

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)

COMPORTAMENTO MECÂNICO NÃO SATURADO DE UM SOLO ARENOSO DO RECÔNCAVO BAIANO

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

Talita da Silva Oliveira¹; Mario Sergio de Souza Almeida²; Weiner Gustavo Silva Costa¹; Acbal Rucas Andrade Achy¹; Ítalo Miller Machado Pereira¹; Isabela de Jesus Santos¹; Larissa Rodrigues dos Santos¹; Josiene Chrystina Ribeiro Cardoso³

RESUMO: O comportamento mecânico do solo está diretamente relacionado aos parâmetros de deformação e resistência. Como forma de estudo, há o ensaio de módulo de resiliência que analisa tais parâmetros para um determinado material. A variação do grau de saturação do solo é um dos fenômenos que influencia nos resultados dos ensaios de laboratório. O objetivo deste trabalho foi analisar o comportamento não saturado de um Latossolo Amarelo Distrocoeso do Recôncavo da Bahia, avaliando o comportamento resiliente em graus de saturação do solo acima, abaixo e na sua umidade ótima. Ensaio de caracterização granulométrica foram realizados inicialmente e, em seguida, a curva de compactação para determinar os parâmetros ótimos do solo estudado. Além disso, realizou-se o módulo de resiliência (MR) das amostras, em que foram moldados corpos de prova, feitos em duplicata para cada grau de saturação, nas dimensões 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura, compactados na energia Proctor Normal, aplicando 5 golpes por camada em um total de 10 camadas cada. Os corpos de prova foram levados para a câmara úmida por no mínimo 12 horas e, em seguida, ao equipamento triaxial para ensaio de módulo de resiliência. Com os resultados obtidos foi observado um aumento do MR médio de 203 MPa para 645 MPa quando da secagem abaixo da umidade ótima e uma redução para 88 MPa quando do umedecimento acima da umidade ótima.

PALAVRAS-CHAVE: comportamento mecânico; módulo de resiliência; grau de saturação.

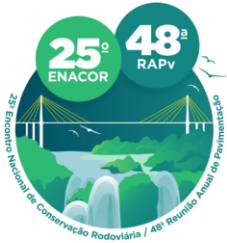
ABSTRACT: The mechanical behavior of soil is directly related to deformation and strength parameters. As a study approach, there is the test for resilience modulus, which analyzes these parameters for a specific material. The variation in the degree of soil saturation is one of the phenomena that influences the results of laboratory tests. The objective of this work was to analyze the unsaturated behavior of a Cohesive Yellow Latosol from the Recôncavo region of Bahia, by conducting soil saturation degrees above, below, and at its optimum moisture content. Granulometric characterization tests were initially performed, followed by a compaction curve to determine the optimum parameters of the studied soil. Additionally, resilience modulus tests were conducted on the samples, where duplicate specimens were molded for each saturation degree, with dimensions of 100 mm in diameter and 200 mm in height, compacted using the Standard Proctor energy, applying 5 blows per layer for a total of 10 layers. The specimens were kept in a wet chamber for at least 12 hours and then subjected to triaxial equipment for the resilience modulus test. With the results obtained, an increase in the average MR from 203 MPa to 645 MPa was observed when drying below the optimum moisture content and a reduction to 88 MPa when wetting above the optimum moisture content.

KEYWORDS: mechanical behavior; resilient modulus; degree of saturation.

¹ Universidade Federal do Recôncavo da Bahia: Rua Ruy Barbosa, Cruz das Almas/BA, CEP: 44380-000, talitaoliveira@aluno.ufrb.edu.br; mario.almeida@ufrb.edu.br; weiner@ufrb.edu.br; acbal@ufrb.edu.br; italomillermachado@hotmail.com; isabela@aluno.ufrb.edu.br; larissars@aluno.ufrb.edu.br;

² Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, mario.almeida@dnit.gov.br;

³ Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília (UnB): Campus Universitário Darcy Ribeiro, CEP 70910-900, Brasília, DF, Brasil, josychrystina@gmail.com;



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

www.rapvenacor.com.br



INTRODUÇÃO

A mecânica dos pavimentos considera o pavimento como um sistema de múltiplas camadas elásticas, cujo dimensionamento da estrutura deve ser de forma que operações repetidas não resultem em falhas de curto prazo por fadiga do material. Cada camada é composta por diferentes materiais e desempenha um papel na execução de uma função específica. O desempenho do pavimento depende das propriedades de tensão-deformação dos materiais em cada camada, da frequência e intensidade do tráfego e das condições ambientais e regionais (RODRIGUES, 1997).

O módulo de resiliência é o parâmetro que caracteriza o comportamento elástico dos materiais sob carregamento cíclico. Esse parâmetro pode ser determinado em laboratório por meio de ensaios de carga cíclica. Em campo, o módulo de resiliência pode ser obtido a partir de retroanálise das medidas de deflexão (RODRIGUES, 1997).

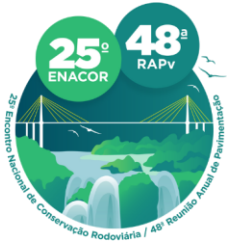
O módulo de resiliência é um dos estudos relacionados ao comportamento do solo e é conceituado como uma propriedade mecânica do solo e definido como o quociente entre a tensão desvio e a deformação resiliente. Seu ensaio é realizado em ciclos e baseado em tensões atuantes no solo (VIANA, 2007).

De acordo com Li e Selig (1994), um dos fatores que podem afetar o comportamento resiliente dos solos é a densidade e umidade de compactação. Segundo esses autores, o estado físico do solo pode ser alterado pelo efeito do ambiente e pelo efeito da compactação causada pelo tráfego. O teor de umidade e a densidade seca podem variar com o tempo de muitas maneiras diferentes. Isso pode levar a uma alteração significativa do módulo de resiliência. E, ainda, a consideração do efeito da variação do teor de umidade no módulo resiliente deve ser acompanhada de informações sobre a variação da densidade seca. A influência da variação de umidade com e sem variação de densidade seca, como será indicado mais adiante, pode ser significativamente diferente.

O grau de saturação do solo, por conseguinte, também é um dos fatores que influenciam no comportamento do módulo de resiliência. Segundo Preussler (1978), comparações feitas em termos de tensões totais demonstram que o módulo resiliente decresce quando o grau de saturação aumenta. Entender como tal comportamento atua em relação a esse fator é de suma importância para os estudos, pois poucos trabalhos são direcionados aos solos não saturados em pavimentação no Estado da Bahia. De acordo com Yang, Huang e Tai (2005), tanto o teor de umidade quanto a compactação do solo desempenham papéis cruciais e têm influência nas variações do módulo de resiliência. Além disso, uma compactação inadequada pode levar a uma redução no módulo de resiliência do solo. Os autores também observaram uma diminuição significativa no módulo de resiliência do solo quando ocorre aumento do teor de umidade. Esses resultados destacam a importância de considerar cuidadosamente o teor de umidade e realizar uma compactação adequada para garantir o desempenho desejado do solo em termos de módulo de resiliência. Da mesma forma, Ng *et al.* (2013) concluíram em seu trabalho que o módulo de resiliência é maior com a secagem em comparação ao umedecimento, possivelmente por consequência de efeitos de sobreconsolidação induzidos.

De acordo com Farias (2004), o solo não saturado é um solo multifásico com grau de saturação inferior a 100%. Por conta disso, é de suma importância estudos específicos como forma de prever o comportamento do solo em circunstâncias distintas da saturação total ou daquela relativa às condições ótimas de compactação, para posterior análise de seu comportamento por meio do módulo de resiliência.

Nesse sentido, este trabalho tem por objetivo avaliar o comportamento mecânico não saturado de um solo arenoso do Recôncavo Baiano, o Latossolo Amarelo Distrocoeso, por meio de ensaios de módulo de resiliência do solo, sob diferentes graus de saturação, quais sejam, aquele relativo aos parâmetros ótimos de compactação, amostras secas e úmidas.



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

www.rapvenacor.com.br



MATERIAIS E MÉTODOS

No estudo em questão, foi utilizado um Latossolo Amarelo Distrocoeso (LA) coletado na Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (UFRB), localizada na cidade de Cruz das Almas, horizonte B de coordenadas 12° 39' 43.0'' S e 39° 04' 46.9'' W (Figura 1). Amostras deformadas do solo foram coletadas, secadas ao ar para utilização no estudo.



Figura 1 - Local de coleta da amostra de solo.

Segundo Malaquias *et al.* (2020), que utilizou o mesmo solo em estudos prévios, o LA possui baixa saturação por bases e baixa capacidade de troca de cátions, o que leva a ter uma baixa atividade da fração argila. Ainda segundo os autores, o solo apresenta mineralogia caulinitica, granulometria fina, é classificado como A-4, solo siltoso moderadamente plástico, de acordo com a classificação TRB (*Transportation Research Board*) e LG' (Laterítico Argiloso) de acordo com a classificação MCT (Miniatura Compacto Tropical).

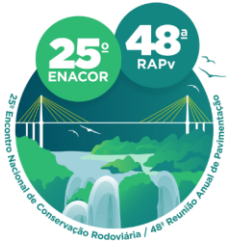
Ensaio de caracterização do solo

O solo foi caracterizado para determinação da granulometria, densidade real (ρ_s), limite de liquidez (w_L), limite de plasticidade (w_p) e índice de plasticidade (IP). Estes ensaios foram realizados seguindo as suas respectivas normas: DNER 051/94-ME (DNER, 1994b), DNER 093/94-ME (DNER, 1994d), DNER 122/94-ME (DNER, 1994e), DNER 082/94-ME (DNER, 1994c), nesta ordem.

Compactação e moldagem de corpos de prova

Após todos os ensaios de caracterização, foi iniciada a compactação do solo para determinação da curva de compactação e dos parâmetros ótimos de compactação: umidade ótima ($w_{ót}$) e massa específica aparente seca máxima ($\rho_{dmáx}$) do solo estudado.

Para a compactação, o solo seco foi destorroado na peneira #10, quarteado (obtendo amostras homogêneas) e foi determinada sua umidade higroscópica, de acordo com os procedimentos descritos



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

www.rapvenacor.com.br



na norma DNER 041/94-ME (DNER, 1994a). A partir daí, separou-se 4000 g para umedecê-lo até uma possível umidade ótima ou próxima dela e levar à câmara úmida, por no mínimo 12 horas. Compactou-se corpos de prova (CPs) com 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura, em 10 camadas, aplicando 5 golpes por camada, na energia de Proctor Normal. Com isso, obteve-se a curva de compactação do solo LA e sua umidade ótima.

Definidos os parâmetros ótimos, iniciou-se a preparação das amostras utilizando o procedimento descrito acima. Todas as amostras foram compactadas em moldes tripartidos de 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura (Figura 2a), na energia de Proctor Normal, em 10 camadas com 5 golpes por camada. A compactação foi realizada com auxílio de compactador automático (Figura 2b).



(a) Molde do CP



(b) Compactação do CP



(c) CP compactado

Figura 2 - Compactação das amostras.

Saturação do solo

Para avaliação do efeito da saturação do solo no módulo de resiliência, promoveu-se a secagem e umedecimento de corpos de prova moldados nos parâmetros ótimos de compactação. Para isso, foi necessária a utilização dos índices físicos (Equação 1) para determinar o grau de saturação (S_r) do solo LA na $w_{ót}$.

$$S_r = \frac{\rho_s \cdot W}{e \cdot \rho_w} \quad (1)$$

em que

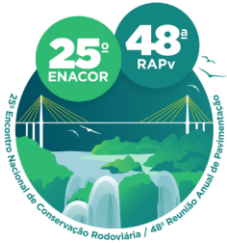
e : Índice de vazios;

ρ_w : Massa específica da água [g/cm³];

ρ_s : Densidade real [g/cm³];

Segundo Ng *et al.* (2013) em outros estudos, amostras de solo foram compactadas em diferentes teores de água mas esta abordagem tem certas limitações. Primeiro, as amostras recompactadas com a mesma densidade seca, mas com teores iniciais de água diferentes, não podem ser consideradas “idênticas”. Alguns pesquisadores relataram que diferentes teores de água de compactação podem induzir diferentes estruturas inerentes ao solo. Nesse sentido é que se propôs a metodologia usada nesse trabalho, além do fato de que essa metodologia também simula possível secagem e umedecimento do solo no campo.

Com o grau de saturação determinado, foram estudados outros graus de saturação para o solo (acima e abaixo da umidade ótima), feitos em duplicata. A partir dos índices físicos, foi possível determinar a massa (Equação 2) que o CP deveria chegar para atingir a saturação preestabelecida, após secagem



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

www.rapvenacor.com.br



ou umedecimento. Essa faixa de valores foi proposta para avaliar o comportamento para além dos valores possíveis de ocorrência e campo.

$$M = \frac{V \cdot Sr \cdot \rho_s (1 + W)}{Sr + \frac{W \cdot \rho_s}{\rho_w}} \quad (2)$$

em que

V : Volume do CP [cm³];

M : Massa [g];

Os CPs foram colocados sobre a parte superior externa de uma estufa para secagem (Figura 3a) e logo em seguida passaram por secagem em estufa numa temperatura de 60 °C, averiguando sempre a sua massa. Os CPs de saturação acima da umidade ótima foram envoltos em papel toalha para dificultar a perda de massa e umedecidos por meio de um conta gotas até atingir a massa almejada (Figura 3b). Ao atingi-la, todos os CPs foram medidos com auxílio de um paquímetro para determinação do seu novo volume e levados novamente para a câmara úmida, por no mínimo 12 horas, para uniformização da umidade.



(a) Corpos de prova na secagem da estufa



(b) Corpo de prova em processo de umedecimento

Figura 3 – Preparação das amostras com diferentes graus de saturação.

Ensaio de módulo de resiliência

Foram realizados ensaios de módulo de resiliência (MR) em amostras do solo LA utilizando uma prensa de ensaio triaxial dinâmico da marca OWNTEC. O modelo de representação do comportamento do MR foi o modelo composto (Equação 3).

$$MR = k_1 \cdot \sigma_3^{k_2} \cdot \sigma_d^{k_3} \quad (3)$$

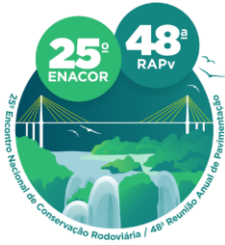
em que

k_1 , k_2 e k_3 : constantes;

σ_3 : Tensão confinante [MPa];

σ_d : Tensão desviadora [MPa];

O ensaio foi feito aplicando 18 pares de tensões (completo), conforme especifica a norma DNIT 134/18-ME (DNIT, 2018). Nos ensaios completos (18 pares de tensão) onde o material rompeu e não foi possível concluir, foi feito um novo ensaio aplicando 12 pares de tensões para materiais de subleito (ensaio simples). As tensões aplicadas em cada ensaio estão apresentadas abaixo nas tabelas 1 e 2.



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

www.rapvenacor.com.br



Após o ensaio, os CP foram levados à estufa a 105 °C, durante 48 horas para determinação da massa seca e cálculo de umidade final.

Tabela 1: Tensões para determinação do módulo de resiliência com 18 e com 12 pares de tensão (DNIT, 2018).

σ_3 (MPa)	Ensaio completo		Ensaio simples	
	σ_d (MPa)		σ_d (MPa)	σ_1/σ_3
0,020	0,020		0,020	2
	0,040		0,040	3
	0,060		0,060	4
0,035	0,035		0,035	2
	0,070		0,070	3
	0,105		0,105	4
0,050	0,050		0,050	2
	0,100		0,100	3
	0,150		0,150	4
0,070	0,070		0,070	2
	0,140		0,140	3
	0,210		0,210	4
0,105	0,105		0,105	2
	0,210		0,210	3
	0,315		0,315	4
0,140	0,140		0,140	2
	0,280		0,280	3
	0,420		0,420	4

RESULTADOS E DISCUSSÕES

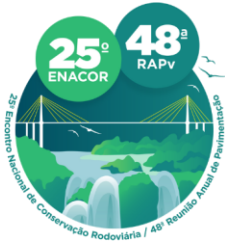
Caracterização do solo

Na Tabela 3, estão indicados os resultados da caracterização do solo estudado, como o limite de liquidez (w_l), limite de plasticidade (w_p), índice de plasticidade (IP), densidade real (ρ_s), massa específica aparente seca máxima ($\rho_{dm\acute{a}x}$) e umidade ótima ($w_{ót}$).

Tabela 3. Caracterização do solo.

Parâmetros					
w_l (%)	w_p (%)	IP (%)	ρ_s (g/cm ³)	$\rho_{dm\acute{a}x}$ (g/cm ³)	$w_{ót}$ (%)
27	19	8	2,660	1,889	13,64

Na Figura 4 é apresentada a curva granulométrica do solo LA, que apresentou 36,9% de argila, 12,6% de silte e 50,5% de areia.



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

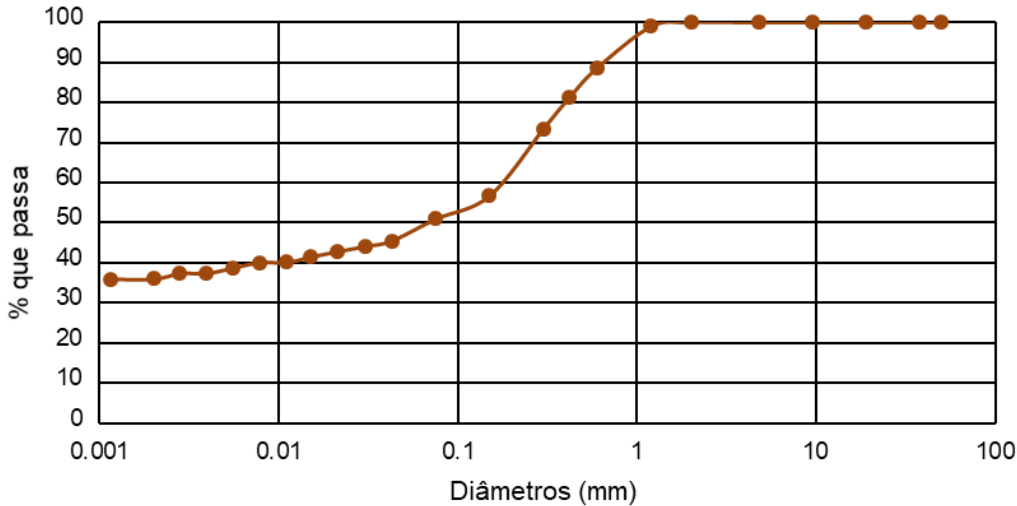


Figura 4. Curva granulométrica do solo.

Compactação e moldagem de corpos de prova

Os dados da curva de compactação obtidos estão apresentados na Figura 5. A partir da curva, foi definido a $w_{ót}$ em 13,64% e $\rho_{dmáx}$ em 1,889 g/cm³.

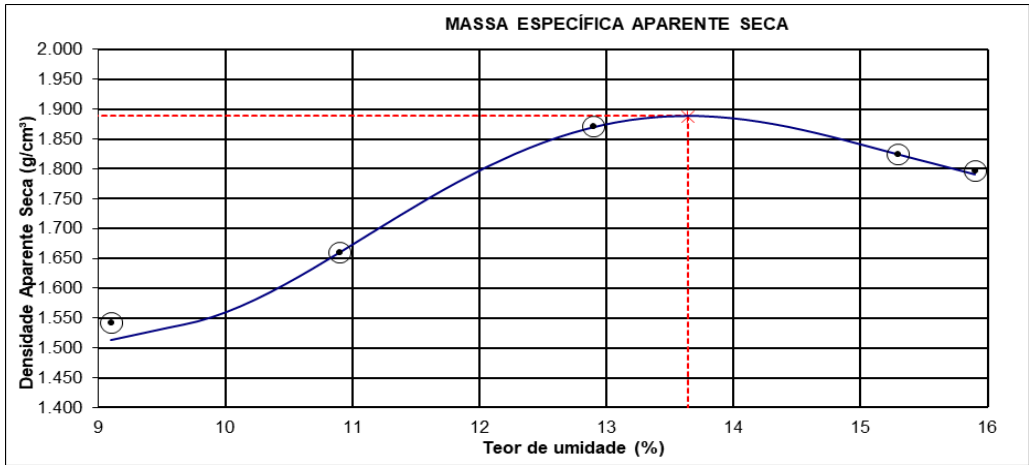
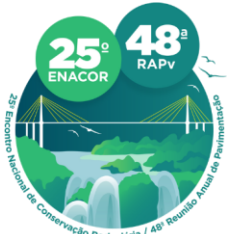


Figura 5. Curva de compactação do solo.

Módulo de resiliência

Na Tabela 4, estão dispostos os resultados médios de MR do solo LA ensaiado na prensa de ensaio triaxial dinâmico, além das constantes de regressão k_1 , k_2 e k_3 que foram determinadas a partir dos resultados experimentais de MR realizados para o ensaio com os 12 e 18 pares de tensões estabelecidos pela norma DNIT 134/2018-ME. Os valores do coeficiente de determinação (R^2) do conjunto de ensaios também estão demonstrados na Tabela 4.

Os valores médios para os graus de saturação abaixo da umidade ótima se estabilizaram em 77%, já os CP de grau de saturação acima da $w_{ót}$ foi umedecido até 95%.



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

www.rapvenacor.com.br



Tabela 4. Valores médios de MR e constantes de ajuste do modelo composto (Equação 3).

Saturação	MR médio (MPa)	Parâmetros				R ²
		k ₁	k ₂	k ₃		
77,89%	644,81	7660,83	0,69	0,14	0,98	
88,89%	203,93	496,88	0,40	-0,11	0,90	
95,00%	88,10	227,96	0,42	0,19	0,94	

Para a saturação de 95%, os CPs atingiram seu limite de deformação permanente acumulado previsto em norma quando ensaiados com 18 pares de tensões. Por conta disso, foi realizado o ensaio simples com 12 pares de tensões. Ainda assim os CPs ensaiados para esse grau de saturação só suportaram 11 pares de tensões. Logo, para esse grau de saturação, os valores apresentados na tabela acima são referentes aos resultados para esses pares de tensão. Os resultados de MR tendem a uma redução com o aumento do grau de saturação, assim como demonstrado por Preussler (1978), Yang, Huang e Tai (2005) e Ng *et al.* (2013).

Na Figura 6 é apresentado o comportamento de variação do MR para os diferentes graus de saturação, sendo possível verificar os altos valores em grau de saturação abaixo da umidade ótima e valores menores quando o solo está mais umedecido. Para o SR = 95% observa-se pouca influência da tensão confinante e da tensão desvio no MR. Enquanto que para Sr = 95% a tensão confinante tem efeito preponderante onde o MR aumenta com o aumento de σ_3 .

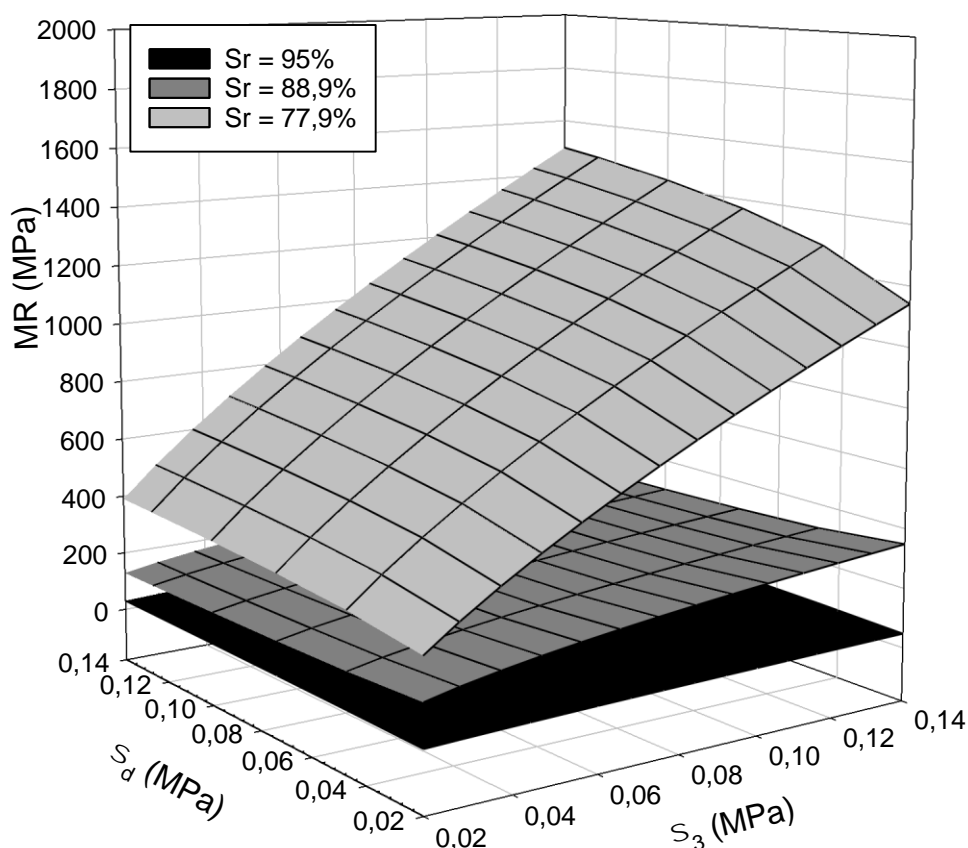
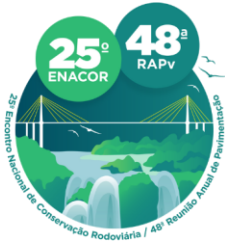


Figura 6. Resultados de módulo de resiliência.



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

www.rapvenacor.com.br

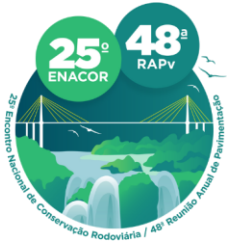


CONCLUSÃO

Com os resultados alcançados, foi possível perceber a diferença entre os valores de módulo de resiliência e suas constantes obtidas, nas diferentes saturações. Este comportamento é influenciado pela quantidade presente de água em cada corpo de prova ensaiado. Além disso, observou-se um aumento de três vezes no módulo de resiliência para graus de saturação abaixo da $w_{ót}$, pois o solo encontra-se mais seco e, por isso mais resistente, estando em uma condição mais favorável. Vale a pena destacar que, mesmo apresentando bom comportamento resiliente dos solos, a secagem para teores abaixo do teor de umidade ótimo pode ocasionar contração em solos mais propensos ao fenômeno de expansão. Estes solos também estão mais suscetíveis aos danos causados pela penetração da água em sua rigidez, ou seja, os impactos do umedecimento após a compactação. Em se tratando do grau de saturação 95%, houve uma redução nos resultados, visto que o solo foi levado à quase 100% saturação, não concluindo o ensaio completo e tendo que ser realizado o ensaio simples, com apenas 12 pares de tensões. Isso mostra a importância da drenagem em pavimentação asfáltica no caso de utilização de uma material como o desse estudo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. DNER - ME 41. Solos – Preparação de amostras para ensaio de caracterização. Rio de Janeiro, 1994a. 4 p.
- Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. DNER - ME 51. Solos – Análise Granulométrica. Rio de Janeiro, 1994b. 12 p.
- Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. DNER - ME 82. Solos – Determinação do Limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 1994c. 3 p.
- Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. DNER - ME 93. Solos – Determinação da Densidade Real. Rio de Janeiro, 1994d. 4 p.
- Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. DNER - ME 122. Solos – Determinação do Limite de liquidez. Rio de Janeiro, 1994e. 7 p.
- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. DNIT - ME 134. Pavimentação – Solos – Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2018.
- Farias, M. M. (2004) Modelagem constitutiva para o comportamento mecânico de solos não saturados. 5º Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados, 2, 527, São Paulo.
- Li, D., Selig, E. T.. Resilient Modulus for Fine-Grained Subgrade Soils. *Journal of Geotechnical Engineering*, 120(6), 939–957, 1994. doi:10.1061/(asce)0733-9410(1994)120:6(939).
- Malaquias, G. A. P. *et al.* (2020) Caracterização e Classificação de Solos Típicos do Recôncavo Baiano para Fins Rodoviários, *Anais do 20º Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica*, São Paulo.
- Ng, C. W. W., Zhou, C., Yuan, Q., & Xu, J. (2013). Resilient modulus of unsaturated subgrade soil: experimental and theoretical investigations. *Canadian Geotechnical Journal*, 50(2), 223–232. DOI:10.1139/cgj-2012-0052.
- Preussler, E. S. Ensaio triaxiais dinâmicos de um solo arenoso. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1978.
- Rodrigues, M. R. Influência da sucção no módulo de resiliência de solos típicos de subleito de pavimentos do Rio Grande do Sul. Dissertação (Mestrado). Porto Alegre, UFRGS, 1997. 105p.
- Souza, F. C. S. *et al.* (2020) Curvas de retenção de água de três solos compactados do Recôncavo da Bahia, *Anais do 20º Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica*, São Paulo.
- Viana, H. M. F. Estudo do comportamento resiliente dos solos tropicais grossos do interior do estado de São Paulo. 2007, São Paulo.



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

www.rapvenacor.com.br



Yang, S.; Huang W.; Tai, Y. Variation of Resilient Modulus with Soil Suction for Compacted Subgrade Soils. Journal of the National Academies, 99-106, 2005.