



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

APLICAÇÃO DE UM MÉTODO OTIMIZADO DE CARACTERIZAÇÃO DA DEFORMAÇÃO PERMANENTE DE SOLOS E MATERIAIS GRANULARES A PARTIR DE SIMULAÇÕES ESTRUTURAIS DE PAVIMENTOS

*Bruno Cavalcante Mota¹; Mariluce de Oliveira Ubaldo²; Francisco Thiago Sacramento Aragão³
& Luis Alberto Herrmann do Nascimento⁴*

RESUMO

O Método de Dimensionamento Mecanístico-Empírico MeDiNa é um importante avanço na área da pavimentação no Brasil, projetado de forma a dar protagonismo às características dos materiais adotados em campo nas obras. Para a identificação destas características, é necessária a realização de ensaios cíclicos, como o de deformação permanente. Atualmente, este ensaio é realizado com a aplicação de 150.000 ciclos e nove pares de tensões. Contudo, acredita-se que este programa experimental pode ser otimizado. Neste sentido, este trabalho adota o Método DP S, que foi desenvolvido recentemente para a avaliação da deformação permanente por meio da construção de curvas mestras. Análises foram realizadas para identificar o impacto da adoção desse método na análise mecanística de estruturas de pavimentos quanto ao afundamento de trilha de roda. Para isso, foram avaliados seis materiais com diferentes características. Foram construídas as curvas mestras e realizados dimensionamentos considerando os coeficientes do modelo adotado no MeDiNa. Resultados de simulações estruturais baseadas no DP S e no método atualmente normatizado não foram significativamente diferentes. Por fim, destaca-se que o método DP S mantém a acurácia na previsão dos afundamentos e possibilita uma redução no tempo de ensaio de até 70%.

PALAVRAS-CHAVE: curva mestra; MeDiNa; *shakedown*; otimização.

ABSTRACT

The Mechanistic-Empirical Design Method MeDiNa is an important advancement in the field of paving in Brazil, designed to give prominence to the characteristics of the materials used in the field. To identify these characteristics, it is necessary to carry out cyclic tests, such as that performed to assess the permanent deformation resistance of the materials. This test is currently carried out using 150,000 cycles and nine pairs of stresses. However, it is believed that this experimental program can be optimized. This work adopts the newly developed DP S Method, which was designed to evaluate permanent deformation based on the construction of master curves. The impact of adopting this method in the mechanistic analysis of pavement structures in terms of rutting was evaluated. To this end, six materials with different characteristics were evaluated. Master curves were constructed and pavement designs were carried out considering the coefficients of the model adopted in MeDiNa. The results of structural simulations based on DP S and on the currently standardized method were not significantly different. Finally, it should be noted that the DP S method maintains accuracy in predicting rutting and enables a reduction in test time of up to 70%.

KEY WORDS: master curve; MeDiNa; *shakedown*; optimization.

¹ Universidade Federal do Rio de Janeiro, e-mail: bruno.mota@coc.ufrj.br

² Universidade Federal do Rio de Janeiro, e-mail: mariluce@coc.ufrj.br

³ Universidade Federal do Rio de Janeiro, e-mail: fthiago@coc.ufrj.br

⁴ CENPES/PETROBRAS, e-mail: luisnascimento@petrobras.com.br



INTRODUÇÃO

O dimensionamento de pavimentos no Brasil, por muito tempo, foi realizado pelo método empírico do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT). Esse método foi desenvolvido na década de 1960 pelo engenheiro Murilo Lopes de Souza. É baseado no ensaio *California Bearing Ratio* (CBR), em que uma carga de 80 kN é considerada como o eixo-padrão e é adotado um coeficiente de equivalência obtido em pistas da AASHTO. A espessura é determinada para atender ao número de repetições do eixo-padrão, conhecido como o Número N (BALBO, 2007; MEDINA E MOTTA, 2015).

Para a elaboração deste método, foram considerados materiais com solos de fundação com propriedades americanas, não sendo bem representados pelos solos tropicais brasileiros. Ainda, ele estima apenas a utilização de mistura asfáltica tradicional no revestimento, sem considerar as novas tecnologias utilizadas para pavimentos flexíveis. Esse método também não prevê o surgimento de defeitos como o Afundamento de Trilha de Roda (ATR) e o trincamento por fadiga, decorrentes de fatores como o tráfego, os materiais e o clima (PITANGUI, 2019).

O MeDiNa foi idealizado a partir de pesquisas com o programa intitulado SisPAV, desenvolvido por Franco (2007). Estas pesquisas foram frutos da cooperação da Petrobras com universidades que compuseram a Rede Temática de Asfalto, a partir da qual foi acumulado um grande volume de informações de laboratório e de campo. Um Termo de Execução Descentralizada (TED) celebrado entre a COPPE/UFRJ e o DNIT resultou na proposição do Método MeDiNa.

Para a realização de análises de dimensionamento usando o MeDiNa, é necessária a identificação de características dos materiais obtidas a partir de ensaios em laboratório. Entre estas caracterizações, incluem-se o estudo dos materiais naturais das jazidas e do solo de subleito que serão utilizados para compor as camadas de base, sub-base e reforço do subleito (BARBOSA *et al.*, 2021). Para a análise mecanístico-empírica, são utilizados dados como umidade ótima, massa específica e resultados dos ensaios de Módulo de Resiliência (MR) e de Deformação Permanente (DP), padronizados pelas normas DNIT 134 (2018a) e DNIT 179 (2018b), respectivamente.

O modelo de previsão da DP de solos e britas constituintes de pavimentos proposto por Guimarães (2009) integra o Método MeDiNa. Para que um material possa ser utilizado na estrutura de um pavimento, é preciso que sejam determinados seus parâmetros de DP, ou Ψ_i , a partir de uma sequência de ensaios triaxiais de cargas repetidas para variados estados de tensões.

A Norma DNIT 179 (2018b) padroniza nove ensaios com estados de tensões distintos, permanecendo cada estado de tensões constante ao longo do mesmo ensaio, em que são aplicados 150.000 ciclos de carga. Lima (2020) ressaltou a possibilidade de utilização de apenas seis pares de tensão para materiais pouco deformáveis. A frequência de aplicação de cargas pode ser de 1 Hz a 5 Hz, dependendo do tipo de equipamento que esteja sendo empregado.

Este entendimento sobre o comportamento do material é essencial para facilitar a sua seleção e aplicação em camadas de pavimentos. No entanto, o programa experimental é reconhecidamente demorado e pode levar cerca de dez dias úteis para ser concluído para um único material, quando



executado na frequência de 2 Hz. Nesse sentido, o objetivo deste artigo é avaliar a utilização do Método DP S, que analisa a DP a partir da construção de curvas mestras, e o impacto da adoção desse método na análise mecânica de estruturas de pavimentos quanto ao afundamento de trilha de roda.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Devido à importância do estudo da DP de solos e materiais granulares, diversos modelos foram desenvolvidos e aprimorados para que fosse possível prevê-la, considerando a sua aplicação na composição de camadas de pavimentos. Um dos principais parâmetros na análise do comportamento de um solo quanto à DP é a sequência de tensões à qual o material é submetido. Monismith *et al.* (1975) indicaram um efeito de enrijecimento em uma argila siltosa devido a uma série de aplicações de tensões.

O estado de tensões pode ser expresso pelo histórico, magnitude e configuração das tensões principais aplicadas durante a passagem de veículos sobre os pavimentos. Barksdale (1972) observou que quanto maior a tensão desvio e a razão de tensões, maior será a DP total. Lashine (1971 *apud* Lekarp *et al.*, 2000) indicou que a DP se mostra associada a uma relação entre tensão desvio e confinante (σ_d/σ_c), indicando proporcionalidade entre a deformação e as tensões aplicadas.

Autores como Barksdale (1972), Lekarp e Dawson, (1998), Rezende (1999) e Guimarães (2009) indicaram que a configuração das cargas influencia a DP, que tende a aumentar com a tensão desvio. Lekarp *et al.* (2000) e Guimarães (2009) indicaram uma relação inversamente proporcional entre a DP e a tensão confinante.

Guimarães (2009) desenvolveu um método mecânico-empírico para a previsão da DP em solos tropicais e outros materiais granulares. O autor utilizou variados estados de tensões nos ensaios para uma mesma amostra, sendo essas compatíveis com as observadas em campo.

No Brasil, em geral, modelos matemáticos não têm sido desenvolvidos. Ao invés disso, o que tem ocorrido é a avaliação de novos parâmetros que podem ser incorporados ao modelo de Guimarães (2009). Os modelos mais recentes consideram diversos fatores como índice de vazios, umidade e características físicas do material.

Lima (2020) recomendou a diminuição de nove para seis pares de tensões em materiais pouco deformáveis. Cabral (2021) ensaiou materiais que se acomodaram com menos de 10.000 ciclos, analisando-os pelo modelo de multiestágios. Silva *et al.* (2021) destacaram que foram obtidos valores de deformações plásticas de 90% para 50.000 ciclos em relação à deformação total para os materiais estudados.

Recentemente, Mota *et al.* (2023; 2024) desenvolveram um método otimizado de ensaio e análise da DP de solos e materiais granulares a partir da construção de curvas mestras. O modelo se baseia na observação de equivalência entre os valores de DP para diferentes combinações de par de tensão e número de ciclos de carga. A análise é feita em um espaço reduzido, o que permite a avaliação da DP do material para um determinado par de tensão considerando um espectro de ciclos reduzidos muito mais amplo do que o de ensaio.



MÉTODO DE PESQUISA

O modelo otimizado de DP

Este artigo avalia o impacto da adoção do modelo otimizado de Mota *et al.* (2023; 2024) na resposta mecânica de ATR de estruturas de pavimentos, a partir de análises pelo método mecanístico-empírico MeDiNa. O método é intitulado DP S, devido ao parâmetro S envolvido na sua formulação, que considera a razão de tensões.

O modelo é matematicamente igual ao desenvolvido por Guimarães (2009) e é representado pelas Equações 1 a 3. Essas equações foram obtidas a partir do desmembramento do modelo de Guimarães (2009) para visualizar o impacto da magnitude das tensões e a sua influência nos resultados de DP. Elas são utilizadas para a construção das curvas mestras, a partir dos fatores de translação (FTs). Contudo, a partir das curvas mestras, o modelo DP S permite a visualização da influência dos pares de tensões nos valores de DP e a sua obtenção a partir do princípio da superposição.

$$S = \left(\frac{\sigma_c}{0,04} \right)^{s_1} \times \left(\frac{\sigma_d}{\sigma_c} \right)^{s_2} \quad (1)$$

onde σ_c é a tensão confinante e σ_d é a tensão desvio (em MPa).

$$DP S = a_1 \times S^{a_2} \times N^{a_3} \quad (2)$$

onde N é a quantidade de ciclos aplicados.

$$N_{red} = N \times FT \quad (3)$$

Os coeficientes s_1 e s_2 do parâmetro S e a_1 , a_2 e a_3 da DP S são calculados por um processo iterativo de minoração do erro quadrático médio (*mean square error*, MSE, em inglês) entre os valores de deformação obtidos no ensaio e pelo modelo, com o solver do Excel.

Para construir uma curva mestra para as propriedades viscoelásticas de materiais asfálticos, é selecionada uma temperatura de referência. De forma análoga, no procedimento descrito por Mota *et al.* (2023; 2024), é definido um par de tensões de referência. Para a proposição do modelo, foi escolhido o par 40/120 (σ_c/σ_d , kPa/kPa), de razão 1/3, porque ele foi aplicado a todos os materiais avaliados.

No processo de deslocamento, as curvas dos pares com razão σ_c/σ_d maior que 1/2 são transladadas para a esquerda e os pares com razão ou tensão confinante menor que 1/2 são transladados para a direita. Isso ocorre porque as razões de pares mais severos (1/3) representam a DP de ciclos mais elevados para um par com menor razão de tensões.

Por fim, com os resultados de DP obtidos a partir das curvas mestras, obtêm-se os coeficientes do modelo de Guimarães (2009) para serem usados como parâmetros de entrada no MeDiNa. Nessa etapa, o solver é novamente executado para que se obtenham os coeficientes do modelo de Guimarães (2009), a partir da redução dos erros quadráticos, com os valores obtidos pelas curvas mestras.



No desenvolvimento do método otimizado de DP, Mota *et al.* (2023; 2024) propuseram os pares de tensões e quantidade de ciclos apresentados na Tabela 1. Os autores destacaram que caso o material não suporte pares de tensões mais severos, como o 120/360, o mais severo anterior a ele deve ser aplicado por 150.000 ciclos. Essa quantidade de ciclos foi definida a partir de uma amostragem de 24 solos e materiais granulares que haviam sido ensaiados anteriormente até 150.000 ciclos. Os dados obtidos foram reanalisados pela metodologia de construção de curvas mestras e foi identificado que apenas 10.000 ciclos eram suficientes para a previsão da DP a partir das curvas construídas. Optou-se pela aplicação de 150.000 ciclos para o par 120/360 para que não fosse necessária fazer a extrapolação da curva mestra depois da sua geração.

Tabela 1. Pares de tensão e número de ciclos do método otimizado DP S (Fonte: MOTA *et al.*, 2024)

Tensão confinante σ_3 (kPa)	Tensão desvio σ_d (kPa)	Número de ciclos
40	40	10.000
80	80	10.000
120	240	10.000
40	120	10.000
80	240	10.000
120	360	150.000

Avaliação mecanístico-empírica do ATR

Para analisar o impacto da modificação do número de ciclos proposta pelo método DP S, foram realizadas simulações de uma estrutura de pavimento no MeDiNa, modificando os materiais da base para os avaliados neste artigo. As simulações ocorreram tanto para o procedimento da norma DNIT 179 (2018b), quanto para o método otimizado de DP S.

A Tabela 2 apresenta os materiais utilizados neste artigo e a Figura 1, a estrutura padrão definida. Para esse estudo, foram selecionados dois materiais com granulometria intermediária, dois materiais com granulometria fina e duas britas. Os materiais do revestimento e do subleito foram selecionados da base de dados do próprio MeDiNa.

Tabela 2. Materiais analisados pelos métodos da DNIT 179 (2018b) e DP S

Id.	Material	Granulometria (%)		MR médio (MPa)	Classificação MCT	h_{ot} (%)	Energia de compactação
		Argila/Silte/Areia/Pedregulho					
M1	Solo	17/23/55/5		289,00	NG'	17,0	Normal
M2	Solo	12/42/45/1		178,00	NS'	11,9	Intermediária
M3	Solo	56/17/27/0		250,00	LG'	22,5	Intermediária
M4	Solo	54/7/38/1		201,36	NG'	20,7	Normal
M5	Brita	Brita		381,00	-	3,2	Intermediária
M6	Brita	Brita		384,00	-	2,6	Modificada



Revestimento (10 cm): RJ CAP 30/45 #12,5mm Sepetiba

Base (15 cm): Variando os materiais da Tabela 2

Subleito: Solo siltoso NS'

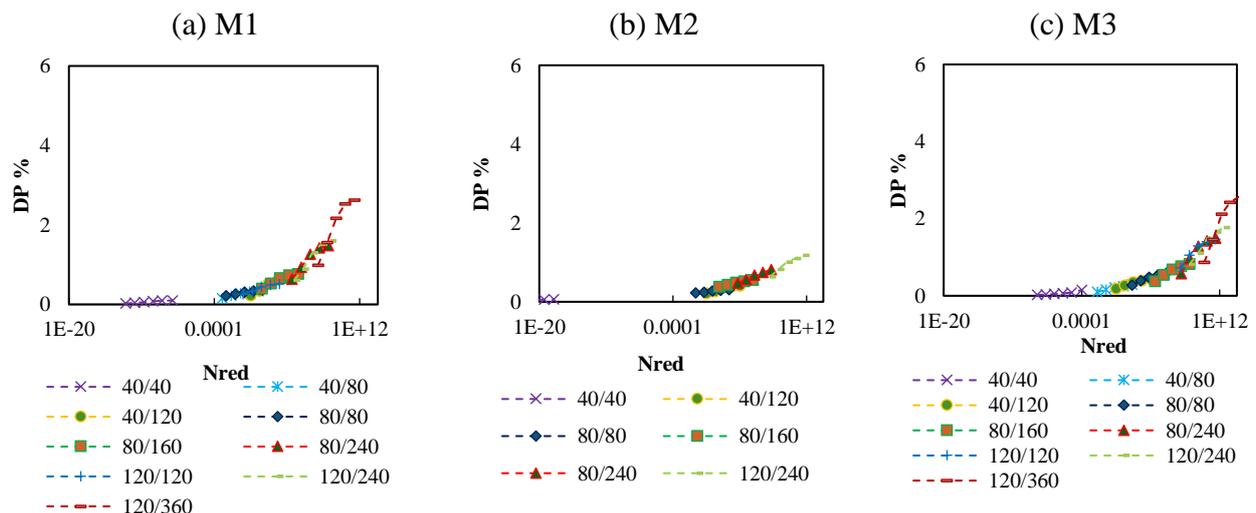
Figura 1. Estrutura padrão para avaliação do ATR

As análises mecanístico-empíricas foram realizadas com os coeficientes do modelo de Guimarães (2009) obtidos a partir das duas metodologias (Norma DNIT 179 e método DP S). O MR foi considerado linear, conforme apresentado na Tabela 2. Os coeficientes do modelo de Guimarães são apresentados na seção de resultados. Também foi analisada a influência do volume de tráfego. Para isso, foram verificados os ATRs para um tráfego leve ($N = 5 \times 10^5$), um tráfego médio ($N = 5 \times 10^6$) e um tráfego pesado ($N = 5 \times 10^7$). Essa classificação de tráfego se enquadra nos intervalos propostos pelo DNIT (2006).

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Construção das curvas mestras

Com os resultados de DP obtidos no equipamento de ensaios triaxiais de cargas repetidas, foram geradas as curvas mestras e determinados os coeficientes do modelo de Guimarães (2009). A Figura 2 apresenta as curvas mestras para os seis materiais avaliados, considerando o par de tensão de referência de 40/120. Os gráficos para os demais pares podem ser obtidos usando os fatores de translação.



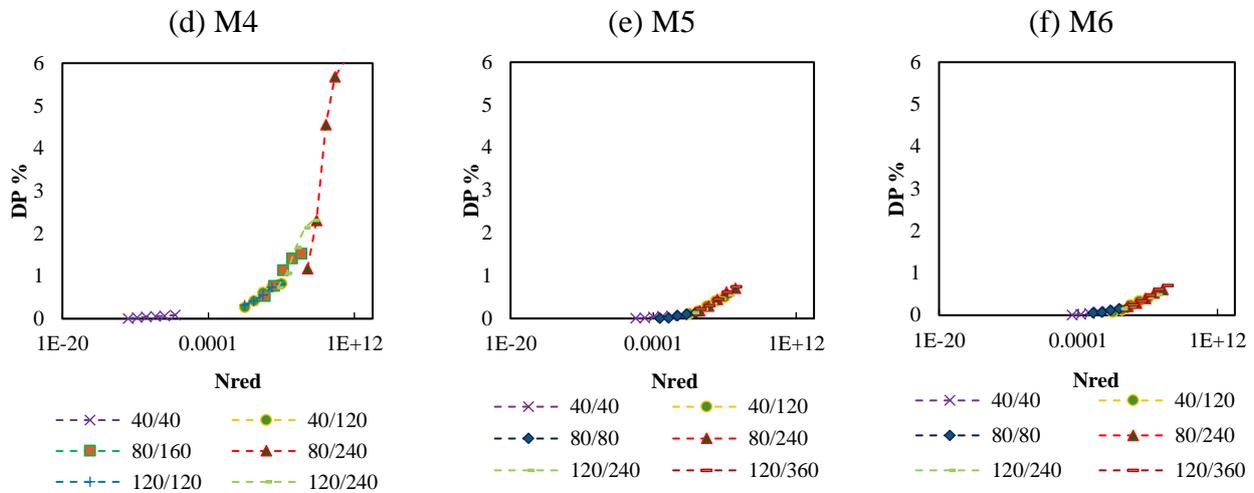


Figura 2. Curvas mestras dos materiais analisados para o par 40/120

Com as curvas mestras no par de referência e os fatores de translação, foram geradas as curvas para os demais pares, de cada material. Após esse procedimento, foram previstos os valores de DP pelo modelo de Guimarães para a obtenção dos coeficientes ψ_i . A Tabela 2 apresenta os coeficientes obtidos a partir do procedimento da Norma DNIT 179 (2018b) e com o Método DP S, considerando 10.000 ciclos por par de tensão, com exceção do mais severo, para o qual foram aplicados 150.000 ciclos.

Tabela 2. Coeficientes do modelo de Guimarães

Método	Coeficiente	Material					
		M1	M2	M3	M4	M5	M6
DNIT 179	Ψ_1	0,2713	0,3513	0,5815	0,0428	0,1967	0,0884
	Ψ_2	-0,0085	0,1996	1,0241	-2,0025	-0,0558	-0,5535
	Ψ_3	1,3873	0,7116	0,6281	4,3048	0,5857	1,0924
	Ψ_4	0,0503	0,0432	0,0480	0,0701	0,0735	0,0831
	R^2	0,9831	0,5913	0,9572	0,9406	0,5989	0,9785
DP S	Ψ_1	0,2895	0,2159	0,5788	0,0479	0,0733	0,0928
	Ψ_2	-0,0045	0,3011	1,2410	-1,8979	-0,8586	-0,5149
	Ψ_3	1,2705	1,2609	0,5399	4,2117	1,2297	1,0330
	Ψ_4	0,0564	0,0601	0,0627	0,0781	0,0962	0,0827
	R^2	0,9730	0,9947	0,9707	0,9884	0,9554	0,9526

Observa-se que nos materiais M1, M4, M5 e M6 a tensão confinante foi inversamente proporcional à deformação. Contudo, o mesmo padrão não foi observado para os materiais M2 e M3. Cabe uma investigação futura sobre essa influência. Após a obtenção dos coeficientes do modelo de Guimarães, foram realizadas as avaliações da estrutura da Figura 1 para os dois cenários (DNIT 179 e DP S) em cada material. A Figura 3 apresenta a comparação do ATR total em cada situação analisada, nos três níveis de tráfego avaliados.

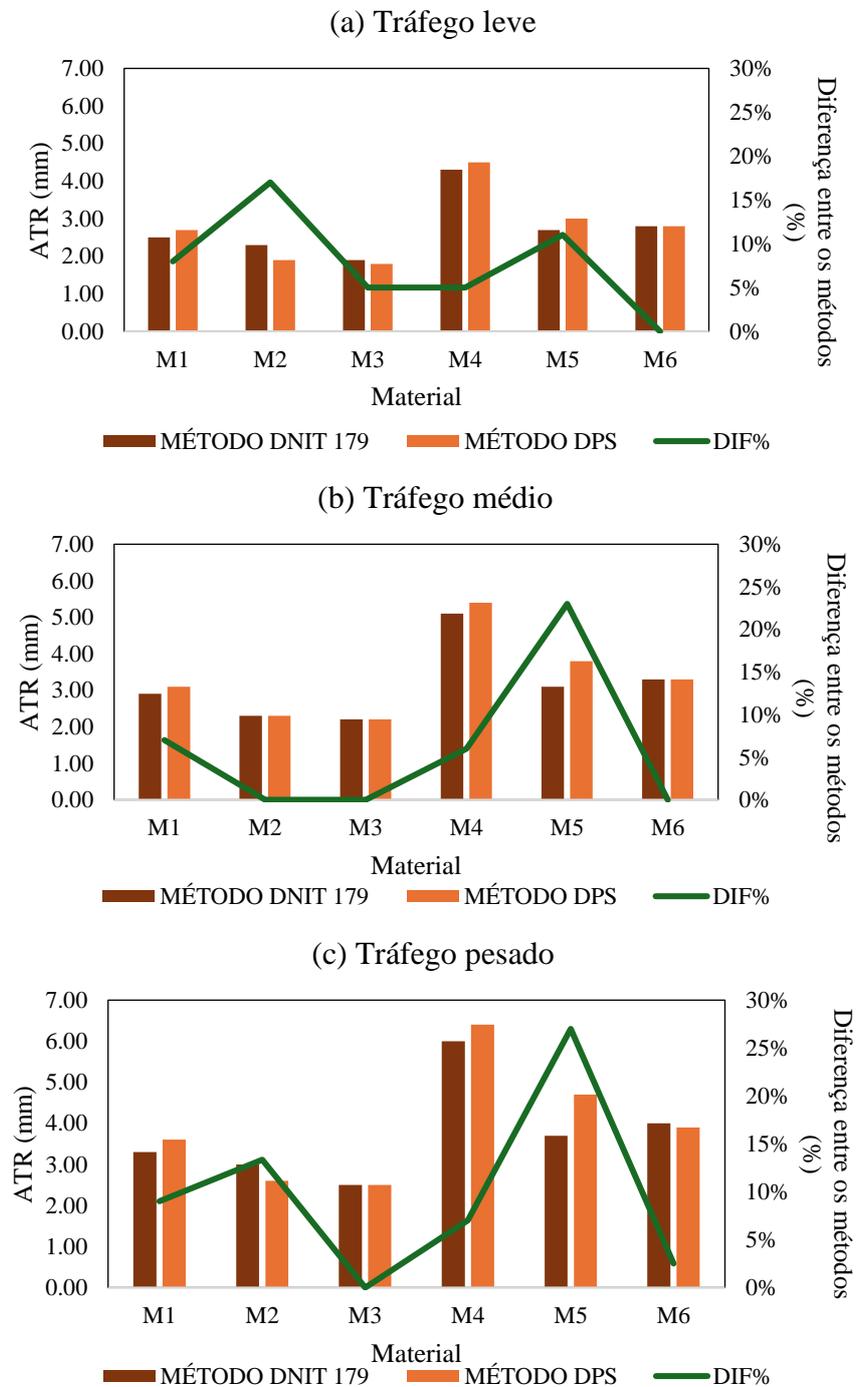


Figura 3. ATR final e diferenças percentuais entre métodos

A observação da Tabela 2 indica que os materiais que tiveram maior sensibilidade na comparação entre os métodos foram os que apresentaram uma maior variação do R^2 e entre os coeficientes do modelo. Essa análise é importante, pois permite identificar que o procedimento das curvas mestras pode retornar previsões da DP próximas do comportamento real.



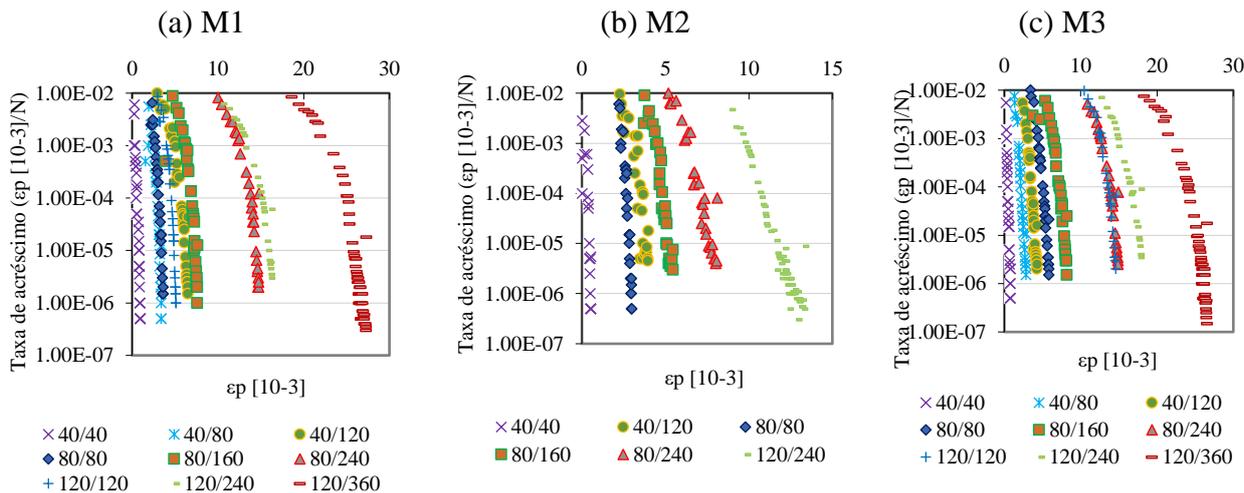
Pelas curvas mestras geradas para o par de tensões 40/120, observa-se que o material com a maior DP foi o M4. Esse resultado é sustentado por esse material ter sido compactado na energia normal, possuir alta porcentagem de argila, ser classificado como não-laterítico e argiloso, ter baixo MR e elevada umidade ótima. O par de tensões mais severo suportado foi o de 80/240. Naturalmente, as maiores porcentagens de DP foram referentes a ele.

O resultado também se confirmou com a avaliação estrutural do pavimento quando o Material M4 compôs a camada de base. Nesta situação, foram obtidos os maiores afundamentos para os três níveis de tráfego. Contudo, o ATR máximo da estrutura de 6,40 mm, obtido pelo método DP S para o tráfego pesado, foi inferior ao limite de 12,5 mm estipulado pelo MeDiNa.

O Material M5 foi o que apresentou a maior diferença percentual entre os resultados do método DNIT 179 (2018b) e do método DP S. Apesar de ser caracterizado como uma brita e apresentar baixos percentuais de DP pela curva mestra, esse material apresentou uma sensibilidade ao tráfego e às tensões aplicadas. Assim, foi necessário investigar a curva de *shakedown* para observar se ele apresentava potencial de estabilização.

A Figura 4 apresenta a curva de *shakedown* para todos os materiais. Observa-se que houve estabilização somente para o par de tensões 40/40 para o Material M5 (Figura 4e). Os demais pares de tensões foram classificados como de tipos de comportamento de B e AB. As curvas de *shakedown* foram obtidas com a mesma quantidade de ciclos adotadas no método DP S, em que apenas o par de tensões mais severo é analisado até 150.000 ciclos.

O material principal, M6, é semelhante ao M5. A única diferença entre eles é a energia de aplicada na sua compactação, ou seja, intermediária para o M6 e modificada para o M5. Como consequência, o M6 apresentou menor afundamento do que o M5. Também se percebeu uma maior proximidade entre resultados obtidos considerando os Métodos DNIT 179 (2018b) e DP S quando a energia modificada foi adotada. Para esse material, a maior diferença percentual, 3%, ocorreu para o tráfego pesado.



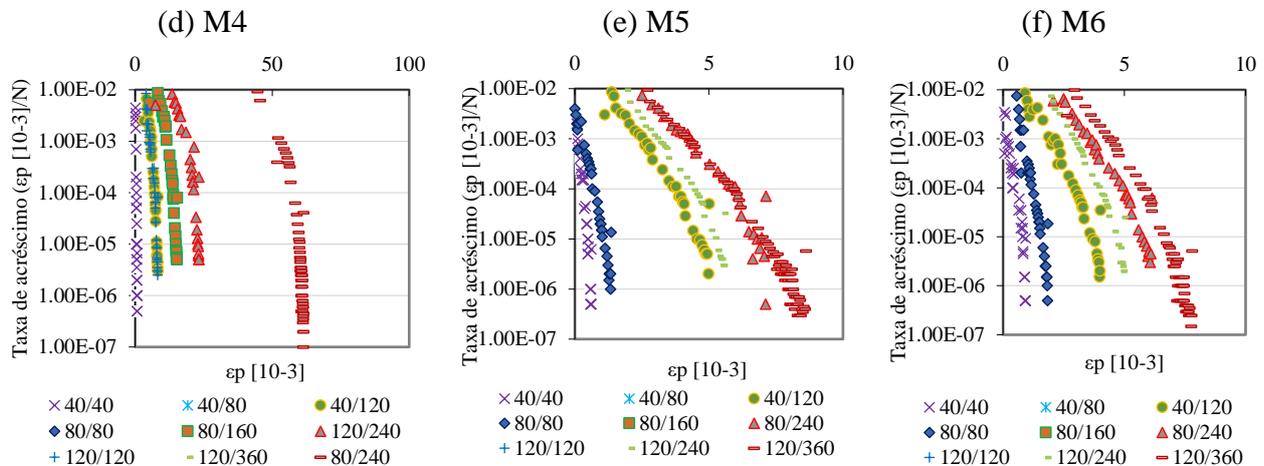


Figura 4. Curva de *shakedown* para os materiais analisados

O Material M2 também apresentou elevada diferença percentual quando comparados os resultados de ATR total, principalmente com relação ao tráfego leve. Contudo, considerando o tráfego médio, não houve diferença percentual evidente entre os Métodos DNIT 179 (2018b) e DP S. Isso convergiu com o espectro de N_{red} para o par de tensões 40/120, para o qual 70% da DP total foi atingida para um N_{red} de até 50.000.

O Material M3 apresentou um bom comportamento quando se consideraram os valores de DP obtidos pela curva mestra, mesmo possuindo uma elevada porcentagem de finos e uma alta umidade ótima. A sua classificação como solo de comportamento laterítico argiloso e a energia de compactação intermediária contribuíram para a obtenção de baixas porcentagens de DP, quando comparadas às do Material M4, que possui quantidade de finos semelhante e para o qual foi aplicada uma menor energia de compactação.

Por fim, observa-se uma maior sensibilidade do método DP S para os tráfegos leve e pesado, a depender do tipo de material, do seu comportamento quanto ao *shakedown* e da razão de tensões à qual o material é submetido. Com relação à razão de tensões, observa-se que o método DP S amplia a contribuição das tensões desvio e confinante no valor de ATR nos materiais M2 e M5. Para o Material M5, o aumento no valor de ATR é justificado por conta da não estabilização da DP para quase todos os pares de tensões. Enquanto isso, o Material M2 apresenta redução nos valores de ATR, pois os pares de tensões menores atingem o *shakedown*, sendo estes que chegam até a parte inferior da camada.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho avaliou a resposta mecânica de uma estrutura de pavimento pelo Método MeDiNa, variando os materiais da camada de base. Esses materiais foram analisados por duas metodologias: (i) Norma DNIT 179 (2018b) e (ii) Método DP S. Foram comparados os valores finais de ATR obtidos para cada material e nível de tráfego avaliados.



Os resultados indicaram que mesmo com uma quantidade bem menor de ciclos por par de tensões, a previsão do ATR dos materiais para todos os pares de tensões se manteve próxima da obtida quando o número tradicional de 150.000 ciclos foi adotado. Também foi observada uma susceptibilidade do material quanto à ocorrência ou não do *shakedown*. Quando não ocorre o acomodamento, as diferenças percentuais entre os métodos tendem a ser mais elevadas. Outro fator que contribui para diferenças entre os métodos é a energia de compactação. Quanto maior a energia, mais semelhantes os resultados entre as metodologias.

O método DP S propõe a mudança da quantidade ciclos para 10.000 nos cinco pares de tensões iniciais e mantém a aplicação de 150.000 ciclos para o par de tensão mais severo, o 120/360 neste estudo, sendo os ensaios realizados a uma frequência de 2 Hz. Quando o material não atinge o par 120/360, o último par ensaiado deve ir até 150.000 ciclos. Assim, é importante realizar o ensaio seguindo a sequência dos pares: 40/40, 80/80, 40/120, 80/240, 120/240 e 120/360. Além disso, seis pares de tensão são suficientes para a caracterização da DP sem perda de acurácia. Desse modo, o método DP S proporciona uma redução de até 70% do tempo de ensaio, possibilitando uma análise que considera características como acomodação de deformações permanentes, umidade ótima, energia de compactação, granulometria e classificação geotécnica. Estudos adicionais estão em andamento para a avaliação de uma quantidade ainda mais ampla de materiais que tenham comportamentos distintos para contemplar as características pedológicas de todas as regiões do país.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o financiamento da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) - Código de Financiamento 001, do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela Chamada Universal 01/2023, da Agência Nacional do Petróleo (ANP) por meio do PRH-4 e do CENPES/PETROBRAS.

REFERÊNCIAS

- BALBO, J. T. **Pavimentação asfáltica: materiais, projeto e restauração**. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.
- BARBOSA, D. S.; SILVA, D. C.; AGUIAR, M. F. M. Análise comparativa entre o novo método de dimensionamento nacional de pavimentos - MeDiNa e o método do DNIT. **Anais do 35º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes da ANPET**, v. 1, pp. 861-872, ANPET, 100%Digital, 2021.
- BARKSDALE, R. D. Laboratory Evaluation of Rutting in Base Course Materials. **Proceedings of the Third International Conference on Structural Design of Asphalt Pavements**, Londres, Inglaterra, 1972.
- CABRAL, W. S. **Exploração, análise comparativa e modelagem da deformação permanente de materiais granulares da microrregião de Mossoró/RN**. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, 2021.
- DNIT. **Manual de pavimentação**. Rio de Janeiro: IPR, 2006. 274 p.
- DNIT. **NORMA DNIT 134/2018 - ME: Pavimentação - Solos - Determinação do módulo de resiliência - Método de ensaio**. Rio de Janeiro: IPR, 2018a.
- DNIT. **NORMA DNIT 179/2018 - IE: Pavimentação - Solos - Determinação da deformação permanente - Instrução de ensaio**. Rio de Janeiro: IPR, 2018b.



- FRANCO, F. A. C. P. **Método de dimensionamento mecânico-empírico de pavimentos asfálticos - SISPAV**. Tese de Doutorado, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2007.
- GUIMARÃES, A. C. R. **Um Método Mecânico Empírico para a Previsão da Deformação Permanente em Solos Tropicais Constituintes de Pavimentos**. Tese de Doutorado, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2009.
- LEKARP, F.; DAWSON, A. Modelling Permanent Deformation Behavior of Unbound Granular Materials. **Construction and Building Materials**, v. 12, n. 1, pp. 9-18, 1998.
- LEKARP, F.; ISACSSON U.; DAWSON, A. State of the art. II: permanent strain response of unbound aggregates. **Journal of Transportation Engineering**, v. 126, n. 1, pp. 76-83, 2000.
- LIMA, C. D. A. **Avaliação da deformação permanente de materiais de pavimentação a partir de ensaios triaxiais de cargas repetidas**. Tese de Doutorado, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2020.
- MEDINA, J.; MOTTA, L. M. G. **Mecânica dos Pavimentos**. 3ª ed. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2015.
- MONISMITH, C. L.; OGAWA, N.; FREEME, C. R. Permanent deformation characteristics of subgrade soils due to repeated loading. **Transportation Research Record**, v. 537, pp. 1-17, 1975.
- MOTA, B. C.; UBALDO, M. O.; LIMA, C. D. A.; NASCIMENTO, L. A. H.; ARAGÃO, F. T. S. Análise da deformação permanente de materiais granulares a partir do conceito da curva mestra. **Anais da 48ª Reunião Anual de Pavimentação**, v. 1, pp. 1-10, ABPV, Foz do Iguaçu, 2023.
- MOTA, B. C.; UBALDO, M. O.; LIMA, C. D. A.; NASCIMENTO, L. A. H.; ARAGÃO, F. T. S. Optimized characterization of the permanent deformation of unbound granular materials considering the master curve concept. **Proceedings of the 103rd Transportation Research Board (TRB) Annual Meeting**, TRB, Washington, 2024.
- PITANGUI, L. C. **Análise comparativa do método do DNER com o método mecânico-empírico MeDiNa**. Trabalho de Conclusão de Curso, Graduação em Engenharia Civil, Universidade de Brasília, 2019.
- REZENDE, L. R. **Técnicas alternativas para a construção de bases de pavimentos rodoviários**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília, 1999.
- SILVA, M. F.; RIBEIRO, M. M. P.; FURLAN, A. P.; FABBRI, G. T. P. Effect of compaction water content and stress ratio on permanent deformation of a subgrade lateritic soil. **Transportation Geotechnics**, v. 26, p. 100443, 2021. DOI: 10.1016/j.trgeo.2020.100443.