

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)

AVALIAÇÃO DA SENSIBILIDADE DA CARGA DE CONTATO E TIPO DE PEDRA POROSA NO ENSAIO DE MÓDULO DE RESILIÊNCIA

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

Weiner Gustavo Silva Costa¹; Mario Sergio de Souza Almeida^{1,5}; Rafael Cerqueira Silva²; Geraldo Luciano de Oliveira Marques³; Acbal Rucas Andrade Achy¹, Gisandra Faria de Paula^{2,4}; Paulo Costa Fernandes⁴ & Mateus Ribeiro Caetano²

RESUMO: A verificação da deformação resiliente de camadas localizadas abaixo do revestimento é feita por meio do ensaio triaxial de carga repetida, um dos principais ensaios requeridos pelo Método de Dimensionamento Nacional (MeDiNa), para obtenção do Módulo de Resiliência (MR). Algumas lacunas presentes na norma deixam dúvidas durante a realização do ensaio, acarretando em resultados que podem interferir no dimensionamento do pavimento. Entre estas dúvidas, destaca-se o valor da tensão de contato a ser considerada entre o pistão de aplicação da carga e o corpo de prova a ser ensaiado, bem como o tipo de material a ser considerado para a pedra porosa presente no topo e base da amostra. Assim, o presente estudo avaliou a carga de contato, o tipo de elemento poroso e como estes fatores influenciam nos resultados de ensaios para obtenção do MR. Para possibilitar que outros laboratórios, com diferentes equipamentos, também possam avaliar estes e outros aspectos que influenciam nos resultados, foi utilizado um corpo de prova padrão, de *nylon*. Os resultados parciais obtidos mostram uma maior dispersão nas leituras quando da não garantia do contato entre o corpo de prova e o pistão de aplicação de carga durante o ensaio. Com a ausência de elemento poroso na base e topo, o MR variou entre 1000 e 1800 MPa (média de 1488 MPa). Com a utilização de discos porosos de bronze, esses valores diminuem para MR entre 200 e 800 MPa (média de 479 MPa). Com a utilização de pedra porosa também houve uma redução nos valores de MR em menor magnitude em relação ao disco poroso de bronze (média de 1258 MPa).

PALAVRAS-CHAVE: comportamento mecânico; módulo de resiliência; normatização.

ABSTRACT:

The verification of the resilient deformation of layers located under the coating is done by means of the repeated load triaxial test, one of the main tests required by the National Design Method (MeDiNa), to obtain the Resilient Modulus (RM). Some gaps in the standard leave doubts during the test, resulting in results that may interfere in the sidewalk design. Among these doubts, there is the value of the contact stress to be considered between the load application piston and the specimen to be tested, as well as the type of material to be considered for the porous stone present at the top and bottom of the sample. Thus, the present study evaluated the contact load, the type of porous element, and how these factors influence the test results to obtain the MR. To enable other laboratories, with different equipment, to also evaluate these and other aspects that influence the results, a standard nylon specimen was used. The partial results obtained show a greater dispersion in the readings when the contact between the specimen and the load application piston is not guaranteed during the test. With the absence of porous element, the RM varied between 1000 and 1800 MPa (average of 1488 MPa). With the use of porous bronze discs, these values decrease to RM between 200 and 800 MPa (average 479 MPa). With the use of porous stone there was also a reduction in the values of RM in smaller magnitude in relation to the bronze porous disc (average of 1258 MPa).

KEYWORDS: mechanical behavior; resilient modulus; standardization.

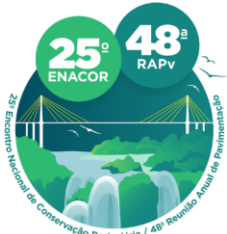
¹ Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (UFRB), weiner@ufrb.edu.br; mario.almeida@ufrb.edu.br; acbal@ufrb.edu.br

² Universidade de Brasília (UnB), rafael.silva@unb.br; mateusribeirocaetano@gmail.com.

³ Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), geraldo.marques@ufjf.br.

⁴ Departamento de Estradas de Rodagem do Distrito Federal (DER/DF), gisandrafp@gmail.com; paulocostaf@gmail.com.

⁵ Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, mario.almeida@dnit.gov.br;



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 Método de Dimensionamento Nacional (MeDiNa), de origem mecanística-empírica, recém lançado pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), ao considerar as tensões e deformações induzidas pelo tráfego ao longo das camadas no comportamento mecânico dos materiais utilizados no pavimento possibilita o entendimento das propriedades mecânicas e a forma como os materiais respondem aos carregamentos dinâmicos ocasionados pela passagem de veículos de carga (PAULA, FERNANDES, SILVA, 2022).

O MeDiNa configura-se como um método mais apropriado ao desempenho dos pavimentos flexíveis e à realidade técnica-científica do país, que tem incorporado os conceitos e práticas da mecânica dos pavimentos para elaboração de análises cada vez mais mecanísticas, alinhando-se, portanto, às práticas e métodos internacionais sobre dimensionamento de pavimentos.

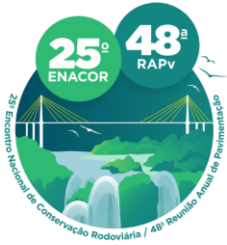
O método baseia-se em definições da teoria da elasticidade, bem como no comportamento dos materiais de cada camada analisados pelos resultados de ensaios de cargas repetidas, que visam simular as condições mais próximas de solicitação *in situ*. Entre estes ensaios de cargas cíclicas repetidas, destaca-se a obtenção do módulo de resiliência de solos ou agregados, um parâmetro que caracteriza o comportamento recuperável (elástico) dos materiais utilizados na pavimentação. Este parâmetro pode ser determinado em laboratório por meio de ensaios em equipamento triaxial dinâmico de cargas repetidas. Em campo, o módulo de resiliência pode ser obtido a partir de retroanálises das medidas de bacias de deflexão (RODRIGUES, 1997).

O módulo de resiliência é um dos estudos relacionados ao comportamento tensão-deformação do solo e é conceituado como uma propriedade mecânica do solo e definido como o quociente entre a tensão desvio (σ_d) e a deformação resiliente (elástica) (ϵ_r). O ensaio é realizado em ciclos de carga (tensão pulsante vertical) e repouso e com diferentes estados de tensões atuantes no solo (VIANA, 2007).

A norma DNIT 134/2018 especifica os procedimentos de ensaio para a determinação do módulo de resiliência de solo e materiais não estabilizados quimicamente, com condições de contorno que tentam reproduzir os estados de tensão-deformação e variações ambientais que estes materiais estarão submetidos nas camadas do pavimento, devido às cargas móveis do tráfego. Naturalmente, ao buscar essa relação entre campo e laboratório, estes ensaios representam um desafio, principalmente pelas incertezas relacionadas às variações ambientais.

Esta norma especifica a sequência de tensões a serem aplicadas de forma repetida para a fase de condicionamento e para a determinação do módulo de resiliência. No entanto, não é definido em nenhum caso a necessidade de uma pressão (carga) mínima de contato ao longo do ensaio de modo a manter o sistema de aplicação de carga do equipamento triaxial (pistão) em contato com o corpo de prova ensaiado.

Destaca-se que a norma AASHTO T307/2007, da *American Association of State Highway and Transportation Officials*, prevê a aplicação de uma pressão de contato de $10\% \pm 0,7$ kPa da máxima tensão axial aplicada em cada sequência de tensões do ensaio. Segundo esta norma, as tensões de contato devem ser ajustadas para compensar a força resultante criada pela pressão de ar da câmara triaxial (força ascendente) e o peso da haste do pistão da câmara, incluindo o suporte dos transdutores LVDTs (*linear variable differential transformer*) (força descendente). O Departamento de Transporte



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

www.rapvenacor.com.br



do Estado de Washington (WSDOT, 2017) adota essa normalização com algumas modificações, dentre elas a utilização de uma carga de contato única de 5 psi (~34,5 kPa) durante todo o ensaio. A norma AG:PT/T053 (AUSTROADS, 2006) determina que, em equipamentos de carga repetida sem controle da força estática vertical, é necessária a aplicação de uma tensão de assentamento (força vertical estática/área do *top cap*) inferior a 5 kPa, a qual deve permanecer constante durante todo o ensaio a fim de evitar o levantamento do pistão de carga sob a ação da pressão de confinamento. Outro ponto relevante do ensaio, é a presença requerida de uma pedra porosa ou um disco poroso de bronze, como é o caso da norma AASHTO T307, ou apenas de pedra porosa no caso da norma DNIT 134/2018 nas faces superior e inferior do corpo de prova a ser ensaiado, sem maiores detalhamentos sobre o melhor tipo de material constituinte a ser utilizado. Tendo em vista as diferentes considerações sobre os ensaios e os consequentes impactos nos resultados, este trabalho objetiva avaliar como a carga de contato e o tipo de elemento poroso influenciam nos resultados de ensaios de módulo de resiliência, os quais podem interferir no dimensionamento do pavimento, especialmente em relação à espessura da camada ensaiada.

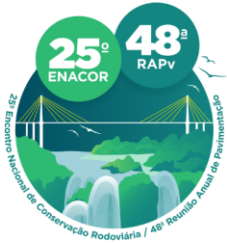
METODOLOGIA

Materiais

Neste estudo, foi utilizado um corpo de prova (CP) de *nylon* com dimensões padrões para o ensaio de módulo de resiliência, conforme a norma DNIT 134/2018: 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura (Figura 1a). Esse espécime foi ensaiado no Laboratório de Pavimentação da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (UFRB), em equipamento triaxial de cargas cíclicas. Segundo alguns fornecedores, o módulo de elasticidade a compressão deste material é da ordem de 1700 MPa e resistência à compressão da ordem de 90 MPa. Foram utilizadas ainda pedras porosas e discos porosos de bronze em diferentes ensaios (Figura 1b e 1c). A ideia do uso de um CP padrão, com dimensões e material pré-definidos, foi baseada no trabalho de Vianna (2002) e proposta para que esses resultados sejam usados e avaliados em estudo interlaboratorial a ser realizado pelo grupo de Pesquisa em Pavimentação UnB-UFRB-UFJF, e para verificações das respostas dos ensaios realizados em diferentes equipamentos. Isto é válido também para equipamentos semelhantes, tendo em vista que estes possuem sensores que necessitam de constante verificação e calibração, pois as medições são usadas nos cálculos dos parâmetros pesquisados.

Ensaio de módulo de resiliência

Foram realizados ensaios triaxiais de cargas repetidas para determinação do módulo de resiliência (MR) de acordo com as recomendações da norma DNIT 134/2018. O CP foi levado para a prensa triaxial, onde foi submetido a diferentes pares de tensões confinante (σ_3) e desvio (σ_d) estabelecidos pela norma, na frequência de 1 Hz, com três repetições para cada configuração.



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

www.rapvenacor.com.br



(a)



(b)



(c)

Figura 1.(a) Corpo de prova de *nylon*, (b) pedra porosa e (c) disco poroso de bronze.

Com a aplicação dos pares de tensões, determinou-se as deformações específicas resilientes (ϵ_r) e, por fim, correlacionando-a com a σ_d correspondente, foi possível obter o MR para cada par de tensões testado, conforme a Equação 1. O equipamento triaxial de cargas repetidas utilizado encontra-se disposto na Figura 2. O mesmo permite a realização do ensaio com e sem carga de contato.

Segundo o fabricante do equipamento, no ensaio com contato, uma carga de contato é aplicada com um valor de 5% da tensão desvio e com uma faixa de erro de $\pm 2\%$. Como os valores de tensão desvio (axial) previstos pela norma variam de 20 kPa a 420 kPa, para o equipamento triaxial do ensaio, a carga de contato variou, respectivamente, de 1 kPa a 24 kPa.

$$MR = \frac{\sigma_d}{\epsilon_r}$$

Equação 1



(a)

Sequência	σ_3 , MPa	σ_d , MPa
1	0.020	0.020
2	0.020	0.040
3	0.020	0.060
4	0.035	0.035
5	0.035	0.070
6	0.035	0.105
7	0.050	0.050
8	0.050	0.100
9	0.050	0.150
10	0.070	0.070
11	0.070	0.140
12	0.070	0.210
13	0.105	0.105
14	0.105	0.210
15	0.105	0.315
16	0.140	0.140
17	0.140	0.280
18	0.140	0.420

(b)

Figura 2. Ensaio de MR: (a) equipamento triaxial de carga repetida e (b) estados de tensões usados neste estudo.

De posse dos resultados dos ensaios de MR para cada material, foi possível determinar as constantes de regressão (k) do modelo composto, utilizado pelo MeDiNa, de acordo com a Equação 2. O *software* para realização dos cálculos e determinação do modelo foi o Excel. As configurações de ensaios realizadas estão apresentadas na Tabela 1.

$$MR = k_1 \sigma_3^{k_2} \sigma_d^{k_3} \quad \text{Equação 2}$$

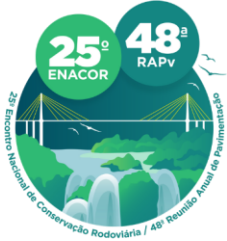
Tabela 1. Configurações dos ensaios realizados.

Tipo de carga de contato	Configuração
Com contato	Sem pedra porosa
	Com pedra porosa
Sem contato	Com disco poroso de bronze
	Com disco poroso de bronze

RESULTADOS PARCIAIS E DISCUSSÕES

Módulo de resiliência – Influência da carga de contato

Os resultados dos ensaios para determinação dos módulos de resiliência foram dispostos em gráficos (Figura 3), nas configurações com e sem contato com o CP. Nas Figuras 3a e 3b, inicialmente, nota-se a variação do MR em função da tensão confinante e da tensão desvio, respectivamente. Observa-se uma maior dispersão (menor R^2) dos resultados quando da não garantia do contato entre o corpo



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

www.rapvenacor.com.br



de prova e o pistão de aplicação de carga durante o ensaio em relação ao modelo constitutivo ajustado. Essa maior dispersão pode estar associada a deslocamentos do *topcap* na parte de cima do CP onde estão acoplados os LVDT's, quando da aplicação dos golpes do pistão. Pode-se notar ainda que ocorre a mesma tendência de crescimento do MR com o aumento de σ_3 e σ_d para a condição com e sem contato.

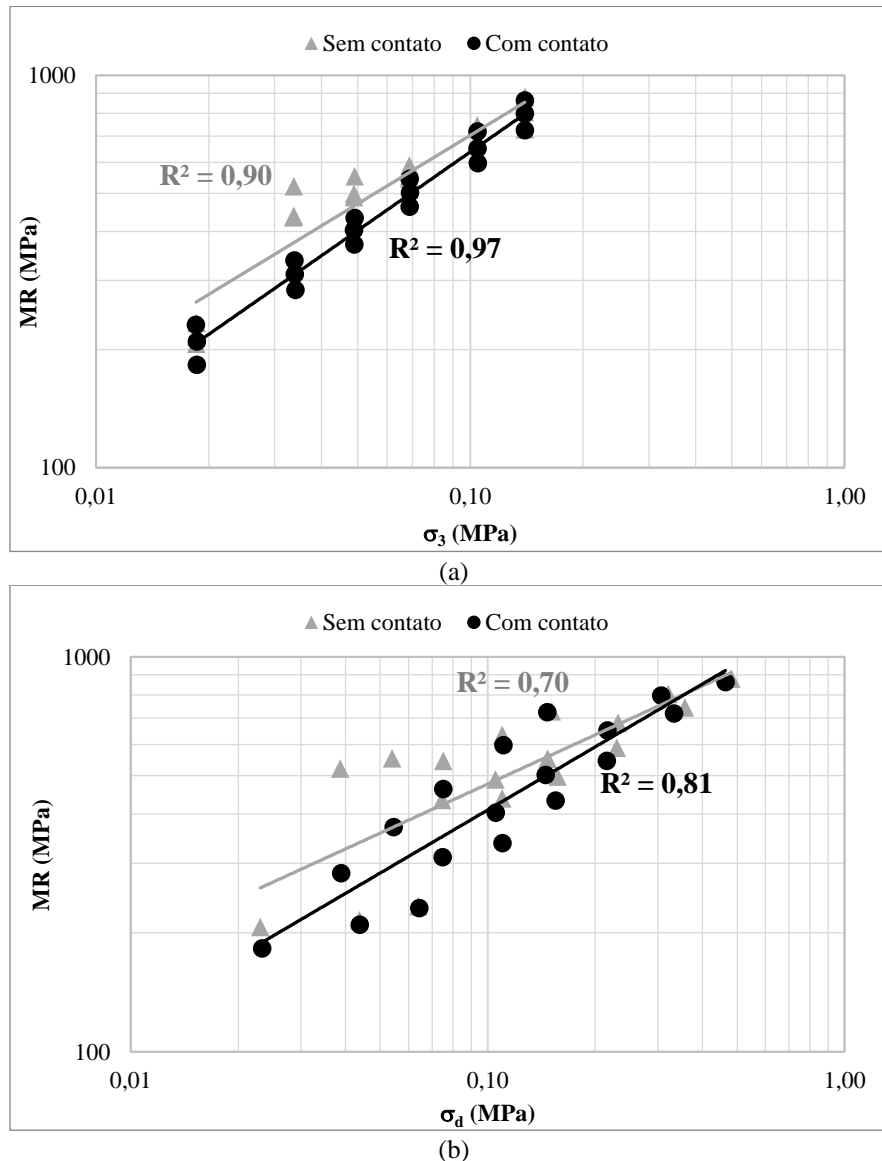
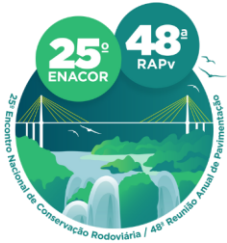


Figura 3. MR a partir de ensaios com e sem carga de contato em função (a) da tensão confinante e (b) da tensão desvio.

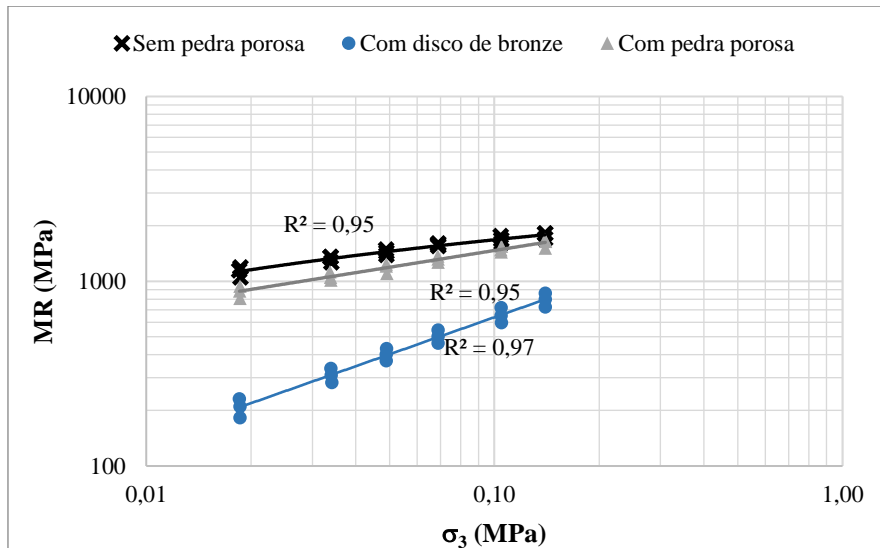
Módulo de Resiliência – Influência do tipo de pedra porosa

Após os ensaios, os resultados de MR nas diferentes configurações de presença de elementos porosos na base e no topo do corpo de prova de *nylon* foram dispostos conforme Figura 4. Ressalta-se que são resultados obtidos a partir de ensaios com carga de contato garantida durante a realização do ensaio.

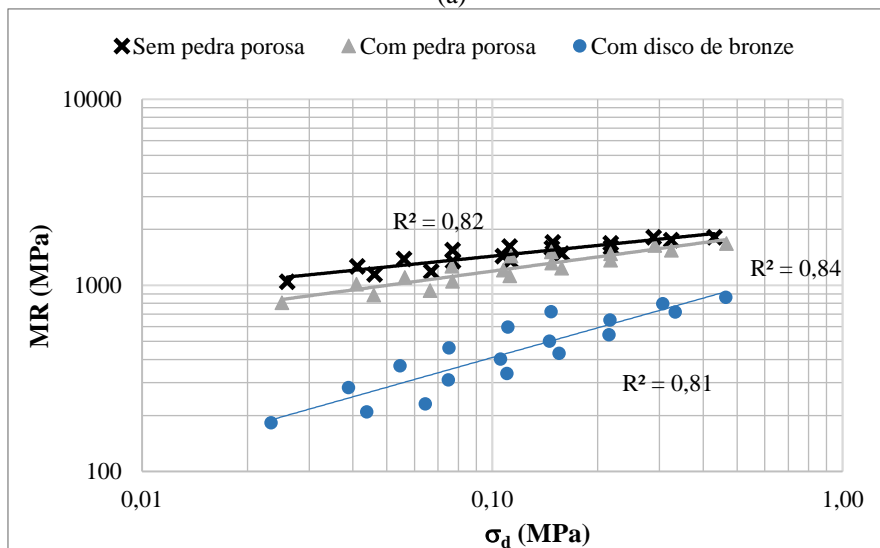


19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



(a)

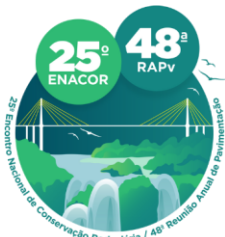


(b)

Figura 4. MR a partir de ensaios com diferentes configurações de elemento poroso no topo e base do corpo de prova em função (a) da tensão confinante e (b) da tensão desvio.

Nas Figura 4a e 4b, verifica-se, novamente, a variação do módulo de resiliência (MR) em função da tensão confinante e da tensão desvio, respectivamente. Observa-se grande diferença nos resultados para as diferentes configurações analisadas: (i) com a ausência de elemento poroso na base e topo do corpo de prova, o módulo de resiliência variou entre 1000 e 1800 MPa (média de 1488 MPa); e (ii) com a utilização de discos porosos de bronze, esses valores diminuem para índices entre 200 e 800 MPa (média de 479 MPa), ou seja, uma redução no valor médio do MR da ordem de 33%; (iii) com a utilização de pedra porosa também houve uma redução nos valores de módulo de resiliência em menor magnitude em relação ao disco poroso de bronze (módulo médio de 1258 MPa). Destaca-se que os valores obtidos sem elementos nas extremidades superior e inferior do CP estão mais próximos do módulo de elasticidade à compressão do *nylon* apresentado por fornecedores (1700 MPa).

Na Tabela 2, constam os resultados médios de MR do CP ensaiado e as constantes de regressão k_1 , k_2 e k_3 determinadas para o modelo composto, a partir dos resultados experimentais de MR. Os



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



valores do coeficiente de determinação (R^2) do conjunto de ensaios também são apresentados na Tabela 2 mostrando bom ajuste aos dados medidos.

Tabela 2. Valores médios de MR, k_1 , k_2 , k_3 , R^2 .

Tipo de carga de contato	Configuração	Parâmetros do Modelo Composto				R^2
		MR* (MPa)	k_1	k_2	k_3	
Com contato	Sem pedra porosa	1488,10	2694,57	0,16	0,06	0,98
	Com pedra porosa	1258,39	2780,35	0,21	0,09	0,99
Sem contato	Com disco de bronze	479,03	2626,00	0,50	0,16	1,00
	Com disco de bronze	541,56	2050,84	0,42	0,07	0,91

* Valores médios

Esses resultados também podem ser visualizados na Figura 5, onde é possível visualizar a influência das diferentes configurações no módulo de resiliência do material ensaiado.

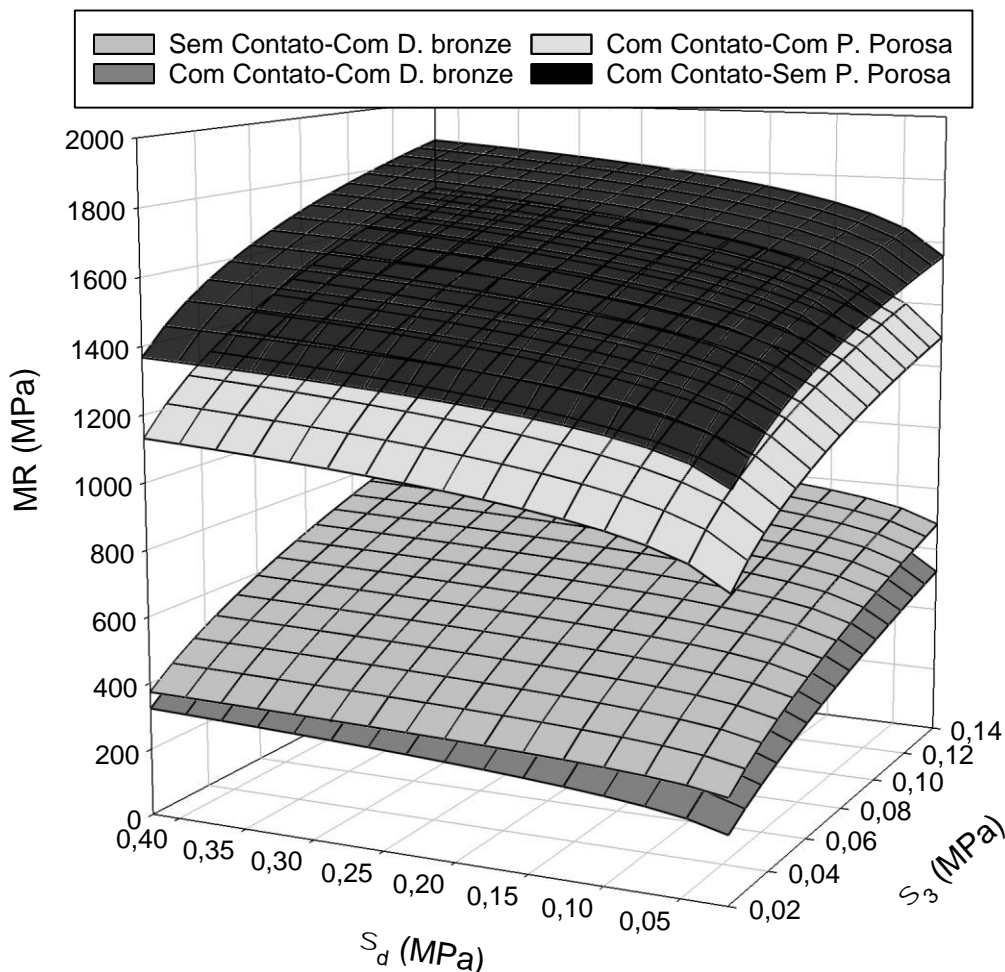
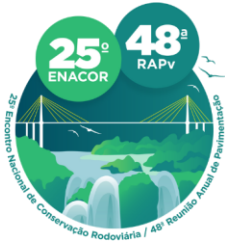


Figura 5. MR a partir de ensaios com diferentes configurações.



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

www.rapvenacor.com.br



CONCLUSÃO

Com os resultados obtidos, foi possível perceber a importância tanto da utilização da carga de contato durante o ensaio, quanto do elemento poroso no topo e na base do material testado. Mostrou-se também que a utilização de diferentes elementos na base e topo do corpo de prova, principalmente de materiais mais rígidos, pode comprometer os resultados obtidos em um ensaio dinâmico como o de módulo de resiliência, principalmente para solos com particularidades geotécnicas, como os solos tropicais brasileiros.

Esses resultados são parciais e serão complementados, numa próxima etapa, com testes em diferentes tipos de solos do Estado da Bahia e do Distrito Federal, por meio de pesquisa em desenvolvimento conjunto entre a Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (UFRB), Departamento de Estradas de Rodagem do Distrito Federal (DER/DF) e Universidade de Brasília (UnB). Outra parceria refere-se à Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF). Nesse sentido, foi montando um grupo de pesquisa, em que um dos objetivos é também o inter laboratorial para avaliação de questões relativas aos procedimentos e resultados de ensaios de projetos de pavimentos flexíveis.

Dada a importância dos solos tropicais para a pavimentação brasileira, as peculiaridades de sua utilização em condição não saturada e compactada e visando um melhor entendimento do comportamento tensão-deformação destes solos no contexto mecanístico-empírico abordado pelo MeDiNa, a execução de ensaios triaxiais necessita de clareza e uniformidade entre os profissionais da engenharia rodoviária durante todo o processo executivo do ensaio, de forma a não acarretar em dúvidas e possíveis prejuízos no projeto de dimensionamento do pavimento.

Assim, considera-se de suma importância que as normativas brasileiras sobre ensaios utilizando equipamentos triaxiais de carga repetida para solos estabeleçam metodologias em consonância com o estabelecido por normas internacionais, levando-se em consideração as características dos solos tropicais do Brasil.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

American Association of State Highway and Transportation Officials. AASHTO T307-99. Standard method of test for determining the resilient modulus of soils and aggregate materials, 2007.

AUSTROADS. AG:PT/T053: Determination of permanent deformation and resilient modulus characteristics of unbound granular materials under drained conditions. Austroads Working Group. Austrália, 2006.

Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. DNIT - ME 134. Pavimentação – Solos – Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2018.

Paula, G. F.; Fernandes, P. C.; Silva, R. C. Modelos tensão-deformação e parâmetros de solos tropicais de subleito do Distrito Federal. 10º Congresso Rodoferroviário Português, Lisboa, Portugal, 2022.

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, 105p, 1997.

Viana, H. M. F. Estudo do comportamento resiliente dos solos tropicais grossos do interior do estado de São Paulo., São Paulo, 320 p, 2007.

Vianna, A. A. D. Contribuição para o Estabelecimento de um Material Padrão e de Metodologia para Calibração de Equipamentos de Ensaios Dinâmicos. COPPE/UFRJ, M.Sc., Engenharia de Transportes. 100 p, 2002.

Washington State Department of Transportation's (WSDOT). Materials Manual - M 46-01.42. Engineering and Regional Operations - State Materials Laboratory, Washington State Department of Transportation's, 2023.