

EFEITO DA RIGIDEZ DAS CAMADAS ESTRUTURAIS NAS DEFORMAÇÕES PERMANENTES DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS

LAUREN VASQUES HOLZ¹; AMANDA DO SACRAMENTO ROBE²; CHAYANE COSTA LOBO³; LEONARDO MACHADO MENDES⁴; PRISCILA MILECH THEISEN⁵; KLAUS MACHADO THEISEN⁶

¹Universidade Federal de Pelotas – teclaurenholz@outlook.com

²Universidade Federal de Pelotas – amandasrobe@gmail.com

³Universidade Federal de Pelotas – contatochayanelobo@gmail.com

⁴Universidade Federal de Pelotas – leonardo.machado@ufpel.edu.br

⁵Universidade Federal do Rio Grande do Sul – priscila.milech@gmail.com

⁶Universidade Federal de Pelotas – theisenkm@yahoo.com.br

1. INTRODUÇÃO

No Brasil, as rodovias exercem papel estratégico no desenvolvimento socioeconômico nacional, sendo responsável pela maior parte do transporte de cargas e passageiros (DNIT, 2019). Nesse contexto, a durabilidade e o desempenho dos pavimentos são fatores essenciais para garantir a eficiência e a segurança das vias. Segundo DA SILVA (2021), entre os mecanismos de deterioração dos pavimentos flexíveis, destacam-se as deformações permanentes, que são deformações residuais que permanecem no material após cessar as cargas do tráfego. Essas deformações ocorrem, principalmente, na camada de revestimento asfáltico, mas podem também afetar as camadas inferiores em função de processos de acomodação e cisalhamento progressivo (PETER, 2016).

Apesar de sua relevância, as deformações permanentes nem sempre são devidamente contempladas em métodos tradicionais de dimensionamento de pavimentos utilizados no Brasil, os quais se baseiam em índices como o CBR (*California Bearing Ratio*) (SILVA, 2021). Tal abordagem, além de desconsiderar uma série de variáveis importantes, pode comprometer a durabilidade e elevar os custos de manutenção das rodovias. Como solução, estudos mecanístico-empíricos, como os de PÉREZ (2016), vêm sendo desenvolvidos, buscando relacionar as deformações acumuladas a parâmetros físicos e mecânicos obtidos em laboratório e às condições reais de operação.

GUIMARÃES (2014) propôs um modelo matemático para a previsão de deformações permanentes em solos tropicais compactados em 15 tipos de materiais, incluindo solos lateríticos e britas graduadas. O modelo proposto relaciona a deformação permanente acumulada com a tensão confinante, a tensão desvio, o número de ciclos de carga e constantes empíricas específicas para cada tipo de material. GUIMARÃES (2014) verificou que os materiais tendem a estabilizar suas deformações após certo número de ciclos, fato não previsto pelos modelos tradicionais baseados em materiais temperados. Esses resultados reforçam a necessidade de modelos mais abrangentes, capazes de considerar as características dos materiais tropicais e as variáveis ambientais brasileiras.

Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo contribuir para compreender a influência dos módulos de resiliência das camadas dos pavimentos flexíveis nas deformações permanentes, analisando-se como o comportamento resiliente dos materiais pode impactar a acumulação de deformações ao longo do tempo, considerando condições típicas de operação de regiões brasileiras.

2. METODOLOGIA

Simulou-se estruturas de pavimentos com revestimento em concreto asfáltico (ligante não modificado CAP 50/70), base granular (brita graduada), sub-base granular e subleito de solo fino, representativos das condições de solo do Sul do Rio Grande do Sul. Considerou-se intervalos de módulos de resiliência definidos pela Instrução de Projeto P00-001 de São Paulo (DER, 2024), adotando-se três valores às camadas (limites mínimo, médio e máximo da Instrução de Projeto), que foram: sub-leito 100, 150 e 200 MPa; sub-base: 150, 225 e 300 MPa; base 200, 290 e 380 MPa e; revestimento 3000, 4750 e 6500 MPa, resultando 81 combinações de módulos. As espessuras das camadas seguiram os valores mínimos recomendados pelo Manual de Pavimentação do DNIT (DNIT, 2006) para o tráfego considerado, adotando-se 10, 20 e 30 cm para revestimento, base e sub-base, respectivamente. O tráfego, quantificado pelo número N, foi estimado pela equação de CALEGARO (2019), considerando-se o pedágio do Retiro (km 510 da BR 116/RS), resultando $N = 2,67 \times 10^7$ passagens de eixo padrão no ano de 2025.

Após, realizou-se análises de tensões no programa AEMC, v.2.4.6. (abr/2023) de para obter valores de tensão confinante e tensão desvio em pontos específicos dentro da estrutura, conforme Figura 2 e Tabela 9 da Instrução de Projeto P00-001 de São Paulo (DER, 2024), sendo tensão confinante a menor tensão principal e a tensão desvio a diferença entre a maior e a menor tensão principal dada em cada ponto pelo programa. Nas simulações, considerou-se carga de eixo padrão rodoviário, camadas não aderidas e coeficientes de Poisson 0,30; 0,35; 0,35 e 0,45 para revestimento, base, sub-base e subleito, respectivamente.

Considerou-se dois cenários distintos: base e a sub-base foram consideradas como camadas únicas, e; dividiu-se as camadas partes de igual espessura. Em cada cenário, considerou-se: i) tensões de tração (negativas) atuantes e ii) desconsiderando essas tensões. Foram calculadas a tensão confinante média e tensão desvio média para cada um dos quatro cenários resultantes.

Para a estimativa das deformações permanentes e dos afundamentos dos cenários analisados, adotou-se o modelo de GUIMARÃES (2014), para estabelecer a relação entre o estado de tensões atuante e a deformação acumulada na camada do pavimento. Os parâmetros de calibração empregados na base foram obtidos em LIMA *et al.* (2017), que apresenta os valores característicos para materiais utilizados em bases e sub-bases de pavimentos. Para a sub-base, os parâmetros de calibração foram extraídos da Figura 8 apresentada por DE OLIVEIRA (2022). A partir da aplicação do modelo, determinaram-se as deformações permanentes acumuladas para todas as combinações de módulos, sendo identificados os pontos extremos correspondentes às situações de maior e menor afundamento superficial, o que permitiu delimitar os cenários mais críticos e mais favoráveis.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nas Tabelas 1 e 2 são vistas as combinações de módulos de resiliência que produziram os menores e maiores percentuais de afundamento de trilha de roda, respectivamente. Na Tabela 1, os resultados mostram que os menores percentuais de afundamento foram associados, em maioria, aos revestimentos com revestimento de 6500 MPa. Essas combinações apresentaram melhor resultado quando associadas a bases de menor módulo, de 200 MPa, registrando valores entre os mais baixos. Nesse grupo, destaca-se a combinação 54, com revestimento de 4750 MPa e base de 380 MPa, com desempenho bastante. Além disso, a

combinação 27 apresentou um resultado relevante, com revestimento de 3000 MPa com base de 380 MPa. Esse comportamento a diferenciou das demais combinações com revestimento de mesmo módulo, que em geral estiveram ligadas a maiores valores de afundamento. De maneira geral, observou-se que os módulos de sub-base e subleito permaneceram bem distribuídos entre as diferentes combinações, mantendo comportamento homogêneo sem grandes variações.

Na Tabela 2, nota-se que os pavimentos com revestimento de 3000 MPa foram os com maiores afundamentos, mostrando que a baixa rigidez do revestimento foi o fator principal para as altas deformações. Percebeu-se que, quando esse revestimento foi combinado com bases de maior rigidez, de 380 MPa, as deformações foram elevadas. O maior valor de deformação ocorreu na combinação em que o revestimento de 3000 MPa foi associado a uma base de 290 MPa, uma sub-base de 300 MPa e um subleito de 200 MPa. Outras combinações também figuraram entre as críticas reforçam o comportamento: revestimento de 3000 MPa associado a uma base de 380 MPa. Nelas, o afundamento foi elevado, independentemente dos módulos das camadas inferiores.

Tabela 1 – Menores Valores de Deformação.

#	MR Revestimento (MPa)	MR Base (MPa)	MR Sub-base (MPa)	MR Subleito (MPa)	Maior % de afundamento
54	4750	380	300	200	0,109707085
55	6500	200	150	100	0,112587683
57	6500	200	150	200	0,114889062
56	6500	200	150	150	0,115280281
58	6500	200	225	100	0,119322291
60	6500	200	225	200	0,11981473
27	3000	380	300	200	0,120241513
65	6500	290	150	150	0,120760098
64	6500	290	150	100	0,121465957

Tabela 2 – Maiores Valores de Deformação

#	MR Revestimento (MPa)	MR Base (MPa)	MR Sub-base (MPa)	MR Subleito (MPa)	Maior % de afundamento
18	3000	290	300	200	0,174016712
21	3000	380	150	200	0,172094701
19	3000	380	150	100	0,170980725
24	3000	380	225	200	0,170016021
20	3000	380	150	150	0,169280685
22	3000	380	225	100	0,168846012
25	3000	380	300	100	0,167049848
23	3000	380	225	150	0,167013213
26	3000	380	300	150	0,16617157

4. CONCLUSÕES

O estudo permitiu verificar que a utilização de um módulo de revestimento muito baixo resulta em maiores índices de afundamento, comprometendo o desempenho estrutural do pavimento. Observou-se que o revestimento é a camada mais sensível às deformações permanentes, sendo determinante para o comportamento global da estrutura.

Também se constatou que o desempenho do pavimento não depende apenas da rigidez individual de cada camada, mas do equilíbrio entre os módulos de resiliência. Combinações desbalanceadas, como revestimentos pouco rígidos associados a bases muito rígidas, intensificam o acúmulo de deformações. Em

contrapartida, quando os módulos são mais equilibrados entre si, os resultados indicam menor afundamento e, logo, maior durabilidade da estrutura.

Dessa forma, confirma-se que o comportamento resiliente dos materiais exerce influência direta na acumulação de deformações permanentes e deve ser considerado de forma criteriosa no dimensionamento de pavimentos flexíveis. O equilíbrio entre os módulos das camadas se mostra essencial para garantir condições de desempenho adequadas e prolongar a vida útil das rodovias.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CALEGARO, G. L. *Um estudo técnico comparativo entre métodos de recuperação estrutural de pavimentos normalizados pelo DNIT/DNER e retroanálise*. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Centro de Engenharias, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2020.

DA SILVA, E. *Avaliação de patologias em pavimentos flexíveis: estudo de caso - Avenida Beira-Mar Norte, Florianópolis, SC*. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2021.

DE OLIVEIRA, L. X. *Análise geomecânica de um solo residual de gnaiss visando sua aplicação em pavimentação*. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Centro Tecnológico de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2022.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DE SÃO PAULO. *Instrução de Projeto – Projeto de Pavimentação*. IP-DE-P00/001 B. São Paulo: DER/SP, 2024.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. *Manual de pavimentação*. 3. ed. Rio de Janeiro: DNIT, 2006. 274 p. (IPR. Publ., 719).

DNIT (Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes). *Rodovias federais*. Disponível em: portal governamental. Acesso em: 29 de agosto de 2019.

GUIMARÃES, A. C. R. *Um método mecanístico-empírico para a previsão da deformação permanente em solos tropicais constituintes de pavimentos*. 2014. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

LIMA, C. D. A. de; MOTTA, L. M. G.; GUIMARÃES, A. C. R. *Vista do estudo da deformação permanente de britas graduadas tratadas com cimento para uso em base e sub-base de pavimentos*. Transportes, v. 25, n. 2, p. 43-52, 2017.

PÉREZ, J. S. L. *Avaliação do desempenho de pavimentos flexíveis dos segmentos monitorados de Urubici e Itapoá*. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

PETER, E. A. *Simulação de deformação permanente em camadas asfálticas: dependência da velocidade de aplicação da carga e da temperatura*. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

SILVA, N. E. G. *Análise comparativa do dimensionamento de pavimentos asfálticos pelo método do DNER e o método mecanístico-empírico Medina em um trecho da BR-101/AL*. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2021.