



Análise comparativa de custos financeiros entre dois métodos de dimensionamento de pavimentos flexíveis

Comparative analysis of financial costs between two flexible pavement design methods

Victória Valéria de Almeida Oliveira

Universidade Federal da Grande Dourados - FAEN

E-mail: victoriavaoliveira@gmail.com

OrcID: 0009-0004-3728-8316

Agleison Ramos Omido

Universidade Federal da Grande Dourados - FAEN

E-mail: agleisonomido@ufgd.edu.br

OrcID: 0000-0002-0014-8537

Recebido em: 2025-02-14

Aceito em: 2025-03-19

DOI: <https://doi.org/10.30612/ipsum.v1i1.19363>

RESUMO - No Brasil, a maioria dos dimensionamentos de pavimentos foi realizada com a aplicação do método empírico, que, apesar de ser amplamente difundido, não leva em consideração a fadiga do revestimento asfáltico e as tensões verticais geradas pelas cargas de tráfego. Com o desenvolvimento do Método de Dimensionamento Nacional (MeDiNa), torna-se possível uma análise mais precisa, utilizando princípios mecanicistas e ferramentas computacionais. Este trabalho teve como objetivo realizar uma análise comparativa de custos financeiros entre dois métodos de dimensionamento de pavimentos flexíveis: o método empírico do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) e o MeDiNa. Para isso, foi realizada a simulação de uma estrutura e seu dimensionamento com aplicação de ambos os métodos, posteriormente foi executado o orçamento com levantamento do custo por quilômetro de rodovia. Os resultados indicaram que o método MeDiNa, embora apresente estrutura com um custo inicial total 42% superior ao método empírico, proporciona maior durabilidade e menor necessidade de manutenção ao longo da vida útil do pavimento. Dessa forma, considerando o custo por ano de vida útil, a estrutura dimensionada pelo MeDiNa apresentou um custo aproximadamente 34% inferior ao método empírico. Concluiu-se que, apesar do pavimento apresentar maior custo

inicial, o MeDiNa se expôs como uma solução mais eficiente a longo prazo, proporcionando uma maior relação custo-benefício.

Palavras-chave: Pavimento flexível. Método empírico de dimensionamento. MeDiNa.

ABSTRACT – In Brazil, most pavement designs were carried out using the empirical method, which, although widely used, does not take into account the fatigue of the asphalt layer or the vertical stresses generated by traffic loads. With the development of the National Design Method (MeDiNa), a more accurate analysis is now possible, using mechanistic principles and computational tools. The objective of this study was to perform a comparative financial cost analysis between two flexible pavement design methods: the empirical method from the National Department of Transport Infrastructure (DNIT) and MeDiNa. For this, a structure was simulated and designed using both methods, and a budget was created to determine the cost per kilometer of road. The results indicated that the MeDiNa method, although presenting a structure with an initial total cost 42% higher than the empirical method, offers greater durability and less maintenance over the pavement's lifetime. Thus, considering the cost per year of useful life, the structure designed using MeDiNa had a cost approximately 34% lower than the empirical method. It was concluded that, despite the higher initial cost, MeDiNa proves to be a more efficient long-term solution, offering a better cost-benefit ratio.

Keywords: Flexible pavement. Empirical design method. MeDiNa.

1 INTRODUÇÃO

A importância de construções de estradas foi percebida desde a antiguidade, em que, o cuidado com o meio de transporte trouxe uma transformação considerável no comércio da Europa, como aponta Bernucci et al. (2008, apud Mascarenhas, 1970). Do mesmo modo, no Brasil, a partir do século XIX foram construídas as primeiras estradas pavimentadas, as quais contribuíram para o desenvolvimento econômico do país, devido ao período de grande exportação de café (Almeida et al., 2022). Assim, desde o Brasil colônia até os dias atuais, as estradas são parte da infraestrutura do país, servindo como acesso à educação, saúde e ao trabalho (Balbo, 2007). Dessa forma, as rodovias se consolidaram como elemento de crescimento econômico no país, possibilitando fluxo de cargas e passageiros (Dos Santos et al., 2021).

A fim de conseguir mais informações sobre os 1.720.909 quilômetros de rodovias brasileiras, a Confederação Nacional do Transporte (CNT, 2022a) coletou informações pelo país sobre o quantitativo de rodovias pavimentadas, obtendo os resultados apresentados na Tabela 1.

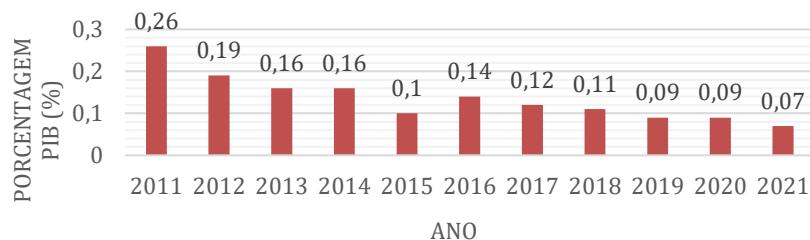
Tabela 1 – Quantitativo de rodovias pavimentadas.

Rodovias	Extensão (km)	Percentual (%)
Pavimentada	213.500	12,4
Não Pavimentada	1.350.100	78,5
Planejada	157.309	9,1

Fonte: Adaptado CNT (2022a).

Constatou-se que a grande maioria das rodovias no Brasil não possui pavimentação, isso ocorre em razão do escasso investimento na malha rodoviária, sendo aplicado nos últimos anos, menos de 0,3% do PIB (Produto Interno Bruto) em melhorias na infraestrutura das rodovias (Figura 1). Ademais, a CNT fez o comparativo entre contribuição em infraestrutura do transporte rodoviário público federal e concessionários, em que o segundo possui quase 2,5 vezes mais investimento médio por quilômetro.

Figura 1 – Investimento público federal em rodovias como percentual do PIB.



Fonte: Adaptado CNT (2022a).

Além disso, de acordo a CNT (2022a), dentre a extensão total da malha rodoviária pavimentada, 55,5% expressa algum problema, dessa forma, essa deficiência acarreta em impactos econômicos, como gastos com manutenção das vias. Ainda segundo a Confederação, em 2022, 71,3% do investimento público federal em rodovias do Brasil foi para manutenção e recuperação como mostra a Tabela 2.

Tabela 2 – Investimento público federal em rodovias do Brasil no ano de 2022.

Investimento	Percentual (%)
Manutenção e recuperação	71,3
Adequação	15,8
Construção	9,8
Outros	3,1

Fonte: Adaptado CNT (2022a).

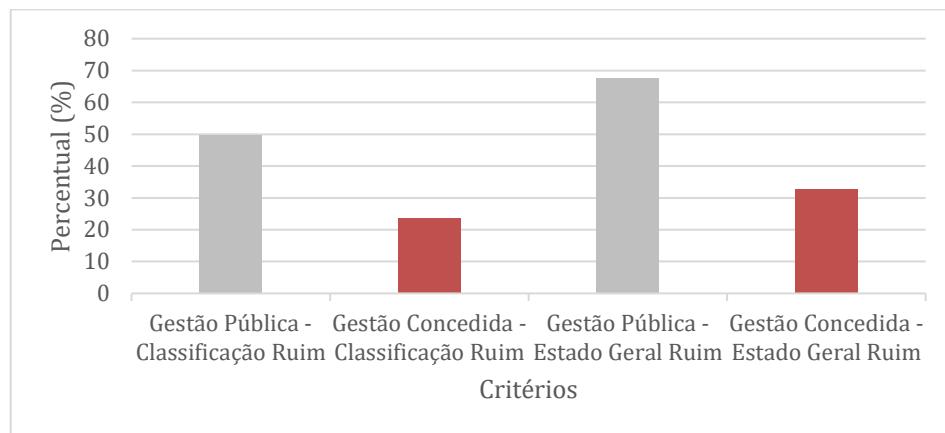
Entretanto, mesmo com as baixas condições na pavimentação, o modal rodoviário ainda é muito utilizado, sendo o transporte predominante no território brasileiro, ligando todo o país, segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística- IBGE (2014). O meio de transporte por rodovias é responsável por, aproximadamente, 64,9% do carregamento de cargas do país e mais de 90% do total de passageiros, sendo os modais mais relevantes responsáveis por transportar os demais carregamentos o ferroviário, 14,95%, e aquaviário, 17,5% (CNT, 2022b).

Aspirando comprovar empiricamente o efeito da infraestrutura de transportes no Brasil sobre a produtividade no país, a Fundação Dom Cabral- FDC (2016) realizou um estudo, em que os resultados indicaram que a cada 1% de aumento nos investimentos do Estado em infraestrutura, haveria um crescimento próximo de R\$ 752 milhões no PIB. Desse modo, é evidente a importância da malha rodoviária para o desenvolvimento econômico brasileiro, porém, o principal meio de fluxo de produção nacional não consegue suprir as necessidades do transporte de cargas, fazendo com que os bens produzidos no país percam competitividade (Bernucci et al., 2008).

Segundo a CNT (2022c), o pavimento da malha federal sobre gestão pública tem classificação de 49,8% como regular, ruim ou péssimo e com os mesmos critérios a de gestão concedida possui apenas 23,7%. Da mesma maneira ocorre no estado geral das vias, as quais para pública é de 67,6% como regular ruim ou péssimo e 32,9% para concedida (Figura 2). Portanto, essa deficiência na infraestrutura, provoca, além do gasto

com a manutenção das vias e desconforto do usuário, um acréscimo no número de acidentes, no desperdício de cargas e combustíveis (Bernucci et al., 2008).

Figura 2 – Classificação de pavimento por usuários.

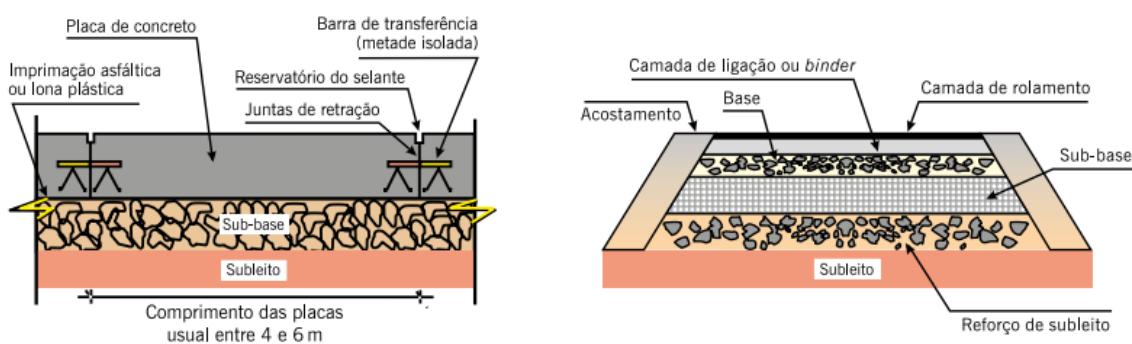


Fonte: Adaptado CNT (2022c).

Como Santana (1993) discorre, o pavimento é a estrutura após a terraplanagem (procedimento de nivelamento do solo) que oferece segurança e conforto ao usuário, com maior desempenho técnico e menor custo viável. De maneira prática, a pavimentação é constituída por camadas de materiais de diferentes aspectos de resistência e deformidade, sendo assim uma estruturação com cálculos de tensões e deformações complexas (Souza, 1980).

Partindo dessa premissa, Bernucci et al. (2008) descreve as faixas de um pavimento, classificando-o como rígido e flexível, demonstrados na Figura 3 (a) e (b) respectivamente. Em que, o primeiro tem revestimento feito com placa de concreto, sendo chamado também de concreto-cimento, e o segundo com capa composta por mistura de agregados, fíler e ligantes asfálticos, designado pavimento asfáltico.

Figura 3 – Classificação de pavimento.



(a) Rígido

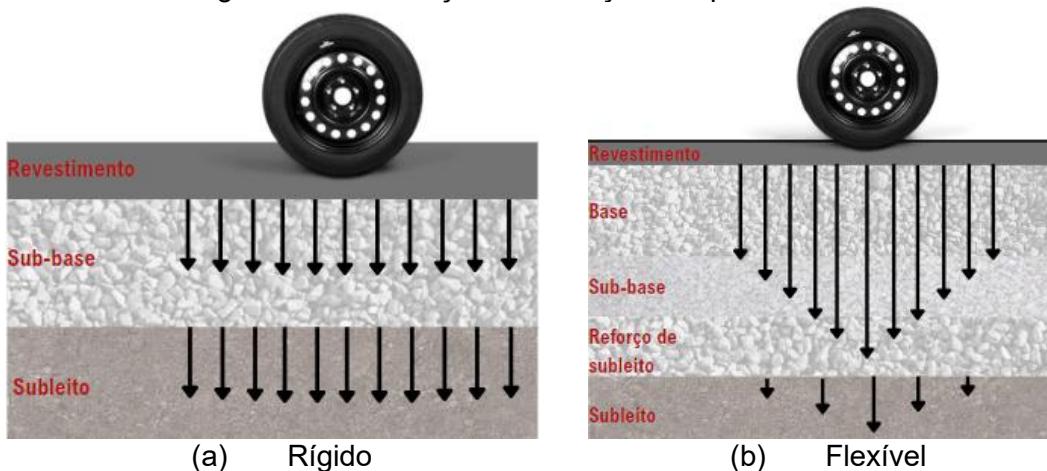
(b) Flexível

Fonte: Bernucci et al. (2008).

Do mesmo modo, Balbo (2007) compara os tipos de pavimento de acordo com a distribuição dos esforços sobre o subleito. Segundo o autor, nos pavimentos rígidos existe um campo de tensões dispersas e bem distribuídas no solo, impondo pressões reduzidas a fundação (Figura 4 (a)). Este efeito ocorre devido a composição do revestimento deste tipo de pavimentação, geralmente feita com capa de cimento Portland, que possui elevada resistência a flexão (Rodrigues, 2011).

Ademais, nos pavimentos flexíveis, o campo de tensões fica concentrado nas proximidades da carga aplicada, como demonstrado na Figura 4 (b), resultando em pressões maiores em pontos específicos do subleito (Balbo, 2007). Como descreve Rodrigues (2011), neste tipo de pavimentação, a capacidade de suporte é a função de distribuição de cargas por um sistema de camadas sobrepostas, em que a camada de revestimento, executada com composto betuminoso, resiste diretamente às forças de tráfego. Desse modo, as camadas do pavimento asfáltico limitam as tensões e deformações por meio da combinação de materiais e espessuras (Bernucci et al., 2008).

Figura 4 – Distribuição de esforços dos pavimentos.



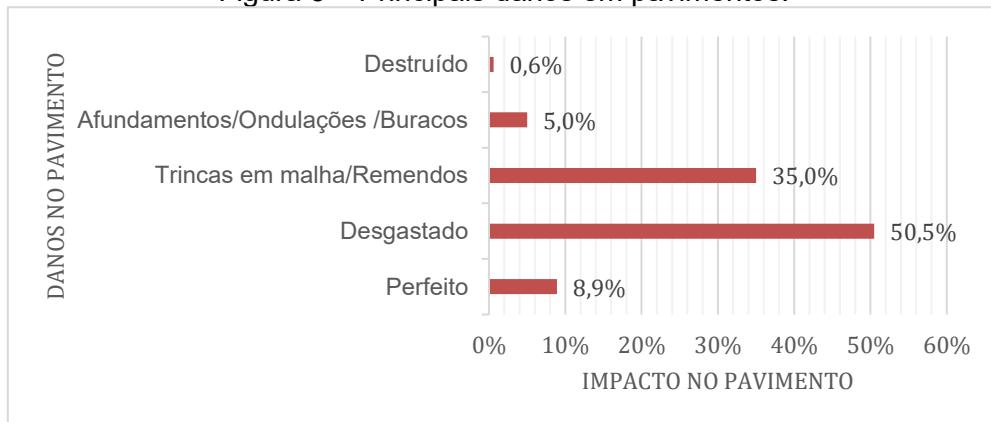
Fonte: Adaptado Balbo (2007).

Segundo a CNT (2022a), 99% das rodovias do Brasil são construídas com pavimento flexível, as quais, assim como os demais pavimentos, são dimensionadas tipicamente pelo método empírico do Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte- DNIT (Guabiroba et al., 2023). A tradicional metodologia brasileira foi projetada de acordo com o engenheiro Murillo Lopes de Souza e publicada pelo extinto DNER – Departamento Nacional de Estradas e Rodagem, com base na experiência do Corpo de Engenheiros do

Exército do Estados Unidos (USACE) e conclusões da Pista Experimental da Associação Americana de Rodovias do Estado e Funcionário de Transporte.

A técnica leva em consideração algumas características, sendo elas, o índice de suporte do solo (IS), massa específica, umidade ótima, classificação dos materiais granulares, solicitação do tráfego, fator climático, coeficiente de equivalência estrutural e a espessura mínima do revestimento. Entretanto, por este método de dimensionamento depender de vários fatores, os resultados derivados do método empírico nem sempre coincidem com as condições reais do pavimento (Silva, 2021 apud Díaz Martínez, 2015). Ademais, os principais danos encontrados na superfície de 110.332 quilômetros pavimentados examinados, aproximadamente 52% do total de pavimentos brasileiros, foram classificados pela CNT (2022a), como demonstra a Figura 5.

Figura 5 – Principais danos em pavimentos.



Fonte: Adaptado CNT (2022a).

Desse modo, Guabiroba et al. (2023), descreve os notáveis defeitos mecânicos nos pavimentos flexíveis, os quais provocam o desgaste do revestimento, sendo eles, a deformação permanente, a qual causa deformação plástica das camadas e formação das trilhas de roda, e o trincamento por fadiga, caracterizada pelas trincas devido ao tráfego, comprovando assim o exposto pela CNT. Sendo assim, o fluxo de veículos é um dos principais responsáveis pela degeneração do pavimento, no qual a análise errônea leva a uma capacidade de suporte equivocada e consequente alteração de vida útil (Mota et al., 2018).

Em virtude disso, foi desenvolvido o método mecanístico-empírico que analisa o pavimento de forma mais analítica, baseado na teoria de Mecânica dos Pavimentos, o considerando como uma estrutura de múltiplas camadas, diferentemente da primeira metodologia tratada, que supõe o pavimento como uma única camada linearmente elástica,

homogênea e isotrópica (Coutinho, 2011). Nos últimos anos, no Brasil, tem-se utilizado o novo método analítico do DNIT, denominado MeDiNa (Método de Dimensionamento Nacional) em homenagem ao engenheiro Jacques Medina, responsável por atualizar o modelo empírico utilizado no país, o qual tem como objetivo a construção de pavimentos flexíveis mais resilientes e duradouros. Para isso, a técnica investiga o Módulo de Resiliência (MR) e a Deformação Permanente (DP) do pavimento por meio de ensaios triaxiais de cargas repetidas (Lima et al., 2021).

O novo método utiliza de ferramentas computacionais que permite calcular os defeitos acumulados na vida útil da estrutura pré-dimensionada, possibilitando comparar o comportamento do pavimento com critérios de desempenho para o tempo de vida em questão (Pelisson et al., 2015). Desse modo, foi elaborado o software MeDiNa, que faz o dimensionamento do pavimento por meio da rotina de cálculo das tensões existentes no interior das camadas (AEMC- Análise Estatística de Múltiplas Camadas).

Neste contexto, percebe-se a diferença entre os métodos de dimensionamento, em que o método empírico do DNIT envolve mais camadas e materiais do que o novo método MeDiNa, elevando o custo do empreendimento, ou seja, gerando mais gastos para realização da obra. Segundo Mattos (2006), os custos podem ser diretos, os quais consideram mão de obra, material e equipamentos, e indiretos que envolvem equipes de supervisão, despesas gerais, taxas, etc. Ademais, para o autor, um orçamento é definido somando os dois tipos de custos, impostos e lucros, assim chegando em um preço de venda viável. Bem como, discorre sobre as estimativas de custos que auxilia na orçamentação, sendo a forma mais precisa com composições de custos unitários, retirados de tabelas de referência ou pesquisa de mercado.

É possível orçar os custos unitários de referência a partir de várias fontes, entre elas estão o INCC- Índice Nacional de Custo da Construção, TCPO- Tabela de Composições e Preços para Orçamentos e ferramentas de órgãos regionais. Entretanto, as mais difundidas são a SINAPI- Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil, da Caixa Econômica Federal, e SICRO- Sistema de custos Rodoviários, desenvolvido pelo DNIT. A SINAPI é muito utilizada na construção civil, devido ao seu amplo banco de dados, compreendendo materiais, mão de obra, encargos sociais e equipamentos. Da mesma maneira, a SICRO é a base de dados focada na infraestrutura rodoviária, a qual abrange a construção, manutenção e recuperação de estradas.

Portanto, este trabalho visa desenvolver uma análise do custo financeiro da pavimentação, por quilômetro e ano de vida útil, de estrutura fictícia, composta de materiais ensaiados e apresentados na leitura de diferentes autores, dimensionada pelos métodos de pavimentos flexíveis, empírico do DNIT e mecanístico-empírico do MeDiNa.

2 METODOLOGIA

2.1 Materiais e características

Este trabalho realizou uma simulação de estrutura de pavimento utilizando os materiais com parâmetros retirados da leitura de artigos, Pereira (2021) e Zago (2016), e do banco de dados do software MeDiNa. Como mostra a tabela 3, foram encontrados pelos autores, a partir de ensaios, a massa específica, umidade ótima e índice de suporte do solo de cada camada.

Tabela 3 – Características do pavimento.

Revestimento				
Material	Massa específica (g/cm³)	Umidade ótima (%)	IS (%)	Autor
Concreto Asfáltico de Petróleo (CAP 30/45 # 12,5mm)	2,4	Não se aplica	Não se aplica	Software MeDiNa
Base				
Material	Massa específica (g/cm³)	Umidade ótima (%)	IS (%)	Autor
Brita Graduada - Gnaisse C3	2,111	7,0	80	Software MeDiNa
Sub-base				
Material	Massa específica (g/cm³)	Umidade ótima (%)	IS (%)	Autor
Mistura de solo- RCD (70% - 30%)	1,865	11,4	20	Pereira (2021)
Subleito				
Material	Massa específica (g/cm³)	Umidade ótima (%)	IS (%)	Autor
Solo CL	1,676	19,6	11	Zago (2016)

Fonte: Elaboração própria (2024).

2.2 Processos de dimensionamentos

2.2.1 Método empírico do DNIT

Pelo método empírico, a primeira etapa realizada para o dimensionamento, é a determinação da capacidade de suporte das faixas do solo, a qual Pereira (2021) e Zago (2016) realizaram por meio do ensaio, normatizado pelo DNIT, de CBR- California Bearing Ratio. Assim, desejando maior segurança, os responsáveis utilizaram o CBR corrigido pelo Índice de Grupo, denominado IS- Índice de Suporte (Tabela 3). Em seguida, fez-se a classificação dos materiais de cada camada conforme especificações da norma, resumidas no Quadro 1 (DNER, 1981).

Quadro 1 – Classificação dos materiais granulares.

Camadas	CBR	Expansão (%)	Limite de Liquidez (LL)	Limite de plasticidade (LP)			
Subleito	≥ 2	≤ 2	-	-			
Reforço de Subleito	Maior que o subleito	≤ 2	-	-			
Sub-base	≥ 20	≤ 1	-	-			
Base	Para $N > 5 \times 10^6$: ≥ 80	$\leq 0,5$	≤ 25	≤ 6			
	Para $N \leq 5 \times 10^6$: ≥ 60						
OBSERVAÇÕES PARA A CAMADA BASE:							
N é o número de repetições do eixo-padrão; Caso o LL seja superior a 25 e/ou o LP seja superior a 6, o material ainda pode ser empregado como base, pois satisfaz as demais condições, desde que o equivalente de areia seja superior a 30%; A fração que passa pela peneira nº 200 deve ser inferior a 2/3 do que passa na de nº40; A fração graúda deve apresentar um desgaste Los Angeles inferior a 50.							

Fonte: Adaptado DNER (1981).

Além disso, calcula-se o pavimento em função do número equivalente (N) de operação, durante o período de projeto, de um eixo-padrão adotado, simples com duas rodas de cada lado. Para que cada eixo contado em campo seja equivalente ao modelo, transforma-se por meio de fatores de equivalência (fator de eixo, carga e regional), achados por ábacos, os eixos simples e tandem a carga padrão de 8,2 tf (DNER, 1981). Desse modo, considerando que o Fator Climático Regional (F_r) do Brasil é 1 devido à falta de elementos experimentais, é possível encontrar o número equivalente de operação, ou tráfego, pela

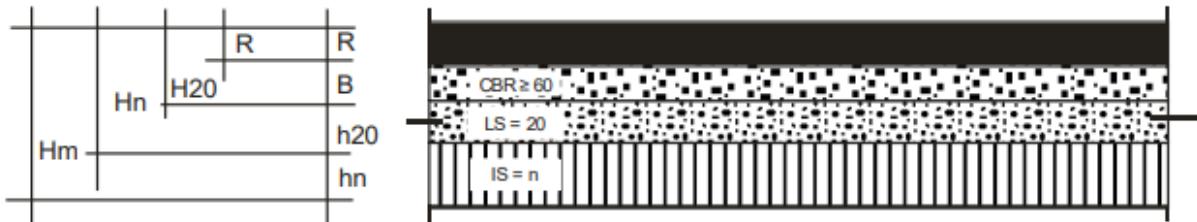
Equação 1 (DNER, 1981). Afim de facilitar a análise proposta para este trabalho, o número equivalente foi adotado igual a $N = 10^7$, considerando um tráfego elevado na via.

$$N = 365 * P * V_m * F_e * F_c * F_r \quad (1)$$

Em que: P é o período de projeto em anos; V_m é o volume médio diário de tráfego durante o período de projeto, em um sentido da via; $\{F\}_e$ é o fator de eixos; F_c é o fator de carga; F_r é o fator regional.

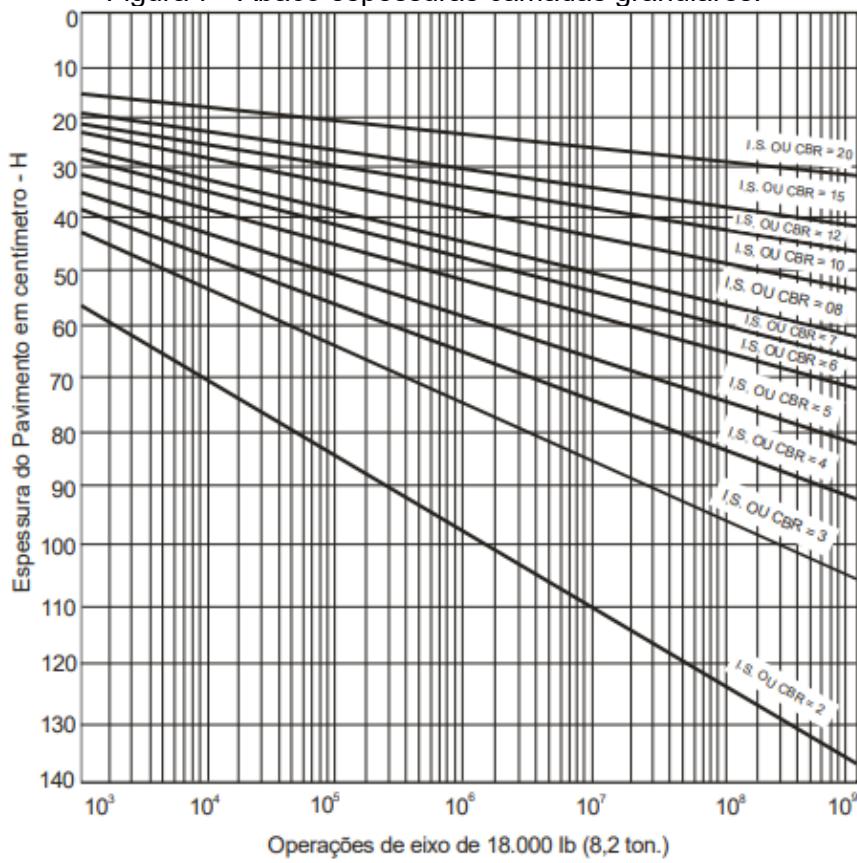
Assim, após N e o CBR de cada faixa adotados, determinou-se as espessuras de proteção a partir do ábaco da Figura 7, ou também pela Equação 2 gerada a partir dele. Sendo denominadas H20 para proteção da sub-base, Hn para reforço do subleito e Hm para subleito na Figura 6.

Figura 6 – Dimensionamento do pavimento.



Fonte: DNIT (2006).

Figura 7– Ábaco espessuras camadas granulares.



Fonte: DNIT (2006).

$$H = 77,67 * (N)^{0,0482} * CBR^{-0,598} \quad (2)$$

Para a camada de revestimento betuminoso, nomeado como R na Figura 6, o DNIT indica as espessuras mínimas, as quais são apresentadas no Quadro 2.

Quadro 2 – Espessuras mínima revestimento betuminoso.

N	Espessura Mínima de Revestimento Betuminoso
$N \leq 10^6$	Tratamentos superficiais betuminosos
$10^6 < N \leq 5 \times 10^6$	Revestimentos betuminosos com 5,0 cm de espessura
$5 \times 10^6 < N \leq 10^7$	Concreto betuminoso com 7,5 cm de espessura
$10^7 < N \leq 5 \times 10^7$	Concreto betuminoso com 10,0 cm de espessura
$N > 5 \times 10^7$	Concreto betuminoso com 12,5 cm de espessura

Fonte: Adaptado DNIT (2006).

Logo, analisando as camadas do pavimento, foi possível encontrar os coeficientes de equivalência estrutural (K) de cada material constituinte, o qual é retirado a partir da Tabela 4 (DNER, 1981).

Tabela 4 – Coeficientes de equivalência estrutural.

Componentes do pavimento	K
Base ou revestimento de concreto betuminoso	2,0
Base ou revestimento pré-misturado a quente, de graduação densa	1,7
Base ou revestimento pré-misturado a frio, de graduação densa	1,4
Base ou revestimento betuminoso por penetração	1,2
Camadas granulares	1,0
Solo cimento com resistência à compressão a 7 dias, superior a 45 kg/cm	1,7
Solo cimento com resistência à compressão a 7 dias, entre 45 kg/cm e 28 kg/cm	1,4
Solo cimento com resistência à compressão a 7 dias, entre 28 kg/cm e 21 kg/cm	1,2

OBSERVAÇÃO: Os coeficientes estruturais são designados, genericamente por:

– Revestimento: K_r – Base: K_b – Sub-base: K_s – Reforço: K_{ref}

Fonte: Adaptado DNIT (2006).

Desse modo, por meio das Inequações 3 e 4, encontrou-se as espessuras das camadas de cada material separadamente, espessura da base (B) e sub-base ($h20$).

$$R K_r + B K_b \geq H20 \quad (3)$$

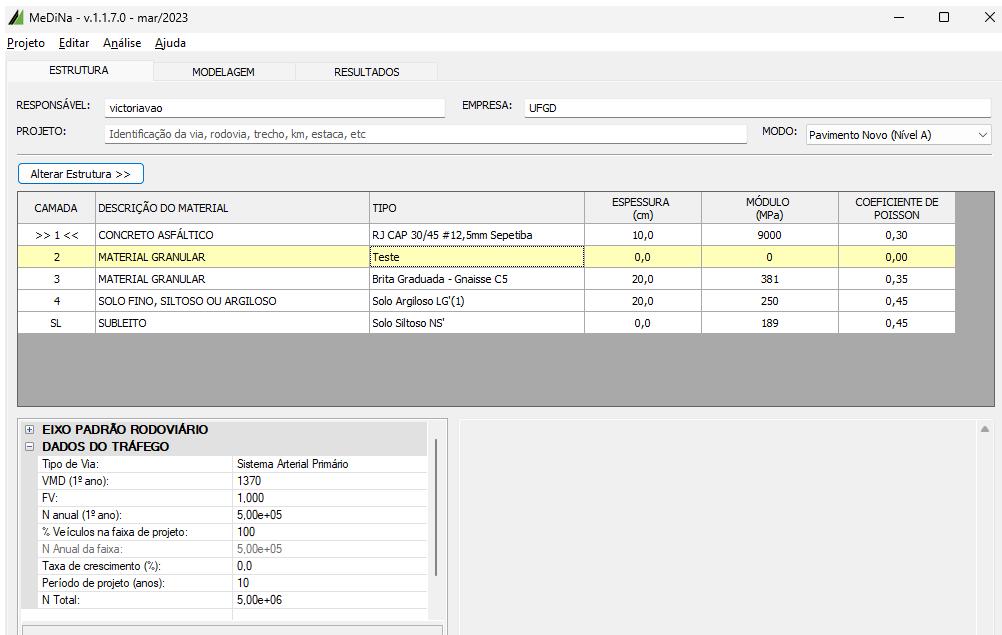
$$R K_r + B K_b + h20 K_s \geq H_n \quad (4)$$

A norma do DNER (1981) expõe que, em caso de $N > 10^7$, deve-se multiplicar o termo $H20$ da Inequação 3 por um fator de segurança 1,2. Ademais, vale ressaltar, que é recomendado espessura mínima adotada para camadas granulares seja de 15 centímetros.

2.2.2 Método mecanístico-empírico MeDiNa

O software desenvolvido para o dimensionamento do novo método reúne de maneira simples a entrada de dados do projeto e característica da estrutura, com campos editáveis (Figura 8), além de apresentar resultados do interior das camadas em relatórios (DNIT, 2020).

Figura 8 – Interface software MeDiNa.



Fonte: Elaboração própria (2024).

Dessa forma, a utilização do programa foi iniciada pela aba estrutura, a qual realiza-se a inserção dos dados do projeto, como identificação, dados da estrutura e tráfego, em que, na caixa do fator veículo (FV) é possível acrescentar os tipos de eixos que trafegam sobre a estrutura, sendo neste trabalho um fator adotado, para facilitar os cálculos. De acordo com as informações preenchidas no sistema, ele fornece um relatório com as deformações e tensões originadas a partir da carga, por isso, é necessário identificar o comportamento das camadas de solo. O programa, possui uma base de dados com informações de alguns tipos de materiais, mas também possibilita a adição de informações de um novo material nas camadas do pavimento, porém, é necessário adicionar dados provenientes de ensaios (DNIT, 2020).

O Módulo de Resiliência (*MR*) e a Deformação Permanente (*DP*) foram encontradas na leitura dos autores, utilizados como base para a análise do presente trabalho, Pereira (2021) e Zago (2016). Assim, o *MR* foi encontrado pelos autores a partir do experimento normatizado DNIT 181/2018, que segundo a norma, é a relação entre a tensão vertical, aplicada repetidamente na amostra, e a deformação resiliente. Sendo assim, o programa utiliza o modelo composto criado por Macêdo (1996), representado pela Equação 5 (Pereira, 2021).

$$MR = k1 * \sigma_3^{k2} * \sigma_d^{k3} \quad (5)$$

Em que k_1 , k_2 e k_3 são os coeficientes de regressão; σ_3 é a tensão confinante e σ_d é a tensão desvio.

Da mesma maneira, a DP foi obtida, segundo os mesmos autores, pelo ensaio normatizado DNIT 179/2018, que segundo a diretriz é a deformação não recuperável da deformação total, sendo cumulativa ao longo da vida útil. O programa faz uso do modelo proposto por Guimarães (2009), representado pela Equação 6 (PEREIRA, 2021).

$$DP = \psi_1 * \left(\frac{\sigma_3}{\rho_0}\right)^{\psi_2} * \left(\frac{\sigma_d}{\rho_0}\right)^{\psi_3} * N^{\psi_4} \quad (6)$$

Em que ψ_1 , ψ_2 , ψ_3 e ψ_4 são os coeficientes de regressão; σ_3 é a tensão confinante; σ_d é a tensão desvio; ρ_0 é a tensão de referência e N é o número de ciclos de carga.

Ademais, para o revestimento composto por material asfáltico, o MeDiNa apresenta os parâmetros de MR e Fadiga (N_{Fad}), em que o segundo é encontrado a partir de ensaio de carregamento repetido. Sendo assim, é liberado no programa a relação do número de ciclos e deformação resiliente de tração, podendo encontrar-se a fadiga da capa, de acordo com a Equação 7 (DNIT, 2020).

$$N_{Fad} = k_1 * \varepsilon_t^{k_2} \quad (7)$$

Em que k_1 e k_2 são parâmetros experimentais da curva de fadiga; ε_t é deformação específica resiliente de tração e N_{Fad} é o número de ciclos.

Para o presente trabalho, foram utilizados os valores de regressão para MR e DP de acordo com os valores encontrados por Pereira (2021) e Zago (2016), os quais foram retirados das Equações 5 e 6 fornecidos pelos ensaios. Além disso, os parâmetros de fadiga utilizados foram os indicados pelo software (Quadro 3). Da mesma maneira, são empregados os mesmos coeficientes de Poisson encontrados nos respectivos trabalhos e software MeDiNa.

Quadro 3 – Coeficientes de equivalência estrutural.

Material	Coeficientes	
Concreto Asfáltico de Petróleo (CAP 30/45 # 12,5mm)	MR	Linear = 9000 MPa
	N_{fad}	$5 * 10^{-14} * \varepsilon_t^{-3,992}$
	POISSON	0,3

Brita Graduada - Gnaisse C3	MR	$786 * \sigma_3^{0,45} * \sigma_d^{-0,09}$
	DP	$0,1276 * \left(\frac{\sigma_3}{\rho_0}\right)^{-0,4085} * \left(\frac{\sigma_d}{\rho_0}\right)^{1,050} * N^{0,0735}$
	POISSON	0,35
Mistura de solo- RCD (70% - 30%)	MR	$126,9 * \sigma_3^{0,238} * \sigma_d^{-0,823}$
	DP	$0,109 * \left(\frac{\sigma_3}{\rho_0}\right)^{-0,665} * \left(\frac{\sigma_d}{\rho_0}\right)^{1,321} * N^{0,043}$
	POISSON	0,35
Solo CL	MR	$215,02 * \sigma_3^{0,23} * \sigma_d^{-0,29}$
	DP	$0,869 * \left(\frac{\sigma_3}{\rho_0}\right)^{0,006} * \left(\frac{\sigma_d}{\rho_0}\right)^{1,212} * N^{0,042}$
	POISSON	0,45

Fonte: Elaboração Própria (2024).

2.3 Determinação de custos

Nesta etapa, foram calculados os custos diretos da estrutura para os dois métodos estudados, primeiramente pelo método empírico e posteriormente pelo software MeDiNa. Assim, determinou-se os quantitativos de insumos e serviços necessários para execução de 1 km de rodovia, classificada como sistema arterial primário, sem acostamento e com uma pista simples com duas faixas de tráfego. Bem como, considerou-se as normativas do DNER (1973) de pistas de rolamento independentes com duas faixas, em que cada via possui 3,5 metros de largura. Portanto, foi utilizado a base de referências SICRO referente ao mês de abril de 2024 para o estado do Mato Grosso do Sul (MS) e como complemento consultou-se a SINAPI.

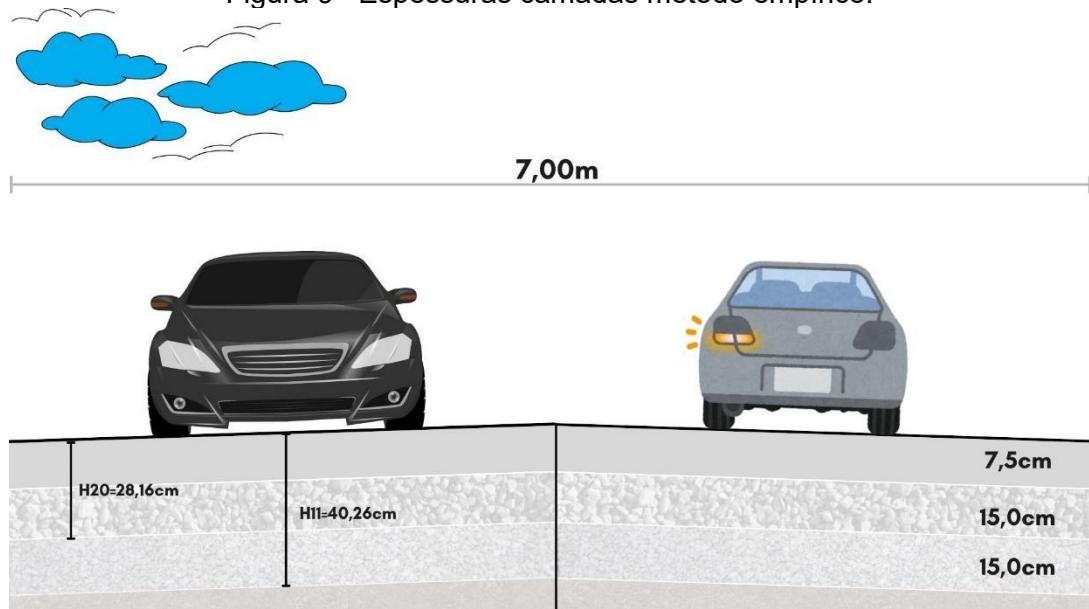
3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Dimensionamento pelo método do DNIT

3.1.1 Resultado do dimensionamento

Após realizar as verificações do método empírico e os cálculos necessários, foi possível encontrar a espessura de cada camada e consequente estrutura do pavimento conforme as exigências da norma, em que os resultados são demonstrados na Figura 9.

Figura 9 –Espessuras camadas método empírico.



Fonte: Elaboração própria (2024).

3.1.2 Quantitativos e custos

Com os dados do pavimento calculados, foi possível determinar o quantitativo de materiais e serviços de cada camada para 1 quilometro de rodovia e, portanto, seus custos, que são apresentados no Quadro 4. De modo que, as quantidades de cada camada foram encontradas a partir do volume, em que se considerou: 7 metros de largura das vias, 1 quilômetro estudado e espessura dimensionada. Sendo que, o revestimento houve necessidade de transformação para tonelada e o subleito não considera a espessura, visto que é tido como uma camada infinita.

Quadro 4 – Custo dimensionamento empírico.

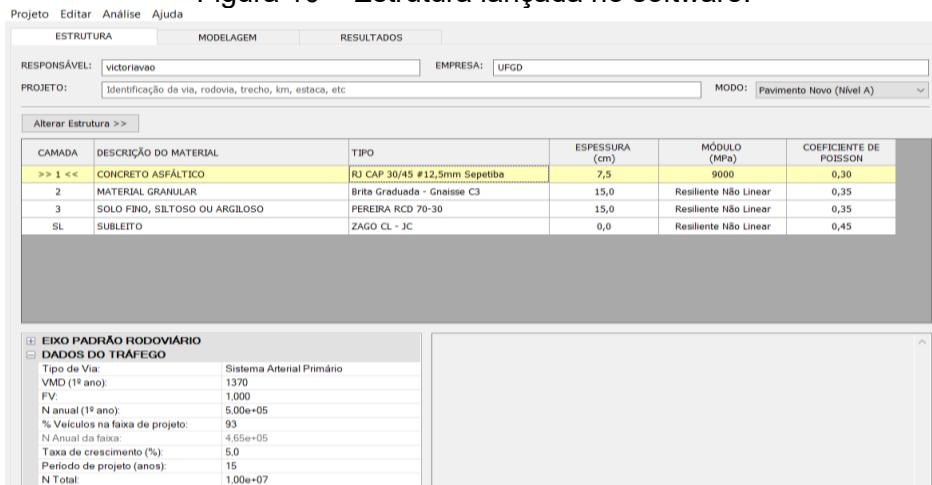
Camada da estrutura	Código SICRO	Descrição	Quantidade	Unidade	Custo Unitário SICRO	Custo total
Revestimento	4011459	Concreto asfáltico - faixa B - areia e brita comerciais	1.485,75	t	R\$ 182,80	R\$ 271.595,10
Base	4011276	Base ou sub-base de brita graduada com brita comercial	1.050,00	m³	R\$ 196,14	R\$ 205.947,00
Sub-base	4011229	Sub-base estabilizada granulometricamente com mistura solo areia (70% - 30%) em usina com material de jazida e areia	1.050,00	m³	R\$ 31,03	R\$ 32.581,50
Sub-leito	4011209	Regularização do subleito	7.000,00	m²	R\$ 1,15	R\$ 8.050,00
OBS: referência tabela sicro atualizada abril 2024				Custo do pavimento:		R\$ 518.173,60

Fonte: Elaboração Própria (2024).

3.1.3 Verificação dos limites normativos no software MeDiNa

Para averiguar se a estrutura atende os limites normativos, a mesma foi lançada no software MeDiNa, inserindo os dados de cada camada, e verificou-se a área trincada e a deformação após 15 anos de projeto, considerando uma via arterial primária (Figura 10). De acordo com os critérios estabelecidos pelo DNIT(2023), a via em questão deve ter limite de 30% de área trincada e 13 mm de deformação permanente. Entretanto, pela análise do programa, demonstrada na Figura 11, fica evidente que o pavimento não atinge a limitação de área trincada e ainda tem deformação permanente próxima a máxima permitida. Ou seja, o pavimento dimensionado empiricamente poderá apresentar defeitos mecânicos no período de projeto estipulado, sendo que a área trincada atinge seu limite ao 7º ano e ao décimo quinto apresentou 11mm de deformação (Figura 12).

Figura 10 – Estrutura lançada no software.



Fonte: Software MeDiNa (2024).

Figura 11 – Análise pavimento pelo método empírico.

--- ANÁLISE DO PAVIMENTO NOVO ---
 Seção do pavimento analisada considerando os dados inseridos pelo Engenheiro Projetista no programa MeDiNa.

Nível de confiabilidade da análise: 85%
 Área Trincada Estimada do pavimento no fim do período: 99,0%
 Afundamento de Trilha de Roda: 11,0mm

--- ALERTAS ---
 Tráfego elevado para a estrutura proposta.
 O Subleito apresentou Afundamento de Trilha de Roda acima do limite de 5mm.

Fonte: Software MeDiNa (2024).

Figura 12 – Evolução dos danos no pavimento método empírico.

Mês	N Equiv	Área Trincada	ATR (mm)
1	3,789e+04	1,34%	8,6
6	2,297e+05	2,76%	9,3
12	4,650e+05	3,95%	9,6
18	7,061e+05	5,12%	9,7
24	9,532e+05	6,36%	9,9
30	1,206e+06	7,72%	10,0
36	1,466e+06	9,24%	10,1
42	1,732e+06	10,95%	10,1
48	2,004e+06	12,88%	10,2
54	2,283e+06	15,06%	10,3
60	2,569e+06	17,50%	10,3
66	2,863e+06	20,22%	10,4
72	3,163e+06	23,24%	10,4
78	3,471e+06	26,57%	10,5
84	3,786e+06	30,21%	10,5
90	4,109e+06	34,14%	10,5

Fonte: Software MeDiNa (2024).

3.2 Dimensionamento pelo software MeDiNa

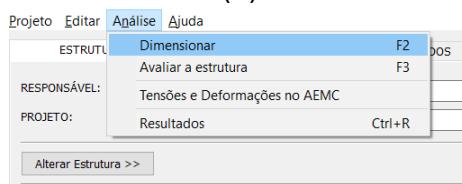
3.2.1 Resultado do dimensionamento

Com base na mesma estrutura lançada no programa no item 3.1.3, foi selecionada a camada de revestimento para realização do dimensionamento (Figura 13 (a)) e execução dele em seguida (Figura 13 (b)).

Figura 13 – Seleção camada para dimensionar.

CAMADA	DESCRIÇÃO DO MATERIAL	TIPO	ESPESURA (cm)	MÓDULO (MPa)	COEFICIENTE DE POISSON
>> 1 <<	CONCRETO ASFÁLTICO	RJ CAP 30/45 #12,5mm Sepetiba	7,5	9000	0,30
2	Adicionar camada	Lata Graduada - Gnaisse C3	15,0	Resiliente Não Linear	0,35
3	Remover camada	FERREIRA RCD 70-30	15,0	Resiliente Não Linear	0,35
SL	Seleciona Camada para Dimensionar	AGO CL - JC	0,0	Resiliente Não Linear	0,45
	Alterar material				
	Propriedades				

(a)



(b)

Fonte: Software MeDiNa (2024).

Sendo assim, ao clicar em dimensionar, o próprio sistema gerou uma nova espessura de revestimento, bem como a análise com os resultados, demonstradas na Figura 14.

Figura 14 –Dimensionamento camada de revestimento.

CAMADA	DESCRIÇÃO DO MATERIAL	TIPO	ESPESURA (cm)	MÓDULO (MPa)	COEFICIENTE DE POISSON
>> 1 <<	CONCRETO ASFÁLTICO	RJ CAP 30/45 #12,5mm Sepetiba	13,7	9000	0,30
2	MATERIAL GRANULAR	Brita Graduada - Gnaisse C3	15,0	Resiliente Não Linear	0,35
3	SOLO FINO, SILTOSO OU ARGILOSO	PEREIRA RCD 70-30	15,0	Resiliente Não Linear	0,35
SL	SUBLEITO	ZAGO CL - JC	0,0	Resiliente Não Linear	0,45

<input checked="" type="checkbox"/> EIXO PADRÃO RODOVIÁRIO <input type="checkbox"/> DADOS DO TRÁFEGO		--- DIMENSIONAMENTO DO PAVIMENTO NOVO --- Seção do pavimento dimensionada considerando os dados inseridos pelo Engenheiro Projetista no programa MeDiNa. Nível de confiabilidade da análise: 85% Área Trincada Estimada do pavimento no fim do período: 28,8% Afundamento de Trilha de Roda: 6,0mm Os resultados obtidos pelo programa devem ser avaliados criteriosamente antes de serem aprovados para a execução de campo.	
Tipo de Via:	Sistema Arterial Primário		
VMD (1º ano):	1370		
FV:	1.000		
N anual (1º ano):	5.00e+05		
% Veículos na faixa de projeto:	93		
N Anual da faixa:	4.65e+05		
Taxa de crescimento (%):	5,0		
Período de projeto (anos):	15		
N Total:	1.00e+07		

Fonte: Software MeDiNa (2024).

Portanto, considerando as características utilizados, com $N = 10^7$ e para 15 anos de vida útil, ao final do período de projeto, o pavimento com a nova espessura apresentaria uma área trincada de 28,8% e 6,0 mm de deformação, resultados estes que estão dentro dos limites normativos.

3.2.2 Quantitativos e custos

Dessa forma, foram recalculados os quantitativos e custos para a estrutura de pavimento com espessura de revestimento igual a 13,7mm, sendo o resultado exposto no Quadro 5.

Quadro 5 – Custo dimensionamento MeDiNa.

Camada da estrutura	Código SICRO	Descrição	Quantidade	Unidade	Custo Unitário SICRO	Custo total
Revestimento	4011459	Concreto asfáltico - faixa B - areia e brita comerciais	2.713,97	t	R\$ 182,80	R\$ 496.113,72
Base	4011276	Base ou sub-base de brita graduada com brita comercial	1.050,00	m³	R\$ 196,14	R\$ 205.947,00
Sub-base	4011229	Sub-base estabilizada granulometricamente com mistura solo areia (70% - 30%) em usina com material de jazida e areia	1.050,00	m³	R\$ 31,03	R\$ 32.581,50
Sub-leito	4011209	Regularização do subleito	7.000,00	m²	R\$ 1,15	R\$ 8.050,00
OBS: referência tabela sicro atualizada abril 2024			Custo do pavimento:			R\$ 742.692,22

Fonte: Elaboração Própria (2024).

3.2.3 Verificação dos limites normativos no software MeDiNa

Desse modo, foi verificado a área trincada e a deformação após o tempo de projeto, considerando uma via arterial primária. Conforme os mesmos limites de área trincada e deformação permanente estabelecidos pelo DNIT(2023), foi realizada a análise do dimensionamento do programa, demonstrada na Figura 15. Assim, observa-se que o pavimento atinge as limitações permitidas, ou seja, o pavimento dimensionado pelo método do MeDiNa suportará a carga estimada e não apresentará defeitos mecânicos durante todo o período de projeto estipulado, sendo que a área trincada registrada foi de 28,77% e enquanto a deformação foi de 6mm (Figura 16).

Figura 15 – Análise pavimento pelo método MeDiNa.

--- DIMENSIONAMENTO DO PAVIMENTO NOVO ---
Seção do pavimento dimensionada considerando os dados inseridos pelo Engenheiro Projetista no programa MeDiNa.

Nível de confiabilidade da análise: 85%
Área Trincada Estimada do pavimento no fim do período: 28,8%
Afundamento de Trilha de Roda: 6,0mm

Os resultados obtidos pelo programa devem ser avaliados criteriosamente antes de serem aprovados para a execução de campo.

Fonte: Software MeDiNa (2024).

Figura 16 – Evolução dos danos no pavimento método MeDiNa.

Mês	N Equiv	Área Trincada	ATR (mm)
1	3,789e+04	0,94%	4,6
6	2,297e+05	1,80%	5,0
12	4,650e+05	2,41%	5,2
18	7,061e+05	2,91%	5,3
162	8,670e+06	23,27%	5,9
168	9,113e+06	25,00%	5,9
174	9,568e+06	26,83%	6,0
180	1,003e+07	28,77%	6,0

Fonte: Software MeDiNa (2024).

3.2 Discussão dos resultados

Analisando os resultados dos métodos de dimensionamentos, percebeu-se que mesmo se tratando de estruturas com quantidades de camadas e materiais iguais, formaram-se pavimentos distintos, em que no MeDiNa houve aumento na espessura do revestimento em quase 83%. Nota-se que essa diferença resultou em um aumento significativo no custo de execução por km dos pavimentos, sendo a camada de revestimento responsável por isso.

A partir dos Quadros 4 e 5 foi possível analisar que o método do MeDiNa é aproximadamente 42% mais custoso comparado ao DNIT, totalizando uma diferença de R\$ 224.518,60. No entanto, o procedimento do novo mecanismo de cálculo combina as tensões e deformações oriundas do tráfego com as características dos materiais da estrutura. Assim, é possível realizar uma análise comparativa do custo por km anual de cada método, avaliando a vida útil total de ambos, em que para o método empírico a estrutura apresenta danos próximo aos 84 meses (Tabela 5).

Tabela 5 – Custo dimensionamento MeDiNa.

Método	Custo/km	Vida útil total (anos)	Custo por ano
Empírico	R\$ 518.173,60	7	R\$ 74.024,80
MeDiNa	R\$ 742.692,22	15	R\$ 49.512,81

Fonte: Elaboração Própria (2024).

Observa-se que apesar do novo mecanismo de dimensionamento ser mais custoso, comparando anualmente durante o período de vida do pavimento, a nova forma de cálculo é vantajosa, com uma diferença de R\$25 mil em relação ao antigo método.

4 CONCLUSÃO

Portanto, mesmo a técnica empírica sendo amplamente utilizada no Brasil e comprovadamente mais econômica em implantação, ela não é eficaz em computar as deformações e fadiga das camadas. No pavimento estudado, a forma de dimensionar mais aplicada atualmente apresentou 99% de sua área trincada em 6 anos e 6 meses dentro dos 15 anos período de projeto. Ou seja, diminuiu aproximadamente 9 anos de vida útil a partir do estipulado inicialmente, sendo então necessárias manutenções e consequentes custos

não previstos. Enquanto pelo novo método, apesar de mais oneroso, o software considera as deformações e tensões e consequente maior precisão, com área trincada igual a 28,8% e 6 mm de deformação total ao final do tempo de vida.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, S; OLIVEIRA, S. Origem, evolução e elementos construtivos da Estrada de Mangaratiba, primeira estrada de rodagem do Brasil. **Ambiente Construído (Online)**, v. 30, p. e44, 2022. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/analismp/a/QLSrC4mJh5dZgkkyGbnHPBz/?lang=pt#>. Acesso em 18 nov. 2023.
- BALBO, José Tadeu. **Pavimentação asfáltica: materiais, projeto e restauração**. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.
- BERNUCCI, Liedi Bariani *et al.* **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**. Rio de Janeiro, 2008.
- CNT, Confederação Nacional do Transporte. **O Transporte move o Brasil: Propostas da CNT ao país**. CNT, 2022b. Disponível em: <https://cdn.cnt.org.br/diretorioVirtualPrd/907973a7-6dc6-4006-b683-9e6ef6bc1505.pdf>. Acesso em: 02 de dez. de 2023.
- CNT, Confederação Nacional do Transporte. **Parcerias Rodovias: A provisão de Infraestruturas de transporte pela iniciativa privada**. CNT, 2022a. Disponível em: <https://cnt.org.br/documento/7300e5a4-9b2b-4b8d-8977-6270832eefca>. Acesso em: 02 de dez. de 2023.
- CNT, Confederação Nacional do Transporte. **Relatório Gerencial**. CNT, 2022c. Disponível em: <https://pesquisarodovias.cnt.org.br/conteudo>. Acesso em: 02 de dez. de 2023.
- DNER, Departamento Nacional de Estradas e Rodagem. **Método de Projeto de Pavimentos Flexíveis**. Rio de Janeiro, 1981.
- DNER, Departamento Nacional de Estradas e Rodagem. **Normas para o Projeto das Estradas de Rodagem**. Rio de Janeiro, 1973.
- DNIT, Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **Manual de Ajuda Programa MeDiNa versão 1.1.5**. 2023. Disponível em: https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/medina/manual_medina_1_1_5.pdf. Acesso em: 02 de dez. de 2023.
- DNIT, Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **Manual de Pavimentação**. Rio de Janeiro, 2006. Disponível em: https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-manuais/vigentes/ipr_719_manual_de_pavimentacao_versao_corrigida_errata_1.pdf. Acesso em: 18 de dez de 2023.

DNIT, Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **MeDiNa**. 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/medina>. Acesso em: 02 de dez. de 2023.

DOS SANTOS, M.; ROSA, T.; CUCONATO, P.; DOS SANTOS, D. Pavimentação de qualidade das vias públicas como uma das garantias dos direitos constitucionais dos cidadãos. **Ambiente Construído (Online)**, v. 23, n. 44, p. 150-165, 4 jan. 2021. <https://revista.umb.org/index.php/revistacientifica/article/view/876>. Acesso 18 de nov. de 2023.

FUNDAÇÃO DOM CABRAL. **Relatório Técnico**: Produtividade de infraestrutura. 2016. Disponível em: <https://www.fdc.org.br/conhecimento-site/nucleos-de-pesquisa-site/centro-de-referencia-site/Materiais/Produtividade%20e%20Infraestrutura.pdf>. Acesso em: 02 de dez. de 2023.

GUABIROBA, J. V. O. C; REZENDE, L. R; BARROSO, L. X; SILVA, J. P. S. Estudo da Fadiga e da Deformação Permanente de Misturas Asfálticas Produzidas em Goiás. **Ambiente Construído (Online)**, v. 28, n. 01, p. e13232, 2023. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rmat/a/RDFynNhwtBB8RkQPS8R9NMh/?lang=pt>. Acesso em: 02 de dez. de 2023.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Logística dos Transportes no Brasil**. IBGE, 2014. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/redes-e-fluxos-geograficos/15793-logistica-dos-transportes.html>. Acesso em: 18 de nov. de 2023.

LIMA, C. D. A. de; MOTTA, L. M. G. da; ARAGÃO, F. T. S. Ensaio de deformação permanente: efeito do número de ciclos na interpretação do comportamento de solos e britas. **Ambiente Construído (Online)**, v. 26, n. 3, p. e13044, 2021. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rmat/a/QWgFhMh6HGvrQvPJmDBHggQ/?lang=pt>. Acesso em 18 nov. 2023. Acesso em: 18 de nov. de 2023.

MATTOS, Aldo Dórea. **Como preparar orçamentos de obras**. São Paulo: Editora Pini, 2006.

MOTA, Rafael Vicente et al. **Efeito do tráfego no dimensionamento de pavimentos asfálticos utilizando dados de pedágio**. In: 32º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte, ANPET, 2018, Gramado. Anais Eletrônicos. p. 1-12. Disponível em: https://www.anpet.org.br/anais32/documentos/2018/Infraestrutura/Dimensionamento,%20Avaliacao%20e%20Gestao%20de%20Pavimentos%20I/6_367_AC.pdf. Acesso em: 02 de dez. de 2023.

PELISSON, N. D; JÚNIOR, J. L. F; JÚNIOR, C. A. P. S; FONTENELE, H. B. Avaliação de desempenho pelo MEPDG: o efeito da variação de espessuras de pavimentos flexíveis. **Ambiente Construído (Online)**, v. 9, n. 01, p. 20-24, 2015. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/itl/a/8GLP7LdyfKHSvqjVHwxLVHG/?lang=pt#>. Acesso em: 02 de dez. de 2023.

PEREIRA, L. A. F. **Análise Comparativa de estruturas de pavimentos utilizando RDC e dimensionadas a partir de parâmetros distintos**. 2021. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.

RODRIGUES, J. L. A. **Concepção de Pavimentos Rígidos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2011. Disponível em: <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/63481/1/000149988.pdf>. Acesso em 02 de dez. de 2023.

SANTANA, H. **Manual de Pré-Misturados a Frio.** IBP/ Comissão de Asfalto. Rio de Janeiro: RJ, 1993.

SILVA, N. A. B. *et al.* Use of mechanistic-empirical method of pavement design for performance sensitivity analysis to asphalt pavement fatigue. **Ambiente Construído (Online)**, v. 26, n. 3, p. e13045, 2021. <https://www.scielo.br/j/rmat/a/d6TGhZPWgsJXhzkRgWRZJVf/?lang=en#>. Acesso em 18 nov. 2023.

SOUZA, M. L. de. **Pavimentação rodoviária.** Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Ed., 1980.

ZAGO, J. P. **Estudo da deformação permanente de três solos típicos de subleitos rodoviários de Santa Maria- RS.** 2016. Dissertação (Pós Graduação) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.