

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2024/672

Comportamento Mecânico dos Materiais Utilizados no Pavimento do Aeroporto de Dourados/MS

Camila Antunes Martins

Aluna de Doutorado, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, Brasil, camilaantunes@ime.eb.br

Luisa Carla de Alencar Menezes

Professora, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, Brasil, luisacarlaam@hotmail.com

Antonio Carlos Rodrigues Guimarães

Professor, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, Brasil, guimaraes@ime.eb.br

Filipe Almeida Corrêa do Nascimento

Professor, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, Brasil, filipe.nascimento@ime.eb.br

Ana Carolina Duarte Bona

Aluna de Mestrado, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, Brasil, anabonna@ime.eb.br

RESUMO: Os aeroportos desempenham um papel fundamental no fortalecimento da economia de um país, sendo essenciais para o comércio internacional, turismo e investimentos. O pavimento aeroportuário deve apresentar desempenho estrutural adequado às demandas operacionais, assegurando uma superfície capaz de suportar as atividades aeroportuárias. A deformação permanente, um defeito comum em pavimentos, está diretamente relacionada ao número de carregamentos aplicados sob o pavimento e pode apresentar um acomodamento após um determinado número de ciclos – descrito pela teoria do *shakedown*. Neste contexto, em contribuição ao estudo da teoria supracitada, o presente trabalho objetiva avaliar a ocorrência de *shakedown* em um solo fino laterítico. Para tanto, foi analisada uma amostra de solo coletada do subleito do pavimento do aeroporto regional de Dourados/MS, dando enfoque à deformação permanente e à acomodação das deformações. A partir dos ensaios realizados no equipamento triaxial de cargas repetidas foi possível a elaboração das curvas de deformação permanente, o que possibilitou a verificação de tendência de ocorrência de *shakedown* no material.

PALAVRAS-CHAVE: Pavimento Aeroportuário, *Shakedown*, Deformação Permanente, Solo Fino Laterítico.

ABSTRACT: Airports play a fundamental role in strengthening a country's economy, being essential for international trade, tourism, and investments. Airport pavement must exhibit structural performance adequate to operational demands, ensuring a surface capable of supporting airport activities. Permanent deformation, a common defect in pavements, is directly related to the number of load applications on the pavement and may exhibit accommodation after a certain number of cycles - described by the shakedown theory. In this context, contributing to the study of the aforementioned theory, this work aims to evaluate the occurrence of shakedown in a lateritic fine soil. To do so, a soil sample collected from the subgrade of the Dourados/MS regional airport pavement was analyzed, focusing on permanent deformation and deformation accommodation. Through tests conducted on the repeated load triaxial equipment, it was possible to develop permanent deformation curves, enabling the verification of the trend of shakedown occurrence in the material.

KEYWORDS: Airport Pavement, Shakedown, Permanent Deformation, Lateritic Fine Soil.

1 INTRODUÇÃO

Os aeroportos desempenham um papel significativo no fortalecimento da economia nacional, sendo essenciais para fomentar o comércio internacional, turismo e investimentos. De acordo com a Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC), o setor aéreo brasileiro registrou 112 milhões de passageiros em 2023,

representando um aumento de aproximadamente 15% em comparação com o ano anterior, 2022 (ANAC, 2023).

A administração aeroportuária exige investimentos substanciais em infraestrutura, especialmente na execução e conservação dos pavimentos, pois sua qualidade e manutenção adequada são cruciais para prevenir potenciais acidentes aéreos decorrentes de irregularidades no pavimento. No entanto, é comum que os recursos financeiros necessários para essa conservação sejam insuficientes em comparação com as demandas identificadas (SHAHIN, 2005).

Diante dessa realidade, a condição dos pavimentos em que as aeronaves operam é fundamental para garantir a segurança e o conforto durante as viagens aéreas. Portanto, torna-se evidente a necessidade de investimentos e pesquisas voltados à melhoria da qualidade dos pavimentos nos aeroportos brasileiros. Esses esforços são essenciais para o progresso do país, pois podem resultar na construção de pavimentos mais duráveis e com desempenho otimizado, atendendo às exigências e contribuindo para um sistema aeroportuário mais eficiente e competitivo.

Conforme destacado por Durán (2015), é imperativo que a superfície dos pavimentos aeroportuários permaneça livre de irregularidades que possam comprometer a segurança das operações das aeronaves, causar danos ou aumentar a fadiga da estrutura do pavimento. O aumento da carga sobre o pavimento devido ao tráfego aéreo, impulsionado pelo crescimento da frota e pela ampliação da capacidade das aeronaves, juntamente com deficiências na escolha de materiais e no dimensionamento das camadas do pavimento, favorece o surgimento de deformações permanentes, como afundamentos nas trilhas de roda, deformações plásticas no revestimento e depressões.

A deformação permanente, após um determinado número de ciclos de carregamento, pode apresentar acomodamento, um fenômeno descrito pela teoria do shakedown. Nesse contexto, este trabalho tem como objetivo avaliar a ocorrência de shakedown do material constituinte do subleito do pavimento do Aeroporto Regional de Dourados/MS, bem como seu comportamento estrutural em termos de deformação permanente.

2 PAVIMENTO AEROPORTUÁRIO

Pavimento, conforme descrito por Bernucci *et al.* (2008), é uma estrutura composta por várias camadas sobre a superfície preparada do solo, projetada para suportar as cargas do tráfego e as condições climáticas, de forma eficiente. De acordo com as diretrizes da NBR 7.207/82, o pavimento é uma construção que vem após a etapa de preparação do solo, e tem como finalidade principal resistir e distribuir as cargas verticais geradas pelo tráfego, além de melhorar as condições de rolamento para garantir segurança e conforto, e suportar as cargas horizontais, proporcionando uma superfície durável para a circulação.

No contexto aeroportuário, o pavimento assume uma importância ainda maior devido às exigências específicas do tráfego de aeronaves. Os pavimentos de aeroportos devem ser projetados para suportar cargas extremamente pesadas, como as geradas por aeronaves de grande porte durante a decolagem e o pouso. Além disso, precisam garantir condições de segurança para as operações aeroportuárias, como resistência ao deslizamento e drenagem eficiente para evitar a formação de poças de água que possam comprometer a aderência dos pneus das aeronaves. A complexidade do pavimento aeroportuário envolve considerações técnicas detalhadas, incluindo a seleção de materiais adequados, dimensionamento estrutural preciso e manutenção regular para garantir a integridade da superfície de rolamento ao longo do tempo.

Ao longo do tempo, conforme observado por Branco *et al.* (2006), as propriedades geométricas do pavimento sofrem alterações devido ao uso contínuo e às influências climáticas. Essas mudanças podem levar ao surgimento de defeitos na superfície, como o ATR (Afundamento nas Trilhas de Roda), associado à deformação permanente do pavimento, que é irreversível e resulta de diversas causas, como baixa densidade ou estabilidade das misturas asfálticas, ruptura por cisalhamento de materiais asfálticos, compactação inadequada das camadas ou materiais com baixa resistência nas camadas inferiores (FERNANDES JÚNIOR, 1994).

O estudo do ATR é um assunto de grande importância e, por ser uma das principais patologias dos pavimentos, diversos autores pesquisam o afundamento por trilha de roda. Cabe aqui ressaltar as pesquisas de Moura (2010), Negrão (2012) e Prediger (2016). Negrão (2012) propôs uma metodologia para calibração de curvas de desempenho para prever a evolução dos afundamentos por trilha de roda. Prediger (2016) desenvolveu modelos de previsão de desempenho para um trecho de uma rodovia com pavimentação asfáltica

no estado do Rio Grande do Sul e os modelos foram desenvolvidos para o ATR e para irregularidade longitudinal (IRI).

De acordo com Durán (2015) a deformação permanente, junto com as trincas por fadiga, é considerada o principal defeito estrutural dos pavimentos. Bernucci *et al.* (2008) considera que a deformação permanente emerge como um problema recorrente nos pavimentos flexíveis, sendo associada não apenas ao revestimento, mas também às camadas subjacentes. Esta condição tende a manifestar-se especialmente em pavimentos deficientemente compactados (densificação) ou com estabilidade reduzida (movimentação plástica), decorrente de problemas relacionados à drenagem e ao processo construtivo.

Para compreender a influência do estado de tensões nas deformações permanentes, é comum recorrer ao ensaio no equipamento triaxial de cargas repetidas. Dessa forma, o ensaio triaxial de cargas repetidas permite uma análise mais abrangente do comportamento estrutural dos pavimentos. Além disso, esses ensaios desempenham um papel fundamental na previsão das respostas do pavimento frente às solicitações impostas pelo tráfego.

Um solo exposto a um carregamento cíclico pode ser levado à ruptura ou a uma tendência de estabilização da deformação permanente. Quando tal estabilização ocorre após a aplicação de um determinado número de repetições de carga (geralmente superior a 100.000 ciclos) observa-se o seu acomodamento – que pode ser descrito pela teoria do *shakedown* (GUIMARÃES, 2001).

De maneira geral, de acordo com Werkmeister (2003), quanto a resposta do material sob às solicitações de carregamentos repetidos, destaca-se, conceitualmente, quatro categorias, sendo elas: (i) comportamento totalmente elástico; (ii) “*Shakedown*” elástico; (iii) “*Shakedown*” plástico; e (iv) colapso incremental, conforme pode ser observado na Figura 3.

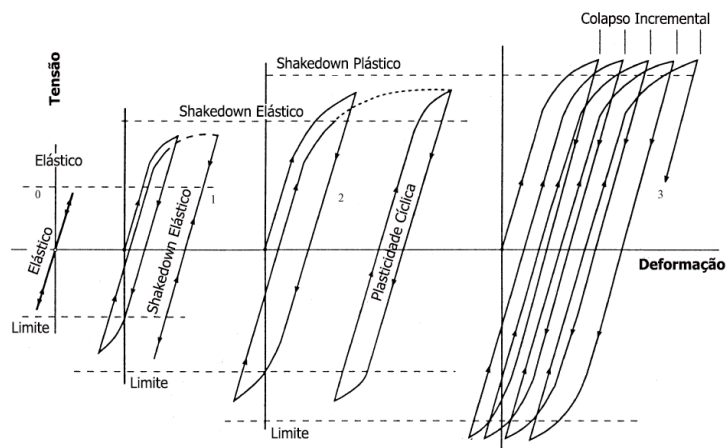


Figura 1. Categorias de comportamento de materiais submetidos a carregamentos cíclicos (WERKMEISTER, 2003).

Segundo Guimarães (2009), nos materiais de pavimentação a condição comumente observada é a de *shakedown* elástico. Nesta condição, o corpo-de-prova ou a estrutura do pavimento acumula deformações permanentes até um determinado número de aplicações de carga, a partir do qual tal deformação passa a ser constante – o material assume um comportamento totalmente elástico – até dar início ao *shakedown* plástico, que antecede a ruptura do material.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para o presente estudo foi analisando um solo proveniente do subleito do Aeroporto Regional de Dourados, localizado no município de Dourados/MS. Durante a coleta pode-se observar o aspecto argiloso e fino do material de acordo com o exposto na Figura 2.



Figura 2. Solo laterítico em seu local de origem no aeroporto de Dourados/MS.
 Fonte: Os autores.

Após a coleta, procedeu-se à realização de ensaios de caracterização no Laboratório de Solos do Instituto Militar de Engenharia, situado no Rio de Janeiro/RJ. Foram conduzidos os seguintes ensaios: análise granulométrica (DNER-ME 051/94), classificação MCT (DNER-ME 256/94 e DNER-ME 258/94), determinação da densidade real (DNER-ME 084/95), e dos limites de liquidez e plasticidade (DNER-ME 122/94 e DNER-ME 082/94, respectivamente). Os resultados desses ensaios estão resumidos na Tabela 1.

Tabela 1. Caracterização do solo estudado.

Limite de Liquidez (%)	Limite de Plasticidade (%)	Densidade Real (g/cm ³)	Umidade Ótima (%)	MEAS (g/cm ³)	Classificação MCT
51,30	31,00	2,77	27,40	1,60	LG'

No que diz respeito à granulometria do solo estudado, observa-se presença majoritária de argila sendo está de 69%, 31% de silte e 1% para areia fina (Figura 3).

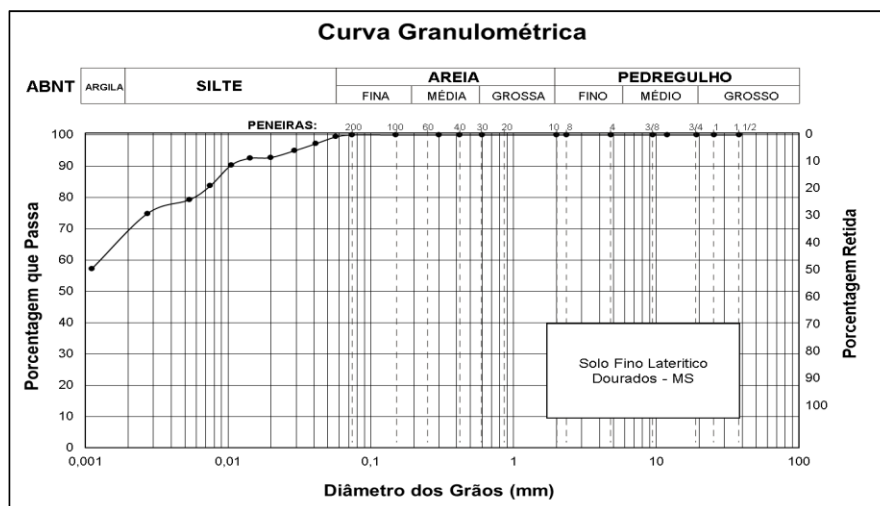


Figura 3. Granulometria por peneiramento e sedimentação do solo.

Após realizada a caracterização granulométrica do material, procedeu-se a utilização do equipamento triaxial de cargas repetidas para a realização dos ensaios de Módulo de Resiliência (MR) e Deformação Permanente. O ensaio para determinação do MR e Deformação permanente foram realizados em concordância com as normas DNIT 134/2018 – ME e DNIT 179/2018 – IE, respectivamente. Em ambos os ensaios foram adotados corpos de prova com 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura e estes foram compactados na energia Proctor Modificada.

No que concerne os ensaios de deformação permanente, estes foram realizados com base no emprego dos pares de tensões apresentados na Tabela 2 – cujos valores são sugeridos pela Norma DNIT 179/2018 – IE,

com 100 mil ciclos, uma vez que simulam de maneira satisfatória às solicitações previstas em campo nas camadas de pavimentos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

No que diz respeito à deformação permanente, os resultados do ensaio triaxial dinâmico indicam níveis elevados de deformação. Como evidenciado no gráfico da Figura 4, um conjunto inicial de resultados demonstrou uma deformação permanente total de 2,0 mm, enquanto nos demais grupos foram observadas deformações mais elevadas.

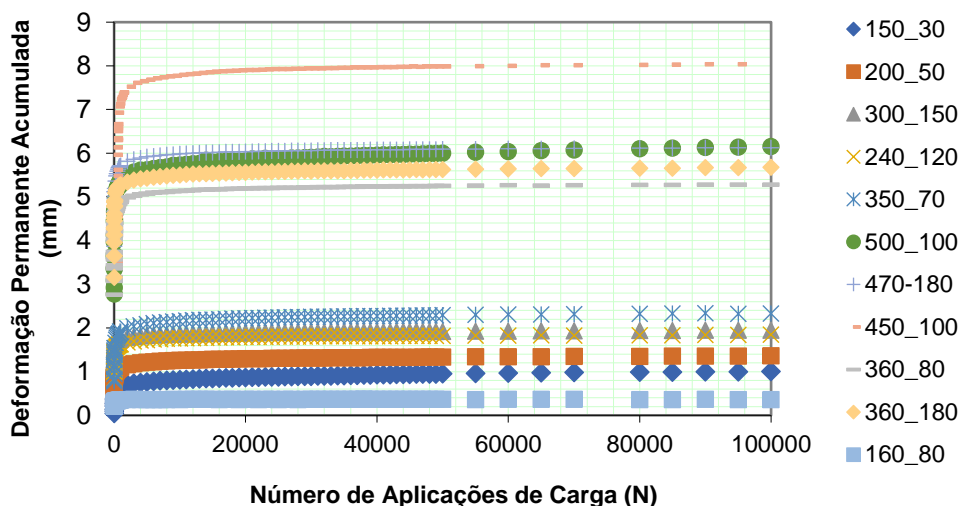


Figura 4. Resultados Deformação Permanente e pesquisa de ocorrência de *shakedown*.

No que diz respeito a constatação da ocorrência de *shakedown*, procedeu-se à determinação do seus limites, conforme preconizado pela Norma Britânica BS EM 13286-7/2004. A referida norma sugere que o limite de pode ser determinado por meio da Equação 1:

$$\varepsilon_p5000 - \varepsilon_p3000 < 0,045.10^{-3} \quad (1)$$

Onde: ε_p5000 é a deformação permanente acumulada após 5000 ciclos e; e ε_p3000 é a deformação permanente acumulada após 3000 ciclos.

Desse modo, a partir dos dados fornecidos pelos ensaios de deformação permanente, pode-se construir a Tabela 2, que identifica em quais ensaios a ocorrência do *shakedown* pode ser constatada de acordo com a norma BS EN 13286-7/2004.

Tabela 2. Relação de Estado de Tensões Utilizados para Avaliação da Deformação Permanente.

Ensaio	σ_3	σ_d	ε_p Total (mm)	ε_p5000 (mm)	ε_p3000 (mm)	$\varepsilon_p5000 - \varepsilon_p3000$ (mm)	Shakedown
1	30	150	1	0,729	0,764	0,035	SIM
2	50	200	1,36	1,182	1	0,033	SIM
3	150	300	1,95	1,805	1,829	0,024	SIM
4	120	240	1,84	1,693	1,724	0,031	SIM
5	70	350	2,33	2,034	2,086	0,052	NÃO
6	100	500	6,15	5,568	5,619	0,051	NÃO
7	180	470	6,12	5,861	5,919	0,058	NÃO
8	100	450	8,04	7,61	7,684	0,074	NÃO

Ensaio	σ_3	σ_d	ϵ_p Total (mm)	ϵ_p 5000 (mm)	ϵ_p 3000 (mm)	ϵ_p 5000 - ϵ_p 3000 (mm)	Shakedown
9	80	360	5,28	5,029	5,074	0,045	SIM
10	180	360	5,68	5,382	5,43	0,048	NÃO
11	80	160	0,36	0,364	0,364	0	SIM

Ao analisar a deformação permanente total em cada ensaio, observamos que esta depende tanto da magnitude da tensão desviatória (σ_d) quanto da razão de tensões σ_1/σ_3 . Em geral, tensões desviatórias mais altas (como no ensaio 6) produziram maiores deformações permanentes, porém, em outros casos, uma razão de tensões elevada também resultou em deformações permanentes significativas, como visto no ensaio 9.

No entanto, é evidente a tendência de acomodação dessas deformações em todos os ensaios realizados, uma vez que uma tangente à curva - qualquer curva - é praticamente paralela ao eixo horizontal. Isso significa que a taxa de acréscimo da deformação permanente é quase nula, já que o coeficiente angular da tangente é praticamente zero.

De acordo com Werkmeister (2001), o primeiro grupo de resultados corresponde ao comportamento tipo A, ou seja, quando ocorre acomodamento das deformações permanentes – *shakedown*. Todavia, no caso do segundo grupo, não fica caracterizado o comportamento do tipo B, que corresponde ao escoamento plástico, visto que a taxa de acréscimo da deformação permanente tende a zero. Nestes casos, Guimarães (2009) classificou como AB. Lima (2018) também identificou este padrão de comportamento para o caso de ensaios em solos finos, ou com significativa matriz de finos. Porém, convém destacar que Werkmeister (2001) estudou britas e materiais pedregulhosos em geral, não solos de matriz fina.

Além disso, nota-se que o par de tensões (100 - 450 kPa) resultou nas maiores deformações. Portanto, ao considerarmos um pavimento composto por esse material e sujeito a essas tensões específicas, sua camada seria determinante para o ATR crítico desse pavimento. Todavia, conforme supracitado, a forma das curvas da Figura 4 indicam claramente uma tendência de acomodamento das deformações permanentes, o que é vantajoso para a integridade do pavimento.

Quanto à pesquisa de ocorrência de *shakedown*, o gráfico da Figura 5 apresentam os resultados dos ensaios de deformação permanente com base no modelo de Dawson e Wellner, cotado por Werkmeister (2001).

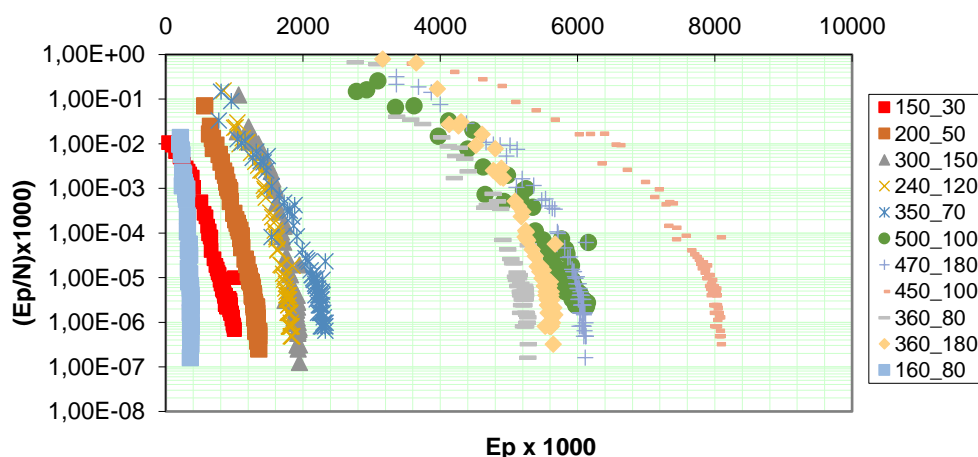


Figura 5. Pesquisa de ocorrência de *shakedown* – Modelo de Dawson e Wellner.

É possível identificar que há, de fato, os padrões de comportamento A e AB. Todos os ensaios atingiram a taxa de acréscimo da deformação permanente na ordem de 10^{-7} , fato que caracteriza acréscimo praticamente nulo.

Ainda no contexto da ocorrência de *shakedown* no solo em análise, a Figura 6 fornece uma comparação entre a curva representativa do limite de *shakedown* desse solo, uma brita graduada de granodiorito investigada por Werkmeister (2001), e uma laterita proveniente de Porto Velho/RO, estudada por Guimarães (2009).

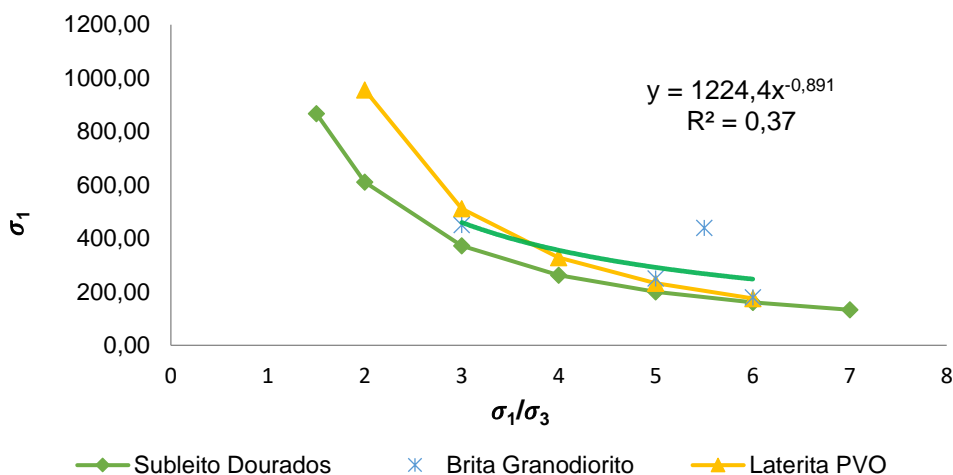


Figura 6. Limite de *shakedown* para o material de subleito estudado em comparação com outros materiais.

Observa-se que o limite de *shakedown* para o solo em análise é ligeiramente superior ao obtido para a brita graduada investigada por Werkmeister (2001) e excede a laterita de Porto Velho, conforme estudada por Guimarães (2009), especialmente para razões de tensões superiores a 3,5.

Entretanto, é importante ressaltar que uma comparação direta entre os limites de *shakedown* pode não ser totalmente válida. Para tal comparação, é essencial que todos os ensaios descartem o mesmo número de deformações iniciais. No estudo de Werkmeister (2001), foram descartadas as primeiras 500 deformações, enquanto em Guimarães (2009) apenas a primeira deformação foi desconsiderada. No presente trabalho, seguindo as diretrizes da norma brasileira, foram eliminados os primeiros 50 ciclos de aplicação de cargas nos ensaios de deformação permanente.

Considerando esses aspectos, é possível que o limite de *shakedown* da laterita de Porto Velho seja maior do que o apresentado na Figura 3 e superior ao do subleito Dourados – solo estudado. Contudo, os resultados obtidos para o solo são significativos, dado que se trata de um solo de subleito que provavelmente será submetido a tensões suficientes para entrar em *shakedown*.

Além disso, mesmo sob tensões mais elevadas, o material tende a se acomodar, como evidenciado nas Figuras 4 e 5. Apesar de acumular deformações permanentes significativas na fase inicial de operação, que pode ocorrer durante o processo construtivo, há a possibilidade de recuperação do nível de greide antes da operação final do pavimento do aeroporto.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O solo proveniente do subleito do pavimento do Aeroporto Regional de Dourados, classificado como um solo fino laterítico argiloso (LG') segundo a classificação MCT, apresentou características de comportamento mecânico, em termos de deformação permanente, que indicam uma tendência à ocorrência de *shakedown*.

A análise das curvas de deformação permanente e da pesquisa de *shakedown*, elaboradas a partir dos resultados dos ensaios realizados no equipamento triaxial de cargas repetidas, revelou a ocorrência de acomodamento das deformações permanentes (*shakedown*) quando submetido a uma taxa de acréscimo de deformação permanente por ciclo de carga na ordem de 10^{-7} .

Os valores obtidos para o limite de *shakedown* do solo analisado (LG') são semelhantes aos obtidos para britas graduadas de granodiorito e cascalho laterítico, indicando que este material possui excelentes propriedades mecânicas para uso na pavimentação.

AGRADECIMENTOS

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) pelo suporte fornecido para a realização do presente trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agência Nacional de Aviação Civil – ANAC (2023). Anuário do Transporte Aéreo. 153 p. Brasília. Disponível em: <https://www.gov.br/anac/pt-br/assuntos/dados-e-estatisticas/mercado-do-transporte-aereo/panorama-do-mercado/anuario-transporte-aereo>. Estudo Transporte e Economia – Transporte Aéreo de Passageiros.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT (1982). NBR 7207: Terminologia e classificação de pavimentação. Rio de Janeiro.
- Bernucci, L. B.; Motta, L. M. G. da.; Ceratti, J. A. P.; Soares, J. B (2008). Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros. 1. ed. Rio de Janeiro: Petrobrás: ABEDA, 504 p.
- Branco, F.; Pereira, P.; Santos, L. P (2006). Pavimentos Rodoviários. 1. ed. Coimbra: Editora Almedina. 388p.
- British Standard European (2004). BS EN 13286-7: Unbound and hydraulically bound mixtures - part 7: Cyclic load triaxial test for unbound mixtures. United Kingdom.
- Departamento Nacional de Estradas de Rodagem – DNER (1994). DNER-ME 051: Solos – análise granulométrica. Rio de Janeiro.
- Departamento Nacional de Estradas de Rodagem – DNER (1994). DNER-ME 082: Solos – determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro.
- Departamento Nacional de Estradas de Rodagem – DNER (1995). DNER-ME 084: Agregado miúdo – determinação da densidade real. Rio de Janeiro.
- Departamento Nacional de Estradas de Rodagem – DNER (1994). DNER-ME 122: Solos – determinação do limite de liquidez – método de referência. Rio de Janeiro.
- Departamento Nacional de Estradas de Rodagem – DNER (1994). DNER-ME 256: Solos compactados com equipamento miniatura – determinação da perda de massa por imersão. Rio de Janeiro.
- Departamento Nacional de Estradas de Rodagem – DNER (1994). DNER-ME 258: Solos compactados com equipamento miniatura – mini-MCV. Rio de Janeiro.
- Departamento Nacional de Estradas de Rodagem – DNIT (2018). DNIT 134-ME: Pavimentação – Solos – Determinação do módulo de resiliência. Rio de Janeiro.
- Departamento Nacional de Estradas de Rodagem – DNIT (2018). DNIT 179-IE: Pavimentação – Solos – Determinação da deformação permanente. Rio de Janeiro.
- Durán, J. B. C. (2015). Sistema de gerência de pavimentos aeroportuários: estudo de caso no aeroporto estadual de Araraquara. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Universidade de São Paulo.
- Fernandes Júnior, J. L (1994). Investigação dos efeitos das solicitações do tráfego sobre o desempenho de pavimentos. 1994. 328 p. Tese (Doutorado em Transportes) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- Guimarães, A. C. R (2001). Estudo de Deformação Permanente em Solos e a Teoria do Shakedown Aplicada a Pavimentos Flexíveis. 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro.
- Guimarães, A. C. R (2009). Um método mecanístico-empírico para a previsão da deformação permanente em solos tropicais constituintes de pavimentos. 367 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- Moura, E (2010). Estudo de deformação permanente em trilha de roda de misturas asfálticas em pista e em laboratório. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo.
- Negrão, D. P (2012). Contribuição para calibração de curva de evolução de afundamentos em trilha de roda de revestimentos asfálticos com utilização de resultados obtidos de simulador de tráfego em escala real. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo.
- Prediger, P. W (2016). Desenvolvimento de modelos de irregularidade longitudinal e afundamento em trilhas de roda para um trecho da BR 285. Dissertação (Mestrado) – Universidade de Passo Fundo.
- Shahin, M. Y. (2005). *Pavement Management for Airports, Roads and Parking Lots*. 2ª Ed. Chapman & Hall, New York, USA.
- Werkmeister, S (2003) Permanent deformation behavior of unbound granular materials in pavement construction. 2003. 189 p. Tese (Doutorado em Engenharia) – University of Technology Dresden.
- Werkmeister, S.; Dawson, A. R.; Wellner, F (2001). Permanent Deformation Behavior of Granular Materials and the Shakedown Concept. *Transportation Research Record n° 01-0152*, Washington, DC.