

ANÁLISE DA DEFORMAÇÃO PERMANENTE DE TRÊS SOLOS TROPICAIS EM DIFERENTES UMIDADES UTILIZANDO O CARREGAMENTO MULTIESTÁGIO

Resumo: Esta pesquisa experimental tem como objetivo analisar a deformação permanente de três solos tropicais, em aparelho triaxial de carregamento cíclico, utilizando solicitações crescentes em multiestágios. Para este ensaio, utilizou-se três solos advindos da faixa de domínio da BR-040 (Km 06 – LA', Km 26 – LG' e Km 824 – NG'). Após classificação do material, foram moldados dois corpos de prova na energia normal de compactação (na umidade ótima e ótima +2%), totalizando seis corpos de prova. O ensaio de deformação permanente foi realizado conforme técnica de carregamento multiestágio, o que diminuiu consideravelmente o tempo de laboratório e quantidade de material utilizado. Os resultados apontam que o solo do Km 26 alcançou os maiores valores de deformação permanente, e, além disso, o corpo de prova ensaiado na umidade ótima + 2%, atingiu a máxima DP possível de ser registrada pelo LVDT do equipamento, no segundo ciclo de carregamento (5% DP). O solo do Km 824 deformou menos, levando em consideração o último estágio de carregamento e as duas condições de umidade e densidade. Portanto, conclui-se que esta técnica de avaliação do comportamento do solo, contribuiu sobejamente com a pesquisa, visto que, de forma simplificada, é possível se obter mais informações de desempenho mecânico do solo.

Palavras-chave: Multiestágio; Deformação Permanente; Triaxial; Umidade ótima

Abstract: This experimental research aims to analyze the permanent deformation of three tropical soils in a triaxial apparatus of cyclic loading, using increasing stresses in multistage. Three grounds from the BR-040 domain strip (Km 06 – LA', Km 26 – LG', and Km 824 – NG') were used for this test. After classifying the material, two specimens were molded at the average compaction energy (at optimal and optimal humidity +2%), totaling six specimens. The permanent deformation test was performed using the multistage loading technique, considerably reducing the laboratory time and material used. The results indicate that the soil at Km 26 reached the highest permanent deformation values. In addition, the specimen tested at optimal moisture + 2% got the maximum possible DP to be recorded by the LVDT of the equipment in the second cycle charge (5% DP). The soil at Km 824 deformed less, taking into account the last loading stage and the two conditions of moisture and density. Therefore, it is concluded that this technique of soil behavior evaluation contributed significantly to the research. Besides this, it is possible to obtain more information on the mechanical performance of the soil.

Keywords: Multistage; Permanent Deformation; Triaxial; Optimal Moisture

1. Introdução

Com base em testes triaxiais de laboratório, em vários estágios ou multiestágio, de solos granulares, Gidel *et al.*, (2001) desenvolveram um método para calcular a deformação permanente utilizando um único corpo de prova (CP), registrando os efeitos dos carregamentos para diferentes ciclos de carga e níveis de tensão aplicados. O objetivo era, através dessa otimização, prever a ruptura (colapso) do solo num período mais curto. Sem isto, para validar este modelo, se fosse utilizado a técnica do carregamento monoestágio, deveriam ter sido moldados distintos corpos de prova para cada par de tensão utilizada. Com a finalidade de se

diminuir o tempo e a quantidade de materiais, testou-se uma abordagem diferente, que consiste na solicitação do mesmo corpo de prova com distintos e crescentes níveis de tensões axiais e confinantes, referidas como tensões desvios e hidrostáticas (p e q) no supracitado estudo.

No Brasil, o ensaio de deformação permanente (DP) é regulamentado pela norma DNIT 179/2018 – IE (DNIT, 2018). Na referida norma são definidos 9 pares de tensão para o ensaio, que ocorre com ciclos de 1 a 5 Hz, sendo a frequência de 2 Hz a mais recomendada, desde que a duração do pulso seja de 0,1 segundo. Utilizando-se a frequência recomendada de 2 Hz e 150 mil ciclos, cada ensaio completo levaria em média 187,5 horas para os 9 pares de tensão, além de ser necessário aproximadamente 37,5 kg de solos para uma densidade de 2,65 g/cm³. Considerando-se uma jornada de 8h de laboratório, seriam necessários 23 dias de testes, caso nenhum imprevisto ocorresse.

Utilizando-se das premissas apontadas por Gidel *et al.*, (2001) e visando otimizar o tempo de laboratório e validar a contribuição desta técnica de carregamento multiestágio, o objetivo deste estudo é analisar a influência da umidade no comportamento mecânico de três solos tropicais submetidos a um carregamento cíclico, em equipamento triaxial, utilizando distintos e crescentes pares de tensões desvio e confinante.

Como delimitação, este artigo realizou uma análise comparativa do comportamento mecânico dos solos sem o objetivo de se dimensionar o pavimento. Os solos utilizados nesta pesquisa vieram da faixa de domínio da BR-040 e ensaiados em laboratório, seguindo as diretrizes das normas que regulam este experimento. Cada CP foi solicitado em 4 carregamentos de 10.000 ciclos, totalizando 40.000 ciclos.

Observou-se, ao fim do estudo, que a utilização da técnica de carregamento multiestágio, forneceu uma quantidade maior de informações do comportamento mecânico do solo em menos tempo e utilizando-se uma menor quantidade de material. Portanto, um procedimento importante para se avaliar a respostas dos materiais às solicitações cíclicas do carregamento axial.

2. Revisão da literatura

A deformação permanente tem sido uma ferramenta importantíssima para análise e seleção de materiais, validando o seu uso seguro nas camadas do pavimento. Este ensaio é realizado no aparelho triaxial de cargas repetidas, que pode ser influenciado por diversos fatores, tais como: as tensões aplicadas, o número de cargas (N), a duração e a frequência da solicitação, o tipo de material, graduação e forma da partícula, o teor de umidade e a densidade do material, (Medina e Motta, 2015).

Ultimamente novos estudos utilizando o carregamento multiestágio no ensaio de DP estão sendo pesquisados no meio científico. Esta técnica também se encontra na norma europeia EN 13826-7 (2004), que padroniza o ensaio e tem como objetivo avaliar, de forma mais expedita, a resposta do material às distintas solicitações. Com isto, é mais fácil se determinar os níveis máximos de tensões suportados pelo material e que não devem ser excedidos.

A norma EN 13826-7 recomenda a aplicação de 10.000 ciclos de carga, em quatro estágios de carregamento, com diferentes e crescentes valores de tensão desvio, mantendo fixa a tensão confinante, adotando 0,5% de DP como critério de parada, caso ocorra. Dentre alguns estudos na literatura que recorreram a esta técnica, destacam-se: Arulrajah *et al.*, (2021); Bilodeau e Perez Gonzalez, (2021); Cabral *et al.*, (2020); Khasawneh, (2020); Bilodeau *et al.*, (2013); Gidel *et al.*, (2001) , como visto na Tabela 1.

Tabela 1: Procedimento de multiestágios na DP

Autor (Ano)	Estágios	p (kPa)	q (kPa)	q/p	Ciclos
Arulrajah <i>et al.</i> , (2021)	4	67/93/120/147	80/160/240/320	1,2/1,7/2/2,1	10.000
Bilodeau e Perez Gonzalez, (2021)	6	1ª - 23/24/27/29/31/33 2ª - 52/55/58/62/65/68 3ª - 79/83/87/93/97/101	1ª - 9/12/20/27/32/40 2ª - 20/30/40/50/60/70 3ª - 27/40/52/68/80/92	1ª - 0,3/0,5/0,7/0,9/1,0/1,2 2ª - 0,3/0,5/0,7/0,8/0,9/1 3ª - 0,3/0,5/0,6/0,7/0,8/0,9	10.000
Cabral <i>et al.</i> , (2020)	4	1ª - 53/67/80/93 2ª - 107/120/160/187 3ª - 160/200/240/280	1ª - 40/80/120/160 2ª - 80/120/240/320 3ª - 120/240/360/480	1ª - 0,75/1,2/1,5/1,7 2ª - 0,75/1/1,5/1,7 3ª - 0,75/1,2/1,5/1,7	10.000
Khasawneh, (2020)	4	1ª - 27,5/41,3/62/82,7; 2ª - 13,7/27,5/34,4/48,2	1ª - 16,5/24,8/37,2/49,2 2ª - 13,7/27,5/34,4/48,2	1ª - 0,5 2ª - 1	10.000
Bilodeau <i>et al.</i> , (2013)	3	37/53/70	50/100/150	1,3/1,8/2,1	10.000
Gidel <i>et al.</i> , (2001)	4	1ª - 60/120/180/240; 2ª - 75/150/225/ 300; 3ª - 100/200/300/400; 4ª - 100/200/300/450; 5ª - 100/200/300/450;	1ª - 150/300/450/600 2ª - 150/300/450/600 3ª - 150/300/450/600 4ª - 100/200/300/450 5ª - 50/100/150/225	1ª - 2,5 2ª - 2 3ª - 1,5 4ª - 1 5ª - 0,5	10.000

Fonte: Autores (2022)

Gidel *et al.*, (2001) alegaram que o carregamento monoestágio para se determinar a DP de um material e conhecer seu comportamento mecânico, utiliza apenas um único par de tensões, tornando o estudo mais moroso. Diante disso, testaram uma abordagem diferente, solicitando a mesma amostra com sucessivos e crescentes pares de tensões. Assim, é possível se reduzir o número de testes a serem realizados (economia de tempo e material) e diminuindo a dispersão experimental, uma vez que a mesma amostra é utilizada para obter informações em vários níveis de tensões.

A pesquisa desenvolvida por Bilodeau *et al.*, (2013) com solos contendo RAP (Revestimento Asfáltico Reciclado), em cinco diferentes gradações de misturas, também utilizou-se a técnica de carregamento multiestágio, com uma frequência de 2 Hz. Os autores concluíram que houve uma boa sinergia entre o comportamento mecânico do solo com o RAP e os parâmetros utilizados no ensaio. Desta forma, foi possível estabelecer uma espessura de camada capaz de conter as deformações no pavimento.

Ribeiro *et al.*, (2014) estudaram o comportamento de um solo LA', variando as tensões e as umidades. A Wot e pWot encontradas foram, respectivamente, 11,8% e 2,035 g/cm³. O MR na Wot = 164,09 MPa e Wot + 1,5 = 142,10 Mpa, considerando $\sigma_3 = 180$ KPa e $\sigma_d = 71$ KPa. As tensões utilizadas nos ensaios podem ser visualizadas na Tabela 2.

Tabela 2: Pares de tensões

Tensões	σ_d	σ_3	σ_d / σ_3
T1	35	70	0,5
T2	70	70	1
T3	105	70	1,5
T4	140	70	2

Fonte: Adaptado de Ribeiro et al., (2014)

Desta maneira, os autores obtiveram os seguintes resultados: aumentando-se a tensão desvio em 4 vezes, a DP duplicou, e, um acréscimo de 3% na umidade entre as tensões T3 e T4, houve um aumento de 20% na DP, considerando o carregamento monoestágio. Os autores também concluíram que o módulo resiliente do material sofreu uma maior influência da variação da umidade, porém a deformação permanente foi menos sensível a esta variação. O acréscimo da tensão desvio teve uma influência maior do que a umidade na variação da DP.

Khasawneh (2020) aplicou a técnica de carregamento multiestágio para determinar a DP de dois solos classificados como A-4a e A-6a. Além de variar a umidade destes solos (Wot e Wot +2%), a amostra também foi solicitada em quatro diferentes valores de tensões confinantes e desvio, utilizando 10.000 ciclos para cada estágio e mantendo constante a razão entre as tensões (q/p). O autor concluiu que este procedimento pode ser realizado em diferentes níveis de tensão e ciclos de cargas, obtendo, desta forma, uma maior quantidade de informações do material. Para facilitar o entendimento, na Figura 1 é apresentado a DP para p/q = 0,5 e 1, de uma argila siltosa na umidade ótima e na umidade ótima + 2%. Conforme é possível se constatar, a DP variou tanto pela influência da umidade quanto pela variação de tensões.

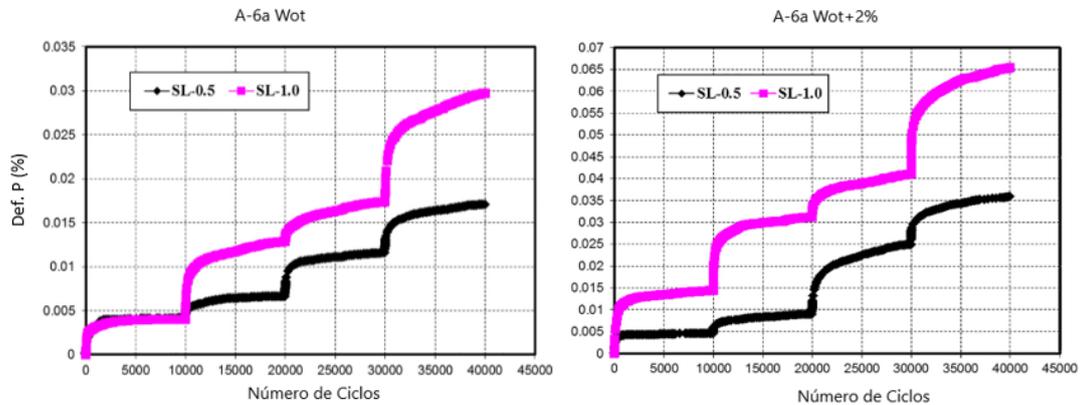


Figura 1: DP para carregamento multiestágio

Fonte: Adaptado de Khasawneh (2020)

Em um outro estudo realizado por Arulrajah *et al.*, (2021), os autores utilizaram amostras de construção e demolição, como tijolos britados (CB) e agregados de concreto reciclado (ACR), em diferentes combinações de tensões. A técnica de multiestágios foi aplicada a uma frequência de 5 Hz num total de 40.000 ciclos. Os autores alegaram que quanto maior o número de tensão desvio, maior seria a DP nos dois tipos de materiais testados.

3. METODOLOGIA

A pesquisa de caráter exploratório e quantitativa foi organizada num fluxograma, Figura 2. Resumidamente, após a caracterização do material - classificação segundo procedimento MCT (Miniatura, Compactado, Tropicais); granulometria; curva de compactação para determinação da umidade ótima; limites de Atterberg para se conhecer os limites de liquidez e plasticidade do solo – o solo foi solicitado por tensões cíclicas, utilizando equipamento triaxial, com o objetivo de melhor compreender seu comportamento mecânico. Estes ensaios foram realizados no laboratório do LESFER/COPPE/UFRJ.

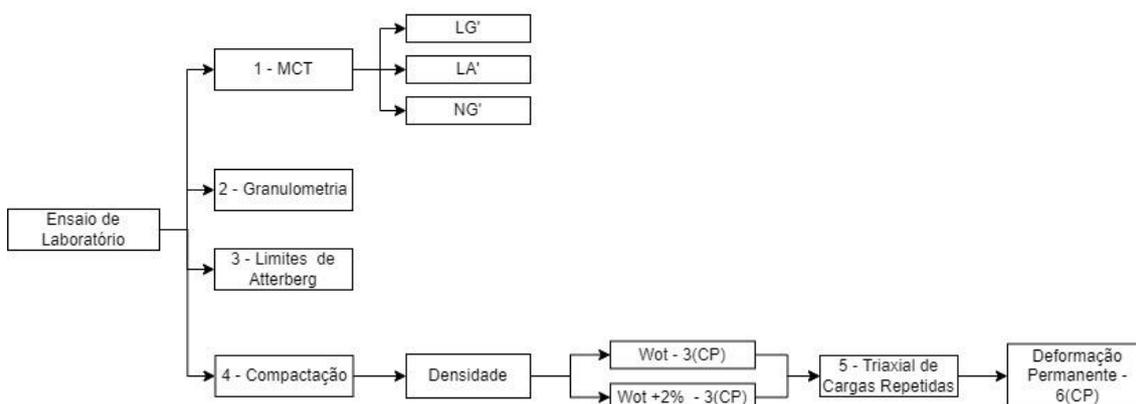


Figura 2: Fluxograma da metodologia

Fonte: Autores (2022)

Na Tabela 3 consta os ensaios realizados e as normas que foram utilizadas para balizar os experimentos.

Tabela 3: Ensaio realizados

Ensaio	Nome da norma	Número da norma
Mini-MCV	Solos compactados em equipamento miniatura – Mini-MCV	DNER-ME 258/94
Granulometria	Análise granulométrica por peneiramento	DNER-ME 080/94
Sedimentação	Análise granulométrica	DNER-ME 051/94
LL	Determinação do Limite de Liquidez	DNER-ME 122/94
LP	Determinação do Limite de Plasticidade	DNER-ME 082/94
Compactação	Compactação utilizando amostras não trabalhadas	DNIT 164/2013 - ME
Umidade	Solos – Determinação do teor de umidade	DNER-ME 213/94

Fonte: Autores (2022)

Triaxial de cargas repetidas

Quando se realiza o ensaio de deformação permanente em corpos de prova distintos, utilizando o mesmo material e as mesmas tensões, ocorre uma dispersão experimental, conforme elucidada Gidel *et al.*, (2001). Essa dispersão é ocasionada porque é impossível se moldar corpos de prova idênticos, por exemplo, com mesmo número de vazios, mesma arrumação dos grãos, em suma, afirmando que todas as variáveis independentes que influem no comportamento mecânico do solo, sejam iguais em todos os CPs.

Para metodologia deste estudo, utilizou-se o procedimento indicado no artigo de Gidel *et al.*, (2001), aplicando 10.000 ciclos intermediários de carregamento multiestágio com 4 pares crescente de tensões p e q, com suas razões constantes. Os ensaios foram realizados na umidade ótima e na umidade ótima +2%, sendo este do tipo drenado, totalizando 40 mil ciclos de aplicação de carga e uma frequência de 2 Hz (com 0,1 s de aplicação de carga e 0,4 s de repouso). Utilizando-se moldes cilíndricos de 100 x 200 mm com amostras passantes na peneira 25,4 mm (1 pol).

As tensões p e q são as tensões médias e desvio. As equações 1 e 2 explicitam essa relação com os *inputs* das tensões utilizadas no equipamento triaxial:

$$p = \frac{(\sigma_1 + 2\sigma_3)}{3} \quad (1)$$

Sendo:

σ_1 = tensão axial
 σ_3 = tensão confinante

$$q = (\sigma_1 - \sigma_3) = \sigma_d \quad (2)$$

Sendo:

$q = \sigma_d$ = tensão desvio

Na Tabela 4 estão relacionadas as tensões utilizadas neste trabalho e suas relações conforme explicitado nas equações 1 e 2:

Tabela 4: Relação entre as tensões de input e p e q

Estágio	σ_1	σ_3	σ_d	σ_1 / σ_3	$p = (\sigma_1 + 2\sigma_3) / 3$ < 300 KPa	$q = (\sigma_1 - \sigma_3)$ < 600 Kpa	$q/p \leq 3$
1	50	20	30	2,5	30	30	1
2	75	30	45	2,5	45	45	1
3	100	40	60	2,5	60	60	1
4	125	50	75	2,5	75	75	1

Fonte: Autores (2022)

O carregamento por etapas consiste em solicitar o mesmo corpo de prova com uma relação constante de q/p, para $p < 300$ kPa e $q < 600$ kPa.

Por serem solos que, possivelmente, possuem baixa capacidade para resistir as solicitações, pois apesar de dois deles serem lateríticos, estes estão próximos da fronteira dos solos não lateríticos, com a presença de finos, optou-se, então, por utilizar uma razão $p/q = 1$ e com menores valores de tensão desvio e confinante, objetivando completar os 4 ciclos de carregamento.

4. Resultados e discussão

Utilizando-se a metodologia explicada no item 3, foram realizados os ensaios mencionados.

Caracterização do solo

Para este trabalho foram selecionados três solos da faixa de domínio da BR-040, sendo estes nomeados conforme o local de extração das amostras deformadas: os km 06, km 26 e km 824, cujos aspectos visuais estão registrados na Figura 3.



Figura 3: Solos selecionados para realização dos ensaios

Fonte: Autores (2022)

Na Figura 4 é apresentado o resultado dos ensaios de granulometria por peneiramento e sedimentação para cada tipo de solo.

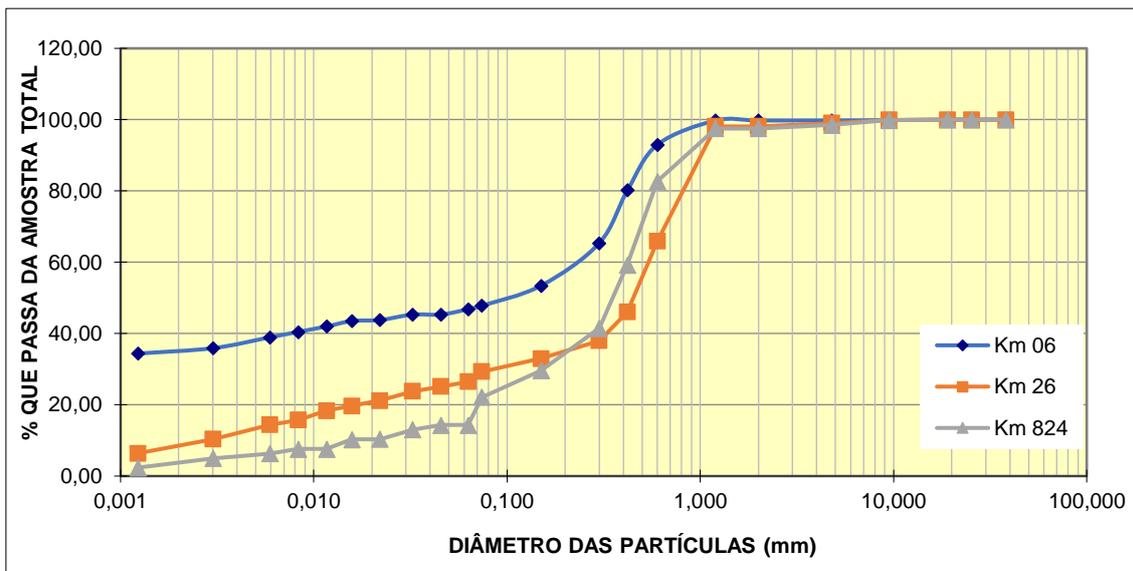


Figura 4: Granulometria dos solos

Fonte: Autores (2022)

Na Figura 5 constam as curvas geradas pelo ensaio de compactação na energia Proctor normal para cada um dos solos deste trabalho.

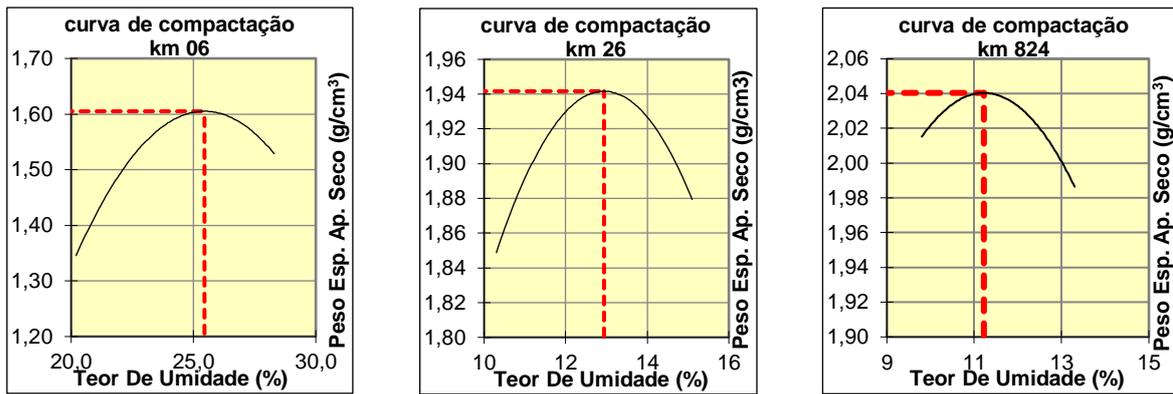


Figura 5: Curvas de compactação

Na Tabela 5 é possível se visualizar os resultados dos ensaios utilizados para classificar os solos utilizados neste artigo.

Tabela 5: Classificação dos solos

Solos	Classificação MCV	W higroscópica	W Ótima	LL	LP	IP	ρ_{Wot} (g/cm ³)	$\rho_{Wot + 2\%}$ (g/cm ³)
Km 06	LA'	12,30%	25,45%	67,04%	47,64%	19,40%	2,066	1,917
Km 26	LG'	0,65%	12,94%	36,99%	33,14%	3,85%	2,160	2,132
Km 824	NG'	6,65%	11,22%	18,06%	17,08%	0,98%	2,046	2,018

Fonte: Autores (2022)

Escolheu-se trabalhar no ramo úmido, pois acima da umidade ótima, partículas de argila ficam oclusas e há uma maior perda de resistência mecânica do solo. Além disso, ocorre a diminuição do intertravamento mecânico das partículas do solo, devido a diminuição do atrito pelo acréscimo de umidade, Braja e Sobhan (2019). Então, torna-se mais interessante compreender e mensurar a perda desta resistência nessas condições.

Mormente, porque durante a execução do projeto em campo, sem os mesmos controles dessas variáveis, o espargimento de água pode levar a uma falha na compactação, que poderá ocorrer no ramo úmido. Portanto, compreender o comportamento do solo nessas condições é importantíssimo para prever possíveis patologias ocorridas no pavimento, como o afundamento de trilha de rodas, defeito no pavimento ocorrido pelos acréscimos de deformação permanente. Em termos de prática construtiva, o controle de vazão e a velocidade de deslocamento do caminhão espargidor de água, por exemplo, podem não ocorrer corretamente, o que justifica sobremaneira o referido estudo e as condições de umidade ensaiadas nesta pesquisa experimental.

Vale se fazer uma observação, o solo LA' do km 06, que apresentou IP e granulometria compatíveis com solos classificados como argilo-arenosos, conforme registrado em Vilar (2021), porém com índice de laterização (e') igual a 1,1221, o que o coloca próximo da fronteira do solo NA' (solos arenosos com finos não lateríticos), sendo um solo transacional.

Desempenho mecânico

Após as análises realizadas, observou-se que devido a uma maior deformação permanente na Wot +2%, as análises a seguir são referentes, principalmente, a esta condição de densidade e umidade.

O solo do Km 06 apresentou nas duas condições aumento no valor do MR. Entre o primeiro e último estágio para wot este aumento foi de 92,48 Mpa enquanto para wot+2 o aumento foi de apenas 21,98 Mpa. Isto pode ser explicado, porque no ramo úmido as partículas de solo na presença de água em excesso vão ficando mais hidratadas, os vazios são preenchidos com a água ocorrendo a diminuição do intertravamento das partículas e o aumento do volume do solo, o que propicia a queda da capacidade de resistência mecânica deste.

Em relação à DP total acumulada, o solo na wot apresentou valor de 0,4% em contrapartida o solo wot+2 apresentou DP total acumulada de 1%, neste caso, para cada estágio de carregamento a DP foi de cerca de 0,3%. Resultados que corroboram com o desempenho no ensaio de MR, pois observou-se que a quantidade de água no solo influenciou no desempenho mecânico do material, tanto em termos de comportamento elástico quanto plástico.

Tabela 6: Def. P(%) do Km 06

Ciclo	Def. P (%) Wot	Def. P (%) Wot+2%	Δ Def. P (%)
ϵ^{10000}	0,044	0,067	0,023
ϵ^{20000}	0,180	0,350	0,170
ϵ^{30000}	0,307	0,677	0,370
ϵ^{40000}	0,428	0,996	0,568

Fonte: Autores (2022)

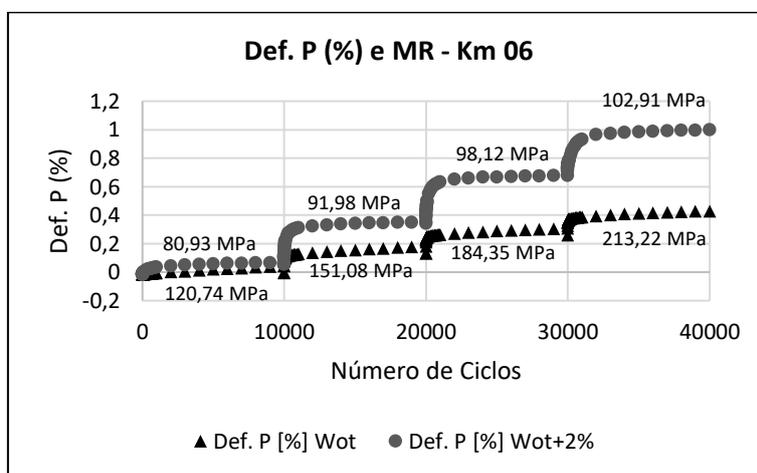


Figura 6: Informações sobre DP e MR (MPa) no carregamento multiestágio do Km 06

Fonte: Autores (2022)

O solo do Km 824 apresentou nas duas condições aumento no valor do MR. Entre o primeiro e último estágio para wot este aumento foi de 80,78 Mpa, enquanto para wot+2 o aumento foi de apenas 39,44 Mpa. Da mesma maneira que ocorreu no solo do Km 06, o aumento do MR no solo com wot+2 foi mais discreto, ou seja, apesar de o aumento das tensões

manter a densidade do solo à níveis que proporcionem o aumento do MR, isto não significa que seja o melhor desempenho do solo.

Em relação à DP total acumulada, o solo na wot apresentou valor de 0,38% em contrapartida o solo wot+2 apresentou DP total acumulada de 0,67%. Novamente se comprova o desempenho quanto ao MR do solo, como explicado anteriormente, mesmo com o aumento discreto do valor de MR a deformação plástica aumenta, quando o solo se encontra na condição úmida.

Tabela 7: Def. P (%) do Km 824

Ciclo	Def. P (%) Wot	Def. P (%) Wot+2%	Δ Def. P (%)
ϵ^{10000}	0,171	0,063	-0,108
ϵ^{20000}	0,254	0,255	0,001
ϵ^{30000}	0,324	0,444	0,120
ϵ^{40000}	0,398	0,622	0,224

Fonte: Autores (2022)

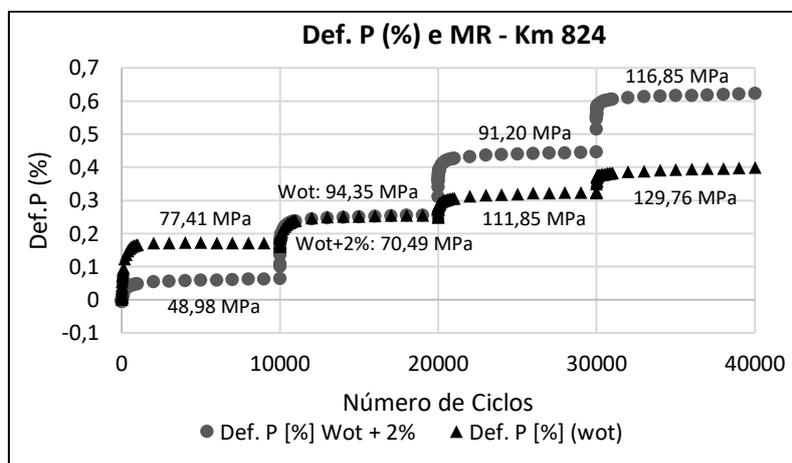


Figura 7: Informações sobre DP e MR (MPa) no carregamento multiestágio do Km 824

Fonte: Autores (2022)

No solo do Km 26 ocorreu o colapso da amostra na condição úmida (wot+2) não sendo possível determinar seu MR além do primeiro estágio (18,36 Mpa). Entre o primeiro e último estágio para wot este aumento foi de 64,05 Mpa. Neste caso, para um solo classificado como LG' o excesso da fração argila na presença de água acima da densidade máxima pode ter influenciado seu comportamento elástico que se fragiliza frente à mudança/aumento de carregamento.

Em relação à DP total acumulada, o solo na wot apresentou valor de 1,4%. Dentre os solos constituintes desta pesquisa, o solo com maior percentual de deformação permanente para a condição mencionada. Além disso, o menor aumento da diferença do valor de MR entre o primeiro e último estágio.

Tabela 8: Def. P(%) do Km 26

Ciclo	Def. P (%) Wot	Def. P (%) Wot+2%	Δ Def. P (%)
ε^{10000}	0,584	1,936	1,352
ε^{20000}	0,955	x*	x*
ε^{30000}	1,222	x*	x*
ε^{40000}	1,484	x*	x*

* Não houve a possibilidade de continuar o ensaio pelo excesso de deformação do CP.

Fonte: Autores (2022)

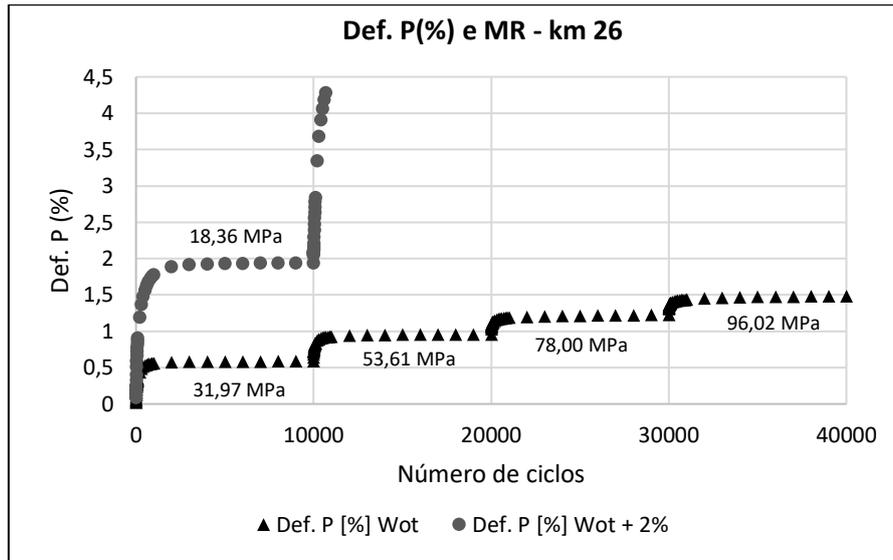


Figura 8: Informações sobre DP e MR (MPa) no carregamento multiestágio do Km 26

Fonte: Autores (2022)

O ensaio multiestágio permitiu acompanhar o desempenho dos solos quanto ao carregamento acumulado em diferentes tensões, procedimento que se aproxima às condições reais de solicitação de tráfego em vias rodoviárias. Além disto, a possibilidade de alterar o valor das tensões permite verificar o comportamento do solo em diferentes condições de carga, para sua aplicação em camadas de pavimento distintas.

Na Figura 9 pode ser observado o desempenho dos três solos na Wot. Para um acréscimo de 250% nas tensões axial e confinante, entre o primeiro e último estágio, a DP do Km 06 variou 872,7% considerando o mesmo intervalo, atingindo 0,428% de DP no último estágio. Seguindo na mesma lógica, o solo do km 824 teve um aumento de 132,7%, alcançando 0,398% e por fim, o solo do Km 26 teve uma variação de 154,1%, chegando a 1,484% de DP.

Isto significa que o material do km 06, apresentou acentuada variação de DP, entre os estágios pois houve menor deformação no primeiro ciclo de carregamento. O que pode indicar que seu desempenho mecânico é menos sensível à baixas tensões solicitantes.

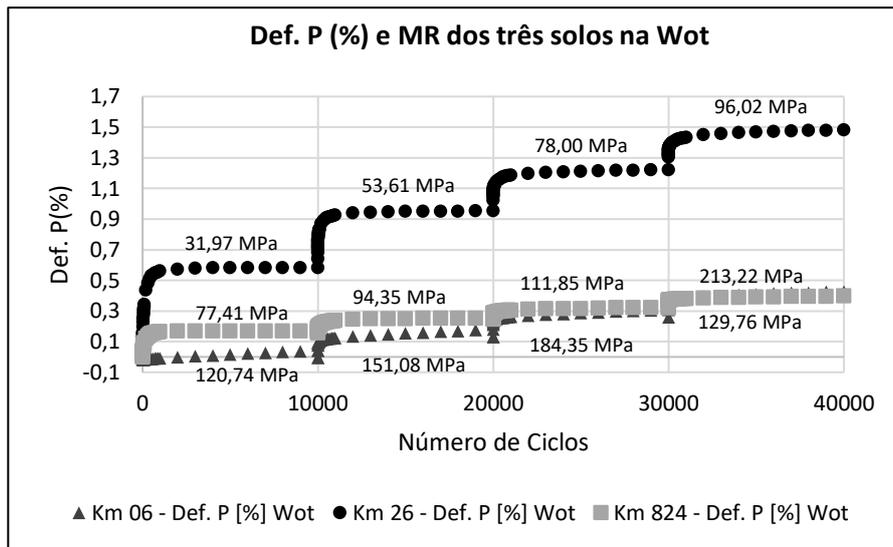


Figura 9: DP e MR (MPa) dos três solos na Wot

Fonte: Autores (2022)

A Figura 10 exibe, similarmente, o desempenho comparativo dos três solos, na Wot + 2%. Observando o primeiro estágio de carregamento, verifica-se que o solo do km 26 é sensível a umidade, devido ao aumento de deformações em relação às demais amostras. Considerando o acréscimo de tensões axial e confinante de 250%, as deformações não recuperáveis do km 06 aumentaram em 1486,6%, atingindo uma DP de 0,996%. Já no km 824 a DP aumentou em 238,6%, alcançando 0,622% de deformação plástica.

Aqui, nessas condições de umidade, no primeiro estágio de carregamento, o solo do km 06 e 824 apresentaram uma DP de 0,067% e 0,063% respectivamente. Este comportamento mecânico, foi similar ao ocorrido no Km 06 na umidade ótima.

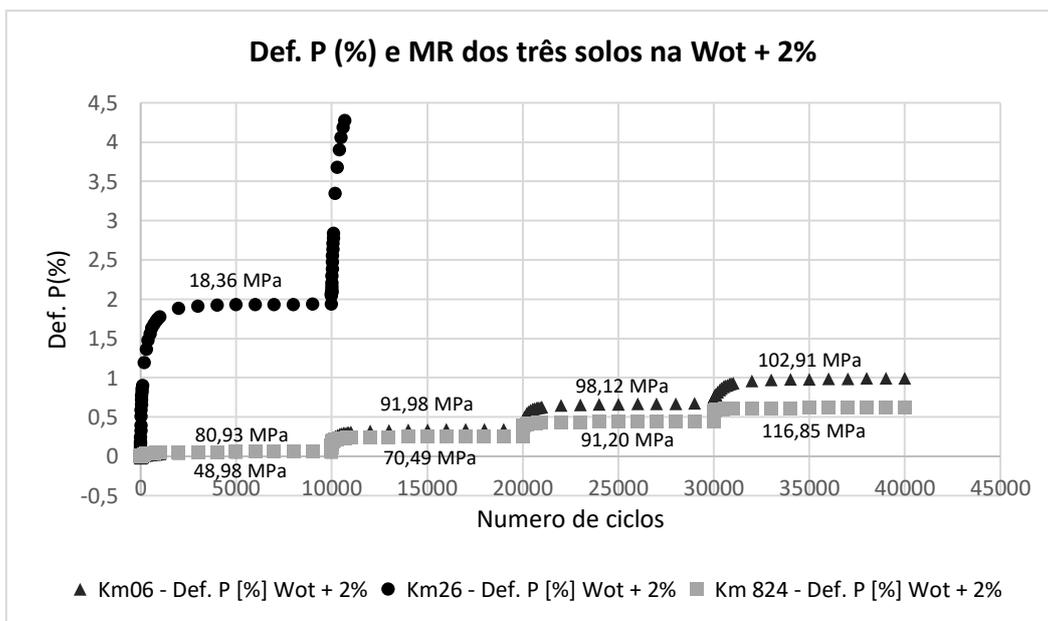


Figura 10: DP e MR (MPa) dos três solos na Wot + 2%

Fonte: Autores (2022)

O aumento do par de tensões não é percentualmente constante. Entre o segundo e o primeiro estágio as tensões axial e confinante tiveram um acréscimo de 150%. Já entre o terceiro e o segundo foi de 133,3% e, por fim, entre o quarto e o penúltimo estágio, de 125%.

Apesar de ocorrer um aumento não linear das tensões, nem sempre a DP aumentou ou diminuiu para as mesmas condições de carregamento entre os solos e condições de umidade ensaiados. O solo do Km 26, por exemplo, mesmo apresentando os maiores valores absolutos de deformação, em cada estágio de carregamento, a sua DP diminuiu na umidade ótima para cada estágio (0,584%, 0,371%, 0,267% e 0,262%). O mesmo padrão de comportamento não aconteceu nos demais solos, ressaltando-se o solo do Km 06, na Wot + 2%, que aumentou a DP em todos os estágios (0,067%, 0,350%, 0,677%, 0,996%).

Sopesando os resultados obtidos neste experimento e no estudo realizado por Ribeiro *et al.*, (2014), fica evidente que é possível se obter as mesmas conclusões em menos tempo e com menos recursos ao se comparar com o ensaio monoestágio, sem o problema da dispersão experimental, já que no carregamento multiestágio o ensaio é realizado utilizando-se um único CP para diferentes pares de tensão.

Considerando-se os ensaios realizados por Khasawneh (2020) e os resultados alcançados por essa pesquisa, observa-se que a umidade influi consideravelmente no incremento de DP desses solos, seja este um solo tropical ou temperado. Levando em conta a execução de uma compactação de solo em campo, onde o controle da umidade é mais tênue, um pequeno incremento de 2%, pode levar o solo a trabalhar no ramo úmido, ocasionando o surgimento precoce de patologias que influenciarão na diminuição da vida útil do pavimento.

5. Conclusão

Este estudo buscou avaliar a possibilidade de se utilizar o carregamento multiestágio em laboratório, otimizando tempo e recursos para tirar o melhor proveito dos ensaios. Esta técnica é uma boa opção para estudar o comportamento mecânico dos solos, comparando o desempenho desses materiais entre si e sua relação com as tensões aplicadas.

Para todos os solos ensaiados, foi estabelecido uma relação entre σ_d/σ_3 de 1,5. Portanto, a cada estágio, a DP e o MR aumentaram com o crescimento da σ_d e σ_3 , sendo o solo do Km 26 (LG') o mais sensível a variação das tensões e da umidade. A variação de umidade influenciou na diminuição do MR em todos os solos, considerando os mesmos pares de tensão.

O solo do Km 824 (NG'), apesar de ser o único solo não laterítico, foi o que obteve os menores valores de DP, tanto na umidade ótima quanto na umidade ótima +2%. Fica evidente que outras variáveis influem no comportamento mecânico dos solos, tais como: sua mineralogia, disposição dos grãos, composição química das partículas adstritas, sua superfície específica, sua interação com a umidade e outras mais. Sento importantíssimo sempre avaliar o comportamento mecânico dos materiais em laboratório, considerando todas as condições de contorno, antes de utilizá-los na pavimentação, garantindo um melhor aproveitamento desses materiais.

Com o carregamento multiestágio, outras configurações de carregamento podem ser exploradas, buscando as condições limítrofes de resistência do material às solicitações cíclicas. Para os solos contidos nas camadas do pavimento, uma mesma amostra é solicitada inúmeras vezes por cargas axiais cíclicas, variando de intensidade. O que significa que o ensaio multiestágio, se aproxima do ocorrido em campo, pois uma mesma amostra está sendo solicitada com cargas variadas.

Outra informação importante deste experimento, é que para se analisar o comportamento mecânico dos solos, torna-se mister ensaiá-los em laboratório. Não existe um comportamento padrão, pré-estabelecido, 100% confiável, para se estimar a resistência de um solo. Assim sendo, este estudo contribui sobremaneira para o estado da arte da compreensão do comportamento mecânico dos solos de forma mais expedita.

Conforme as tensões desvio e confinante aumentam, o solo pode diminuir ou aumentar a sua DP. No caso de mudança de comportamento, aquele par de tensão torna-se de interesse e deve ser analisado mais profundamente. Isso ocorre porque pode existir uma maior influência da tensão confinante ou axial, conforme o tipo de solo. O que poderia indicar, por exemplo, que este não entraria em *shakedown*.

Exemplificando a contribuição do ensaio multiestágio, existe a possibilidade de se analisar, no mesmo corpo de prova, o acréscimo das tensões axiais, conforme acontece com as camadas do pavimento em campo. Digamos que ocorra numa rodovia o aumento imprevisto do número N, ocasionado pelo desvio inesperado de tráfego de uma rodovia próxima. O ensaio multiestágio permite compreender o desempenho do solo frente ao aumento dessas solicitações.

Para substituição da DP com carregamento monoestágio para o multiestágio, é necessário encontrar uma relação mais robusta entre a quantidade de ciclos do carregamento, os pares de tensão utilizados e o critério de parada. Os modelos de regressão não linear podem ser ferramentas interessantes para se ajustar melhor as duas técnicas.

Mais pesquisas precisam ser desenvolvidas e fomentadas para se construir uma melhor compreensão da relação entre os ciclos de carregamento, as tensões confinantes e desvio do ensaio multiestágio e o comportamento mecânico dos solos, explorando mais possibilidades e configurações de *inputs*.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Coppe e a Capes pelo apoio e fomento continuado à pesquisa.

Referências

- Arulrajah, A., Ghorbani, B., Narsilio, G., Horpibulsuk, S., e Leong, M. (2021) Thermal performance of geothermal pavements constructed with demolition wastes. *Geomechanics for Energy and the Environment*, 28, 100253. doi:10.1016/j.gete.2021.100253
- Bernucci, L. B. (2022) Pavimentação Asfáltica: formação básica para engenheiros. Editora: ABEDA. Rio de Janeiro, RJ
- Bilodeau, J. P., Doré, G., e Depatie, J. (2013) Mitigation of permanent deformation in base layer containing recycled asphalt aggregates. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 40(2), 181–187. doi:10.1139/cjce-2012-0395
- Bilodeau, J. P., e Perez Gonzalez, E. L. (2021) Permanent deformation analysis of base layers with recycled material: Effect of density and stress level. *Transportation Geotechnics*, 27(November 2020), 100466. doi:10.1016/j.trgeo.2020.100466
- Cabral, W. S., Barroso, S. H. A., e Torquato, S. A. (2020) Study of the Permanent Deformation of Soil Used in Flexible Pavement Design. *Advances in Civil Engineering*, 2020. doi:10.1155/2020/4274926

- CEN - European Committee for Standardization. (2004) EN 13286-7: Unbound and Hydraulically Bound Mixtures. Part 7: Cyclic Load Triaxial Tests for Unbound Mixtures. *European Standard, EN*. Brussels, Belgium.
- Das, B.M, Sobhan, K. (2019) Fundamentos de Engenharia Geotécnica. Tradução 9ª edição norte americana. Editora Cengage. São Paulo, SP.
- DNER-ME 051/94. (1994) Solos - Análise granulométrica. Departamento Nacional de Estrada de Rodagem.
- DNER-ME 080/94. (1994) Solos - análise granulométrica por peneiramento. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem.
- DNER-ME 082/94. (1994) Solos - determinação do limite de plasticidade. Departamento Nacional de Estrada de Rodagem.
- DNER-ME 122/94. (1994) Solos - determinação do limite de liquidez - método de referência e método expedito. Departamento Nacional de Estrada de Rodagem.
- DNER-ME 213/94. (1994) Solos - determinação do teor de umidade. Departamento Nacional de Estrada de Rodagem.
- DNER-ME 258/94. (1994) Solos compactados em equipamento miniatura - Mini-MCV. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem.
- DNIT 164/2013 - ME. (2013) Solos – Compactação utilizando amostras não trabalhadas – Método de Ensaio. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes.
- DNIT 179/2018-IE. (2018) Pavimentação-Solos-Determinação da deformação permanente-Instrução de ensaio. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes.
- Gidel, G., Hornych, P., Chauvin, J. J., Breyse, D., e Denis, A. (2001) Nouvelle approche pour l'étude des déformations permanentes des graves non traitées à l'appareil triaxial à chargements répétés. *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, (233).
- Khasawneh, M. A. (2020) Permanent deformation behavior of cohesive subgrade soils classified as A-4a and A-6a. *Materials Today: Proceedings*, 33, 1762–1768. doi:10.1016/j.matpr.2020.04.875
- Ribeiro, M. M. P., Silva, M. F. da, Furlan, A. P., e Fabbri, G. T. P. (2014) Estudo do efeito da relação de tensões e da variação de umidade na deformação permanente de um solo de subleito. *In: XXVIII Congresso Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes*, 15(2), 1–23.