

ANÁLISE DAS TENSÕES APLICADAS NOS ENSAIOS DE DEFORMAÇÃO PERMANENTE DE SOLOS E BRITAS PARA O DIMENSIONAMENTO MECANÍSTICO-EMPÍRICO DE PAVIMENTOS

Caroline Dias Amancio de Lima
Laura Maria Goretti da Motta
Francisco Thiago Sacramento Aragão
Programa de Engenharia Civil - COPPE
Universidade Federal do Rio de Janeiro

RESUMO

O ensaio atualmente normatizado no país para a caracterização do potencial de acúmulo de deformações permanentes (DP) em solos e britas é realizado em um equipamento triaxial de cargas repetidas, com a aplicação de até 150 mil ciclos de um par de tensões por corpo de prova. A norma sugere nove pares de tensões e propõe um modelo de previsão de DP. Porém, permite que engenheiros projetistas selecionem estes pares, contanto que sejam no mínimo seis. Este trabalho avalia três solos e uma brita graduada simples em ensaios realizados seguindo as recomendações da norma de DP variando os pares de tensão selecionados na análise. Adicionalmente, análises estatísticas dos modelos de previsão e simulações no programa MeDiNa são realizadas e evidenciam a importância da escolha cuidadosa dos pares de tensões adotados nos ensaios quando os nove pares indicados pela norma não são todos adotados.

ABSTRACT

The currently standardized test in the country for the characterization of the potential to accumulate permanent deformations (PD) in soils and crushed stones is conducted in repeated load triaxial equipment, with the application of up to 150,000 cycles of a pair of stresses on each testing specimens. The standard suggests nine pairs of stresses and proposes a PD predictive model. However, it allows pavement design engineers to select these pairs of stresses, as long as they are at least six. This research evaluates three soils and one crushed gravel based on tests conducted following recommendations of the PD standard by varying the selected pairs of stresses in the analysis. In addition, statistical analyses of the predictive models and simulations in the MeDiNa program are performed and highlight the importance of the careful selection of the stress states adopted in the tests when all the nine pairs indicated by the standard are not adopted.

1. INTRODUÇÃO

Os pavimentos rodoviários são o meio mais utilizado para o escoamento de cargas e a locomoção de pessoas. Um pavimento bem dimensionado atinge a vida útil de projeto sem apresentar um nível inaceitável de dano. O surgimento de defeitos estruturais deve ser devidamente previsto e para isso são utilizados ensaios mecânicos de seleção dos materiais como um pré-requisito para o sucesso da análise do pavimento.

A caracterização em laboratório do potencial de deformação permanente (DP) é realizada a partir de ensaios mecânicos que fornecem informações sobre a parcela plástica do material quando este é submetido a muitos ciclos de aplicação de carga, em diferentes estados de tensão. Esta parcela plástica corresponde à deformação que não é recuperada, após cessada a solicitação.

O defeito resultante dessa parcela permanente é o afundamento de trilha de roda (ATR) que pode ser devido ao deslocamento da camada de revestimento ou das camadas subjacentes a ele. Werkmeister *et al.* (2002) e Guimarães (2009) comentam sobre a necessidade da caracterização em laboratório dos materiais para garantir pavimentos resistentes ao acúmulo acentuado de DP na superfície, ao longo do tempo.

O ensaio de DP para solos e materiais granulares tem sido realizado no equipamento triaxial de cargas repetidas e há uma norma brasileira recente de instrução deste ensaio: DNIT 179/2018-IE (DNIT, 2018a). Autores (Lekarp *et al.*, 2000; Guimarães, 2009; Hussain *et al.*,

2011; Lima *et al.*, 2017; Lima *et al.*, 2019) vêm estudando distintos materiais e ressaltam que diferentes fatores podem influenciar o comportamento do material durante este ensaio: propriedades intrínsecas do material, grau de compactação, composição granulométrica, tensões aplicadas, teor de umidade e número de aplicações de ciclos de carga, entre outros.

As tensões são um dos principais fatores influenciadores no acúmulo de deformação permanente na estrutura do pavimento, tanto em laboratório quanto em campo. Por isso, é imprescindível que se tenha um conhecimento prévio do material sob vários níveis de tensão antes de este ser aplicado em campo para que o pavimento não venha a deformar plasticamente de forma acentuada e necessitar de reparo prematuramente.

A norma brasileira sugere um modelo de previsão de DP que é utilizado no programa computacional do novo método brasileiro de dimensionamento mecânico-empírico de pavimentos asfálticos, o MeDiNa. Para uma boa regressão do modelo, são necessários no mínimo seis pares de tensões ensaiados. Os pares devem ser devidamente escolhidos pelo projetista quando este optar por não utilizar todos os nove propostos na norma.

Este trabalho visa caracterizar quatro materiais distintos quanto à sua deformabilidade plástica, e também identificar as combinações de tensões mais adequadas entre as propostas na norma brasileira para possibilitar a redução da quantidade de corpos de prova necessários na caracterização sem comprometer o potencial preditivo do modelo de DP.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Análises estatísticas dos modelos de DP gerados com diferentes conjuntos de pares de tensão e simulações no programa MeDiNa foram realizadas para quatro materiais distintos a partir dos resultados de caracterização dos materiais em laboratório. Para o ensaio de DP de referência, os nove pares de tensões recomendados pela norma DNIT 179/2018-IE foram aplicados.

O ensaio de módulo de resiliência (MR), referente à parcela elástica das deformações totais quando o material é submetido à sollicitação de carga, também foi realizado em triplicata para cada material analisado nesta pesquisa, segundo a norma DNIT 134/2018-ME.

Os resultados de DP dos materiais foram analisados estatisticamente, para o ensaio de referência feito com os nove pares de tensão, e considerando oito combinações destes pares de tensões para obter os parâmetros de regressão do modelo. Assim, é possível verificar se há diferença na análise e a identificação da melhor combinação de pares de tensão entre os nove recomendados pela norma DNIT 179/2018-IE. As equações de DP geradas por estas combinações foram usadas como parâmetros de entrada em simulações de avaliação estrutural de um pavimento típico no programa MeDiNa.

2.1. Os materiais

Três solos de classificações distintas pela metodologia MCT (NS', NG' e NA') e uma brita graduada simples (BGS) foram analisados nesta pesquisa. A abrangência quanto aos tipos de materiais foi importante na observação de quais entre os nove pares de tensão sugeridos pela norma são imprescindíveis para possibilitar uma possível redução da quantidade destes pares nos ensaios triaxiais de cargas repetidas. Os materiais foram coletados em duas rodovias, uma por meio da abertura de poços de sondagens (segmento na BR-040) e outra em coleta durante a construção (segmento na BR-493). A Tabela 1 e a Figura 1 mostram informações sobre estes materiais.

Curvas de compactação foram produzidas para cada material. A umidade ótima foi determinada utilizando corpos de prova (CP) moldados com as mesmas dimensões (diâmetro de 100 mm e altura de 200 mm) adotadas para os ensaios no equipamento triaxial de cargas repetidas. A Tabela 2 mostra informações sobre a compactação de cada material avaliado na pesquisa.

Tabela 1: Informações básicas sobre os materiais analisados nesta pesquisa

Tipo	Camada em que o material foi aplicado	Rodovia	Classificação MCT
Solo	Sub-base	BR-040 km 753	NS'
Solo	Reforço do subleito	BR-493 E1188	NG'
Solo	Subleito	BR-040 km 701	NA'
BGS	Base	BR-040 km 701	-

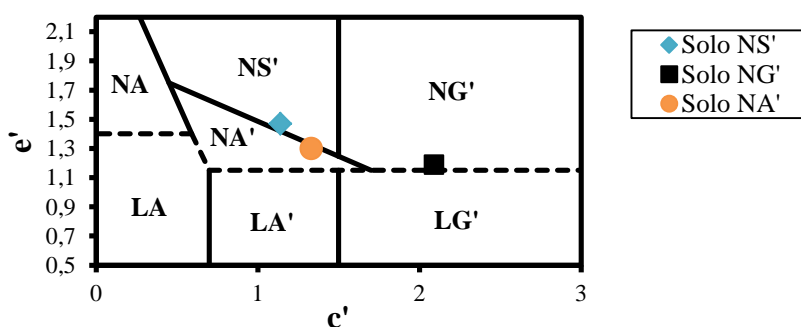


Figura 1: Ábaco da classificação MCT com os três solos analisados nesta pesquisa

Tabela 2: Dados de compactação dos quatro materiais analisados nesta pesquisa

Identificação	Energia	h_{ot} (%)	MEAS (g/cm ³)
NS'	Intermediária	9,1	1,892
NG'	Intermediária	16,3	1,812
NA'	Normal	16,3	1,704
BGS	Modificada	3,2	2,081

Nota: h_{ot} = umidade ótima; MEAS = massa específica aparente seca.

2.2. Ensaio de deformação permanente

Todos os materiais selecionados foram ensaiados com os nove pares de tensão da norma brasileira (Tabela 3) e este resultado passou a ser a referência. Em seguida, foram selecionadas algumas destas combinações de tensões (Tabela 4) para a realização de regressões do modelo de previsão de deformação permanente.

A frequência utilizada nos ensaios foi de 2 Hz (0,1 s de aplicação de carga e 0,4 s de repouso, no formato *haversine*). Todos os ensaios foram realizados até os 150 mil ciclos (quantidade mínima de aplicações de carga exigida pela norma), passando anteriormente por um período de condicionamento com um par de tensões baixas, aplicado por 50 ciclos. Os quatro materiais foram ensaiados na umidade ótima definida em laboratório, na energia de compactação adotada em campo.

As análises estatísticas consistiram em regressões para obter os valores dos coeficientes do modelo de previsão (Equação 1) de deformação permanente com as tensões especificadas na Tabela 4. Para avaliar o modelo, foram observados os parâmetros erro padrão, *p-value*, R e R². Além disso, foram avaliados o R² e a Raiz do Erro Quadrático Médio (*Root Mean Square Error - RMSE*) entre os valores medidos de todos os ensaios realizados para os nove estados de tensões normalizados (combinação de referência) e os previstos para cada um pelos modelos obtidos das oito combinações.

$$\varepsilon_p(\%) = \psi_1 \cdot \left(\frac{\sigma_3}{\rho_0}\right)^{\psi_2} \cdot \left(\frac{\sigma_d}{\rho_0}\right)^{\psi_3} \cdot N^{\psi_4} \quad (1)$$

Onde,

$\varepsilon_p(\%)$: deformação permanente específica;

$\psi_1, \psi_2, \psi_3, \psi_4$: parâmetros de regressão;

σ_3 : tensão confinante;

σ_d : tensão desvio;

ρ_0 : tensão de referência (tensão atmosférica);

N: número de ciclos de aplicação de carga.

Tabela 3: Nove pares de tensões da norma DNIT 179/2018-IE aplicados nesta pesquisa como referência

Condicionamento		
σ_3 (kPa)	σ_d (kPa)	σ_d / σ_3
30	30	1
Leitura da Deformação Permanente		
σ_3 (kPa)	σ_d (kPa)	σ_d / σ_3
40	40	1
40	80	2
40	120	3
80	80	1
80	160	2
80	240	3
120	120	1
120	240	2
120	360	3

Tabela 4: Combinações de tensões feitas para análises do efeito no modelo de previsão de DP

1	2	3	4	5	6	7	8
40/40	-	-	40/40	-	40/40	40/40	40/40
-	40/80	-	40/80	40/80	40/80	-	-
40/120	40/120	-	40/120	40/120	40/120	40/120	-
80/80	80/80	80/80	-	-	-	80/80	80/80
-	80/160	80/160	-	80/160	80/160	-	-
80/240	-	80/240	-	80/240	-	80/240	80/240
120/120	120/120	120/120	120/120	-	120/120	-	120/120
-	-	120/240	120/240	120/240	120/240	120/240	120/240
120/360	120/360	120/360	120/360	120/360	120/360	120/360	120/360

Nota: X/Y = σ_3/σ_d [kPa]

Vale salientar que o R^2 e o RMSE foram utilizados para a verificação da efetividade do modelo. O R^2 da regressão é uma função direta da correlação entre as variáveis do modelo, medindo a proporção da variabilidade de Y que é explicada por X. É utilizado para medir a força da relação: quanto mais próximo do valor 1, mais forte a relação entre as duas variáveis. Já o RMSE é a soma das diferenças (erros) entre o valor estimado e o valor real dos dados, ponderados pelo número de termos usados no cálculo. Ele pode ser utilizado como medida de precisão da previsão feita com o modelo da regressão: quanto menor o RMSE, melhor é o modelo.

2.3. Simulações no programa MeDiNa

A análise no programa MeDiNa consistiu em simulações variando os modelos gerados, no ensaio completo (referência) com os nove pares de tensão e depois com as oito combinações destes pares, para cada material, em uma mesma camada de base para uma única estrutura de

pavimento selecionada, que é apresentada na Figura 2. A espessura do revestimento é compatível com o N adotado. As demais informações dos materiais utilizados nas outras camadas constituintes deste pavimento estão indicadas na Tabela 5.

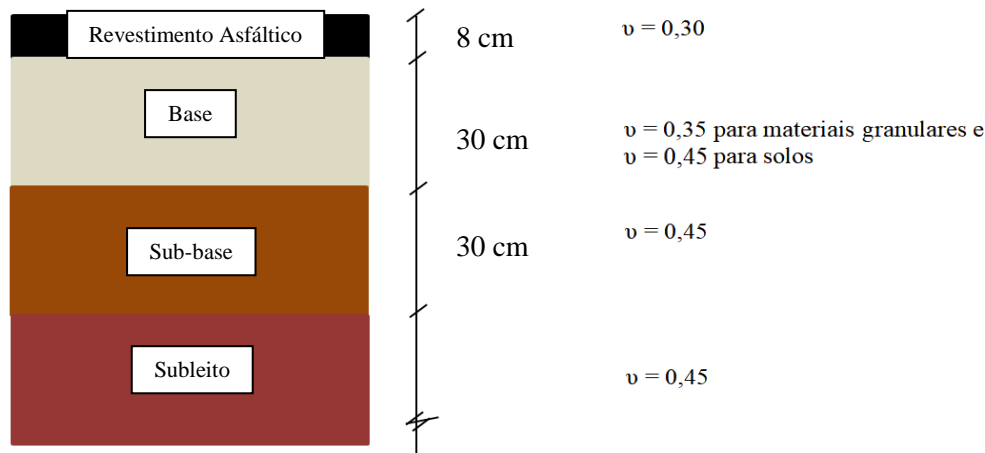


Figura 2: Seção transversal da estrutura do pavimento simulado no programa MeDiNa com os diferentes modelos de previsão dos quatro materiais analisados nesta pesquisa

Tabela 5: Dados de entrada dos materiais constituintes das camadas da estrutura do pavimento simulado no programa MeDiNa

		Revestimento Asfáltico		Curva de fadiga
MR (MPa)	Tipo de CAP	Massa específica (g/cm ³)		CF = 2,73 ⁻¹⁰ · (e _t ^{-3,009})
14.614	Convencional	2,4		
Base - variável: NS', NG', NA' ou BGS				
Sub-base: LG' ₁				
MR (MPa) ¹	h _{ot} (%)	MEAS (g/cm ³)	Energia de compactação Intermediária	DP (%) DP = 0,21 · σ ₃ ^{-0,24} · σ _d ^{1,34} · N ^{0,04}
250	24,0	1,665		
Subleito: NG' ₂				
MR (MPa) ²	h _{ot} (%)	MEAS (g/cm ³)	Energia de compactação Normal	DP (%) DP = 0,47 · σ ₃ ^{0,02} · σ _d ^{1,58} · N ^{0,08}
173	27,5	1,485		

Nota: MR = módulo de resiliência. ¹ MR = 446,5 · σ₃^{0,26} · σ_d^{-0,09}; ² MR = 17,9 · σ₃^{0,30} · σ_d^{-1,15}.

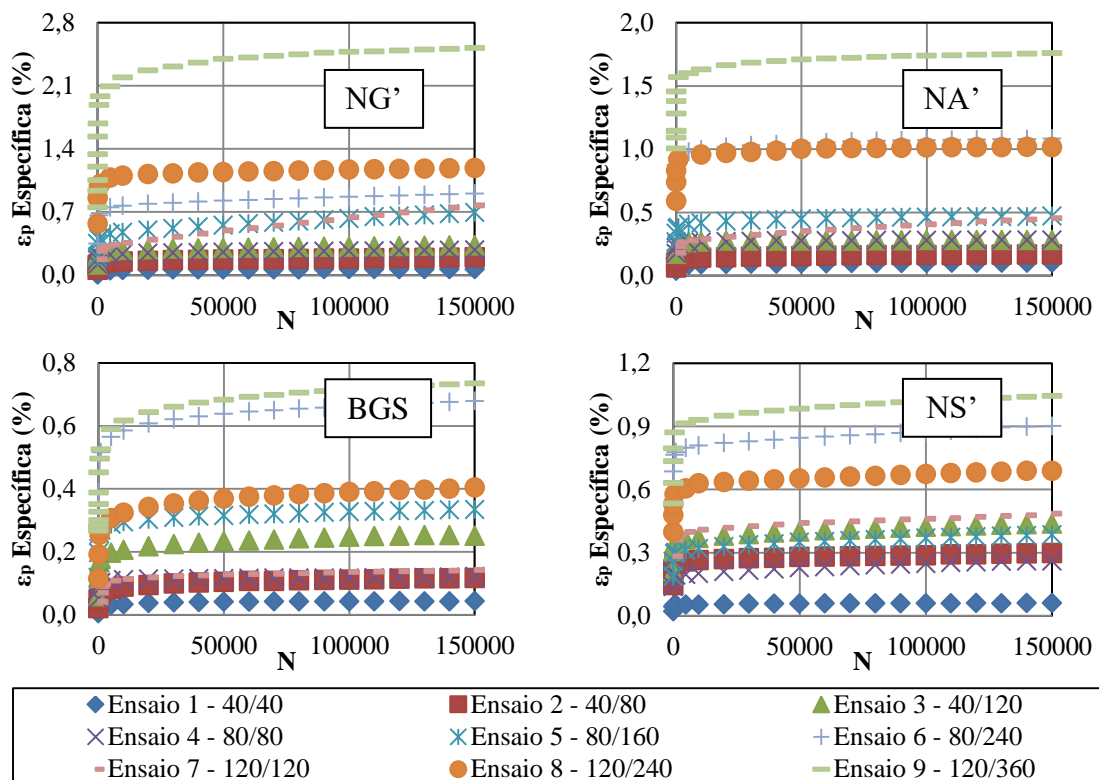
O objetivo de colocar os materiais deste estudo na posição de base foi simular uma profundidade que tivesse um estado de tensões relativamente elevado para explicitar bem as possíveis diferenças entre os modelos gerados com as oito combinações de pares de tensão em relação ao modelo resultante da consideração dos nove pares da norma.

Uma mesma condição de tráfego foi selecionada para todas as simulações considerando: o eixo padrão rodoviário de 8,2 t de carga por eixo, um volume médio diário no ano de abertura do tráfego de 1792 e uma taxa de crescimento de 3%. As análises estruturais foram realizadas nestas condições para um período de 10 anos, totalizando um número equivalente total de passagens (N) de 7,5x10⁶.

3. RESULTADOS E ANÁLISES

A Figura 3 mostra gráficos relacionando às deformações plásticas específicas, em porcentagem, com o número de aplicações de cargas (N) para os quatro materiais avaliados. A Tabela 6 apresenta as deformações permanentes específicas de cada material para quatro N diferentes e o acréscimo percentual de deformação, Δ(%) = [(ε_f-ε_i)/ε_i]x100, de cada N com relação à deformação observada para o N escolhido e identificado na tabela.

Pela Figura 3 e Tabela 6, pode-se concluir que todos os materiais apresentaram a tendência de acréscimo de DP com o aumento das tensões desvio para uma mesma tensão confinante, ou seja, há aumento de DP na medida em que se aplica uma maior razão de tensão (σ_d/σ_3), entre as três normalizadas pela norma brasileira e aplicadas nesta pesquisa.



Nota: Ensaio X - σ_3/σ_d [kPa].

Figura 3: Deformação permanente específica dos quatro materiais analisados nesta pesquisa para os nove pares de tensões normalizados pelo DNIT

Analisando a tabela, percebe-se claramente que as maiores deformações aconteceram entre os ciclos 0 e 5.000 (Δ_{ab}) para todos os pares de tensões, e, entre os ciclos 5.000 e 10.000 (Δ_{bc}), as diferenças foram pequenas, mostrando que os materiais diminuíram a taxa de deformação por ciclo, como indicado pelas curvaturas acentuadas das curvas de ensaio da Figura 3 nesta região.

De forma geral, o primeiro par de tensões (relação $\sigma_d/\sigma_3 = 1$) foi mais sensível ao número de ciclos até 5.000. A terceira taxa (Δ_{cd}) contemplou um intervalo bem maior de ciclos e, assim, apresentou um pequeno aumento em relação ao Δ_{bc} , mas bem menor do que o acúmulo dos ciclos iniciais, representado por Δ_{ab} . Isto mostra a tendência ao acomodamento das deformações para os quatro materiais e para todos os pares de tensões ensaiados.

Os resultados também indicam que os materiais apresentaram comportamentos distintos para os diferentes pares de tensões, como esperado. Dos materiais analisados, o solo NG' foi o que apresentou maiores DPs, sendo a BGS e o solo NS' os materiais que apresentaram as menores DPs acumuladas ao final de 150 mil ciclos.

Isso evidencia que os materiais devem ser cuidadosamente ensaiados em laboratório para a identificação das suas características individuais de resistência ao acúmulo de DP. O solo NS', por exemplo, apesar de ter sido classificado como siltoso, no ábaco da metodologia

MCT, está na região limítrofe com NA', o que pode ter sido a causa das baixas DPs, inclusive observa-se que a umidade ótima está mais parecida com um solo arenoso do que siltoso em geral.

Tabela 6: Deformação permanente (em mm) e suas diferenças percentuais para os quatro materiais analisados nesta pesquisa em quatro diferentes números de aplicação de carga

Material	σ_3 (kPa)	σ_d (kPa)	σ_d/σ_3	ϵ_{p1} (mm), a	$\epsilon_{p5.000}$ (mm), b	$\epsilon_{p10.000}$ (mm), c	$\epsilon_{p150.000}$ (mm), d	Δ_{ab} (%)	Δ_{bc} (%)	Δ_{cd} (%)
NS'	40	40	1	0,040	0,106	0,106	0,120	163	0	14
	40	80	2	0,292	0,516	0,528	0,594	77	2	12
	40	120	3	0,422	0,724	0,738	0,876	72	2	19
	80	80	1	0,276	0,392	0,400	0,520	42	2	30
	80	160	2	0,372	0,622	0,638	0,768	67	2	21
	80	240	3	0,936	1,596	1,616	1,800	71	1	11
	120	120	1	0,566	0,794	0,816	0,970	41	3	19
	120	240	2	0,794	1,210	1,234	1,376	52	2	12
	120	360	3	1,066	1,826	1,858	2,088	71	2	12
NG'	40	40	1	0,006	0,100	0,108	0,130	1567	8	20
	40	80	2	0,114	0,282	0,298	0,390	150	5	31
	40	120	3	0,228	0,538	0,554	0,658	136	3	19
	80	80	1	0,238	0,450	0,464	0,552	90	3	19
	80	160	2	0,398	0,908	0,944	1,388	129	4	47
	80	240	3	0,694	1,500	1,536	1,806	116	2	18
	120	120	1	0,348	0,670	0,712	1,540	93	6	117
	120	240	2	1,136	2,158	2,200	2,376	90	2	8
	120	360	3	1,502	4,184	4,382	5,034	179	5	15
NA'	40	40	1	0,074	0,172	0,176	0,200	131	3	14
	40	80	2	0,124	0,270	0,280	0,332	118	3	19
	40	120	3	0,342	0,524	0,536	0,562	53	2	5
	80	80	1	0,350	0,514	0,526	0,560	47	3	6
	80	160	2	0,530	0,808	0,828	0,938	53	2	13
	80	240	3	1,192	1,958	1,996	2,164	64	2	8
	120	120	1	0,360	0,554	0,576	0,904	54	4	57
	120	240	2	1,178	1,888	1,912	2,082	60	1	9
	120	360	3	2,010	3,200	3,258	3,518	59	2	8
BGS	40	40	1	0,010	0,062	0,066	0,086	589	5	32
	40	80	2	0,042	0,164	0,178	0,234	298	9	32
	40	120	3	0,116	0,392	0,412	0,502	238	5	22
	80	80	1	0,104	0,216	0,222	0,244	110	3	9
	80	160	2	0,236	0,574	0,588	0,668	143	2	14
	80	240	3	0,476	1,130	1,170	1,356	138	4	16
	120	120	1	0,082	0,216	0,228	0,284	163	5	25
	120	240	2	0,230	0,612	0,648	0,808	167	6	25
	120	360	3	0,534	1,178	1,232	1,470	120	5	19

Nota: $\Delta_{if} = [(\epsilon_f - \epsilon_i) / \epsilon_i] \times 100$ é o cálculo da diferença percentual das deformações entre dois ciclos de um intervalo específico, onde i = ciclo inicial e f = ciclo final. Na análise, a = 1, b = 5.000, c = 10.000, d = 150.000.

Vertamatti (1988) propôs modificações na classificação MCT, sugerindo classes transicionais nesta região do ábaco, e recentemente, Roza *et al.* (2018) também apresentaram comparações que indicam a necessidade de melhorar a classificação dos solos dentro da metodologia MCT, mostrando que deve ser levado em conta o comportamento mecânico dos materiais nesta classificação.

Em comparação a outros solos, e mesmo outras britas, caracterizados em outros trabalhos (Lima *et al.*, 2017; Guimarães *et al.*, 2018; Lima *et al.*, 2018), os materiais analisados nesta pesquisa apresentaram bom comportamento plástico na umidade ótima nas tensões propostas

na norma do ensaio, a que foram submetidos durante os ensaios.

A Tabela 7 mostra os parâmetros do modelo de DP (Equação 1) de todos os materiais quando submetidos aos nove pares de tensões normalizados. Os parâmetros foram obtidos por meio de regressões não lineares no programa Statistica 10.0. Todos os modelos apresentaram R² elevado e superior a 0,9. Esta tabela também contém os parâmetros do modelo composto não linear de MR e o MR considerado para análise linear dos quatro materiais analisados nesta pesquisa.

Tabela 7: Parâmetros de regressão dos modelos de DP considerando os nove pares de tensões e parâmetros de regressão dos modelos composto de MR

Material	$\varepsilon_p = \psi_1 \cdot \sigma_3^{\psi_2} \cdot \sigma_d^{\psi_3} \cdot N^{\psi_4}$ (% , kgf/cm ²)					$MR = k_1 \cdot \sigma_3^{k_2} \cdot \sigma_d^{k_3}$ (MPa)			
	ψ_1	ψ_2	ψ_3	ψ_4	R ²	k_1	k_2	k_3	MR (MPa)
NS'	0,184	-0,199	1,045	0,039	0,93	363,00	0,381	-0,438	336
NG'	0,145	0,696	1,523	0,065	0,98	751,39	0,402	-0,219	393
NA'	0,190	0,121	1,428	0,034	0,97	48,94	0,372	-1,044	244
BGS	0,046	-0,761	1,595	0,079	0,94	702,07	0,345	-0,169	381

A Tabela 8 mostra os resultados das análises estatísticas das regressões para obter os modelos de DP gerados com os pares de tensão propostos na norma, usando as oito combinações apresentadas na Tabela 4. Nesta tabela, além do R e do R² para a comparação entre os resultados experimentais e os previstos pelos modelos para as tensões das combinações, também são indicados o R² e o RMSE entre os resultados observados para os nove pares de tensões e os previstos a partir dos modelos resultantes das combinações.

Tabela 8: Análise estatística dos modelos de deformação permanente calibrados para as diferentes combinações de pares de tensão

Material	Coefficiente / Combinação	1	2	3	4	5	6	7	8
NS'	R	0,98	0,97	0,95	0,99	0,97	0,97	0,99	0,98
	R ²	0,95	0,94	0,90	0,97	0,94	0,94	0,97	0,95
	R ² *	0,93	0,92	0,93	0,92	0,91	0,92	0,92	0,92
	RMSE	0,0792	0,0811	0,0762	0,0797	0,0860	0,0818	0,0774	0,0847
NG'	R	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99
	R ²	0,99	0,99	0,98	0,99	0,98	0,99	0,99	0,99
	R ² *	0,98	0,98	0,99	0,98	0,99	0,98	0,99	0,99
	RMSE	0,0869	0,1010	0,0833	0,1032	0,0838	0,0992	0,0840	0,0878
NA'	R	0,98	0,99	0,98	0,99	0,98	0,99	0,99	0,99
	R ²	0,97	0,99	0,96	0,99	0,97	0,99	0,97	0,97
	R ² *	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,96
	RMSE	0,0866	0,0915	0,0869	0,0880	0,0850	0,0921	0,0919	0,0994
BGS	R	0,97	0,99	0,99	0,99	0,95	0,99	0,97	0,99
	R ²	0,95	0,98	0,99	0,99	0,91	0,98	0,94	0,99
	R ² *	0,94	0,92	0,76	0,93	0,94	0,93	0,94	0,80
	RMSE	0,0512	0,0603	0,1181	0,0649	0,0510	0,0599	0,0511	0,1043

Nota: R²* e RMSE entre os resultados observados dos nove estados de tensões dos ensaios experimentais e os resultados previstos usando os modelos resultantes das combinações.

As melhores combinações (menores RMSE) observadas entre as indicadas na Tabela 4 para os materiais NS', NG', NA', e BGS foram, respectivamente, 3, 3, 5, e 5. As piores, para mesma sequência de materiais, foram 5, 4, 8, e 3, respectivamente. Não foi possível considerar as combinações 3 e 5 como melhores, pois, para alguns materiais, estas combinações geraram modelos que apresentaram previsões mais distantes do observado em laboratório (RMSE elevados entre as oito combinações).

Considerando estes critérios citados e visando definir um conjunto único de pares que fosse

adequado aos quatro materiais, avaliou-se que a melhor combinação para todos os materiais foi a sétima, já que esta apresentou coeficientes estatísticos próximos dos das melhores combinações individuais, evidenciando o bom potencial preditivo dos modelos gerados com estas tensões.

Os modelos resultantes da combinação 1 também foram eficientes para maioria dos materiais, mas ainda assim a sétima combinação apresentou resultados melhores (RMSE menores para três dos quatro materiais). Estas diferenças podem ser justificadas devido ao espaçamento entre as tensões nas seleções, pois a combinação 7 considerou o acréscimo entre as razões de tensões 2 e 3, enquanto a combinação 1 só englobou ensaios com tensões em razões 1 e 3. Assim, deve ser dada atenção para todas as situações de acréscimo de tensões, a fim de que se possam prever de forma mais acurada os acúmulos de DP, sejam as tensões normatizadas ou as escolhidas pelo engenheiro projetista.

Os resultados das simulações no MeDiNa para os 36 casos avaliados nesta pesquisa com a estrutura da Figura 2 são mostrados na Tabela 9, tendo sido realizadas 72 simulações ao todo.

Tabela 9: Deformações permanentes resultantes (em mm) para as diferentes condições estruturais analisadas no programa MeDiNa

Material da base	ϵ_p (mm) das camadas	Combinações com MR não linear (mm)								Referência
		1	2	3	4	5	6	7	8	
NS'	Base	1,88	1,45	2,15	1,55	2,46	1,39	2,07	2,48	1,87
	Sub-base									1,23
	Subleito									3,21
	ATR									6,31
NG'	Base	0,40	0,86	0,36	1,00	0,51	0,95	0,44	0,31	0,50
	Sub-base									1,23
	Subleito									3,19
	ATR									4,92
NA'	Base	1,02	0,69	1,07	0,71	0,84	0,63	0,96	1,37	0,88
	Sub-base									1,22
	Subleito									3,20
	ATR									5,30
BGS	Base	1,33	1,46	8,67	0,83	2,57	1,63	2,69	7,93	2,42
	Sub-base									1,23
	Subleito									3,22
	ATR									6,87
Material da base	ϵ_p (mm) das camadas	Combinações com MR linear (mm)								Referência
		1	2	3	4	5	6	7	8	
NS'	Base	1,98	1,53	2,27	1,63	2,68	1,47	2,31	2,61	1,98
	Sub-base									1,15
	Subleito									2,71
	ATR									5,84
NG'	Base	0,45	0,96	0,41	1,12	0,57	1,06	0,50	0,35	0,56
	Sub-base									1,13
	Subleito									2,64
	ATR									4,33
NA'	Base	1,16	0,79	1,21	0,82	0,97	0,73	1,05	1,54	1,01
	Sub-base									1,18
	Subleito									2,80
	ATR									4,99
BGS	Base	1,46	1,48	9,36	0,87	2,83	1,78	2,96	8,60	2,65
	Sub-base									1,14
	Subleito									2,70
	ATR									6,49

Nota: A combinação "Referência" corresponde ao modelo resultante dos nove pares de tensões.

Na Tabela 9 foram considerados dois tipos de análises: MR linear e não linear. O intuito de também estudar a forma de adotar o MR na análise de tensões é verificar se, para um solo que apresenta MR não linear, o uso do MR linear adotado como o valor médio do ensaio (prática adotada por projetistas que usam o Elsym ou outro programa Elástico Linear (EL) de análise de tensões) pode afetar a análise de DP.

A partir das deformações permanentes, em mm, fornecidas pelo programa, foi possível observar que a combinação 7 resultou em valores finais bem próximos ao obtido com a referência, para todos os materiais, o que confirma ser esta a combinação mais indicada no caso de somente seis ensaios serem realizados.

Já quanto ao comportamento plástico específico dos materiais, o NS', que tinha apresentado as menores DPs na Figura 3 para os pares de tensões ensaiados, teve DPs maiores na análise estrutural realizada no programa MeDiNa. Outro caso foi o NG', que apresentou maiores DPs pelo ensaio experimental e teve as menores DPs pelo MeDiNa, mas, em compensação, as maiores DPs na sub-base e no subleito, em comparação às dos demais casos. Esta variação é devido às tensões atuantes no material quando este compõe a camada de base do pavimento simulado. Além disso, os pesos próprios dos materiais também são considerados no cálculo de DP pelo programa.

Na Tabela 10 são mostradas as tensões atuantes, obtidas por análises na sub-rotina chamada Análise Elástica de Múltiplas Camadas (AEMC) do MeDiNa, no centro das camadas e a 15 cm abaixo do topo do subleito para o modelo de DP de referência, usando os MRs linear e não linear.

Tabela 10: Tensões atuantes (kgf/cm²) no centro do carregamento de um eixo padrão rodoviário para as diferentes soluções estruturais analisadas com a combinação referência

Condição de MR	Profundidade (cm)	Camada	Base NS'		Base NG'		Base NA'		Base BGS	
			σ_d	σ_3	σ_d	σ_3	σ_d	σ_3	σ_d	σ_3
Linear	4	Revest.	0,681	0,093	0,691	0,105	0,663	0,069	0,683	0,095
	23	Base	0,929	0,199	0,952	0,200	0,879	0,190	0,934	0,160
	53	Sub-base	0,557	0,202	0,549	0,198	0,567	0,199	0,556	0,208
	83	Subleito	0,415	0,361	0,408	0,356	0,423	0,360	0,414	0,366
Não Linear	4	Revest.	0,662	0,066	0,667	0,074	0,642	0,034	0,660	0,065
	23	Base	0,874	0,194	0,892	0,194	0,802	0,182	0,872	0,156
	53	Sub-base	0,591	0,209	0,590	0,206	0,584	0,203	0,593	0,215
	83	Subleito	0,464	0,382	0,462	0,379	0,462	0,376	0,465	0,388

Nota: O σ_3 apresentado leva em consideração os resultados de σ_3 , σ_2 e o peso próprio nestas profundidades.

Observa-se que houve mudança nas tensões atuantes em todas as camadas para os casos da combinação referência quando comparados os resultados das simulações considerando o MR linear com as considerando o MR não linear. As maiores mudanças ocorreram nas tensões desvio dos materiais das camadas imediatamente abaixo do revestimento. Também se observa que as camadas de sub-base e subleito foram mais solicitadas na análise não linear.

As simulações considerando o comportamento não linear do MR geraram DPs menores na camada de base, mas próximas das encontradas nas simulações com o MR linear. No geral, o material de subleito utilizado neste estudo, adotado considerando o banco de dados do programa MeDiNa, apresentou as maiores diferenças de DP quando comparadas as duas análises com diferentes considerações de MR. No entanto, estas diferenças foram menores do que 1 mm. Apesar desta similaridade, o modelo não linear tende a fornecer previsões mais precisas e, em todos os casos, as análises não lineares resultaram em valores maiores de ATR,

o que é a favor da segurança.

Vale ressaltar que as DP e suas diferenças entre as duas considerações de MR foram pequenas, comparado ao menor ATR (10 mm) admissível, pois todos os materiais analisados tenderam ao acomodamento. Estas diferenças poderiam ter sido maiores se na Tabela 6 os Δ_{cd} fossem elevados. Eventualmente materiais mais deformáveis poderia afetar o dimensionamento.

Adicionalmente, a opção pela consideração da linearidade do MR afeta também a estimativa da vida de fadiga. Nestas simulações, ao fim dos 10 anos da vida de projeto do pavimento, a consideração do MR linear resultou em acréscimos de cerca de 3 a 5% na área trincada em comparação à obtida com o modelo não linear em todos os casos analisados. Esta diferença teria sido mais acentuada caso os expoentes dos modelos fossem ainda maiores, ou seja, a simplificação das análises com MR médio afetaria mais o dimensionamento.

Foram realizadas mais 24 simulações no MeDiNa, totalizando 96 simulações neste trabalho, para a combinação referência com os 4 materiais variando as condições de MR e mais três espessuras na camada de revestimento (5, 10 e 15 cm), estando na Figura 4 os ATR para MR não linear e a fadiga para ambas as análises variando a condição de MR. Para as duas condições de MR, o ATR e áreas trincadas aumentaram significativamente com a diminuição da espessura do revestimento. Diferente dos ATR que tiveram pouca diferença ($< 1,0$ mm) com relação à mudança na consideração de MR, as áreas trincadas apresentaram maiores diferenças quanto menos espesso foi o revestimento.

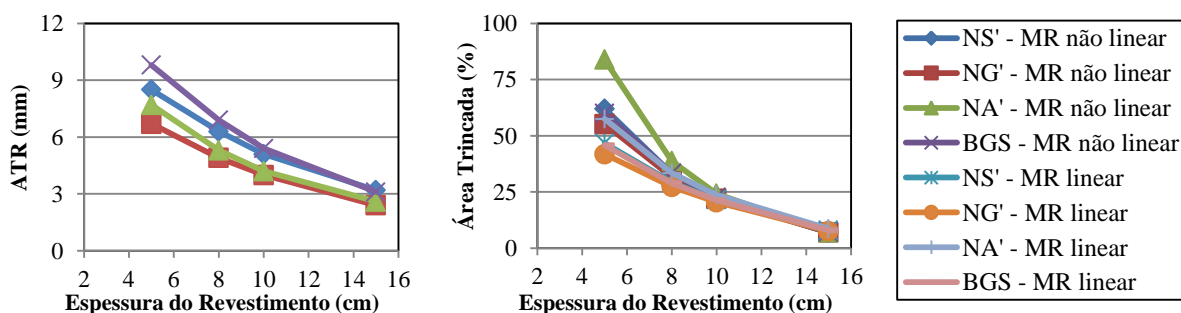


Figura 4: ATR (mm) e área trincada (%) resultantes das simulações no MeDiNa com diferentes espessuras do revestimento asfáltico e os quatro materiais na base

É importante notar que as observações feitas no trabalho são relacionadas aos materiais e às condições de carga e de geometria das camadas consideradas nas simulações. Estudos adicionais devem ser realizados para possibilitar a avaliação das respostas estruturais com outras combinações, que, dependem do comportamento dos materiais.

4. CONCLUSÕES

Este trabalho avaliou a deformabilidade plástica de quatro materiais distintos por meio de ensaios de DP no equipamento triaxial de cargas repetidas, seguindo as especificações da norma brasileira. Para os quatro materiais avaliados (três solos e uma BGS), concluiu-se que os maiores acréscimos de DP ocorreram quando foram aplicadas as maiores tensões desvio para determinada tensão confinante. Também se observou que os acréscimos percentuais mais significativos de DP, todos maiores que 50%, ocorreram nos 5.000 primeiros ciclos de aplicações de carga e que o par de tensões $\sigma_3 = \sigma_d = 40$ kPa apresentou as maiores diferenças percentuais com relação à primeira aplicação de carga.

Oito combinações de pares de tensões escolhidos entre os nove da norma DNIT 179/2018-IE

foram analisadas e uma destas combinações foi a que melhor manteve o ajuste quando comparados os seus resultados previstos com os observados para os nove pares de tensões. Esta combinação englobou razões de tensões (σ_3/σ_d) iguais a 1, 2 e 3, tendo sido no mínimo duas razões de tensões por tensão confinante.

As simulações no MeDiNa evidenciaram a importância da escolha adequada das tensões a serem aplicadas durante o ensaio ao se reduzir o número de pares de tensões, porque houve diferenças nos resultados de DP. As simulações também indicaram que a consideração de modelos não-lineares para o MR dos materiais é mais apropriada para a simulação da DP.

Este estudo mostrou que a quantidade de pares de tensão recomendada pela norma brasileira para ensaios de DP pode ser reduzida de nove para pelo menos seis, escolhidos convenientemente, sem perda de acurácia dos modelos fornecidos como informações de entrada para as análises estruturais no MeDiNa para materiais que tendem ao acomodamento das DP.

A norma de DP permite a escolha das tensões a serem aplicadas no material, mas estas devem ser cuidadosamente escolhidas de acordo com o propósito de aplicação para que as informações sobre o comportamento mecânico dos materiais no programa de dimensionamento sejam as mais representativas.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001. Os autores também são gratos ao suporte financeiro recebido pelo CENPES/PETROBRAS.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- DNIT (2018a) *DNIT 179/2018-IE Pavimentação - Solos - Determinação da Deformação Permanente - Instrução de Ensaio*. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Brasil.
- DNIT (2018b) *DNIT 134/2018-ME Pavimentação - Solos - Determinação do Módulo de Resiliência - Método de Ensaio*. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Brasil.
- Guimarães, A. C. R. (2009) *Um Método Mecânico - Empírico para a Previsão da Deformação Permanente em Solos Tropicais Constituintes de Pavimentos*. Tese de Doutorado. Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, Brasil.
- Guimarães, A. C. R.; Motta, L. M. G. e Dias Castro, C. (2018) Permanent Deformation Parameters of Fine - Grained Tropical Soils. *Road Materials and Pavement Design*. Published online.
- Hussain, J.; Wilson, D. J.; Henning, T. F. P.; Black, P. e Alabaster, D. (2011) Investigating the Permanent Deformation of Unbound Greywacke Road Base considering Geology, Gradation and Moisture Conditions. *90th Transportation Research Board Annual Meeting, TRB*. Washington, D.C, EUA.
- Lekarp, F.; Isacsson, U. e Dawson, A. (2000) State of the Art. I: Resilient Response of Unbound Aggregates. *Journal of Transportation Engineering*, v. 126, n. 1, p. 66 - 75.
- Lima, C. D. A.; Motta, L. M. G. e Guimarães, A. C. R. (2017) Estudo da Deformação Permanente de Britas Granito-Gnaiss para Uso em Base e Sub-Base de Pavimentos. *Transportes*, v. 25, n. 2, p. 41 - 52.
- Lima, C. D. A.; Norback, C. e Motta L. M. G. (2018) Deformabilidade de Três Diferentes Solos para Uso em Pavimentação. *XIX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, COBRAMSEG*, Salvador, Brasil.
- Lima, C. D. A.; Motta L. M. G. e Aragão F. T. S. (2019) Effects of Compaction Moisture Content on Permanent Deformation of Soils Subjected to Repeated Triaxial Load Tests. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, v. 2673, n. 2, p. 466 - 476.
- Roza, A. E. D.; Lima, C. D. A. e Motta, L. M. G. (2018) Avaliação da Correlação entre o Módulo de Resiliência e a Classificação MCT de Solos Finos Argilosos. *XXXII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, ANPET*, Gramado, Brasil.
- Vertamatti, E. (1988) *Contribuição ao Conhecimento Geotécnico de Solos da Amazônia com Base na Investigação de Aeroportos e Metodologias MCT e Resiliente*. Divisão de Pós-Graduação do Instituto Tecnológico de Aeronáutica. São José dos Campos, SP.
- Werkmeister, S.; Ralf, N.; Dawson, A. R. e Wellner, F. (2002) Deformation Behavior of Granular Materials Under Repeated Dynamic Load. *Journal of Environmental Geomechanics - Monte Verità*. p. 215-223.