

ESTUDO COMPARATIVO ENTRE OS MÉTODOS EMPÍRICOS E EMPÍRICO MECANICISTA PARA O DIMENSIONAMENTO DA ESPESSURA DE REFORÇO DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS: ESTUDO DE CASO DA RODOVIA MS-040

COMPARATIVE STUDY BETWEEN EMPIRICAL AND EMPIRICAL MECHANISTIC METHODS FOR DIMENSIONING THE FLEXIBLE PAVEMENTS REINFORCEMENT: CASE STUDY OF THE MS-040 HIGHWAY

ISABELLA STÉFANNI DIAS ANDRADE

UFMG - Universidade Federal de Minas Gerais

jisela@etg.ufmg.br

JISELA APARECIDA SANTANNA-GRECO

UFMG - Universidade Federal de Minas Gerais

jisela@etg.ufmg.br

Resumo: O objetivo deste trabalho é realizar uma comparação entre métodos empíricos e empírico-mecanicista para o dimensionamento de reforço de pavimentos flexíveis. Para conduzir o estudo, foi selecionado um trecho da rodovia MS-040, localizada no Mato Grosso do Sul. Inicialmente, foram analisados os levantamentos de campo realizados no trecho, que indicaram os estados superficial e estrutural da rodovia, além dos estudos de tráfego. Primeiramente, foi feita a avaliação funcional do pavimento por meio do Índice de Gravidade Global (IGG). Em seguida, procedeu-se com a avaliação estrutural do pavimento, analisando-se as deflexões reversíveis máximas. Posteriormente, foi realizado o dimensionamento das espessuras de reforço utilizando dois métodos empíricos: DNER-PRO 11/79 – Método B e DNER-PRO 269/94 – Método da Resiliência (TECNAPAV), além de um método empírico-mecanicista processado pelo *software* BISAR 3.0. Foram examinados os parâmetros considerados por cada método e como cada um deles influencia a camada de reforço necessária. Os resultados indicam que os métodos empíricos vigentes estão desatualizados e precisam ser revisados. Em contraste, os métodos empírico-mecanicistas permitem a consideração das variáveis características dos materiais e das técnicas de construção, além de possibilitar a avaliação do estado de tensão e deformação dos materiais.

Palavras-Chave: Pavimentos flexíveis, Métodos de dimensionamento, Reforço asfáltico.

Abstract: The objective of this work is to carry out a comparison between empirical and empirical-mechanistic methods for designing flexible pavement reinforcement. To conduct the study, a section of the MS-040 highway, located in Mato Grosso do Sul, was selected. Initially, the field surveys carried out on the section were analyzed, which indicated the surface and structural states of the highway, in addition to traffic studies. Firstly, the functional assessment of the pavement was carried out using the Global Gravity Index (IGG). Next, we proceeded with the structural assessment of the pavement, analyzing the maximum reversible deflections. Subsequently, the sizing of reinforcement thicknesses was carried out using two empirical methods: DNER-PRO 11/79 – Method B and DNER-PRO 269/94 – Resilience Method (TECNAPAV), in addition to an empirical-mechanistic method processed by the BISAR software 3.0. The parameters considered by each method were examined and how each of them influences the required reinforcement layer. The results indicate that current empirical methods are outdated and need to be revised. In contrast, empirical-mechanistic methods allow the consideration of the characteristic variables of materials and construction techniques, in addition to enabling the evaluation of the state of stress and deformation of materials.

Keywords: Flexible pavements, Design methods, Asphalt reinforcement.

O transporte rodoviário é crucial para a economia brasileira, movimentando 65% das cargas e 95% dos passageiros, segundo a Confederação Nacional de Transportes (CNT, 2023). Contudo, a infraestrutura rodoviária é deficiente, com apenas 12,4% das rodovias pavimentadas, totalizando 213,5 mil dos 1,7 milhão de quilômetros. A pesquisa revelou que 56,8% da malha rodoviária tem problemas de pavimentação, com 34,5% classificadas como regular, 16,8% como ruim e 5,8% como péssimo. Esses problemas impactam a economia, segurança e conforto dos usuários, destacando a necessidade urgente de melhorias nas rodovias.

Diante desse contexto, é crucial realizar uma exploração e comparação de diversas abordagens de dimensionamento de reforço para pavimentos rodoviários, visando garantir sua durabilidade e desempenho ao longo do tempo. É importante ressaltar que a execução adequada dos serviços de recuperação tem um impacto significativo tanto nos custos quanto na vida útil do pavimento.

A restauração oportuna e eficaz dos pavimentos é fundamental para prolongar sua vida útil e reduzir os custos associados à manutenção corretiva a longo prazo. Fatores como a seleção de materiais adequados, técnicas de construção precisas e monitoramento regular desempenham um papel crucial na maximização da durabilidade dos pavimentos.

Este estudo comparativo entre métodos empíricos e mecanicistas para o dimensionamento de reforço tem como objetivo investigar as práticas adotadas no Brasil. Além disso, busca-se avaliar as disparidades nas espessuras dimensionadas por cada método. Ao analisar diferentes abordagens, visa-se identificar as práticas mais eficazes e diretrizes adequadas para otimizar os recursos e garantir a durabilidade das estradas.

O Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos do Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes (DNIT, 2006) fornece diretrizes e recomendações para a avaliação e o projeto de restauração e conservação de pavimentos asfálticos no Brasil. No entanto, para o dimensionamento de reforços asfálticos, o manual ainda se baseia principalmente em métodos empíricos, que podem não capturar completamente as características dos materiais de construção e as condições de tráfego atuais.

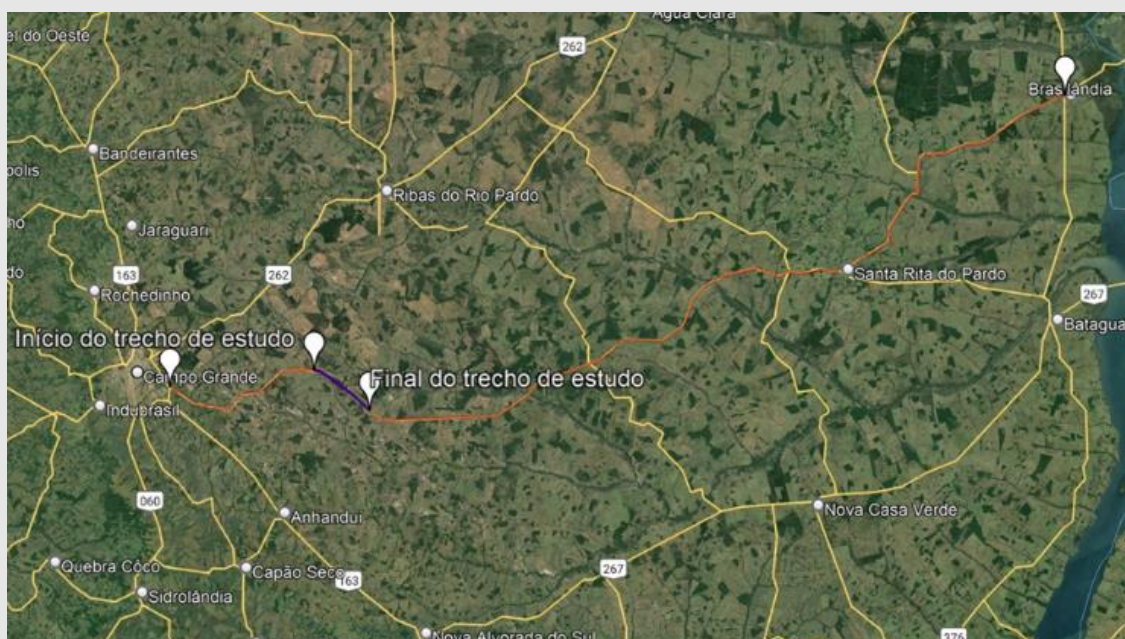
Nesse contexto, este estudo pretende contribuir para a evolução dos métodos de dimensionamento de reforço. A implementação de abordagens mais dinâmicas e flexíveis permite que os engenheiros considerem uma ampla gama de condições do pavimento e critérios

Revista Mirante, Anápolis (GO), v. 17, n. 2, p. 19-34, dez. 2024 (edição extra). ISSN 1981-4089 de dimensionamento. Isso tende a aprimorar a precisão do processo de dimensionamento, resultando em pavimentos mais duráveis e resilientes ao longo do tempo.

Metodologia

A MS-040 é uma rodovia estadual, localizada no Mato Grosso do Sul, que liga Campo Grande à Brasilândia, passando por Santa Rita do Rio Pardo. A rodovia possui 320 quilômetros de extensão e é predominantemente em pista simples. É administrada pela Agência Estadual de Gestão de Empreendimentos (AGESUL), órgão responsável pelo gerenciamento e manutenção dessa via. O trecho selecionado para o estudo encontra-se representado na figura 1. O trecho encontra-se localizado em região rural, e não perpassa por qualquer perímetro urbano. Trata-se de uma rodovia em pista simples, com duas faixas de tráfego com largura de aproximadamente 3,70 m, e acostamentos estreitos, em torno de 80 cm.

Figura 1. Localização da MS-040.



Fonte: Adaptado do Google Earth, 2024

Avaliação Funcional do Pavimento

O estado funcional do pavimento foi analisado com base na Irregularidade Longitudinal e na identificação dos defeitos presentes na superfície.

A avaliação objetiva da superfície foi conduzida por meio da determinação do Índice de Gravidade Global (IGG), conforme estabelecido na norma DNIT 006/2003–PRO. Para isso foi feito o levantamento contínuo dos defeitos superficiais do pavimento, registrados em um inventário de defeitos, e da irregularidade transversal da rodovia, expressa pela medida dos afundamentos nas trilhas de roda interna e externa das faixas de rolamento. Os defeitos considerados na avaliação objetiva da superfície estão definidos na norma DNIT 005/2003TER.

Em seguida, com base nos levantamentos feitos no pavimento, a saber: levantamento defletoométrico, levantamento das condições de irregularidade transversal e longitudinal, investigação geotécnica das camadas do pavimento, foi feita a segmentação visual do trecho em segmentos homogêneos, ou seja, com comportamento semelhante.

A partir das frequências relativas e absolutas de cada defeito de superfície inventariado no pavimento, bem como das médias e variâncias dos valores medidos de afundamentos nas trilhas de rodas, juntamente com os respectivos fatores de ponderação dessas manifestações de ruína, foi calculado o Índice de Gravidade Global (IGG) para cada segmento homogêneo.

Avaliação do Estado Estrutural do Pavimento

A avaliação estrutural do pavimento incluiu o mapeamento da condição defletoométrica utilizando um FWD (*Falling Weight Deflectometer*) com carga dinâmica de 4.100 kgf, pressão média de 5,6 kgf/cm² e raio de aplicação de 15 cm. O mapeamento abrangeu ambas as pistas da rodovia, registrando valores de deflexão em sete pontos distintos: diretamente sob o ponto de aplicação da carga (D0) e em pontos situados a 20, 30, 45, 65, 90 e 120 cm de distância do ponto de aplicação da carga.

A investigação geotécnica, essencial para estudar as camadas do pavimento, foi realizada conforme a norma DNER-PRO 010/79. Foram abertos poços de sondagem a cada 2 km nos bordos do revestimento da pista, coletando informações sobre espessura das camadas do pavimento, umidade, massa específica e amostras representativas de materiais granulares e betuminosos. Esses dados permitiram ensaios de caracterização, compactação e capacidade de suporte (CBR). Dez poços de sondagem foram analisados, incluindo espessura das camadas,

Revista Mirante, Anápolis (GO), v. 17, n. 2, p. 19-34, dez. 2024 (edição extra). ISSN 1981-4089 granulometria das camadas de base, sub-base e subleito, limite de liquidez, índice de plasticidade e índice de grupo.

O método de retroanálise das bacias de influência medidas pelo FWD utilizou o programa ELSYM5, que calcula tensões, deformações e deslocamentos em pavimentos com até cinco camadas, incluindo o subleito. Considerando as camadas como elásticas, isotrópicas e homogêneas, o programa admite até dez cargas verticais iguais com distribuição circular. Para realizar a retroanálise, são ajustados os módulos de resiliência de cada camada até que os resultados se alinhem com a bacia medida em campo. Embora esse processo seja trabalhoso, o estudo utilizou um *software* específico derivado do ELSYM5, automatizando as interações para ajustar espessuras e módulos até encontrar a melhor correspondência com os dados de campo.

Dimensionamentos Empíricos

Para este estudo foram considerados dois métodos empíricos de dimensionamento de reforço descritos pelo Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos (DNIT, 2006), sendo eles:

- DNER-PRO 11/79 – Método B;
- DNER-PRO 269/94 – Método da Resiliência (TECNAPAV).

Ambos os métodos se baseiam na avaliação do comprometimento estrutural do pavimento em termos de deflexão recuperável máxima medida na superfície do pavimento.

DNER-PRO 11/79 – Método B

A metodologia DNER-PRO 11/79 – Método B foi desenvolvida com base no critério da deformabilidade dos pavimentos flexíveis, expresso pela medida das deflexões recuperáveis. O método tem como fundamento o princípio de que: “a deflexão máxima admissível (D_{adm}) para um pavimento flexível é função apenas do tráfego que o solicita, não dependendo das características da estrutura do pavimento” (DNIT, 2006). Logo, a determinação da deflexão característica se dá através da equação 1.

$$\log D_{adm} = 3,01 - 0,174 \log N_{USACE} \quad (1)$$

Onde:

- D_{adm} = deflexão admissível;

Revista Mirante, Anápolis (GO), v. 17, n. 2, p. 19-34, dez. 2024 (edição extra). ISSN 1981-4089

• N_{USACE} = número de solicitações de eixo padrão de 8,2tf segundo o procedimento de cálculo do USACE

Já o raio de curvatura da bacia de deformação pode ser determinado pela equação 2.

$$R = \frac{10 x^2}{2 (d_0 - dx)} \quad (2)$$

Onde:

- R = raio de curvatura;
- x = afastamento em centímetros do centro da carga;
- d_0 = deflexão máxima recuperável medida sob o ponto de aplicação da carga;
- dx = deflexão no ponto considerado de afastamento x.

A avaliação estrutural por meio dos parâmetros supracitados deve ser feita após observadas as condições de aplicabilidade, conforme a figura 2.

Figura 2. Critérios para Avaliação Estrutural.

Hipótese	Dados defletoométricos obtidos	Qualidade Estrutural	Necessidade de Estudos Complementares	Critério para cálculo de reforço	Medidas Corretivas
I	$D_p \leq D_{adm}$ $R \geq 100$	Boa	Não	-	Apenas correções de superfície
II	$D_p > D_{adm}$ $R \geq 100$	Se $D_p \leq 3 D_{adm}$ Regular	Não	Deflectométrico	Reforço
		Se $D_p > 3 D_{adm}$ Má	Sim	Deflectométrico e Resistência	Reforço e Reconstrução
III	$D_p \leq D_{adm}$ $R < 100$	Regular para Má	Sim	Deflectométrico e Resistência	Reforço e Reconstrução
IV	$D_p > D_{adm}$ $R < 100$	Má	Sim	Resistência	Reforço e Reconstrução
V	-	Má O pavimento apresenta deformações permanentes e rupturas plásticas generalizadas (IGG>180)	Sim	Resistência	Reconstrução

Fonte: Norma DNER-PRO 011/79

Se os critérios estabelecidos indicarem a necessidade de execução de uma camada de reforço, a espessura desta é calculada através da aplicação da equação 3.

$$h_{CB} = k \cdot \frac{\log D_p}{D_{adm}} \quad (3)$$

Onde:

Revista Mirante, Anápolis (GO), v. 17, n. 2, p. 19-34, dez. 2024 (edição extra). ISSN 1981-4089

- h_{CB} = espessura do reforço em concreto asfáltico (cm);
- k = fator de redução da deflexão (para concreto asfáltico, $k = 40$);
- D_p = deflexão Benkelman de projeto, sob carga de 8,2tf.

DNER-PRO 269/94 – Método da Resiliência (TECNAPAV)

O Método da Resiliência (TECNAPAV), proposto pelos engenheiros Salomão Pinto e Ernesto Preussler em 1982, oferece uma abordagem que permite a consideração explícita das propriedades resilientes dos solos e materiais que são comumente parte das estruturas de pavimentos no Brasil. Esse procedimento tem como base modelos de fadiga de misturas betuminosas, o comportamento resiliente característico de solos finos e materiais granulares, e o cálculo de tensões e deformações, levando em consideração a teoria da elasticidade não linear. (DNIT,2006).

O método se divide em, basicamente, quatro etapas:

- Classificação do tipo de solo que constitui o subleito

A classificação do solo do subleito é feita com base nos valores de CBR e da porcentagem de silte de cada segmento homogêneo (tabela 1).

Tabela 1. Classificação dos solos

CBR %	SILTE %		
	≤35	35 a 45	≥45
≥10	I	II	III
6 a 9	II	II	III
2 a 5	II	III	III

Fonte: Norma DNER-PRO 269/94

- Cálculo da espessura efetiva do pavimento (h_{ef})

A espessura efetiva do pavimento (h_{ef}), essencialmente, representa a parte da estrutura que permanece capaz de cumprir suas funções no pavimento existente, contribuindo para o suporte adequado, a durabilidade e o desempenho geral da via. Seu cálculo é feito por meio da equação 4.

$$h_{ef} = -5,737 + \frac{807,961}{D_c} + 0,972I_1 + 4,101I_2 \quad (4)$$

Onde:

h_{ef} = espessura efetiva do revestimento betuminoso em centímetros;

Revista Mirante, Anápolis (GO), v. 17, n. 2, p. 19-34, dez. 2024 (edição extra). ISSN 1981-4089

Dc = deflexão característica em centésimos de milímetro.

As constantes I_1 e I_2 estão relacionadas com as características resilientes do solo de fundação e com os casos descritos na tabela 2. Cabe destacar que, na tabela 2, h_e representa a espessura da mistura betuminosa existente.

Tabela 2. Análise do pavimento existente de acordo com as diretrizes do TECNAPAV

Caso	Situação	Adotar
Caso 1: Espessura da camada granular menor ou igual a 45cm	Solo de fundação tipo I	$I_1=0$ e $I_2=0$
	Solo de fundação tipo II	$I_1=1$ e $I_2=0$
	Solo de fundação tipo III	$I_1=0$ e $I_2=1$
Caso 2: Espessura da camada granular é maior que 45cm		$I_1=0$ e $I_2=1$
Caso 3	$0 \leq h_{ef} \leq h_e$	h_{ef}
	$h_{ef} < 0$	$h_{ef} = 0$
	$h_{ef} > h_e$	$h_{ef} = h_e$
Caso 4	Grau de trincamento (TR) > 50%	$h_{ef} = 0$
	FC-2 + FC-3 > 80%	
	FC-3 > 30%	

Fonte: Norma DNER-PRO 011/79

- Cálculo da deflexão máxima admissível (Dadm)

A deflexão máxima permissível é calculada através da equação 5.

$$\log D = 3,148 - 0,188 \cdot \log N_p \quad (5)$$

Onde:

D = deflexão máxima permissível (0,01 mm);

N_p = número de solicitações do eixo padrão de 8,2t, durante a vida do projeto.

- Cálculo da espessura do reforço (HR)

A espessura do reforço é obtida pela equação 6.

$$HR = -19,015 + \frac{238,14}{D^{\frac{1}{2}}} - 1,357h_{ef} + 1,014I_1 + 3,893I_2 \quad (6)$$

Onde:

HR = espessura do reforço em concreto asfáltico (cm);

D = deflexão máxima permissível (0,01 mm);

h_{ef} = espessura efetiva de revestimento (cm);

I_1 e I_2 = constantes relacionadas com as características resilientes do solo de fundação.

O método das deflexões reversíveis para calcular o reforço em pavimentos foca nos critérios de fadiga e deformação, utilizando o *software* BISAR 3.0 para automatizar cálculos. Esse processo requer a inserção dos módulos de deformabilidade e coeficientes de Poisson das camadas do pavimento, incluindo a camada de reforço, cujas espessuras reais são fornecidas e a do reforço é arbitrária. A espessura adequada do reforço é determinada pelo critério de fadiga do revestimento, com base nos módulos de elasticidade obtidos por retroanálise. "Espessuras-tentativa" são estimadas com precisão de 0,5 cm, e o BISAR 3.0 calcula as deformações para determinar o número máximo de passagens de eixos-padrão admissíveis. A espessura final do reforço é fixada quando o número de passagens admissível é igual ou superior ao previsto para o pavimento. Foram usados módulos e leis de fadiga de uma das misturas betuminosas estudadas por Fontes (2009), destacando-se a mistura asfáltica BBB, com betume CAP 50/70, granulometria DNIT Faixa "C", 5,5% de betume e volume de vazios de 4,0%. Essa mistura possui um módulo dinâmico de 6314 MPa e segue a lei de fadiga, apresentada na equação 7.

$$N = 1,185 \cdot 10^{15} \cdot \varepsilon_t^{-4,037} \quad (7)$$

Onde:

- N – Número de eixos padrão;
- ε_t – Deformação de tração

A determinação da espessura final do reforço ocorre quando o número de eixos padrão admissível é igual ou superior ao número de eixos padrão que vão impactar o pavimento.

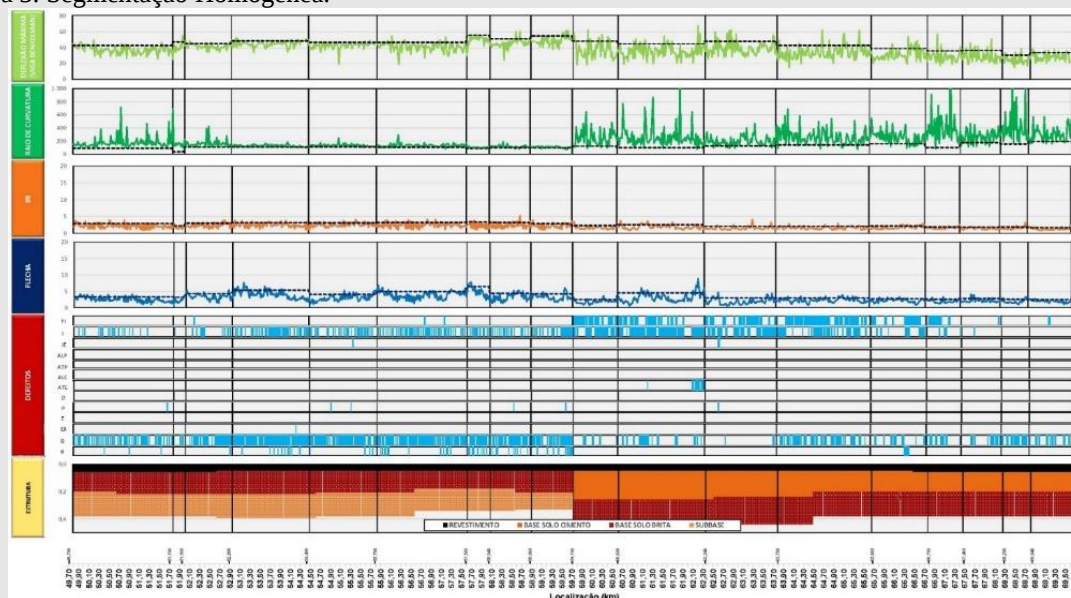
Resultados da avaliação funcional

Para uma compreensão abrangente das características do pavimento, foram elaborados gráficos que proporcionam uma visualização geral dos resultados dos levantamentos. Estes incluem o Índice de Irregularidade Longitudinal (IRI), deflexões reversíveis máximas, raio de curvatura, afundamentos nas trilhas de roda, defeitos de superfície e estrutura constitutiva do pavimento.

Revista Mirante, Anápolis (GO), v. 17, n. 2, p. 19-34, dez. 2024 (edição extra). ISSN 1981-4089

Após a análise dos dados, realizou-se uma segmentação visual do trecho em estudo (figura 3). É importante destacar que essa segmentação homogênea considera ambas as faixas de tráfego conjuntamente. Para os dados coletados de forma individual para cada faixa, como o IRI e os afundamentos nas trilhas de roda, foram utilizadas as médias dos valores medidos em ambas as faixas. Essa abordagem garante uma avaliação abrangente e equilibrada das condições do pavimento.

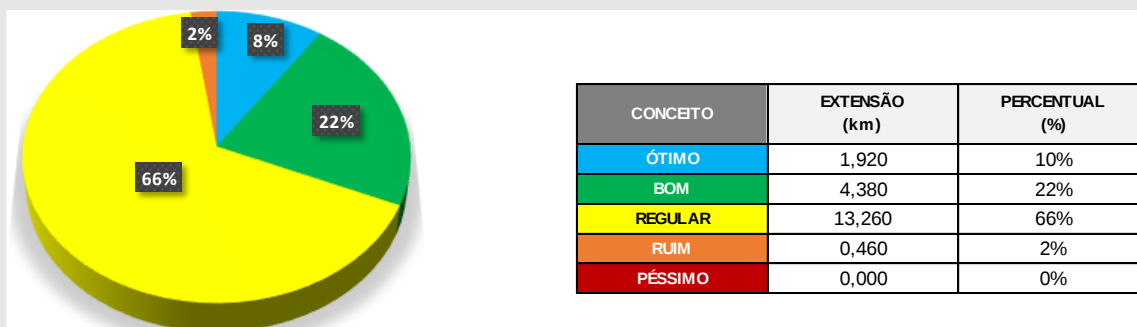
Figura 3. Segmentação Homogênea.



Fonte: Elaboração própria, 2024.

Feita a segmentação homogênea do trecho, procedeu-se com o cálculo do IGG. Resumidamente, a figura 4 mostra a distribuição percentual de cada conceito de degradação observado ao longo da extensão do trecho.

Figura 4. Distribuição percentual dos conceitos de degradação em função do IGG.



Fonte: Elaboração própria, 2024.

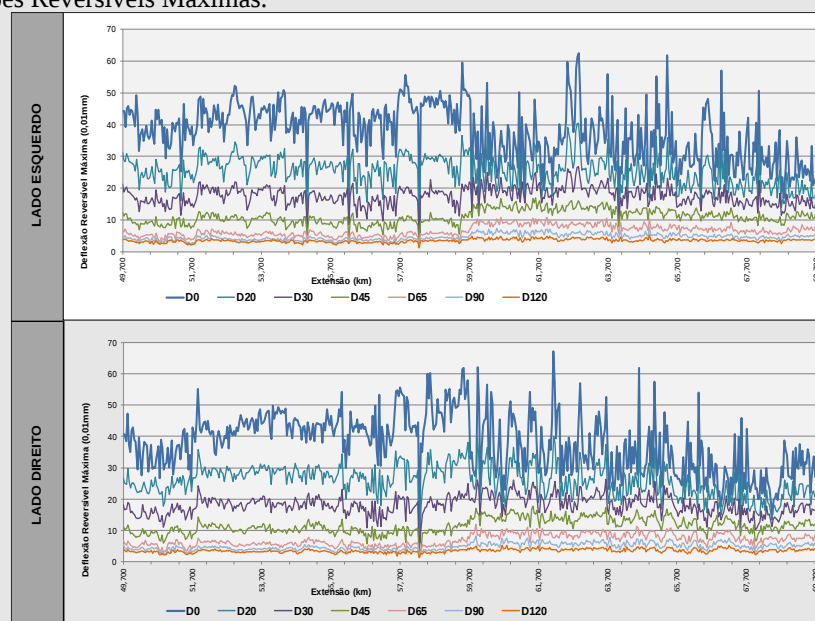
Revista Mirante, Anápolis (GO), v. 17, n. 2, p. 19-34, dez. 2024 (edição extra). ISSN 1981-4089

Em relação aos conceitos de degradação do pavimento, estabelecidos com base no Índice de Gravidade Global, observa-se que 23% da extensão do trecho apresenta o conceito "Bom" e 8% o conceito "Ótimo", conforme a classificação da Norma DNIT PRO - 006/2003. Por outro lado, o conceito "Regular" predomina em 66% do trecho, enquanto apenas os 2% restantes são classificados como "Ruim", sem a ocorrência de segmentos com conceito de degradação "Péssimo".

Resultados da avaliação estrutural

A análise gráfica revelou a presença de dois segmentos distintos (figura 5). O primeiro apresenta deflexões reversíveis máximas variando entre 30 e 50 centésimos de milímetros, enquanto o segundo segmento registra valores entre 20 e 40 centésimos de milímetros.

Figura 5. Deflexões Reversíveis Máximas.



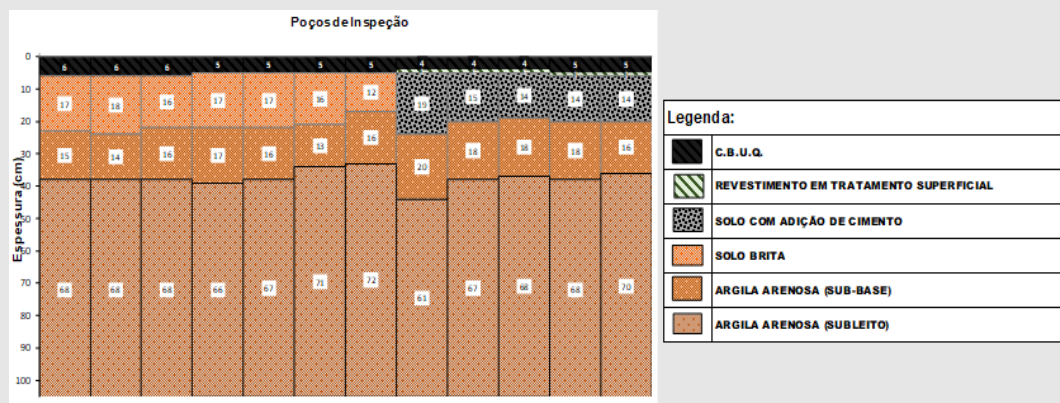
Fonte: Elaboração própria, 2024.

Estrutura do Pavimento

O trecho analisado apresenta duas estruturas distintas no pavimento (figura 6). Nos poços de inspeção PI-01 ao PI-07, a camada de revestimento é de Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ) com espessura de 5 a 6 cm, a base granular é de solo brita com 12 a 18 cm, e a sub-base é de argila arenosa com 13 a 17 cm. Nos poços PI-07 ao PI-12, a camada de revestimento é de CBUQ com 4 a 5 cm sobre um Tratamento Superficial Duplo (TSD) de 1

Revista Mirante, Anápolis (GO), v. 17, n. 2, p. 19-34, dez. 2024 (edição extra). ISSN 1981-4089 cm, a base é de solo com adição de cimento com 14 a 19 cm, e a sub-base é de argila arenosa com 16 a 20 cm.

Figura 6. Estrutura Constitutiva do Pavimento



Fonte: Elaboração própria, 2024.

Retroanálise

A análise dos valores modulares das faixas de tráfego revela grande similaridade entre elas, com uma mudança significativa no comportamento da camada de base a partir do ponto de mudança da estrutura. No primeiro segmento (km 49,7 ao 59,7), o pavimento consiste em uma sub-base de solo areno argiloso, uma base de solo brita e um revestimento de CBUQ, com módulos variando entre 25.000 e 40.000 kgf/cm² para o revestimento, 3.000 e 5.000 kgf/cm² para a base e 2.000 e 3.000 kgf/cm² para a sub-base (tabela 3). No segundo segmento (km 59,7 ao 69,7), a estrutura é similar, mas a base é de solo com adição de cimento e o revestimento inclui um tratamento superficial e CBUQ (tabela 4). Os módulos da camada de revestimento variam entre 40.000 e 60.000 kgf/cm², a base apresenta valores entre 10.000 e 14.000 kgf/cm², e a sub-base entre 1.000 e 3.000 kgf/cm² (figuras 7 e 8).

Tabela 3 – Dados de entrada para retroanálise – Quilômetro 49,7 ao 59,7

Camada	Material	Faixa de espessura (cm)	Faixa de módulos (kgf/cm ²)	Coefficiente de Poisson
Revestimento	CBUQ	4 – 6	20.000 - 30.000	0,30
Base	Solo Brita	16 – 21	2.500 - 4.000	0,35
Sub-base	Argila Arenosa Avermelhada	15 - 20	2.000 - 3.000	0,35
Subleito	Argila Arenosa Avermelhada	0	1.500 - 2.000	0,40

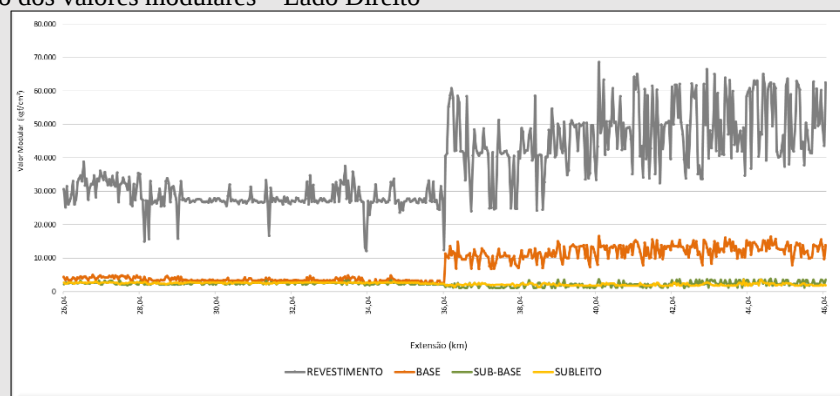
Fonte: Elaboração própria, 2024.

Revista Mirante, Anápolis (GO), v. 17, n. 2, p. 19-34, dez. 2024 (edição extra). ISSN 1981-4089
 Tabela 4 – Dados de entrada para retroanálise – Quilômetro 59,7 ao 69,7

Camada	Material	Faixa de espessura (cm)	Faixa de módulos (kgf/cm ²)	Coefficiente de Poisson
Revestimento	CBUQ	4 – 6	38.000 - 58.000	0,3
Base	Cascalho laterítico	13 - 16	10.000 - 15.000	0,35
Sub-base	Solo areno argiloso	16 - 20	2.500 - 4.500	0,35
Subleito	Solo argiloso	0	2.500 - 4.500	0,4

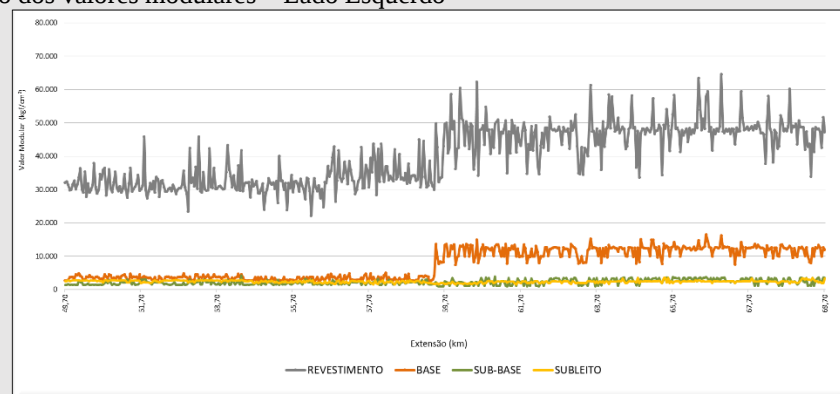
Fonte: Elaboração própria, 2024.

Figura 7. Gráfico dos valores modulares – Lado Direito



Fonte: Elaboração própria, 2024.

Figura 8. Gráfico dos valores modulares – Lado Esquerdo



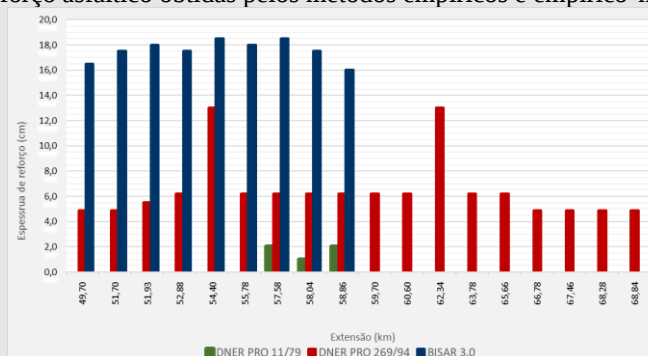
Fonte: Elaboração própria, 2024.

Observa-se uma homogeneidade nos valores modulares do subleito e da sub-base ao longo do trecho, com o primeiro subtrecho apresentando valores ligeiramente superiores. A camada de base no segundo segmento, composta por solo com adição de cimento, apresenta valores modulares mais altos comparados à base de solo brita do primeiro segmento, indicando maior rigidez e melhor desempenho sob cargas de tráfego. Os módulos da camada de revestimento estão dentro dos valores de referência, sugerindo que as misturas betuminosas de concreto asfáltico atendem às expectativas de desempenho estrutural.

ANÁLISE COMPARATIVA DOS DIMENSIONAMENTOS REALIZADOS

Conforme ilustrado na Figura 9, o método DNER-PRO 11/79 – Método B apresentou as menores espessuras quando comparado a outros métodos. Vale destacar que esse método se baseia no princípio de que "a deflexão máxima admissível (Dadm) para um pavimento flexível é função apenas do tráfego que o solicita, não dependendo das características da estrutura do pavimento" (DNIT, 2006). Além disso, o Índice de Gravidade Global (IGG) é considerado um critério de análise apenas quando atinge valores superiores a 180. Assim, apesar de a condição funcional do pavimento com base no IGG ser “Regular” em 66% do trecho, a condição estrutural apontada pelo método é “Boa”, já que considera apenas a deflexão admissível e o raio de curvatura para a análise, sem levar em conta as características dos materiais que constituem o pavimento.

Figura 9. Espessura de reforço asfáltico obtidas pelos métodos empíricos e empírico-mecanicista



Fonte: Elaboração própria, 2024.

No que se refere ao Método da Resiliência (TECNAPAV), foram obtidas espessuras de reforço para todos os segmentos homogêneos. Este método considera que a deflexão admissível é função do tráfego que o solicita; entretanto, para o cálculo da espessura de reforço, também são considerados o índice de trincamento (TR), a espessura da camada granular (Hcg) e o tipo de solo de fundação. Apesar de levar em conta as características do subleito e o estado funcional do revestimento asfáltico, as características das demais camadas não são consideradas no método.

Já em relação ao método empírico-mecanicista aplicado, foram necessárias espessuras de reforço apenas no primeiro segmento do trecho. Cabe ressaltar que esse método considera não apenas os módulos de resiliência de todas as camadas do pavimento existente, mas também do

Revista Mirante, Anápolis (GO), v. 17, n. 2, p. 19-34, dez. 2024 (edição extra). ISSN 1981-4089 reforço a ser aplicado. Além disso, a forma como o pavimento se comporta como um conjunto também é avaliada pelo método.

As espessuras determinadas pelo método empírico-mecanicista são superiores às obtidas pelos métodos empíricos do DNIT. Esses resultados exemplificam a necessidade de revisão dos métodos empíricos vigentes. Como consequência, degradações prematuras, como deformações permanentes e trincamentos por fadiga, ocorrem nos pavimentos brasileiros.

Conclusão

O dimensionamento das espessuras de reforço foi realizado apenas para misturas asfálticas convencionais. Verifica-se que as espessuras determinadas pelo método empírico-mecanicista são superiores às obtidas pelos métodos empíricos do DNIT. Isso se deve ao fato de que os métodos empírico-mecanicistas consideram os valores modulares de todas as camadas do pavimento, bem como a avaliação do comportamento do pavimento como um conjunto.

Os métodos aplicados resultaram em diferentes espessuras de reforço, com variações decorrentes dos distintos parâmetros considerados em cada método. Nos métodos empíricos, as variações nas espessuras são influenciadas pelas características específicas de cada segmento. Já o método empírico-mecanicista leva em consideração a estrutura do pavimento, as propriedades dos materiais e o comportamento do sistema como um todo, além de avaliar o estado de tensão e deformação.

Quando se observa o estado atual das rodovias brasileiras, conforme a pesquisa conduzida pela Confederação Nacional do Transporte (CNT) em 2023, nota-se que 55,8% das rodovias estão degradadas, 30,8% apresentam trincas em malha e remendos, 4,5% sofrem com afundamentos, ondulações e buracos, 0,6% estão destruídas, e apenas 8,3% estão em perfeitas condições. Esses resultados indicam que as soluções atualmente adotadas para os pavimentos não atendem às demandas de tráfego.

Uma análise mais aprofundada do pavimento, possibilitada pelos métodos empírico-mecanicistas, permite considerar as variáveis características dos materiais e das técnicas de construção, além de avaliar o estado de tensão e deformação dos materiais. Isso resulta em soluções mais adequadas ao pavimento, pois a gama de variáveis levadas em consideração proporciona um modelo de análise mais próximo da realidade da via. Além disso, esses métodos

Revista Mirante, Anápolis (GO), v. 17, n. 2, p. 19-34, dez. 2024 (edição extra). ISSN 1981-4089 são mais flexíveis e dinâmicos, permitindo constantes atualizações e exigindo do engenheiro projetista um conhecimento mais aprofundado dos materiais e das interações entre eles.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e a Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) pelo apoio recebido.

Referências

Confederação Nacional do Transporte – CNT. **Pesquisa CNT de rodovias 2023**. Brasília, 2023. Disponível em: <https://www.cnt.org.br/pesquisas>. Acesso em: 17 mar. 2024.

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **DNIT 005-TER: Defeitos nos pavimentos flexíveis e semi-rígidos: terminologia**. Rio de Janeiro, 2003a.

DNIT. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos**. 2ª ed. Rio de Janeiro, 2006.

FONTES, L. P. T. L. **Optimização do desempenho de misturas betuminosas com betume modificado com borracha para reabilitação de pavimentos**. Tese (Doutorado) - Universidade do Minho, Escola de Engenharia, Minho, 2009.

SHELL. BISAR - **User Manual**. Bitumen Business Group.1998.