

INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL PARA INTERPRETAÇÃO DE ANÁLISE MECANÍSTICA DE PAVIMENTOS: NÃO-LINEARIDADE DE BASES

LUCAS ADRIEL RODRIGUES CARDOSO¹; LAUREN VASQUES HOLZ²; NICOLE LEIVAS GOMES³; LEONARDO MACHADO MENDES⁴; PRISCILA MILECH THEISEN⁵; KLAUS MACHADO THEISEN⁶

¹*Universidade Federal de Pelotas – lucascardosor.c2@gmail.com*

²*Universidade Federal de Pelotas – teclaurenholz@outlook.com*

³*Universidade Federal de Pelotas – nicolegomesufpel@gmail.com*

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

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

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

1. INTRODUÇÃO

O módulo de resiliência (MR) é um parâmetro que expressa a capacidade dos materiais de recuperar deformações elásticas após sucessivas aplicações de carga. Este parâmetro é amplamente utilizado em métodos de dimensionamento mecanístico-empírico de pavimentos, substituindo parâmetros como o CBR, ainda frequente em procedimentos no Brasil. O MR é geralmente obtido por meio de ensaios triaxiais de carga repetida, conforme descrito pela norma DNIT 134/2018-ME (DNIT, 2018) e reflete o comportamento elástico dos materiais frente ao tráfego. No entanto, a literatura mostra que esse comportamento é notoriamente não linear, dependendo de variáveis como tensão confinante, tensão desviadora, umidade, densidade e estrutura interna dos materiais (UZAN, 1985; GUIMARÃES, 2009).

Os materiais granulares e solos finos, apresentam respostas mecânicas complexas que não são adequadamente descritas por modelos lineares. Tais materiais exibem variações de comportamento em função do estado de tensões, do histórico de carregamento e das condições ambientais, tornando necessário o uso de modelos constitutivos mais sofisticados. Assim, diversos autores propuseram equações empíricas para modelar o MR como função das tensões atuantes. Entre os modelos, destacam-se os de HICKS e MONISMITH (1971), UZAN (1985) e os adaptados à realidade brasileira por GUIMARÃES (2009), este último com base em ensaios triaxiais realizados com solos tropicais. Diante desse cenário, o problema de pesquisa que se apresenta refere-se à inadequação de modelos tradicionais para a previsão do MR de materiais utilizados em pavimentos brasileiros, especialmente em regiões de clima tropical.

O modelo não linear mais empregado para os materiais de base e sub-base é o modelo generalizado. Nesse modelo, o módulo de resiliência é obtido em função das constantes de regressão k_1 , k_2 e k_3 , parâmetros obtidos por meio de ajuste estatístico dos resultados de ensaios triaxiais de carga repetida. O coeficiente k_1 atua como um fator de escala, refletindo a ordem de grandeza do módulo de resiliência quando as tensões normalizadas assumem valores unitários. O expoente k_2 está associado à sensibilidade do solo à tensão confinante, indicando o aumento de rigidez do material conforme cresce o nível de confinamento. Já o expoente k_3 relaciona-se à influência da tensão desviadora sobre o módulo de resiliência, sendo geralmente negativo, o que evidencia a tendência de redução da rigidez do material sob maiores tensões desviadoras.

Em função do contexto, o objetivo deste trabalho é realizar uma análise comparativa entre modelos lineares e não lineares aplicados à previsão do módulo

de resiliência de solos empregados em estruturas de pavimentação que simulação as condições da região Sul do Rio Grande do Sul, de modo a avaliar a representatividade e a aplicabilidade de cada modelo no contexto do dimensionamento de pavimentos.

2. METODOLOGIA

Foram simuladas estruturas de pavimentos compostas por revestimento em concreto asfáltico (CAP 50/70), base de brita graduada, sub-base granular e subleito de solo fino, representativo do Sul do Rio Grande do Sul. Os módulos de resiliência seguiram a Instrução de Projeto P00-001 do DER/SP (2024), considerando valores mínimo, médio e máximo: subleito (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), totalizando 81 combinações. As espessuras adotadas foram as mínimas do Manual de Pavimentação do DNIT (2006): 10 cm (revestimento), 20 cm (base) e 30 cm (sub-base). O tráfego foi estimado pela equação de Calegaro (2019), no pedágio do Retiro (km 510 da BR-116/RS), resultando em $N = 2,67 \times 10^7$ passagens de eixo padrão em 2025.

As análises de tensões foram realizadas no programa AEMC (v.2.4.6, abr/2023), obtendo-se tensão confinante (menor tensão principal) e tensão desvio (diferença entre a maior e a menor tensão principal), conforme Figura 2 e Tabela 9 do DER/SP (2024). Considerou-se eixo padrão rodoviário, camadas não aderidas e coeficientes de Poisson de 0,30; 0,35; 0,35 e 0,45 para revestimento, base, sub-base e subleito, respectivamente.

Foram avaliados dois cenários: (i) base e sub-base como camadas únicas e (ii) subdivididas em duas partes de mesma espessura. Em cada cenário, analisaram-se as condições com e sem consideração das tensões de tração negativas, resultando em quatro combinações de análise, a partir das quais foram calculadas as tensões médias confinantes e de desvio.

Os materiais analisados, oriundos do trabalho de Lima (2017), correspondem a materiais utilizados em camadas de base e sub-base de pavimentos. Cada material apresenta características distintas quanto à composição granulométrica e comportamento mecânico, expresso pelas constantes k_1 , k_2 e k_3 para efeito de simulação comparativa, foram escolhidos: C2 (menor CNU – Capacidade de suporte não linear), representando o material de menor desempenho e C7 (maior CNU), representando o material de melhor resposta mecânica.

Por último, realizou-se uma análise comparativa entre o modelo linear e o modelo não-linear do módulo de resiliência, a fim de avaliar a precisão de cada abordagem frente a diferentes configurações de materiais de pavimento, buscando-se configurações de estruturas com menores e maiores diferenças entre os módulos lineares e não lineares.

Utilizando-se da Ferramenta Chat GPT 5.0, análise baseou-se em encontrar as seguintes combinações com relação ao comportamento do material de base e revestimento, buscando-se encontrar um padrão em função dos módulos das camadas, analisando-se o que cada uma das condições i, ii, iii e iv têm em comum.

- MR não linear/MR linear < 1, indicando que modelo linear superestima o módulo. Apontou-se as 5 combinações para base no qual essa razão é a menor;
- MR rev/MR não linear a maior possível, indicando maior possibilidade de fadiga de revestimento. Apontou-se as 5 combinações para base no qual essa razão é a menor;

- MR não linear/MR linear > 1, indicando que modelo linear subestima o módulo. Apontou-se as 5 combinações para base onde a razão é maior;
- MR rev/MR não linear a menor possível, indicando menor possibilidade de fadiga de revestimento. Apontou-se as 5 combinações para base no qual essa razão é a maior;

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 1 mostra as 5 combinações mais críticas onde MR não linear/MR linear < 1. A Tabela 2 mostra as 5 combinações mais críticas onde MR rev/MR não linear é a maior possível. A Tabela 3 mostra as 5 combinações mais favoráveis onde MR não linear/MR linear > 1. A Tabela 5 mostra as 5 combinações mais favoráveis onde MR rev/MR não linear é a menor possível.

Tabela 1: combinações mais críticas onde MR não linear/MR linear < 1

Combinação	MR revestimento (MPa)	MR base (MPa)	MR sub-base (MPa)	MR (MPa)	MR base (não linear/linear)
54	4750	380	300	200	0,498595
27	3000	380	300	200	0,53466
73	6500	380	150	100	0,544854
74	6500	380	150	150	0,555696
75	6500	380	150	200	0,559532

Tabela 2: combinações mais críticas onde MR rev/MR não linear é maior

Combinação	MR revestimento (MPa)	MR base (MPa)	MR sub-base (MPa)	MR (MPa)	MR base (não linear/linear)
62	6500	200	300	150	36,25727
59	6500	200	225	150	35,96434
61	6500	200	300	100	35,76025
56	6500	200	150	150	35,5329
58	6500	200	225	100	35,47984

Tabela 3: combinações mais favoráveis onde MR não linear/MR linear > 1

Combinação	MR revestimento (MPa)	MR base (MPa)	MR sub-base (MPa)	MR (MPa)	MR base (não linear/linear)
1	3000	200	150	100	1,109827
4	3000	200	225	100	1,088839
2	3000	200	150	150	1,083954
7	3000	200	300	100	1,073549
36	4750	200	300	200	1,071362

Tabela 4: combinações mais favoráveis onde MR rev/MR não linear é menor

Combinação	MR revestimento (MPa)	MR base (MPa)	MR sub-base (MPa)	MR (MPa)	MR base (não linear/linear)
24	3000	380	225	200	12,17477
25	3000	380	300	100	12,19699
23	3000	380	225	150	12,24782
22	3000	380	225	100	12,26226
21	3000	380	150	200	12,32315

Os padrões notados em cada condição:

i) MR não linear/MR linear < 1:

Nas 5 combinações mais críticas, a base é sempre 380 MPa (máxima da malha), e o revestimento é alto (4750–6500 MPa; mediana 6500). A sub-base oscila entre 150 e 300 MPa (modo 150) e o subleito entre 100 e 200 MPa. Padrão: base muito rígida + revestimento rígido puxam a razão < 1 para baixo (superestimação do modelo linear aumenta).

ii) MR rev/MR não linear (5 maiores): as 5 maiores razões ocorrem sempre com revestimento = 6500 MPa e base = 200 MPa (baixa). Sub-base entre 150–300 MPa e subleito 100–150 MPa. Padrão: revestimento muito rígido sobre base relativamente macia → razão alta, indicando maior solicitação do revestimento.

iii) MR não linear/MR linear > 1 (5 maiores) — “linear subestima o MR da base. As 5 maiores razões aparecem com revestimento = 3000 MPa (baixo) e base = 200 MPa (baixa). Sub-base varia (150–300 MPa), subleito ~100–200 MPa. Padrão: revestimento e base mais macios favorecem razão > 1, isto é, o modelo linear tende a subestimar o MR da base.

iv) MR rev/MR não linear (5 menores). Aqui, revestimento = 3000 MPa (sempre) e base = 380 MPa (sempre). Sub-base 150–300 MPa; subleito 100–200 MPa. Padrão: revestimento menos rígido sobre base rígida implica razão baixa, sugerindo menor risco relativo de fadiga do revestimento.

4. CONCLUSÕES

Como conclusão geral da presente pesquisa, pode-se dizer que:

- A razão (MR NL / MR LIN da base) cai nitidamente quando a base fica mais rígida (correlação negativa forte com o módulo da base).
- A razão (MR rev / MR NL) cresce quando o revestimento fica mais rígido e tende a cair com bases mais rígidas.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CALEGARO, G. L. UM ESTUDO TÉCNICO COMPARATIVO ENTRE MÉTODOS DE RECUPERAÇÃO ESTRUTURAL DE PAVIMENTOS NORMALIZADOS PELO DNIT/DNER E RETROANÁLISE.** Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Centro de Engenharias, Universidade Federal de Pelotas. Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo. DER/SP. **IP-DE-P00/001 B.** Instrução de Projeto – Projeto de Pavimentação, 2024.
- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **Manual de pavimentação.** 3.ed. – Rio de Janeiro, 2006. 274p. (IPR. Publ., 719).
- GUIMARÃES, A. C. R. UM MÉTODO MECANÍSTICO-EMPÍRICO PARA A PREVISÃO DA DEFORMAÇÃO PERMANENTE EM SOLOS TROPICais CONSTITUINTES DE PAVIMENTOS.** Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- HICKS, R. G.; MONISMITH, C. L.** Factors influencing the resilient properties of granular materials. *Highway Research Record*, n. 345, p. 15–31, 1971.
- LIMA, R. S.** Avaliação do comportamento mecânico de materiais granulares para pavimentação com base em ensaios triaxiais. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2017.
- UZAN, J.** Characterization of granular material. *Transportation Research Record*, n. 1022, p. 52–59, 1985.