

Ensaio de deformação permanente: efeito do número de ciclos na interpretação do comportamento de solos e britas

Permanent deformation tests: effect of the number of loading cycles on the interpretation of the behavior of soils and gravels

Caroline Dias Amancio de Lima¹, Laura Maria Goretti da Motta²,
Francisco Thiago Sacramento Aragão²

¹ Escola Politécnica, DETG/UFBA, Rua Prof. Aristides Novis, 2, 6º andar, Salvador, BA, Brasil.

² Laboratório de Geotecnia - Setor de Pavimentos, PEC/COPPE/UFRJ, Av. Pedro Calmon, s/n, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
e-mails: carolinedal@ufba.br, laura@coc.ufrj.br, fthiago@coc.ufrj.br

RESUMO

No novo método brasileiro de dimensionamento mecanístico-empírico de pavimentos, o MeDiNa, a caracterização da deformação permanente (DP) para a seleção dos solos e britas baseia-se em ensaios de 150.000 ciclos de carregamento para cada um dos nove corpos de prova indicados na norma do DNIT. Apesar de fornecer informações sobre o comportamento dos materiais em um amplo conjunto de condições de ensaio, o programa experimental relacionado a estas caracterizações de DP é demorado e acredita-se que pode ser otimizado. Este artigo avalia a influência do número de ciclos de aplicação de carga na caracterização dos materiais. Para tal, foram analisados sete materiais na umidade ótima, e um deles compactado também em condição acima da umidade ótima, totalizando oito conjuntos de dados. Análises estatísticas de regressão foram realizadas para identificar os parâmetros de um modelo de previsão para diferentes números de ciclos e os resultados de DP previstos para os diferentes materiais foram comparados. A partir destes resultados, foram realizadas simulações no programa MeDiNa para prever o desempenho dos materiais. Foram avaliados quatro diferentes valores de N, considerando 150.000 ciclos como a referência: descartando os 500 primeiros ciclos, mas considerando a DP acumulada neste intervalo; descartando os 500 primeiros ciclos e a DP acumulada neste intervalo; N final de 80.000; e N final de 100.000. Para os materiais analisados, não foram observadas diferenças significativas na previsão de DP, mesmo considerando ensaios com 50.000 ou 70.000 ciclos a menos do que os 150.000 ciclos exigidos em norma. Isso indica que, ainda que seja recomendada a caracterização seguindo procedimentos normatizados, o programa experimental da norma de DP vigente pode possivelmente ser significativamente otimizado a partir da redução do número de ciclos aplicados aos materiais nos ensaios de laboratório. Esta possibilidade deve ser analisada para cada material.

Palavras-chave: Pavimento asfáltico. Deformação permanente. Ensaio triaxiais. Ciclos de carregamento.

ABSTRACT

In the new Brazilian mechanistic-empirical design method of asphalt pavements, MeDiNa, the characterization of permanent deformation (PD) for the selection of soils and gravel is based on tests performed with at least 150,000 loading cycles for each of the nine specimens indicated in the DNIT standard. Despite providing information about the material behavior under a wide range of testing conditions, the experimental program related to these PD characterizations is time consuming and it is believed that it can be optimized. This paper evaluates the influence of the number of loading cycle applications on the characterization of the materials. For this purpose, seven materials were analyzed at their optimum moisture content (OMC) and one of them was also compacted in a condition above the OMC, in a total of eight data sets. Statistical regression analyzes were performed to identify the parameters of the predictive model for different numbers of cycles and the PD predictions for the different materials were compared. From these results, simulations were performed in the MeDiNa software to predict the performance of the materials. Four different N values were evaluated, considering 150,000 cycles as reference: discarding the 500 first cycles, but considering the PD accumulated in that interval; discarding the 500 first cycles and considering the PD accumulated in that interval; final N of 80,000; and final N of 100,000. For the analyzed materials, no significant differences were observed in the PD prediction, even considering tests with 50,000 or 70,000 cycles less than the 150,000 cycles required in the standard. This indicates that, although characterization is recommended following standardized procedures, the experimental program of the current PD standard can possibly be significantly optimized by reducing the number of cycles applied to materials in laboratory tests. This possibility must be analyzed for each material.

Keywords: Asphalt pavement. Permanent deformation. Triaxial tests. Loading cycles.

1. INTRODUÇÃO

A qualidade dos pavimentos das rodovias é de fundamental importância na sociedade brasileira devido ao modo rodoviário apresentar papel expressivo no deslocamento de pessoas e cargas, frente aos demais meios de transportes. Com o objetivo de permitir a restauração e a construção de pavimentos asfálticos mais resilientes e duradouros, a partir do conhecimento de propriedades de materiais e de como estes interagem em um sistema de camadas interligadas, está sendo implantado no país um novo método mecanístico-empírico de dimensionamento de pavimentos, o MeDiNa (Método de Dimensionamento Nacional). Para aplicar este método, diversas normas de ensaios foram publicadas recentemente para a caracterização dos materiais que compõem a estrutura dos pavimentos.

Os defeitos estruturais mais comuns de um pavimento são os afundamentos de trilha de roda (ATR) e as trincas, resultantes das passagens repetidas das cargas dos veículos comerciais. Os ensaios de laboratório que visam simular a passagem das rodas dos veículos são realizados com a aplicação de cargas cíclicas nos corpos de prova e geram parâmetros úteis para a seleção dos materiais e o dimensionamento de pavimentos.

Com o avanço do conhecimento sobre a Mecânica dos Pavimentos, a análise de tensões e deformações pode ser feita levando em conta estes ensaios, que visam diminuir o surgimento dos defeitos estruturais e garantir a vida de projeto do pavimento. Seguindo recomendações de normas associadas ao MeDiNa, para permitir esta análise, ensaios em um equipamento triaxial de cargas repetidas são realizados e fornecem características de deformabilidade relacionadas ao Módulo de Resiliência (MR) e à Deformação Permanente (DP).

Por muitos anos, focou-se, no país, na disseminação de ensaios de MR, visto que o principal defeito dos pavimentos asfálticos são os trincamentos do revestimento, que resultam, em especial, da parcela elástica dos deslocamentos provocados pela passagem das rodas dos veículos. A parcela plástica, que provoca os ATRs, é menos frequente, especialmente nas camadas abaixo do revestimento, devido às condições climáticas favoráveis e à formação dos solos brasileiros, mas também vem sendo estudada em laboratório desde 1980 [1]. Porém, somente no ano de 2018, foi lançada a primeira norma técnica de DP pelo DNIT, que essencialmente segue as indicações da experiência brasileira mais recente.

Os estudos sobre DP realizados no Brasil vêm se tornando cada vez mais frequentes [2-15]. A DP também passou a ser indicada para análise e seleção dos possíveis materiais a serem utilizados em camadas de pavimentos e, para isso, assim como para o MR, há diferentes modelos de previsão, sendo mais utilizado no Brasil o de GUIMARÃES [3], sugerido na norma DNIT 179/2018-IE [16] e implementado no programa MeDiNa.

Nos ensaios de DP, as solicitações dos veículos são simuladas pelas aplicações de tensões verticais pulsantes nos equipamentos triaxiais. Os materiais podem apresentar diferentes tipos de comportamento frente à deformação plástica por inúmeros fatores, com destaque para a magnitude dos estados de tensões e número de ciclos aplicados. Dependendo da magnitude das tensões, o aumento da rigidez, expressa pelo MR, não é significativo após algumas repetições de ciclos de carga. Porém, [2, 3, 7, 9, 11] caracterizaram o MR após ensaios de DP e verificaram que os materiais se tornam mais rígidos após 150.000 ciclos de carregamento.

A chamada “teoria do *Shakedown*” tem sido utilizada para a identificação do comportamento de materiais de pavimentação, visando observar o acomodamento das deformações plásticas como função do número de aplicações de solicitações de carga. Ressalta-se que este é o comportamento adequado para um solo ou uma brita que serão usados nas camadas dos pavimentos. Por vezes, a teoria é empregada para a determinação da carga crítica de acomodamento, mas também é uma ferramenta que auxilia na previsão do número máximo de ciclos de carregamento a que o pavimento pode ser submetido até que ocorra a ruptura ou o excesso de afundamento [3, 17, 18].

Quanto ao número de ciclos de aplicação de carga (N), na literatura internacional, em geral, considera-se que alguns materiais já estão aparentemente estabilizados após 80.000 aplicações de carga [19, 20]. Alguns autores [21, 22] já indicaram que 100.000 ciclos já seria uma quantidade suficiente para a caracterização mecânica plástica dos materiais, tendo ensaios de trabalhos brasileiros [9, 23] sido realizados até este valor de número de ciclos. A atual norma brasileira de ensaios de DP, DNIT 179/2018-IE [16] exige o mínimo de 150.000 ciclos, desconsiderando-se os 50 primeiros ciclos, que são aplicados com um estado de tensão baixo com a finalidade de evitar que eventuais folgas sejam lidas como deformação do corpo de prova, garantindo assim total contato entre o pistão e o cabeçote.

Neste contexto, esta pesquisa foca na análise do número de ciclos de carga exigidos no Brasil para a realização do ensaio de DP no equipamento triaxial de cargas repetidas, considerando o estado de tensões aplicado e o método MeDiNa para a caracterização dos materiais e a análise estrutural de pavimentos. O principal propósito é permitir um entendimento mais aprofundado sobre os efeitos deste número de ciclos de carga no comportamento mecânico dos materiais e avaliar a possibilidade de otimização do programa experimental de caracterização de DP.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Foram realizadas análises de DP de sete materiais. Um destes foi avaliado considerando duas condições de umidade. Ao todo, 70 corpos de prova de britas e solos de variadas origens, classificações e respostas mecânicas foram ensaiados. Estes foram preliminarmente separados segundo seus comportamentos plásticos e posteriormente analisados de duas formas quanto à quantidade necessária de aplicações de ciclos de carga no ensaio de DP: por retirada de ciclos iniciais e por retirada de ciclos finais. Adicionalmente, foram realizadas análises estruturais no programa de dimensionamento MeDiNa para verificar a influência destes diferentes números de ciclos no desempenho previsto em campo, caso o material viesse a ser aplicado em alguma camada do pavimento e tivesse sido ensaiado com quantidade menor de ciclos do que a indicada atualmente pela norma DNIT 179/2018-IE [16].

2.1 Materiais

A Tabela 1 mostra a identificação e algumas propriedades dos materiais analisados neste trabalho. Inicialmente, três solos e três britas graduadas simples (BGS) foram selecionados para as análises com retiradas de ciclos, totalizando seis materiais. Os três solos e as três britas foram selecionadas da seguinte maneira: um que deformasse consideravelmente, um

que deformasse pouco, e outro que apresentasse deformação mediana comparada com os outros dois materiais em análise. Tanto os solos quanto as britas analisados nesta fase foram nomeadas com prefixos S para solos e B para britas, e sufixos quanto à magnitude das deformações permanentes comparada entre eles: A - deformações altas, M - deformações médias, e B - deformações baixas.

Com relação aos solos, um dos três selecionados para as análises dos Ns também foi previamente submetido à variação da umidade de compactação, e este é um fator importante [24]. Assim, foi selecionado para comparar a influência dos ciclos neste caso específico. Complementarmente, foi analisado um solo adicional que deformou significativamente durante os ensaios de DP, ainda mais que o SA inicialmente selecionado, tendo sido denominado como “SA extra”. Um dos corpos de prova deste solo foi usado para a análise do acomodamento.

Tabela 1: Características dos materiais analisados neste estudo.

MATERIAL	CLASSIFICAÇÃO MCT	ENERGIA DE COMPACTAÇÃO	UMIDADE DE COMPACTAÇÃO
SB	LG ⁷	Intermediária	17,8%
SM	NS ⁷	Intermediária	9,0%
SA	NS ⁷	Intermediária	16,0%
SM +	NS ⁷	Intermediária	9,1%
BB	-	Modificada	4,5%
BM	-	Modificada	3,5%
BA	-	Modificada	7,5%
SA extra	NG ⁷	Normal	28,0%

2.2 Métodos

A princípio, foram analisadas as seguintes condições: desconsideração dos 500 primeiros ciclos; desconsideração dos 50.000 últimos ciclos; desconsideração dos 70.000 últimos ciclos; desconsideração dos ciclos iniciais deslocando as curvas e, conseqüentemente, desconsiderando os ciclos iniciais. Estas condições foram separadas em duas grandes etapas: a com relação à desconsideração dos N iniciais e a com relação à desconsideração dos N finais. Estes valores de N foram adotados tomando como base as indicações de normas e trabalhos na literatura.

Todos os materiais foram submetidos aos ensaios de DP segundo a norma DNIT 179/2018-IE [16]. A brita BA teve um nível de tensão ligeiramente diferente, mas isso não afetou a análise. Os ensaios foram realizados considerando a umidade ótima definida pela curva de compactação. Um dos solos também foi avaliado com umidade acima da ótima. A norma DNIT 179/2018-IE [16] indica que nove estados de tensões devem ser aplicados, sendo um estado de tensão por corpo de prova e até, no mínimo, 150.000 ciclos. Todos os ensaios foram realizados na frequência de 2 Hz (0,1 s de aplicação de carga e 0,4 s de repouso). A diminuição dos ciclos para 100.000 e 80.000 permitiria reduzir entre 30 e 50% o tempo em ensaios a 2 Hz.

O modelo selecionado para esta pesquisa para representar o comportamento de DP foi o proposto por GUIMARÃES [3], que está implementado no MeDiNa e é mostrado na Equação 1. Para a obtenção dos parâmetros do modelo para cada material e considerando as diversas condições de ensaio, foram realizadas regressões não lineares múltiplas.

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

Onde

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

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

σ_3 : tensão confinante (kgf/cm²);

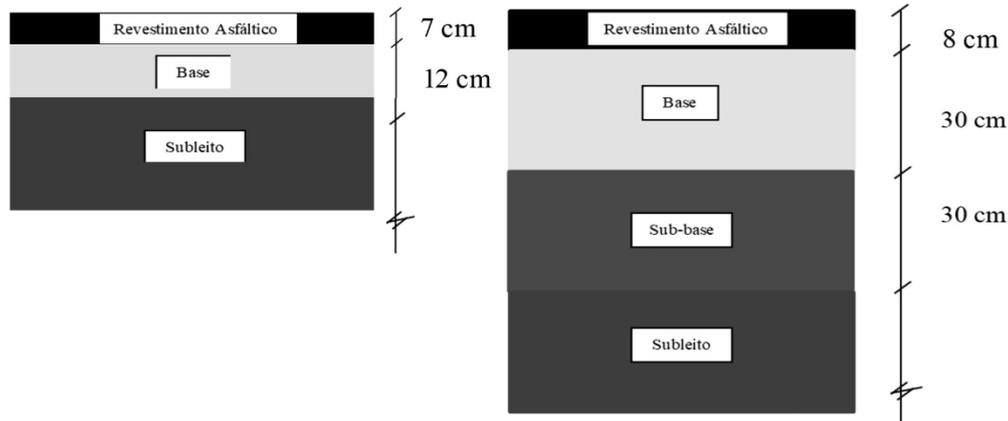
σ_d : tensão desvio (kgf/cm²);

ρ_0 : tensão de referência (tensão atmosférica - 1kgf/cm²);

N: número de ciclos de aplicação de carga.

As análises foram realizadas para três diferentes estados de tensões aplicados a cada material, tendo sido gerados 35 modelos ajustados em três diferentes estados de tensões nesta etapa da pesquisa, totalizando 105 previsões de deformação permanente, incluindo a variação da umidade de compactação acima da ótima de um dos solos. Cinco modelos adicionais correspondentes ao solo SA extra foram ajustados para as cinco condições de números de ciclos de carga e, no total, foram realizadas 50 simulações no programa MeDiNa.

A Figura 1 ilustra as duas seções utilizadas para as análises paramétricas e as espessuras adotadas para as suas diversas camadas. Nestas estruturas, os materiais avaliados na pesquisa compuseram a camada de base.



ν : Coeficiente de Poisson (0,30 revestimento; 0,35 britas; 0,45 solos)

Figura 1: Seções transversais das estruturas de pavimento simuladas com o programa MeDiNa nesta pesquisa.

Para a Seção 1, os parâmetros de entrada adicionais foram: tráfego $N = 2,93 \times 10^6$ (eixo padrão de 80 kN) e taxa de crescimento de 3,5%. Para a Seção 2, foram considerados: tráfego $N = 7,5 \times 10^6$ (eixo padrão de 80 kN) e taxa de crescimento de 3%. As análises estruturais foram realizadas nestas condições para um período de 10 anos. Os materiais do revestimento, sub-base e subleito foram selecionados a partir do banco de dados do programa MeDiNa e mantidos constantes em todas as análises com as diferentes condições das bases.

As análises de DP dos materiais foram embasadas no conceito de acomodamento. A Figura 2 ilustra o formato do gráfico proposto por DAWSON e WELLNER [25] e os diferentes formatos das curvas propostas por WERKMEISTER *et al.* [17] e GUIMARÃES [3] para representar os diversos comportamentos de solos e materiais granulares.

Em geral, o tipo A (*plastic shakedown*) representa baixas DP acumulada e taxa de acréscimo de DP, e, consequentemente, o material neste estado de tensão não contribui muito para os afundamentos no pavimento. O tipo B (*plastic creep*) apresenta progressivo aumento de DP, ainda que apresente uma baixa, e quase constante, taxa de acréscimo. O tipo C (*incremental collapse*) representa a situação em que, para poucos ciclos de carga, o material apresenta considerável diminuição da deformação elástica e aumento sucessivo da plástica a cada aplicação de carga, podendo resultar em ATR excessivos e na ruptura do pavimento. Por fim, o tipo AB representa o material atingindo o comportamento do tipo *plastic shakedown*, porém com maior magnitude inicial de acúmulo de DP.

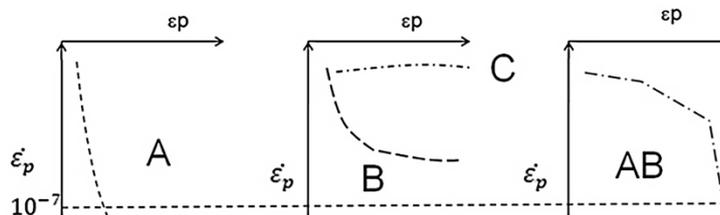


Figura 2: Diferentes comportamentos de solos e materiais granulares quanto à deformação permanente [3, 17].

3. RESULTADOS

Esta seção foi dividida em três partes, que englobam os dois focos das análises. Os dois primeiros são relacionados à retirada dos N iniciais e dos N finais e o terceiro contempla os resultados das simulações no programa MeDiNa para complementar as observações feitas a partir dos dois primeiros.

Para a etapa de “ciclos de cargas iniciais”, foi avaliada a desconsideração dos 500 primeiros ciclos, prática de trabalhos europeus, observando-se os formatos das curvas no gráfico e seus comportamentos quanto ao acomodamento, e sua influência nos parâmetros do modelo de previsão de DP de GUIMARÃES [3]. Já na etapa “ciclos de cargas suficientes para caracterização dos materiais”, foram avaliadas as condições 80.000 e 100.000 aplicações de ciclos de carga.

A Figura 3 ilustra os resultados dos ensaios de DP para dois dos solos selecionados, ou seja, o que apresentou as menores e as maiores DPs, SB e SA, respectivamente. Foram considerados três estados de tensões para materiais ensaiados na umidade ótima e na energia Proctor Normal, estando em destaque os pontos referentes a $N = 500, 1.000, 3.000, 5.000, 10.000, 80.000$ e 100.000 . Ressalta-se que os limites superiores dos valores apresentados nos eixos horizontais foram ajustados para facilitar a observação da evolução de DP nestes ciclos iniciais selecionados.

Como observado, houve maiores acúmulos de DP antes do $N = 500$, apesar de continuar havendo acréscimo posteriormente em uma taxa de crescimento menor. Também foram observados; acúmulos contínuos de DP entre 80 e 100 mil ciclos de aplicações de carga, especialmente nos corpos de prova que foram submetidos aos maiores estados de tensões e para o material SA.

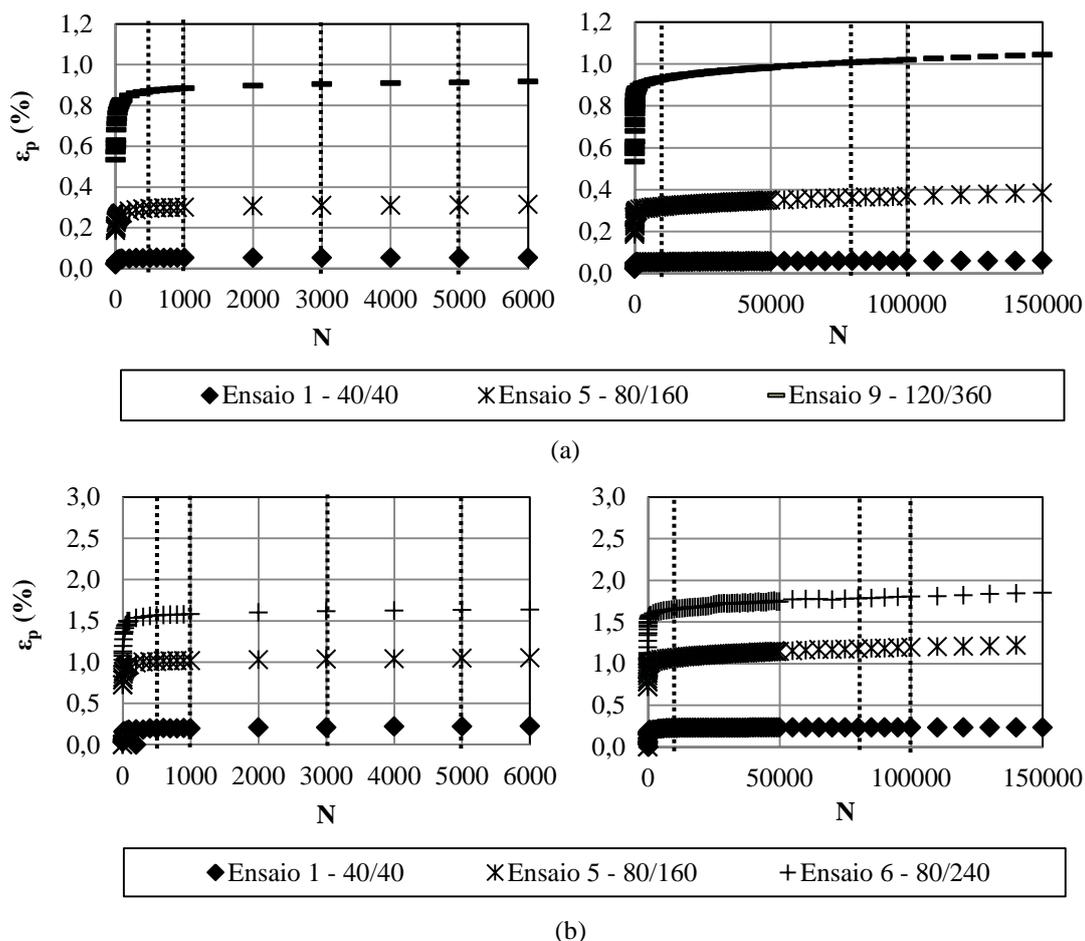


Figura 3: Resultados de deformações permanentes de dois solos: (a) SB e (b) SA desta pesquisa.

3.1 Desconsideração de ciclos iniciais

Regressões não lineares múltiplas foram realizadas para a obtenção de parâmetros para o modelo de previsão de DP de cada material considerando a diminuição dos 500 primeiros ciclos e o deslocamento das curvas a partir da retirada destes 500 ciclos de carga. A Tabela 2 mostra as deformações previstas pelo modelo calibrado para cada material, obtidas pela substituição dos três estados de tensões selecionados.

Tabela 2: Resultados de DPs para diferentes considerações de ciclos iniciais.

MATERIAL	TENSÃO (kPa)		ε _p (%) PREVISTO EM 150 MIL		
	σ _c	σ _a	150 MIL	SEM 500 INICIAIS	SEM 500 INICIAIS DESLOCADO PARA 0
SB	40	40	0,051	0,052	0,036
	80	160	0,230	0,230	0,063
	120	360	0,559	0,550	0,087
SM	40	40	0,135	0,133	0,030
	80	160	0,500	0,493	0,093
	120	360	1,076	1,061	0,179
SA	40	40	0,278	0,279	0,076
	80	160	1,241	1,231	0,221
	120	240	1,918	1,889	0,279
SM +	40	40	0,386	0,360	0,045
	80	160	1,285	1,212	0,168
	80	240	1,931	1,827	0,242

BB	40	40	0,093	0,091	0,030
	80	160	0,313	0,304	0,076
	120	360	0,638	0,616	0,133
BM	40	40	0,056	0,055	0,017
	80	160	0,302	0,296	0,096
	120	360	0,809	0,789	0,266
BA	50	50	0,151	0,145	0,034
	80	160	0,528	0,508	0,130
	120	360	1,255	1,209	0,320

Como ilustração, a Figura 4 mostra os gráficos obtidos para o solo SA, o material que mais deformou plasticamente entre os analisados nesta seção, e para um solo adicional (SA extra) que deformou bastante durante os ensaios de DP, ainda mais que o SA, estando em destaque um resultado de ensaio deste solo extra no estado de tensão plotado. Foram selecionados estes materiais para a observação do comportamento em dois tipos de curvas: $\epsilon_p \times N$ e $\dot{\epsilon}_p \times \epsilon_p$, sendo este último conjunto de curvas usado para a avaliação do comportamento de *shakedown* dos materiais, cuja classificação, seguindo os limites da norma europeia EN 13286-7 [20], é apresentada na Tabela 3.

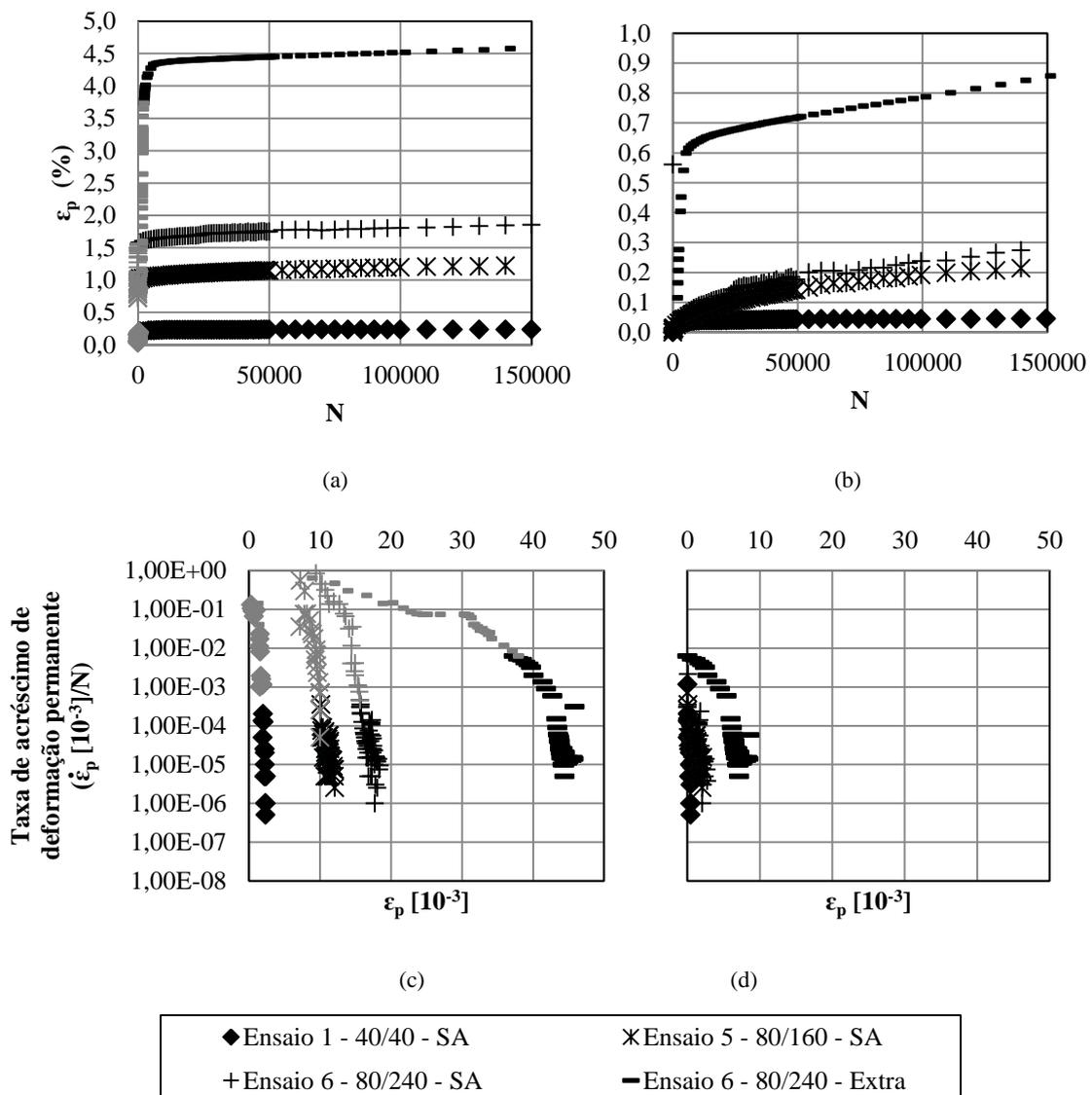


Figura 4: DP de dois solos, destacando os 500 ciclos de cargas iniciais: (a) evolução com os 500 ciclos iniciais em destaque, (b) evolução sem os 500 ciclos iniciais, (c) taxa de acréscimo com os 500 ciclos iniciais em destaque, (d) taxa de acréscimo sem os 500 ciclos iniciais.

Tabela 3: Variação do comportamento quanto ao acréscimo de deformação permanente para as duas situações de ciclos iniciais.

MATERIAL	TENSÃO (kPa)		TIPO DO COMPORTAMENTO PELA EN 13286-7:2004 [19]	
	σ_c	σ_d	DNIT (2018)	SEM OS PRIMEIROS 500 CICLOS (EIXOS DESLOCADOS)
SA	40	40	B	A
	80	160	B	B
	120	240	B	B
Extra	120	240	C	B

3.2 Desconsideração de ciclos finais

A Tabela 4 mostra os resultados previstos para os casos em que foram desconsiderados os 50.000 e 70.000 ciclos finais dos 150.000 aplicados nos ensaios para os três estados de tensões.

Tabela 4: Resultados de deformações permanentes para diferentes quantidades de ciclos finais.

MATERIAL	TENSÃO (kPa)		ϵ_p (%) PREVISTO EM 150 MIL		
	σ_c	σ_d	N = 150 MIL	N = 100 MIL	N = 80 MIL
SB	40	40	0,051	0,050	0,049
	80	160	0,230	0,230	0,229
	120	360	0,559	0,561	0,562
SM	40	40	0,135	0,134	0,133
	80	160	0,500	0,498	0,497
	120	360	1,076	1,074	1,074
SA	40	40	0,278	0,276	0,275
	80	160	1,241	1,238	1,236
	120	240	1,918	1,916	1,916
SM +	40	40	0,386	0,389	0,392
	80	160	1,285	1,294	1,302
	80	240	1,931	1,946	1,958
BB	40	40	0,093	0,093	0,093
	80	160	0,313	0,315	0,316
	120	360	0,638	0,642	0,645
BM	40	40	0,056	0,056	0,056
	80	160	0,302	0,304	0,305
	120	360	0,809	0,814	0,816
BA	50	50	0,151	0,153	0,153
	80	160	0,528	0,531	0,533
	120	360	1,255	1,259	1,262

3.3 Programa MeDiNa

As Figuras 5 e 6 mostram os resultados das DPs previstas usando o programa MeDiNa para as duas condições de simulações, diferenciadas por tráfego, seção transversal e materiais, nas cinco situações em que a camada de base é simulada com modelos ajustados a partir de variações da quantidade de números de ciclos de carga. Das 50 simulações realizadas, são apresentados os resultados que melhor evidenciam o que era esperado com a retirada dos ciclos estudados.

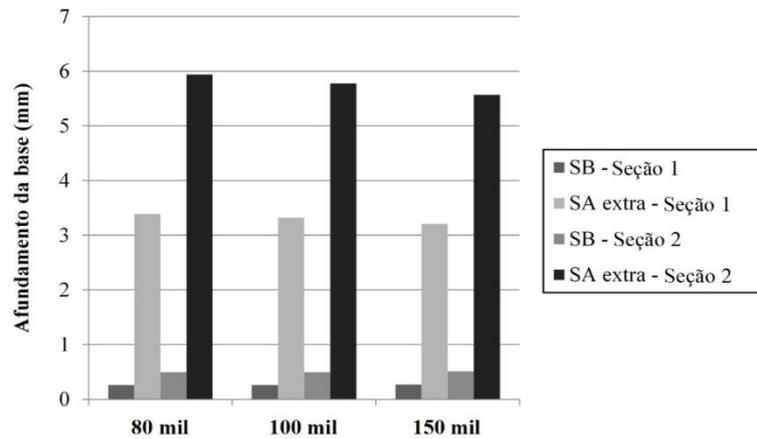


Figura 5: Afundamentos previstos em simulações no MeDiNa para dois solos em duas seções transversais distintas e com modelos de DP calibrados para três diferentes N, usados na camada de base.

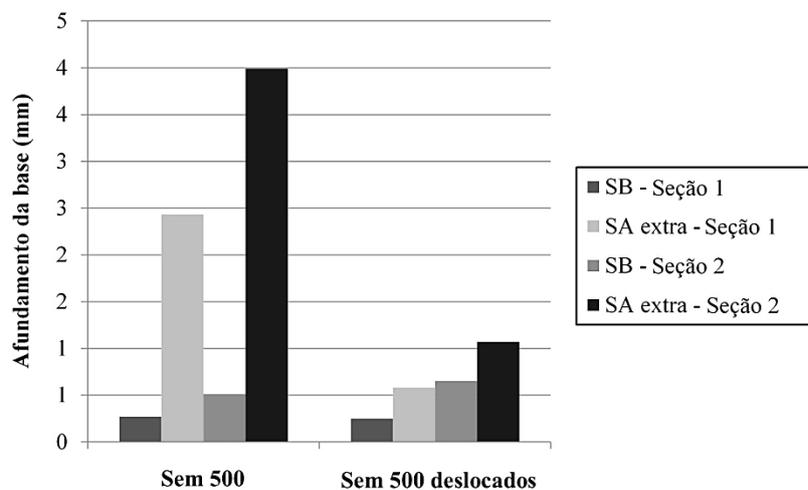


Figura 6: Afundamentos previstos em simulações no MeDiNa para dois solos em duas seções transversais distintas e com modelos de DP calibrados para duas diferentes situações de desconsideração dos 500 primeiros ciclos de carga.

4. DISCUSSÃO

A Tabela 2 indica que a desconsideração dos 500 primeiros ciclos de aplicação de carga afetou consideravelmente a previsão dos valores de DP para 150.000 ciclos, como observado a partir da comparação entre os valores da coluna correspondente aos resultados dos ensaios com todos os ciclos aplicados e os das demais colunas correspondentes à desconsideração dos 500 ciclos iniciais. As diferenças na previsão são evidentes para os seis materiais nos três estados de tensões, tendo sido mais acentuada para o estado de tensão com razão σ_d/σ_c de 3. No geral, com exceção do caso $\sigma_d/\sigma_c = 1$ para SB, a diferença percentual foi maior que 100%.

A Tabela 2 também ilustra a sensibilidade do comportamento do material com a umidade de compactação e com o estado de tensão. Além disso, a tabela evidencia a importância da desconsideração de resultados correspondentes a ciclos iniciais do ensaio de DP para a avaliação do comportamento dos materiais. Para esta análise, foi avaliado o ensaio no qual foi aplicado 240/80 (σ_d/σ_c , kPa/kPa), visto que foi o maior estado de tensão ensaiado para esta condição.

Na Figura 4, com o deslocamento dos resultados nos eixos, é possível observar a diminuição do acréscimo de DP e, conseqüentemente, das DP finais para todos os casos mostrados. No caso do SA extra, os ciclos após os 500 iniciais ainda contribuem significativamente com o acréscimo de DP. Assim, este material também foi selecionado para as simulações do programa MeDiNa. Esta observação foi confirmada quando também analisados os dados na Tabela 2 para os seis materiais distintos.

A Tabela 3 mostra a variação na classificação do solo como resultado do deslocamento das curvas após a desconsideração dos 500 primeiros ciclos de carga. As Figuras 4c e 4d representam estas mudanças e indicam que alguns materiais tiveram as suas classificações alteradas, passando de B para A e de C para B. O material, por já ter sido consideravelmente solicitado nos ciclos iniciais, passou da etapa de acréscimo que ainda teria entre 3.000 e 5.000, que são os ciclos tomados como base para delimitação das regiões de comportamento, já para início de acomodamento, nos casos em que há *shakedown*. Isso pode afetar a seleção do material, visto que, ao ser aplicado em campo, ele pode potencialmente deformar mais do que o previsto em determinadas camadas.

A eliminação dos 500 primeiros ciclos das curvas de DP equivale à consideração de que, no campo, o material

sofreu as deformações iniciais na etapa de construção do pavimento, quando ainda são realizadas compactações de outras camadas superiores e passagens de veículos da obra. Apesar de ser uma representação desta situação *in situ*, a retirada dos 500 primeiros ciclos, zerando a leitura para esta ser de fato considerada a partir do ciclo 501, faria com que não se levasse em consideração a DP que ocorre nos ciclos iniciais, que são as maiores, o que prejudica a análise do comportamento do material em todas as etapas seguintes, dificultando a fase de seleção.

Quanto à desconsideração de ciclos finais, é possível observar na Tabela 4 que, dos 21 casos analisados para cada modelo ajustado de acordo com cada N máximo, houve diferenças quando comparados os valores observados no ensaio e os previstos pelo modelo ajustado com o menor número de ciclos.

No geral, as deformações permanentes previstas para 80.000 e para 100.000 ciclos foram maiores do que as previstas para 150.000. Isso ocorreu em 12 e 13 dos casos avaliados, respectivamente. No entanto, os valores obtidos para a interrupção dos ensaios em 80.000, 100.000 e 150.000 ciclos foram semelhantes, não apresentando diferenças significativas limitadas a, no máximo, 0,027. A maioria destas diferenças ocorreu na terceira casa decimal. Os valores para 80.000 e 100.000 ciclos foram mais próximos entre si e este fato pode ser explicado por estarem separados por apenas 20.000 ciclos de aplicação de carga.

As Figuras 5 e 6 mostram os resultados de ATR na camada de base previstos pelo programa MeDiNa. Os maiores ATRs foram previstos para a seção transversal 2, como consequência das características estruturais distintas entre as seções avaliadas e do maior tráfego imposto para a seção 2.

O solo SA extra apresentou afundamentos mais acentuados do que os demais. Com exceção do material SB, as simulações com os demais materiais resultaram em alerta do programa indicando que o N estava elevado para a estrutura proposta. Nota-se também que as diferenças de ATR para os números de ciclos finais avaliados ocorreram na segunda casa decimal para a maioria dos materiais. Para o solo SA extra, as diferenças de ATR entre os diversos ciclos finais ocorreram na primeira casa decimal. Maiores valores de ATR foram observados para os casos em que o ensaio foi finalizado com menos de 150.000 ciclos aplicados.

Estes resultados também indicam que materiais pouco deformáveis podem ter o número de ciclos de ensaio reduzido de 150.000 para 100.000, ou mesmo para 80.000. Por outro lado, materiais mais deformáveis precisam ser de fato ensaiados considerando um número de ciclos maior, já que tendem a continuar apresentando uma taxa de acréscimo de DP considerável ao serem submetidos às aplicações de carga. Vale salientar que este comportamento também pode ser influenciado por outros fatores, como o estado de tensão aplicado, por exemplo. Assim, recomenda-se cautela ao se analisar a possibilidade de redução do número de ciclos de ensaio, podendo esta decisão ser auxiliada pela observação dos tipos de comportamento pela teoria do *shakedown*. Neste caso, o ensaio já poderia ser finalizado quando a taxa de acréscimo de DP atingisse um valor próximo ao zero matemático (10^{-6} , para fins práticos), ou seja, comportamento A.

A desconsideração dos 500 ciclos iniciais influenciou significativamente o resultado de ATR ao final do N proposto para a vida de serviço. Os afundamentos foram menores do que se houvessem sido considerados todos os ciclos que foram aplicados no material. Logo, a desconsideração destes ciclos iniciais não deve ser estimulada. Já foram feitas comparações com a observação de campo e a previsão do ensaio da forma como está normatizado foi coerente com o ATR medido [26].

Adicionalmente, resultados de DP de diferentes materiais já caracterizados pelos autores deste trabalho [11, 15] foram avaliados para 1.000, 3.000, 5.000, 10.000, 50.000, 100.000 e 150.000. Os resultados indicaram que, de maneira geral, os materiais com maiores deformações são os que continuam a acumular DPs para números de ciclos maiores, porém, como já mencionado, este comportamento também é influenciado pelo estado de tensão aplicado, havendo maior acúmulo de DP à medida em que as tensões solicitantes aumentam.

Alguns materiais, geralmente submetidos a estados de tensões mais baixos, apresentaram acomodamento a partir de 50.000 ciclos. Porém, dependendo do material e do estado de tensão aplicado, a utilização de apenas 50.000 ciclos poderia levar a previsões de DPs maiores, como já observado por GUIMARÃES *et al.* [27]. Neste caso, o acréscimo considerável de DP para apenas 50.000 ciclos poderia fazer com que materiais que apresentam bom desempenho em campo fossem descartados para algumas aplicações. A possibilidade de diminuição do número de ciclos normalizado só deve ser cogitada em casos especiais, especialmente quando for observada a acomodação das deformações plásticas para as condições de ensaio adotadas.

5. CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo avaliar as condições do ensaio de deformação permanente utilizadas para análises das respostas plásticas de materiais geotécnicos aplicados em camadas de pavimentos. Especificamente, analisou-se o efeito do número de ciclos em ensaios de deformação permanente sobre o comportamento mecânico dos materiais visando avaliar a possibilidade de otimização do programa experimental atualmente recomendado em norma, que estabelece a necessidade da aplicação de 150.000 ciclos.

Considerando os nove corpos de prova indicados pelo procedimento normatizado, a caracterização dos materiais pode durar cerca de 189 horas (aproximadamente 8 dias) para os 150.000 ciclos de carga, a 2Hz, frequência geralmente utilizada. Nota-se que este tempo corresponde somente ao ensaio em si e é ainda maior se for considerado o processo preliminar de preparação das amostras. A avaliação da possibilidade de redução do número de ciclos para diferentes solos e britas com diferentes deformabilidades foi realizada a partir de ensaios de laboratório, análises estatísticas e simulações no programa MeDiNa.

Os resultados indicaram a importância que alguns ciclos adicionais podem ter na análise, seleção e previsão de deformações permanentes de materiais mais susceptíveis ao acúmulo de deformações permanentes. Também se observou uma grande semelhança entre os afundamentos previstos nas simulações no MeDiNa considerando dados de ensaios até 80.000 e até 100.000 ciclos. No entanto, isso não necessariamente reflete o comportamento dos diversos materiais existentes no Brasil, país extenso com grande variedade pedológica, o que exige uma avaliação criteriosa por parte dos engenheiros ao se optar pela redução do número de ciclos.

Com base nos materiais analisados, conclui-se que, ao se verificar que a amostra tende ao acomodamento, é possível finalizar o ensaio com 80.000 ou 100.000 ciclos, visto que os dados obtidos para os dois casos não afetaram o ajuste do modelo de previsão implementado no programa MeDiNa.

Uma sugestão para tornar esta decisão de finalizar os ensaios antes de 150.000 ciclos de maneira objetiva e automatizada é programar o equipamento triaxial de cargas repetidas para plotar o gráfico de acomodamento (*shakedown*) e implementar um alerta para indicar quando a taxa de acréscimo de deformação permanente atingir certo valor correspondente à condição de acomodação do material. Neste ponto, é possível interromper o ensaio porque os dados obtidos são suficientes para permitir a classificação dos materiais e a calibração do modelo de previsão. Isto pode otimizar o programa experimental a partir da redução do tempo de ensaio necessário para caracterizar todos ou, pelo menos, alguns corpos de prova, quando estes tenderem ao acomodamento para os níveis de tensão aplicados.

A desconsideração dos 500 primeiros ciclos não permitiu a caracterização de alguns comportamentos dos materiais, principalmente de solos, e não se aconselha descartar estas informações dos resultados do ensaio.

Por fim, ressalta-se que ensaios mecânicos em equipamentos triaxiais, como os realizados neste trabalho, permitem uma caracterização mais representativa da deformabilidade plástica de solos e materiais granulares aplicados em pavimentos, substituindo com muitas vantagens e com maior consistência a avaliação tradicional pelo ensaio CBR. O procedimento moderno fornece informações relevantes e os resultados obtidos a partir das suas análises apresentam boa correlação com o comportamento no campo. Estes fatores, aliados à possível otimização dos programas experimentais a partir de análises como as realizadas neste trabalho, tornam o procedimento atraente para ser adotado na caracterização do potencial de deformação permanente de materiais de pavimentação.

6. AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) - Código de Financiamento 001, do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e do CENPES/PETROBRAS.

7. BIBLIOGRAFIA

- [1] SVENSON, M., “Ensaio triaxiais dinâmicos de solos argilosos”, Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1980.
- [2] GUIMARÃES, A.C.R., “Estudo de deformação permanente em solos e teoria do shakedown aplicada a pavimentos flexíveis”, Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2001.
- [3] GUIMARÃES, A.C.R., “Um método mecânico-empírico para a previsão da deformação permanente em solos tropicais constituintes de pavimentos”, Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2009.
- [4] MALYSZ, R., “Comportamento mecânico de britas empregadas em pavimentação”, Dissertação de M.Sc., Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, RS, Brasil, 2004.
- [5] MALYSZ, R., “Desenvolvimento de um equipamento triaxial de grande porte para avaliação de agregados utilizados como camada de pavimentos”, Tese de D.Sc., Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, RS, Brasil, 2009.
- [6] SILVA, B.A., “Aplicação das metodologias MCT e resiliente a solos finos do centro-norte do Mato Grosso”, Dissertação de M.Sc., Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2003.
- [7] DELGADO, B.G., “Análise da deformabilidade de um solo tropical do oeste do Maranhão como material de sublastro na Estrada de Ferro Carajás”, Dissertação de M.Sc., Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, Brasil, 2012.
- [8] VON DER OSTEN, F.B., “Avaliação de quatro solos tropicais para emprego em sublastro da Estrada de Ferro Carajás”, Dissertação de M.Sc., Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2012.
- [9] RIBEIRO, M.M.P., “Contribuição ao estudo da deformação permanente dos solos de subleito”, Dissertação de M.Sc., Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, Brasil, 2013.
- [10] ZAGO, J.P., “Estudo da deformação permanente de três solos típicos de subleitos rodoviários de Santa Maria – RS”, Dissertação de M.Sc., Universidade de Santa Maria, Santa Maria, RS, Brasil, 2016.
- [11] LIMA C.D.A., “Estudo da deformação permanente de duas britas graduadas para uso em camadas de pavimentos”, Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2016.
- [12] NORBAK, C., “Caracterização do módulo de resiliência e da deformação permanente de três solos e misturas solos-brita”, Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2018.
- [13] DALLA ROZA, A.E., “Contribuição para projeto mecanístico-empírico de pavimentos asfálticos na região Norte do estado do Mato Grosso”, Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2018.
- [14] SAGRILO, A.V. “Estudo de Deformabilidade de Britas com Diferentes Origens Litológicas do Estado do Rio Grande do Sul”, Dissertação de M.Sc., Universidade de Santa Maria, Santa Maria, RS, Brasil, 2020.
- [15] LIMA, C.D.A., “Avaliação da deformação permanente de materiais de pavimentação a partir de ensaios triaxiais de cargas”, Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2020.
- [16] DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT “DNIT 179/2018-IE Pavimentação – Solos – Determinação da deformação permanente – Instrução de ensaio.” Brasil, 2018.

- [17] WERKMEISTER, S., DAWSON, A.R., WELLNER, F., “Permanent deformation behavior of granular materials and the shakedown concept”, *Transportation Research Record*, v. 1757, n. 1, pp. 75-81. 2001.
- [18] QIAN, J., WANG., Y., LIN, Z., *et al.* “Dynamic shakedown analysis of flexible pavement under traffic moving loading”, *Procedia Engineering (Advances in Transportation Geotechnics 3)*, v. 143, pp. 1293-1300. 2016.
- [19] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION “EN 13286-7: Unbound and hydraulically bound mixtures. Part 7: cyclic load triaxial tests for unbound mixtures.” European Standardization. 2004.
- [20] ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION - AFNOR “NF P 98-235-1: Essais relatifs aux chaussées - matériaux non traités. Partie 1: essai triaxial à chargements répétés”, Paris, França. 1995.
- [21] MONISMITH, C.L., OGAWA, N., FREEME, C.R., “Permanent deformation characteristics of subgrade soils due to repeated loading” *In: 54^o Annual Meeting of Transportation Research Board (TRB)*, Washington, EUA, 1975.
- [22] ARNOLD, G.K. “Rutting of granular pavements”, Tese de D.Sc., Universidade de Nottingham, Nottingham, Inglaterra, 2004.
- [23] ESPINOSA, V.R.P., “Ensaio triaxiais de carga repetida de uma brita”, Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1987.
- [24] LIMA, C.D.A, MOTTA, L.M.G., ARAGÃO, F.T.S., “Effects of compaction moisture content on permanent deformation of soils subjected to repeated triaxial load tests”, *Transportation Research Record*, v. 2673, n. 2, pp. 466-476. 2019.
- [25] DAWSON A.R., WELLNER F. Plastic behavior of granular materials, *In: Final Report ARC Project 933, Reference PRG99014*, Universidade de Nottingham, Nottingham, Inglaterra, 1999.
- [26] UBALDO, M.O., MOTTA, L.M.G., FRITZEN, M.A., *et al.*, “Comparação entre avaliação de campo e o método de dimensionamento nacional em relação à deformação permanente”, *Revista Estradas*, v. 23, pp. 29-37. 2018.
- [27] GUIMARÃES, A.C.R., MOTTA, L.M.G., MEDINA, J., “Considerações sobre o modelo de Monismith de deformação permanente em solos tropicais constituintes de camadas de pavimentos” *In: 35^a Reunião Anual de Pavimentação da ABPv*, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2004.

ORCID

Caroline Dias Amancio de Lima	https://orcid.org/0000-0003-2246-7392
Laura Maria Goretti da Motta	https://orcid.org/0000-0001-5517-9421
Francisco Thiago Sacramento Aragão	https://orcid.org/0000-0003-4957-9474