil, Universidade de Brasília. 2023.
- Santos, E. F. Estudo comparativo de diferentes sistemas de classificações geotécnicas aplicadas aos solos tropicais. Dissertação de Mestrado, Curso de Engenharia Civil, Universidade de São Paulo, São Carlos. 2006.
- SANTOS, I. J. *et al.* Caracterização resiliente de solos oriundos de diferentes regiões do estado da Bahia para uso em subleito rodoviário. In: Anais do Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, 2022, Fortaleza. Anais eletrônicos [...] Campinas, Galoá, 2022.
- Takeda, M. C. A influência da variação da umidade pós-compactação no comportamento mecânico de solos de rodovias do interior paulistas. Tese de Doutorado, Curso de Engenharia civil, Universidade de São Paulo, p. 13. 2006.
- Villibor, D. F.; Alves, D. M. L. Pavimentação de Baixo Custo para Regiões Tropicais: projeto e construção - novas considerações. Florianópolis: Tribo da Ilha. 2019.