



TAMARA GOMES

**ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE OS MÉTODOS DE
DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS EMPÍRICO E
MECANÍSTICO-EMPÍRICO EMPREGADOS NO BRASIL**

**LAVRAS-MG
2023**

TAMARA GOMES

**ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE OS MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO DE
PAVIMENTOS EMPÍRICO E MECANÍSTICO-EMPÍRICO EMPREGADOS NO BRASIL**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia Civil, para a obtenção do título de Bacharel.

Prof. Dr. Paulo Roberto Borges
Orientador

Prof. Dr. Eduardo Souza Cândido
Coorientador

**LAVRAS-MG
2023**

TAMARA GOMES

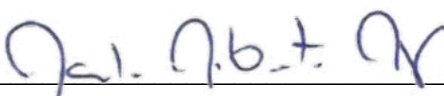
**ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE OS MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO DE
PAVIMENTOS EMPÍRICO E MECANÍSTICO-EMPÍRICO EMPREGADOS NO BRASIL**

**COMPARATIVE ANALYSIS BETWEEN THE EMPIRICAL AND MECHANISTIC-
EMPIRICAL PAVEMENT SIZING METHODS USED IN BRAZIL**

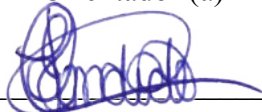
Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia Civil, para a obtenção do título de Bacharel.

APROVADA em 28 de fevereiro de 2023.

Dr. Paulo Roberto Borges UFLA
Dr. Eduardo Souza Cândido UFLA
Dr. Keoma Defáveri do Carmo e Silva UFLA



Prof. Dr. Paulo Roberto Borges
Orientador (a)



Prof. Dr. Eduardo Souza Cândido
Coorientador (a)

**LAVRAS-MG
2023**

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha mãe e meus irmãos pelo apoio.

Aos meus professores orientadores pelo direcionamento.

Aos meus amigos por toda a partilha de conhecimentos, experiências e momentos.

A mim.

“Todas as vitórias ocultam uma abdicação.”

(Simone de Beauvoir)

RESUMO

O Brasil possui o transporte rodoviário como o principal meio de escoamento da produção e movimentação da economia. Contudo, os pavimentos brasileiros apresentam más condições de rodagem e uma baixa vida útil, ocasionados principalmente pelo excesso de carga, falta de manutenção e, preocupantemente, pela deficiência na metodologia de dimensionamento. O método de dimensionamento de pavimentos mais usado no país é a metodologia do extinto Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER), criada na década de 1960 pelo Engenheiro Murillo Lopes de Souza, baseado no método empírico, e possui como principal fundamento de dimensionamento o CBR (*California Bearing Ratio*). Para sanar a defasagem da metodologia empírica, vêm sendo desenvolvidos os métodos de dimensionamento mecanísticos-empíricos fundamentados na mecânica dos pavimentos, que possuem enfoque nos aspectos estruturais do pavimento. O intuito deste trabalho é apresentar um comparativo entre as metodologias de dimensionamento empírica e a mecanística-empírica, através do dimensionamento de cinco estruturas diferentes pelos métodos do DNIT (Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes) e do MeDiNa (Método de Dimensionamento Nacional). As estruturas foram montadas utilizando os materiais do banco de dados do programa MeDiNa e foi feito o uso da correlação entre o CBR e o módulo de resiliência para encontrar os valores de CBR dos materiais. Desenvolveu-se então o dimensionamento dos pavimentos pelo método do DNIT e pelo do MeDiNa. As estruturas apresentaram grandes diferenças em seus resultados e o dimensionamento pelo DNIT originou pavimentos com camadas de menores espessuras. A discrepância entre os resultados está relacionada com a alteridade das considerações usadas por cada metodologia.

Palavras chave: Dimensionamento de Pavimentos. Método Empírico. Método Mecanístico-empírico. Mecânica dos Pavimentos.

ABSTRACT

Brazil has the road transport as the main means of production flow as way to move the economy. However, Brazilian pavements present poor running conditions and short useful life, mainly caused by excessive load, lack of maintenance, and worryingly, by the deficiency in the dimensioning methodology. The most used pavement design method in the country is the methodology of the defunct National Roads Department (DNER), created in the 1960s by Engineer Murillo Lopes de Souza, based on the empirical method, and has as its main design foundation the CBR (California Bearing Ratio). To remedy the gap in the empirical methodology, mechanistic-empirical design methods based on the mechanics of pavements have been developed, focusing on the structural aspects of the pavement. In this way, this work aims to present a comparison between the empirical and mechanistic-empirical pavement design, through the design of five different structures using the DNIT (National Department of Transport Infrastructure) and MeDiNa (National Dimensioning Method) methods. The structures were assembled using materials from the database of the MeDiNa program and the correlation between the CBR and the resilience modulus was used to find the CBR values of the materials. The design of the pavements was then developed using the DNIT and MeDiNa methods. The structures presented great differences in their results and the design by DNIT originated pavements with thinner layers. The discrepancy between the results is related to the otherness of the considerations used by each methodology.

Keywords: Pavement Design. Empirical Method. Mechanistic-Empirical Method. Mechanics of Pavements.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Estrutura do pavimento flexível.....	15
Figura 2 - Distribuição de tensões no pavimento flexível.....	16
Figura 3 - Ilustração do sistema de camadas de um pavimento e tensões solicitantes.	16
Figura 4 - Esforços em camadas do pavimento.	17
Figura 5 - Curvas de Fatores de equivalência de operação.	22
Figura 6 - Esquema de dimensionamento mecânico de pavimentos.....	24
Figura 7 - Curva sigmoide ajustada.	27
Figura 8 – Curva de calibração da Função de Deslocamento.	28
Figura 9 – Regressão de obtenção do erro da nova função transferência.	28
Figura 10 – Esquema de deformação permanente.	29
Figura 11 - Exemplo de dano de fadiga em pavimento asfáltico.	31
Figura 12 - Determinação de espessuras do pavimento.	36
Figura 13 - Simbologia das inequações do cálculo das espessuras das camadas do pavimento	37
Figura 14 - Tela inicial do programa MeDiNa.	38
Figura 15 - Definição de materiais da estrutura no programa MeDiNa.....	39
Figura 16 - Dados do tráfego pelo programa MeDiNa.	39
Figura 17 – Dados do tráfego.	44
Figura 18 - Configuração da Estrutura 01.....	44
Figura 19 - Configuração da Estrutura 02.....	44
Figura 20 - Configuração da Estrutura 03.....	45
Figura 21 - Configuração da Estrutura 04.....	45
Figura 22 - Configuração da Estrutura 05.....	45
Figura 23 - Análise da Estrutura 01.	46
Figura 24 - Análise da Estrutura 02.	46
Figura 25 - Análise da Estrutura 03.	46
Figura 26 - Análise da Estrutura 04.	46
Figura 27 - Análise da Estrutura 05.	47
Figura 28 - Estrutura 01 dimensionada pelos métodos do DNIT e MeDiNa, respectivamente.	48
Figura 29 - Estrutura 02 dimensionada pelos métodos do DNIT e MeDiNa, respectivamente.	48

Figura 30 - Estrutura 03 dimensionada pelos métodos do DNIT e MeDiNa, respectivamente.	48
Figura 31 - Estrutura 04 dimensionada pelos métodos do DNIT e MeDiNa, respectivamente.	49
Figura 32 - Estrutura 05 dimensionada pelos métodos do DNIT e MeDiNa, respectivamente.	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Composição de materiais das estruturas.....	32
Tabela 2 - Valores de MR e CBR dos materiais empregados.	33
Tabela 3 - Especificações dos materiais para as camadas do pavimento.....	34
Tabela 4 - Coeficiente de equivalência estrutural.....	35
Tabela 5 – Espessura mínima de revestimento betuminoso.....	35
Tabela 6 – Critérios e confiabilidade dos tipos de vias.....	40
Tabela 7 - Coeficientes de equivalência estrutural das camadas dos pavimentos.....	42
Tabela 8 – Espessura da camada de revestimento.	42
Tabela 9 - Resultados de Hm e $H20$ dos pavimentos “contínua”.....	42
Tabela 10 - Resultados de Hm e $H20$ dos pavimentos “conclusão”.....	43
Tabela 11 - Resultado das estruturas dimensionadas pelo método do DNIT.....	43

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	15
2.1	PAVIMENTO	15
2.1.1	Estrutura do pavimento.....	16
2.1.1.1	Revestimento.....	17
2.1.1.2	Base	18
2.1.1.3	Sub-base.....	18
2.1.1.4	Reforço do subleito	18
2.1.1.5	Subleito	18
2.2	MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO	19
2.2.1	Métodos empíricos	19
2.2.1.1	Método DNIT.....	20
2.2.2	Métodos mecanístico-empíricos	23
2.2.2.1	Método de Dimensionamento Nacional – MeDiNa.....	25
2.3	MECANISMOS DE DEGRADAÇÃO DO PAVIMENTO.....	29
2.3.1	Deformação permanente.....	29
2.3.2	Fadiga	30
3	METODOLOGIA	32
3.1	MATERIAIS PARA A ESTRUTURA DO PAVIMENTO.....	32
3.1.1	Correlação entre CBR e Módulo de Resiliência	33
3.2	DIMENSIONAMENTO PELO MÉTODO DO DNIT	33
3.2.1	Definição dos materiais	34
3.2.2	Determinação do tráfego	34
3.2.3	Coeficiente de equivalência estrutural.....	34
3.2.4	Espessura mínima do revestimento betuminoso	35
3.2.5	Espessura total do pavimento.....	36
3.2.6	Espessura das camadas	36
3.3	DIMENSIONAMENTO PELO MÉTODO MEDINA	37
3.3.1	Início do projeto	37
3.3.2	Materiais da estrutura	38
3.3.3	Tráfego.....	39

3.3.4	Dimensionamento e análise da estrutura	40
3.3.5	Critérios de parada	40
3.3.6	Relatórios	41
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	42
4.1	DIMENSIONAMENTO PELO MÉTODO DO DNIT	42
4.2	DIMENSIONAMENTO PELO MÉTODO MEDINA	44
4.3	COMPARATIVO	47
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	51
	REFERÊNCIAS.....	52
	ANEXO A – Relatório da estrutura 01.....	55
	ANEXO B – Relatório da estrutura 02.....	59
	ANEXO C – Relatório da estrutura 03.....	63
	ANEXO D – Relatório da estrutura 04.....	67
	ANEXO E – Relatório da estrutura 05.....	71

1 INTRODUÇÃO

A matriz de transporte brasileira é predominantemente rodoviária e é por ela que a economia do país é majoritariamente movimentada. Segundo a CNT - Confederação Nacional do Transporte (2017), o Brasil possui cerca de 1.720.700,0 km de extensão de malha rodoviária e apenas 12,4% desse valor é pavimentada, se mostrando um sistema deficiente.

A carência do sistema rodoviário já é uma questão bem antiga no país. A primeira grande expansão da malha rodoviária brasileira ocorreu no governo Kubitschek na década de 50, contudo, a partir da segunda metade de 1980, com a extinção do Fundo Rodoviário Nacional e a crise econômica, o crescimento da infraestrutura rodoviária foi mínimo.

Os produtores brasileiros têm sofrido prejuízos imensuráveis devido a precária condição das vias para escoamento da produção. Porém, o problema não deve ser visto apenas pelo âmbito econômico, mas também pelo social. É uma questão de cidadania que a população consiga ter acesso à educação, à saúde, ao trabalho, ao convívio social, à cultura e ao lazer de forma segura e confortável (BALBO, 2007).

De acordo com Silva (2018) os principais fatores apontados pela falha dos pavimentos nacionais são o excesso de carga dos caminhões, o emprego de materiais inadequados e a execução deficiente. Para Balbo (2007), os materiais das camadas dos pavimentos são degradados por cargas de veículos, produtos químicos e ações ambientais como temperatura e umidade, causando sua falha precoce. Na busca por encontrar os motivos, a CNT divulgou o estudo “Por que os pavimentos das rodovias do Brasil não duram?” (2017) onde especialistas e órgãos de controle foram ouvidos na tentativa de encontrar as principais causas de defeitos. Dentre elas estão a defasagem do método de dimensionamento utilizado, falta de fiscalização, falta de manutenção e deficiência técnica na execução e gerenciamento de obras.

A falta de fiscalização nas rodovias permite que os veículos circulem com cargas de peso excessivo, que não foram previstas no dimensionamento, diminuindo a vida útil do pavimento. A negligência quanto a manutenção preventiva faz com que o pavimento chegue a um nível de degradação onde há a necessidade de reconstrução parcial ou total, aumentando exponencialmente os custos. Contudo, a grande problemática se apresenta em o método de dimensionamento ser um dos fatores ocasionadores de falha.

O método de dimensionamento de pavimentos flexíveis mais usado no Brasil é a metodologia do extinto Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER), substituído pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), criada na década de 1960 pelo engenheiro Murillo Lopes de Souza através de uma adaptação dos conceitos adquiridos

em testes de campo e em pistas experimentais do Corpo de Engenheiros do Exército Americano (USACE) e da Associação Norte-Americana de Especialistas Rodoviários e de Transporte (AASHTO) e é essencialmente empírico. Essa metodologia tem como principal parâmetro o *California Bearing Ratio* (CBR), ou Índice de Suporte Califórnia (ISC). Esse método trata diversas situações de forma simplificada, se tornando generalista e levando a uma análise superficial das especificidades das variáveis diversas que influenciam no desempenho funcional e estrutural de um pavimento (COUTINHO, 2011).

Em busca do aprimoramento do dimensionamento dos pavimentos e com o intuito de sanar as deficiências da metodologia empírica, vêm sendo desenvolvidos os métodos de dimensionamento mecanísticos-empíricos, baseados nos princípios da mecânica dos pavimentos. Estes possuem enfoque nos aspectos estruturais do pavimento e usam em suas análises teorias físicas elástico-lineares e não-lineares na observação das deformações permanentes e fadiga do pavimento (MORAIS, 2014).

De acordo com Coutinho (2011, p. 3):

A Metodologia mecanística-empírica (ME) apresenta um caráter específico, isto é, possui a capacidade de determinar e analisar os pavimentos de acordo com as suas diversas características e, assim, potencializando o desempenho funcional e estrutural de um pavimento.

Em 2017 foi anunciado pelo DNIT a vigência de um novo método de pavimentação asfáltica, o Método de Dimensionamento Nacional (MeDiNa), a partir de 2018. O método foi desenvolvido através da cooperação entre o Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR) e o Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, da Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE), além da colaboração do Centro de Pesquisas da Petrobrás (CENPES) e de diversas Universidades do Brasil. O método mecanístico-empírico foi nomeado em homenagem ao engenheiro e professor Jacques de Medina, precursor da mecânica dos pavimentos no Brasil.

A importância deste trabalho está em elucidar a diferença entre as estruturas obtidas através do dimensionamento pela metodologia empírica e pela metodologia mecanística-empírica, considerando a vida útil dos pavimentos.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O pavimento é uma estrutura complexa e que possui diferentes formas de dimensionamento, que são apresentados neste trabalho com seus conceitos e particularidades.

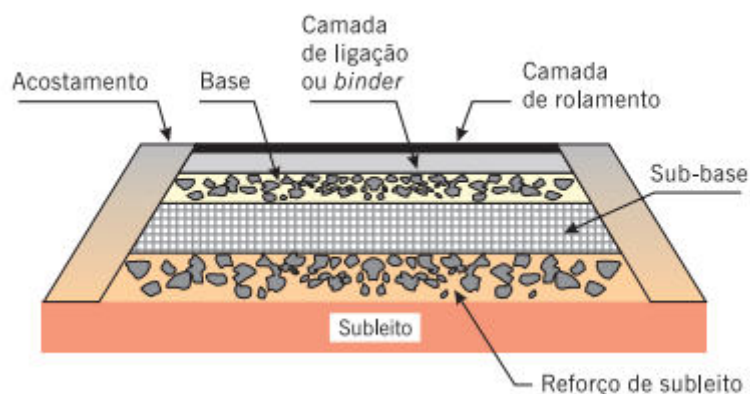
2.1 Pavimento

Segundo DNIT (2006), o pavimento é a superestrutura constituída por um sistema de camadas de espessuras finitas, assentadas sobre um semiespaço considerado teoricamente como infinito, designado subleito.

Para Bernucci et al. (2008) o pavimento é uma estrutura de múltiplas camadas de espessuras finitas, construída sobre a superfície final de terraplenagem (subleito), destinada técnica e economicamente a resistir aos esforços oriundos do tráfego de veículos e do clima, e a proporcionar aos usuários condições de rolamento quanto ao conforto, segurança e economia.

Os pavimentos podem ser classificados em dois tipos básicos, rígido e flexível. O pavimento rígido possui como revestimento uma placa de concreto de cimento Portland, que tem uma elevada rigidez em relação às camadas inferiores e, portanto, absorve praticamente todas as tensões provenientes do carregamento aplicado (DNIT, 2006). O pavimento flexível, mais empregado no Brasil, possui revestimento composto por ligantes asfálticos e agregados e é constituído por cinco camadas principais: revestimento asfáltico, base, sub-base, reforço do subleito e subleito (YODER; WITCZAK, 1975), de acordo com a Figura 1.

Figura 1 - Estrutura do pavimento flexível.

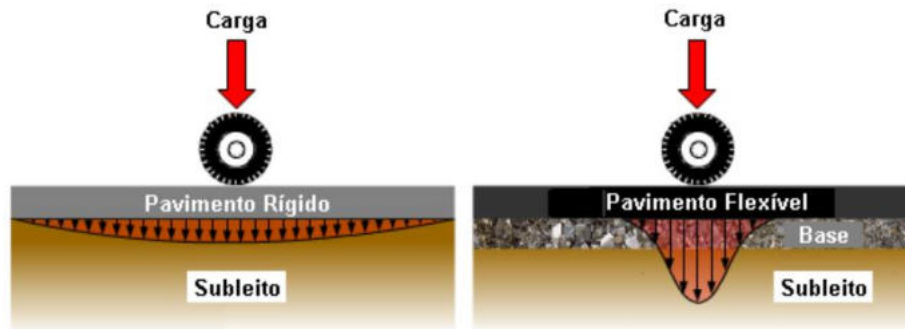


Fonte: Bernucci *et. al.* (2008).

No pavimento flexível todas as camadas sofrem deformação elástica significativa sob o carregamento aplicado pelo tráfego, onde a carga se distribui em parcelas aproximadamente

equivalentes entre as camadas, gerando uma distribuição de tensões atuando de forma concentrada nas proximidades de aplicação da carga e, conseqüentemente, baixa dissipação dos esforços como mostrado pela Figura 2 (BALBO, 2007; DNIT, 2006).

Figura 2 - Distribuição de tensões no pavimento flexível.



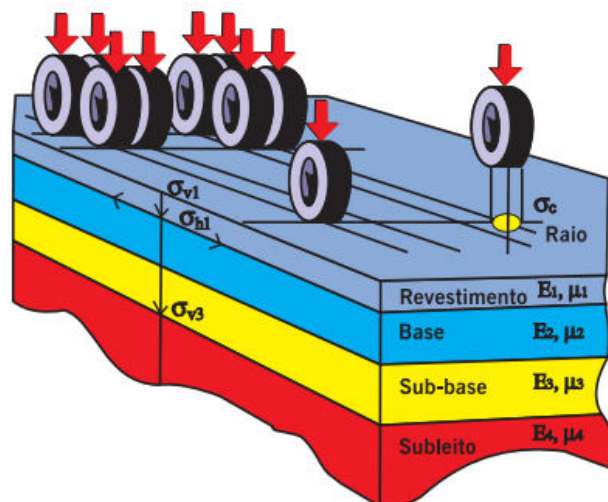
Fonte: Lanix (2016).

2.1.1 Estrutura do pavimento

Segundo Balbo (2007, p. 39), “A estrutura do pavimento é concebida, em seu sentido puramente estrutural, para receber e transmitir esforços de maneira a aliviar pressões sobre as camadas inferiores, que geralmente são menos resistentes.”

No pavimento flexível, a camada que mais absorve esforços é a fundação, ou seja, o subleito. Com isso, as camadas de base, sub-base e reforço do subleito são de grande importância estrutural, pois limitam as tensões e deformações na estrutura do pavimento por meio da combinação de materiais e espessuras das camadas (FIGURA 3) (BERNUCCI, 2008; MEDINA 1997).

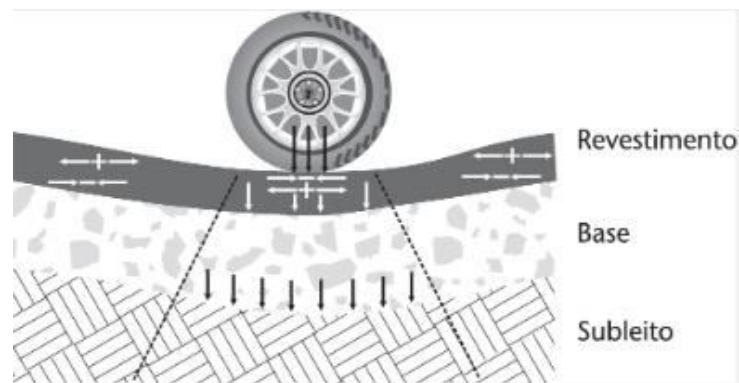
Figura 3 - Ilustração do sistema de camadas de um pavimento e tensões solicitantes.



Fonte: Bernucci *et. al.* (2008).

As cargas atuantes nos pavimentos são aplicadas por veículos e pelo ambiente de forma cíclica. Estas geram um estado de tensões na estrutura, que depende do comportamento mecânico de cada uma das camadas e delas em conjunto. As cargas externas geram esforços sollicitantes verticais e horizontais, conforme mostrado na Figura 4, sendo os verticais simplificados a sollicitações de compressão e de cisalhamento e os horizontais a sollicitação de tração ou simplesmente atuando confinando alguns materiais (BALBO, 2007).

Figura 4 - Esforços em camadas do pavimento.



Fonte: Balbo (2007).

As camadas do pavimento possuem funções específicas a fim de proporcionar aos veículos as condições adequadas de suporte e rolamento em qualquer condição climática e são definidas a seguir (BALBO, 2007).

2.1.1.1 Revestimento

Conforme Bernucci et al. (2010), o revestimento asfáltico é a camada superior destinada a resistir diretamente às ações do tráfego e transmiti-las de forma atenuada às camadas inferiores, impermeabilizar o pavimento, além de melhorar as condições de rolamento quanto a comodidade e segurança.

Para os revestimentos asfálticos novos existe uma subdivisão em duas camadas, a camada de rolamento que consiste na camada superficial que receberá o contato direto das cargas e ações do ambiente, e a camada de ligação (binder) que também é constituída de mistura asfáltica e está entre a camada de rolamento e a base, agindo como camada impermeável (BALBO, 2007; BRANCO, 2006). O material mais usado para a realização do revestimento é o CBQU (Concreto Betuminoso Usinado a Quente) e exige um elevado controle de qualidade na execução.

2.1.1.2 Base

A base é a camada logo abaixo do revestimento e é destinada a resistir e distribuir os esforços verticais oriundos dos veículos, para aliviar as pressões sobre as camadas de solo inferiores (NBR 7207, 1982). Sua capacidade estrutural está ligada as propriedades físicas e mecânicas dos materiais que formam sua composição.

2.1.1.3 Sub-base

A sub-base, localizada entre a base e o reforço do subleito ou subleito, desempenha o mesmo papel da base e é usada quando a camada de base exigida é muito espessa, fornecendo uma alternativa mais viável no âmbito construtivo e econômico (BALBO, 2007). Ela pode ser constituída pelos mesmos materiais da base, porém de menor qualidade. Outra função dessa camada é prevenir o bombeamento de solo do subleito para camadas superiores.

2.1.1.4 Reforço do subleito

O reforço do subleito é uma camada que pode ou não ser necessária, possui espessura constante e é executada por circunstâncias técnico-econômicas, acima do subleito. Ela possui características geotécnicas inferiores ao material usado na camada que lhe for superior, porém melhores que o material do subleito, evitando custos elevados com camadas superiores espessas (DNIT, 2006).

2.1.1.5 Subleito

O subleito é o terreno de fundação do pavimento formado por material natural consolidado e compactado, ou por material de empréstimo compactado. Os esforços que são impostos a sua superfície serão absorvidos em sua profundidade, fazendo com que assim, as camadas superiores tenham que absorver as maiores solicitações de esforços (NBR 7207, 1982). O subleito precisa ser consolidado e compactado e deve ser conhecido até a profundidade onde as cargas impostas atuam significativamente.

2.2 Métodos de dimensionamento

O dimensionamento de um pavimento consiste na determinação da espessura das camadas e os materiais de composição das mesmas, formando uma estrutura que forneça capacidade de suporte aos carregamentos aplicados pelo volume de tráfego, em condições climáticas condizentes com o ambiente em que está inserido (BALBO, 2007).

Essa combinação de camadas deve suportar a repetição de solicitações do tráfego durante sua vida útil. A vida útil de um pavimento consiste em uma medida temporal de sua durabilidade, ou seja, o período em que a estrutura se presta às atividades para as quais foi projetada e construída, sem apresentar um grau inaceitável de deterioração estrutural ou funcional (NBR 15575, 2013).

Devido o pavimento ser uma estrutura complexa e a previsão de seu desempenho ser feita a partir de uma série de simplificações a fim de facilitar sua análise, desenvolveram-se alguns métodos de dimensionamento, sendo eles os empíricos, mecanísticos e teóricos experimentais. (FERNANDES, 2016).

Para Balbo (2007), a existência de diferentes metodologias de dimensionamento está atrelada a utilização de diferentes critérios de ruptura da estrutura. O tipo de ruptura se divide em ruptura plástica, ruptura funcional e ruptura por fadiga. A ruptura plástica ocorre de forma cumulativa no decorrer da vida útil do pavimento e é relacionada ao comportamento elástico-plástico dos materiais empregados, que se deformam quando solicitados, sendo evidenciada quando as camadas inferiores possuem baixa resistência. A ruptura funcional por sua vez, caracteriza-se quando as condições de rolamento são afetadas por diferentes motivos como o surgimento de deformações plásticas em trilhas de roda que geram irregularidades superficiais ou a má aderência entre pneu e pavimento, prejudicando o conforto e segurança. A ruptura por fadiga é de natureza estrutural e resulta no fissuramento dos revestimentos betuminosos.

2.2.1 Métodos empíricos

Segundo Motta (1991), a maioria dos métodos de dimensionamento de pavimentos flexíveis têm uma forte dose de empirismo. A metodologia empírica baseia-se em experiências repetidas em campo e faz correlação do desempenho do pavimento em serviço com as propriedades dos materiais usados em sua composição. É limitada a prever a espessura adequada das camadas que garantam a não ruptura por deformação permanente.

Apresenta vantagem na facilidade de aplicação devido os ensaios de caracterização exigidos serem simples e não demandarem aparelhagem sofisticada e também no bom desempenho dos pavimentos dimensionados que possuem características semelhantes as quais o método empírico foi fundamentado. Contudo, se torna bastante limitada pelas condições de contorno como materiais utilizados, clima da região e condições de tráfego, não permitindo uma generalização para outras regiões, novos materiais e diferentes cargas aplicadas (BEZERRA NETO, 2004; MOTTA, 1991).

2.2.1.1 Método DNIT

O método de dimensionamento de pavimentos flexíveis do extinto DNER foi elaborado pelo engenheiro Murillo Lopes de Souza na década de 1960, baseado na adaptação do método de dimensionamento elaborado pelo Corpo de Engenheiro do Exército do Estados Unidos e no conceito de coeficiente de equivalência estrutural estabelecido na pista experimental da AASHTO (MEDINA; MOTTA, 2015).

Através do trabalho “*Design of Flexible Pavements Considering Mixed Loads and Traffic Volume*”, realizado por Turnbull et al. (1962), Murillo Lopes retirou gráficos para o dimensionamento de pavimentos e a determinação das equivalências de operação entre as diferentes cargas por eixo e a carga por eixo padrão, e a partir dos resultados obtidos pela AASHTO, os coeficientes de equivalência estrutural dos materiais utilizados e fatores climáticos regionais. Os valores de equivalência estrutural sofreram uma redução a favor da segurança do dimensionamento (MORAIS, 2014). Esse método pode ser dividido em três etapas principais: definição dos materiais, determinação do tráfego e dimensionamento do pavimento.

2.2.1.1.1 Definição dos materiais

A determinação da capacidade de suporte do subleito e dos materiais constitutivos do pavimento é feita pelo CBR, que é o ensaio de Índice de Suporte Califórnia (*California Bearing Ratio*) desenvolvido por O. J. Porter em 1929 para avaliar a capacidade de suporte relativa dos subleitos, comparada à de uma brita (SOUZA, 1981; MEDINA; MOTTA, 2015). O ensaio é realizado em corpos de prova indeformados ou moldados em laboratório nas condições esperadas em campo. Para garantir o bom desempenho do pavimento e a sua durabilidade, os

materiais constituintes de cada camada da estrutura devem possuir características que se enquadrem dentro das determinações do DNIT.

2.2.1.1.2 Determinação do tráfego

A determinação do tráfego rodoviário traz consigo uma certa complexidade de avaliação visto a diversidade de veículos, a variabilidade das cargas transportadas e as diferentes configurações dos pneus. No método empírico do DNIT, o pavimento é dimensionado em função do número equivalente de operações de eixo padrão (N), que é um eixo simples de rodas duplas que possui uma carga total igual a 8,2 tf ou 80 kN, durante o período de projeto escolhido (SOUZA, 1981). Através do número N as operações dos diferentes tipos de eixo são todas transformadas em operações equivalentes ao eixo padrão, padronizando os veículos de forma matemática, mas mantendo o valor destrutivo das solicitações de forma física (SILVA, 2018).

O cálculo do número N é feito empregando-se a Equação (1).

$$N = 365 \times P \times V_m \times FV \times FR \quad (1)$$

Em que:

N = número de operações do eixo padrão de 8,2 tf;

P = período de projeto em anos;

V_m = volume médio diário de tráfego durante a vida de projeto;

FV = fator de veículo da frota;

FR = fator climático regional (adota-se FR = 1,0).

O volume médio diário de tráfego V_m é calculado através da Equação (2), onde V_1 é o volume médio diário de tráfego no ano da abertura, t corresponde a taxa de crescimento anual da frota em progressão aritmética e P é o período de projeto em anos.

$$V_m = \frac{V_1 \times (2 + (P-1) \times \frac{t}{100})}{2}$$

(2)

O fator de veículo da frota é definido pela expressão:

$$FV = FC \times FE \quad (3)$$

FE é o fator de eixo e corresponde a um valor médio que indica quantos eixos possuem, em média, os caminhões da frota. Ou seja, é um número que multiplicado pelo número de veículos dá o número de eixos correspondentes. Seu cálculo é apresentado na Equação (4).

$$FE = \frac{f_1 \times 1 + f_2 \times 2 + \dots + f_n \times n}{100\%} \quad (4)$$

Em que:

f_n = frequência de veículos com “n” eixos traseiros.

FC é o fator de carga que representa um fator de equivalência para cargas médias entre toda a frota de projeto. Em outras palavras, ele transforma o poder de dano dos eixos dos vários tipos de veículos que compõem o tráfego em dano equivalente ao eixo padrão. Ele é expresso pela Equação (5).

$$FC = \frac{\sum_{i=1}^n FEC_i \times P_i}{100} \quad (5)$$

Em que:

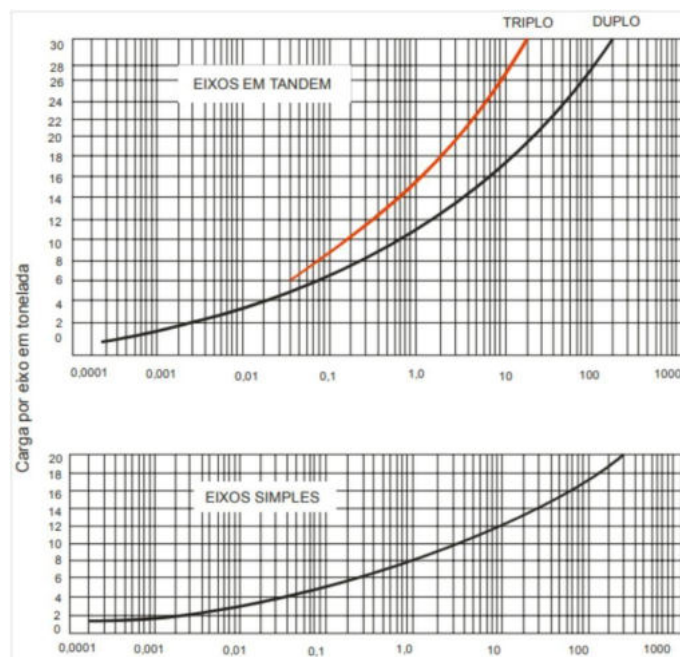
FEC_i = Fator de equivalência de cada categoria “i”;

P_i = Porcentagem que incidem cada categoria “i”.

O FEC é uma constante numérica para quantificar o dano causado no pavimento pela passagem de dado veículo ou eixo em relação ao dano causado pelo veículo ou eixo padrão adotado em projeto. A determinação dos FECs depende do conhecimento do perfil de cargas oferecido pelos eixos de veículos comerciais que circularão pela via.

Os valores dos fatores de equivalência de carga são obtidos por meio de gráficos como o apresentado na Figura 5.

Figura 5 - Curvas de Fatores de equivalência de operação.



Fonte: DNIT (2006).

O fator climático regional FR incorpora as variações de umidade dos materiais do pavimento através de uma média ponderada dos diferentes coeficientes sazonais. É indicado pelo DNIT adotar $FR=1$.

2.2.1.1.3 Dimensionamento do pavimento

O processo de dimensionamento do pavimento pode ser dividido em etapas que determinam o coeficiente de equivalência estrutural, a espessura mínima do revestimento betuminoso, a espessura total do pavimento e a espessura das camadas.

O coeficiente de equivalência estrutural é um parâmetro que representa a capacidade de um material em distribuir as tensões sobre as camadas inferiores da estrutura do pavimento. O DNIT possui recomendações de coeficientes de equivalência para alguns tipos de materiais. A espessura mínima para o revestimento asfáltico é estabelecida pelo DNIT e é determinada em função do número N. A espessura total do pavimento se dá através de uma relação entre o número N e o CBR. Já a determinação da espessura das camadas da estrutura é feita a partir da aplicação de inequações.

2.2.2 Métodos mecanístico-empíricos

Um método de dimensionamento é considerado mecanístico quando usa uma teoria para prever as tensões e deformações provenientes do tráfego e do clima que atuam na estrutura do pavimento e busca compatibilizá-las com as tensões resistentes dos materiais (MOTTA, 1991).

Pelo ponto de vista mecanístico tem-se um panorama de funcionamento da estrutura quando solicitada, permitindo modificações da natureza dos materiais constituintes e a espessura das camadas. Através desse tipo de análise, a estrutura pode ser alterada de forma a proporcionar um desempenho adequado de cada um dos materiais do pavimento, promovendo o equilíbrio na solicitação do conjunto como um todo, sem que haja uma camada sendo sobrecarregada de forma a leva-la a ruptura precoce (BEZERRA NETO, 2004).

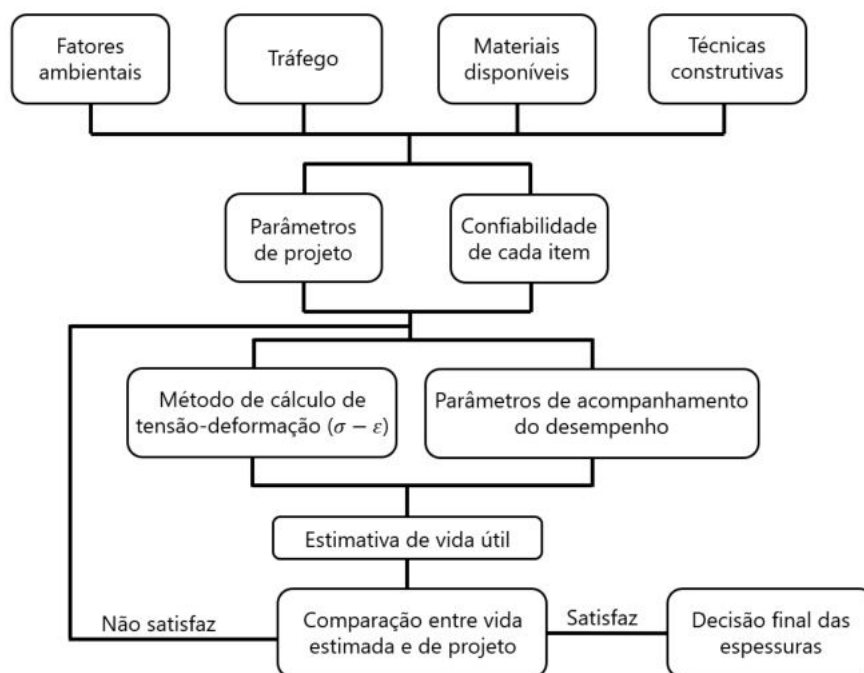
O guia da AASHTO (1986) lista as seguintes vantagens de se utilizar o método mecanístico para o dimensionamento de pavimento flexíveis:

- a) melhor confiabilidade no projeto;
- b) possibilidade de prever defeitos específicos;
- c) habilidade de extrapolação de resultados de laboratório e de campo;

- d) maior compatibilização entre custo/benefício das obras;
- e) possibilidade de estimativa das consequências de novas configurações de carregamento;
- f) melhor utilização dos materiais disponíveis;
- g) melhores procedimentos para se avaliar a possibilidades de defeitos prematuros;
- h) inclusão do envelhecimento na estimativa de desempenho, como por exemplo, o endurecimento do asfalto com o tempo, que afeta a fadiga das misturas;
- i) possibilidade de se considerar explicitamente os efeitos sazonais;
- j) melhoria do métodos de avaliação dos benefícios a longo prazo do melhoramento da drenagem dos trechos.

Segundo Medina e Motta (2015), o dimensionamento pelo método mecanístico-empírico segue os passos mostrados no fluxograma da Figura 6, onde são apresentados os dados de entrada (fatores ambientais, tráfego, materiais e técnicas construtivas), o processamento por via mecanística e os critérios de decisão que evitam que a degradação por qualquer um dos mecanismos de ruptura ultrapasse os valores estabelecidos para o trecho, antes que o N de projeto seja alcançado. O dimensionamento parte de espessuras admitidas e calcula-se o estado de tensões e deformações, que se comparam a valores limites estabelecidos. Através de um processo iterativo, chega-se a uma estrutura satisfatória.

Figura 6 - Esquema de dimensionamento mecanístico de pavimentos.



Fonte: Adaptado de Medina (2015).

2.2.2.1 Método de Dimensionamento Nacional – MeDiNa

O Método de Dimensionamento Nacional (MeDiNa) foi desenvolvido através da cooperação entre o Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR) e o Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, da Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE), além da colaboração do Centro de Pesquisas da Petrobrás (CENPES) e de diversas Universidades do Brasil. O método foi nomeado em homenagem ao engenheiro e professor Jacques de Medina, precursor da mecânica dos pavimentos no Brasil.

O MeDiNa é um programa de computador que realiza a verificação e o dimensionamento de estruturas de pavimentos mecanístico-empírico, por meio da rotina AEMC de análise de camadas elásticas de múltiplas camadas. (DNIT; IPR, 2020, p.4).

Para o emprego correto do método é necessário um amplo conjunto de informações precisas e confiáveis, como o conhecimento das características do subleito através de ensaios laboratoriais e as características e propriedades dos materiais naturais disponíveis para uso nas camadas de base, sub-base e de reforço do subleito quando necessário. Para os materiais usados, o programa pré-estabelece parâmetros mínimos para utilização.

Outra informação importante para o funcionamento do método é a definição do número equivalente de eixos (N). O programa demonstra uma alta sensibilidade quanto a pequenas variações do número N, portanto uma estimativa apurada é de grande relevância para o êxito do projeto (DNIT; IPR, 2020).

Dessa forma, vale salientar que a confiabilidade dos resultados advindos do programa MeDiNa está diretamente relacionada com a precisão dos dados fornecidos pelo projetista, em relação a estimativa do tráfego, as características e capacidade do subleito, como também dos materiais empregados nas demais camadas.

Segundo o Manual de utilização do MeDiNa (2018), as hipóteses fundamentais da solução computacional baseiam-se nas mesmas hipóteses consideradas na solução de problemas de elasticidade linear em sistemas contínuos de múltiplas camadas, sendo elas:

- a) os materiais são elásticos lineares, isotrópicos e homogêneos (a modelagem elástica não linear é feita por iterações elásticas lineares);
- b) a lei de Hooke é válida e o módulo de compressão é semelhante ao módulo de tração;
- c) as camadas são ilimitadas na direção horizontal;
- d) todas as camadas possuem uma espessura finita, à exceção da camada inferior que é considerada semi-infinita;
- e) a superfície da camada superior não está sujeita a tensões fora da área carregada;

- f) na área carregada ocorrem apenas tensões normais;
- g) a carga aplicada é considerada estática, uniformemente distribuída em toda a área circular de contato;
- h) a grandes profundidades as tensões e deformações são nulas;
- i) as condições de aderência na interface das camadas podem variar de totalmente aderida para lisa ou sem aderência (IPR; DNIT, 2020, p. 6).

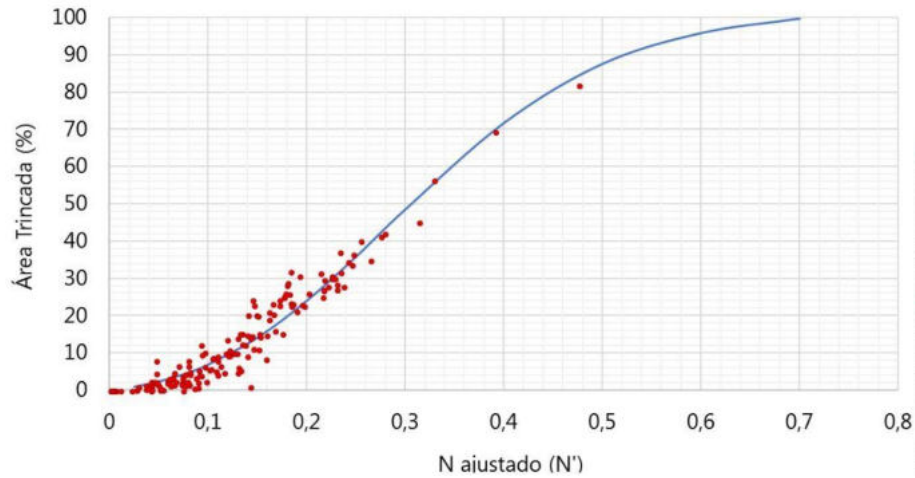
O MeDiNa possui uma sub-rotina para o cálculo das tensões e deformações no interior do pavimento denominado AEMC (Análise Elástica de Múltiplas Camadas) que faz uma modelagem física similar a teoria de molas, permitindo o movimento horizontal relativo na interface entre duas camadas. Esse tipo de solução combina carregamentos com mais de uma roda, por meio do princípio da superposição e da hipótese de elasticidade linear. Também é possível obter os resultados de tensão, deformação e deslocamentos em qualquer ponto da estrutura (DNIT; IPR, 2020).

Para a definição das informações de tráfego, como já falado, o programa usa as informações coletadas para o projeto junto ao conceito do número equivalente N para os cálculos. É adotado o eixo padrão rodoviário, em função da calibração dos modelos de fadiga que se baseou na comparação da evolução da área trincada com o número estimado de passagens do eixo padrão. Quanto ao carregamento, a carga da roda é assumida como sendo uniformemente distribuída em uma área de contato circular entre o pneu e a superfície do revestimento e a pressão de contato entre o pneu e o pavimento como igual à pressão de inflação dos pneus (DNIT; IPR, 2020).

De acordo com o manual, a calibração dos danos por fadiga em termos de área trincada utilizada no programa MeDiNa é uma atualização baseada no trabalho de Fritzen (2016).

A evolução da área trincada é representada por uma curva sigmoideal. Através dos estudos de Fritzen, foi obtida a curva sigmoide cujo melhor ajuste apresentou os parâmetros Z e n iguais a 0,25 e 5,0 respectivamente, com um coeficiente de determinação $r^2=0,82$, como mostrado a seguir (FIGURA 7) (DNIT; IPR, 2020).

Figura 7 - Curva sigmoide ajustada.



Fonte: DNIT; IPR (2020).

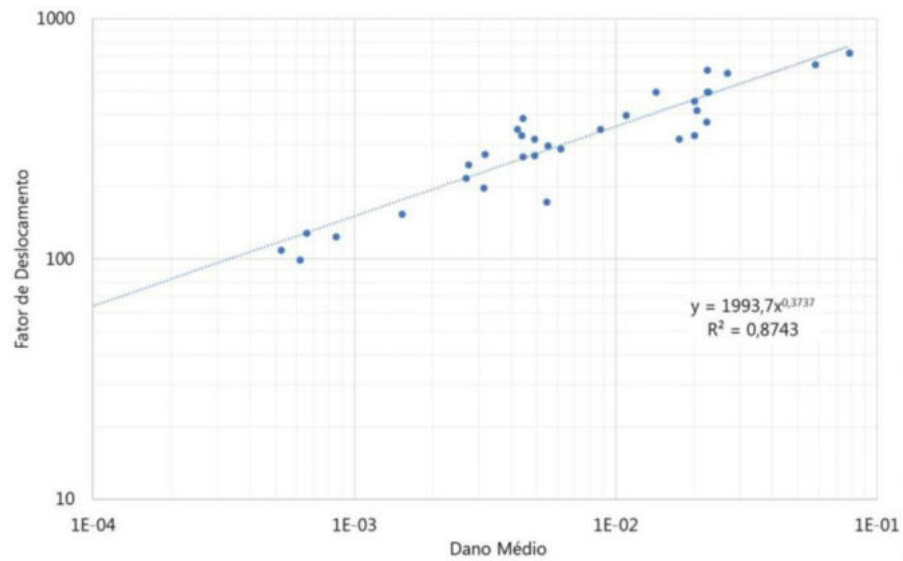
Na sequência, foi correlacionado os dados da área trincada, no caso, os fatores de deslocamento de cada seção, com o dano médio de fadiga dos pontos da calibração de Fritzen. O dano médio foi estimado em uma malha distribuída em 20 pontos do revestimento e calculado através da divisão de uma aplicação do eixo de carga padrão pelo número permissível de aplicações de eixos de carga N , expresso pela Equação 6.

$$D_{\text{médio}} = \frac{1}{20} \sum \frac{1}{N_f} \quad (6)$$

O dano médio é transformado em vinte pontos em área trincada através da função de transferência por meio das constantes $C1$ e $C2$. A expressão da Função Deslocamento, equação 7, fornece os valores para as constantes $C1$ e $C2$ de 1993,7 e 0,3737 respectivamente, e sua correlação com o dano médio é apresentada no gráfico da Figura 8. (DNIT; IPR, 2020).

$$fS = C1 \times (D_{\text{médio}})^{C2} \quad (7)$$

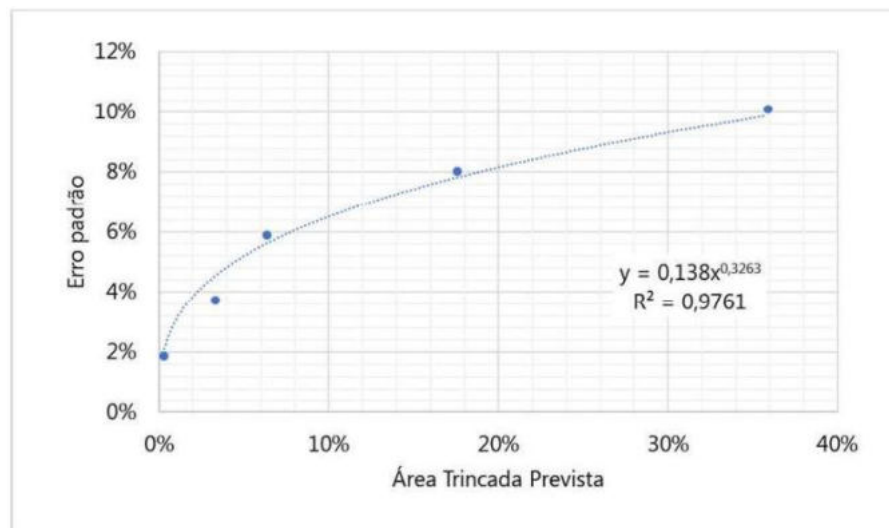
Figura 8 - Curva de calibração da Função de Deslocamento.



Fonte: DNIT; IPR (2020).

O erro da função transferência (FT) é dado pela diferença de área prevista com área observada em cada segmento utilizado na calibração e pode ser fornecido através da regressão apresentada na Figura 9.

Figura 9 - Regressão de obtenção do erro da nova função transferência.



Fonte: DNIT; IPR (2020).

Como validação, foi feito o estudo de trechos de outros locais do país e os erros apresentados entre o previsto pela calibração e os observados em campo ficaram dentro das confiabilidades previstas no MeDiNa (DNIT; IPR, 2020).

O MeDiNa também conta com outro programa chamado BackMeDiNa que realiza a retroanálise dos módulos de resiliência das camadas de um pavimento a partir das bacias

deflectométricas obtidas com o FWD (*Falling Weight Deflectometer*). O cálculo dos módulos de resiliência é feito através de um processo iterativo, utilizando o módulo AEMC para análise elástica linear, por meio da variação dos valores dos módulos em torno de um valor central até que seja obtida a bacia teórica mais próxima da bacia de deflexões de campo medida pelo FWD (DNIT; IPR, 2020).

2.3 Mecanismos de degradação do pavimento

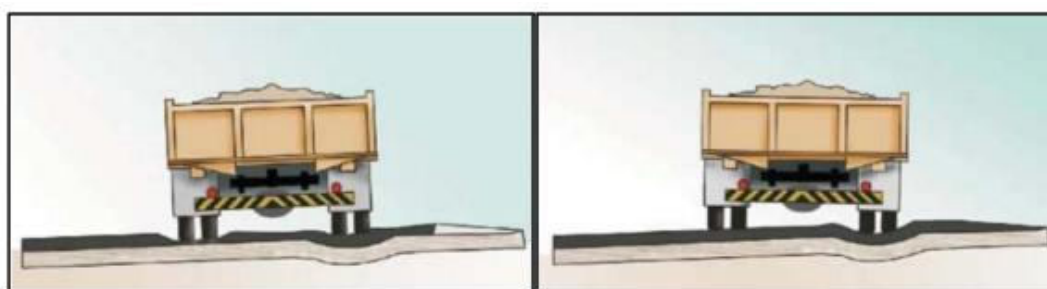
Os mecanismos de degradação são os meios pelos quais o pavimento se deteriora conforme passa sua vida útil. Os pavimentos brasileiros enfrentam dois principais mecanismos de degradação, a deformação permanente e a fadiga (MEDINA; MOTTA, 2015).

2.3.1 Deformação permanente

Segundo Medina e Motta (2015) o defeito mais frequente nos pavimentos flexíveis brasileiros é o trincamento da camada superior de concreto betuminoso, ocasionado pela flexão alternada da camada superficial apoiada em camadas granulares, que são, geralmente, bastante deformáveis elasticamente.

Porém, há outro defeito que ocorre comumente conhecido como deformação permanente. Esse tipo de deformação ocorre no regime plástico, sendo dessa forma, irreversíveis. A deformação permanente acontece devido a ação de uma carga de tráfego que solicita o pavimento, induzindo uma deformação em todas as camadas da estrutura. O efeito da deformação permanente é caracterizado pelo surgimento de afundamentos ao longo da trilha de roda, que além de prejudicarem a serventia das estradas, afetam a segurança do tráfego pois podem acumular água, dificultando a governabilidade dos veículos (FIGURA 10) (HARTMANN, 2009).

Figura 10 - Esquema de deformação permanente.



Fonte: Bernucci *et. al.* (2010).

A causa desse defeito não está relacionada ao dimensionamento da estrutura em si, mas à dosagem das misturas asfálticas, que devem resistir às ações dos esforços do tráfego e à ação climática. O estudo das deformações permanentes ainda é um aspecto nebuloso; embora a medição em campo do afundamento da trilha de roda ser simples, a sua previsão é bastante complexa. A análise do problema envolve não só a caracterização dos materiais como também a avaliação do impacto das condições ambientais e do cálculo das tensões durante toda a vida útil do pavimento, sendo assim necessário o conhecimento dos mecanismos de deformação de cada um dos materiais que compõem as camadas da estrutura (FRANCO, 2007).

De acordo com Medina e Motta (2015), em alguns países o valor admissível do afundamento de trilha de roda para autoestradas é de 10mm, e para estradas de menor volume de tráfego pode chegar a 16mm. Caso atinja-se 20mm, é recomendado o reparo imediato da estrutura.

2.3.2 Fadiga

A fadiga é o fenômeno de degradação estrutural, progressivo e localizado, que sofre um material submetido a tensões ou deformações repetidas, inferiores a sua resistência última, podendo culminar na fissuração ou ruptura completa do material após um número suficiente de repetições (BEZERRA NETO, 2004, p. 23).

O trincamento principia onde as tensões são maiores. O revestimento asfáltico é solicitado à flexão pelas cargas das rodas dos veículos e as trincas se iniciam, geralmente, na parte inferior do revestimento, se propagando para cima até atingir a superfície (FIGURA 11). Em revestimentos muito espessos, com 20cm ou mais, as trincas podem se iniciar pela superfície (MEDINA; MOTTA, 2015).

O problema é agravado quando há a passagem de água da superfície para a estrutura, comprometendo a resistência das camadas e reduzindo o desempenho global do pavimento. O trincamento por fadiga também pode gerar o surgimento de “panelas”, aberturas no revestimento que causam a exposição da base, que ocorrem quando os componentes do revestimento se separam do material adjacente (HARTMANN, 2009).

Para Bezerra Neto (2004), a vida de fadiga das misturas asfálticas é influenciada pela magnitude das cargas, número de aplicações de carga, tipo e teor de CAP usado na mistura, granulometria do agregado, volume de vazios da mistura, temperatura de serviço, entre outros.

Figura 11 - Exemplo de dano por fadiga em pavimento asfáltico.



Fonte: Franco (2007).

3 METODOLOGIA

Nesta seção serão apresentados os materiais utilizados para o dimensionamento das estruturas de pavimentos flexíveis e a descrição das metodologias de dimensionamento utilizadas.

3.1 Materiais para a estrutura do pavimento

Para aplicação das metodologias empíricas e mecanístico-empíricas de dimensionamento de pavimentos, foram selecionados materiais para composição de cinco diferentes estruturas, compostas pelas camadas de revestimento, base, sub-base e subleito. Os materiais constituintes das estruturas são provindos do banco de dados do programa MeDiNa. Para todas as estruturas foi considerado o mesmo subleito e mesmo revestimento. A Tabela 1 traz as cinco estruturas montadas com seus respectivos materiais.

Tabela 1- Composição de materiais das estruturas.

Camada	Material	
	Estrutura 01	Estrutura 02
Revestimento	RJ CAP 50/70 #12,5mm Sepetiba	RJ CAP 50/70 #12,5mm Sepetiba
Base	Brita graduada – Gnaisse C5	Brita graduada – Gnaisse C4
Sub-base	Solo argiloso LG'(1)	Solo NG'(s:1494)
Subleito	Solo siltoso NS'	Solo siltoso NS'
	Estrutura 03	Estrutura 04
Revestimento	RJ CAP 50/70 #12,5mm Sepetiba	RJ CAP 50/70 #12,5mm Sepetiba
Base	Brita graduada – Gnaisse C7	Solo argiloso LG'(4)
Sub-base	Solo areno-argiloso LG'(2)	Solo argiloso LG'(1)
Subleito	Solo siltoso NS'	Solo siltoso NS'
	Estrutura 05	
Revestimento	RJ CAP 50/70 #12,5mm Sepetiba	
Base	Solo brita M5 (LG' s:1521)	
Sub-base	Solo areno-argiloso LG'(2)	
Subleito	Solo siltoso NS'	

Fonte: Do autor (2023).

3.1.1 Correlação entre CBR e Módulo de Resiliência

O módulo de resiliência (MR) é um parâmetro que representa o comportamento mecânico dos materiais quanto às repetidas solicitações de cargas. O módulo de resiliência é utilizado no dimensionamento mecânico das camadas do pavimento e afere as deflexões de uma estrutura sujeita a esforços de movimentação cíclica, estimando os valores para uma vida útil satisfatória (MEDINA; MOTTA, 2015).

Para a realização do trabalho, foi utilizada uma correlação entre CBR e MR, para encontrar o CBR dos materiais empregados. Foi aplicada a proposta de correlação elaborada por Powell (1996), apresentada pela Equação (8).

$$MR (MPa) = 17,48 * CBR^{0,64} \quad (8)$$

A Tabela 2 mostra os resultados da correlação. Todos os materiais apresentaram valores de CBR permitidos para uso segundo as determinações do método do DNIT.

Tabela 2 - Valores de MR e CBR dos materiais empregados.

Material	Módulo de Resiliência (MPa)	CBR (%)
Brita graduada – Gnaisse C5	381	123,37
Brita graduada – Gnaisse C4	311	89,84
Brita graduada – Gnaisse C7	350	108,05
Solo argiloso LG'(4)	435	151,76
Solo brita M5 (LG' s:1521)	385	125,40
Solo argiloso LG'(1)	250	63,87
Solo NG'(s:1494)	303	86,25
Solo areno-argiloso LG'(2)	248	63,08
Solo argiloso LG'(1)	250	63,87
Solo areno-argiloso LG'(2)	248	63,08
Solo siltoso NS'	189	41,26

Fonte: Do autor (2023).

3.2 Dimensionamento pelo método do DNIT

Dimensionamento dos pavimentos pela metodologia empírica empregada pelo DNIT.

3.2.1 Definição dos materiais

Para garantir o bom desempenho do pavimento e a sua durabilidade, os materiais constituintes de cada camada da estrutura devem possuir as características apresentadas na Tabela 3, de acordo com DNIT (2006).

Tabela 3 - Especificações dos materiais para as camadas do pavimento.

Camadas	Recomendação DNIT (2006)
Material do subleito	CBR \geq 2% Expansão menor que 2%
Material para reforço do subleito	CBR maior que o do subleito Expansão menor que 1%
Material para sub-base	CBR \geq 20% Expansão menor que 1% Índice de Grupo (IG) = 0
Material para base	CBR \geq 80% Expansão menor que 0,5% LL \leq 25% IP \leq 6%

Fonte: Adaptado de DNIT (2006).

3.2.2 Determinação do tráfego

Pela metodologia empírica apresentada no método do DNIT, o dimensionamento do pavimento é feito em função do número equivalente (N) de operações de eixo padrão, que é um eixo simples de rodas duplas que possui uma carga total igual a 8,2 tf ou 80kN.

Para o presente trabalho, como não é contemplado um trecho de análise real, foi estabelecido um número N igual a $1,10 \times 10^7$, com Volume Médio Diário (VMD) igual a 3.000,00, valor adotado para gerar o N de interesse, e tipo de via sistema arterial primário.

3.2.3 Coeficiente de equivalência estrutural

Um parâmetro necessário para o dimensionamento é o coeficiente de equivalência estrutural para os diferentes materiais constituintes do pavimento. Na Tabela 4 são apresentados diferentes coeficientes de acordo com as recomendações do DNIT.

Tabela 4 - Coeficiente de equivalência estrutural.

Componentes do pavimento	Coeficiente K
Base ou revestimento de concreto betuminoso	2,00
Base ou revestimento pré-misturado a quente, de graduação densa	1,70
Base ou revestimento pré-misturado a frio, de graduação densa	1,40
Base ou revestimento betuminoso por penetração	1,20
Camadas granulares	1,00
Solo cimento com resistência à compressão a 7 dias, superior a 45kg/cm	1,70
Idem, com resistência à compressão a 7 dias, entre 45kg/cm e 28kg/cm	1,40
Idem, com resistência à compressão a 7 dias, entre 28kg/cm e 21kg/cm	1,20

Fonte: DNIT (2006).

Os coeficientes de equivalência estruturais são designados de forma genérica como:

Revestimento: K_r ;

Base: K_b ;

Sub-base: K_s ;

Reforço do Subleito: K_{ref} .

3.2.4 Espessura mínima do revestimento betuminoso

O método do DNIT estabelece uma espessura mínima para o revestimento asfáltico em função do tráfego, ou seja, do número de repetições de cargas equivalentes N. Os valores são apresentados a seguir na Tabela 5.

Tabela 5 – Espessura mínima de revestimento betuminoso.

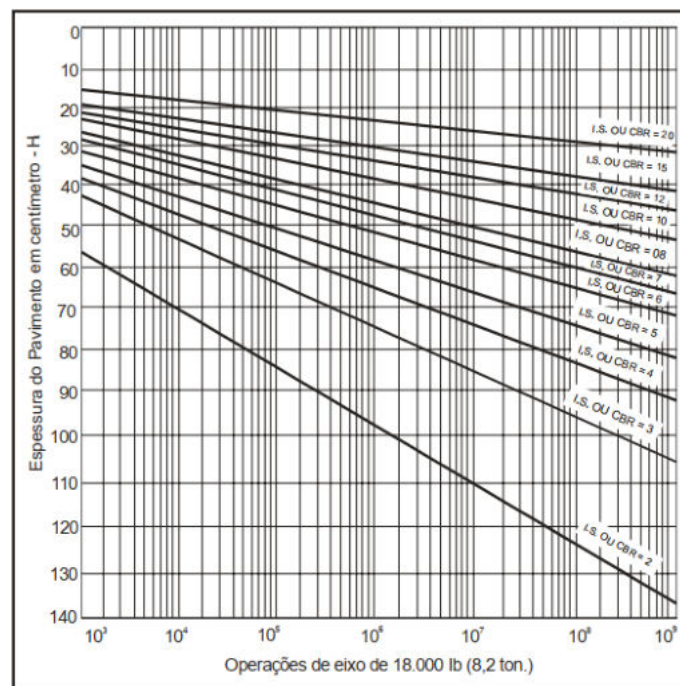
N	Espessura Mínima de Revestimento Betuminoso
$N \leq 10^6$	Tratamentos superficiais betuminosos
$10^6 < N \leq 5 \times 10^6$	Revestimentos betuminosos com 5,0 cm de espessura
$5 \times 10^6 < N \leq 10^7$	Concreto betuminosos com 7,5 cm de espessura
$10^7 < N \leq 5 \times 10^7$	Concreto betuminosos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

Fonte: DNIT (2006).

3.2.5 Espessura total do pavimento

A obtenção da espessura total do pavimento (H_m) e da espessura de proteção da sub-base (H_{20}) são feitas através da relação entre N e o CBR dada pelo gráfico apresentado na Figura 12. A espessura fornecida pelo gráfico é em termos de base granular, material com $K=1,00$. No eixo das abscissas entra-se com o valor de N , procede-se verticalmente até interceptar a reta correspondente ao CBR, procede-se horizontalmente a partir da interseção e encontra-se o valor da espessura total no eixo das ordenadas (SOUZA, 1981).

Figura 12 - Determinação de espessuras do pavimento.



Fonte: DNIT 2006.

3.2.6 Espessura das camadas

Após determinadas a espessura total do pavimento e a espessura mínima do revestimento betuminoso, podem ser obtidas as espessuras das demais camadas que compõem a estrutura, apresentadas na Figura 13, através da aplicação de inequações, considerando-se os materiais disponíveis para uso em cada uma delas e seus respectivos coeficientes de equivalência estrutural.

As espessuras das camadas são obtidas pela resolução sucessiva das seguintes inequações:

$$RK_R + BK_B \geq H_{20} \quad (9)$$

$$RK_R + BK_B + h_{20}K_S \geq H_n \quad (10)$$

$$RK_R + BK_B + h_{20}K_S + h_n K_{Ref} \geq H_m \quad (11)$$

Em que:

R: espessura do revestimento;

B: espessura da base;

H_{20} : espessura de pavimento necessária para proteger a sub-base;

h_{20} : espessura da sub-base;

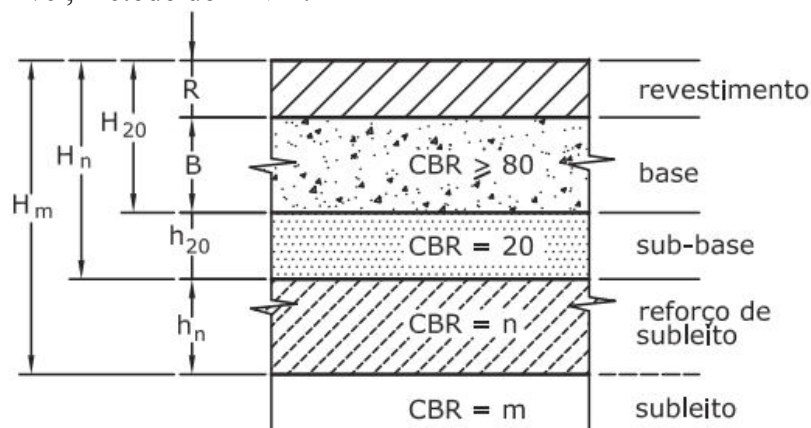
H_n : espessura de pavimento necessária para proteger o reforço do subleito;

h_n : espessura do reforço do subleito;

H_m : espessura total de pavimento.

Os valores de H_{20} , H_n e H_m são determinados através do ábaco da Figura 12.

Figura 13 - Simbologia das inequações do cálculo das espessuras das camadas do pavimento flexível, método do DNIT.



Fonte: Medina e Motta (2015).

3.3 Dimensionamento pelo método MeDiNa

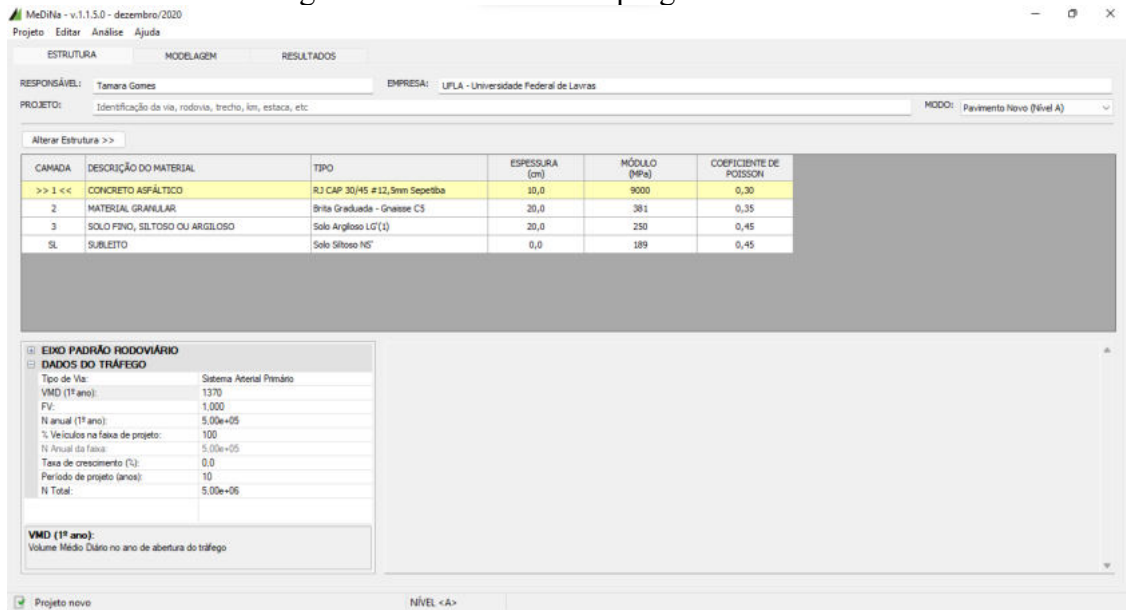
Dimensionamento dos pavimentos pela metodologia mecanístico-empírica empregada pelo MeDiNa.

3.3.1 Início do projeto

O dimensionamento da estrutura do pavimento pelo método mecanístico-empírico escolhido, método MeDiNa, se dá através da aplicação do software MeDiNa. Em sua interface inicial são apresentadas quatro diferentes abas, sendo elas “Estrutura”, “Modelagem” e “Resultados”. Logo quando iniciado, o programa mostra a aba de “Estrutura”, que possui quatro

componentes que permitem a entrada das informações de projeto, sendo eles a área de identificação do projeto, uma tabela para entrada de dados da estrutura do pavimento, como suas camadas, espessuras e materiais constituintes, uma tabela para entrada de dados sobre o tráfego e um painel ao lado direito onde são apresentados o resumo dos resultados das análises ou dimensionamentos (FIGURA 14).

Figura 14 - Tela inicial do programa MeDiNa.



Fonte: Do autor (2023).

Antes das informações do projeto serem adicionadas, é necessário definir em qual modo o programa irá tratar os dados, estando disponíveis dois modos: Pavimento Novo e Projeto de Reforço. Essa definição é feita clicando no menu “Projeto”, no canto superior esquerdo.

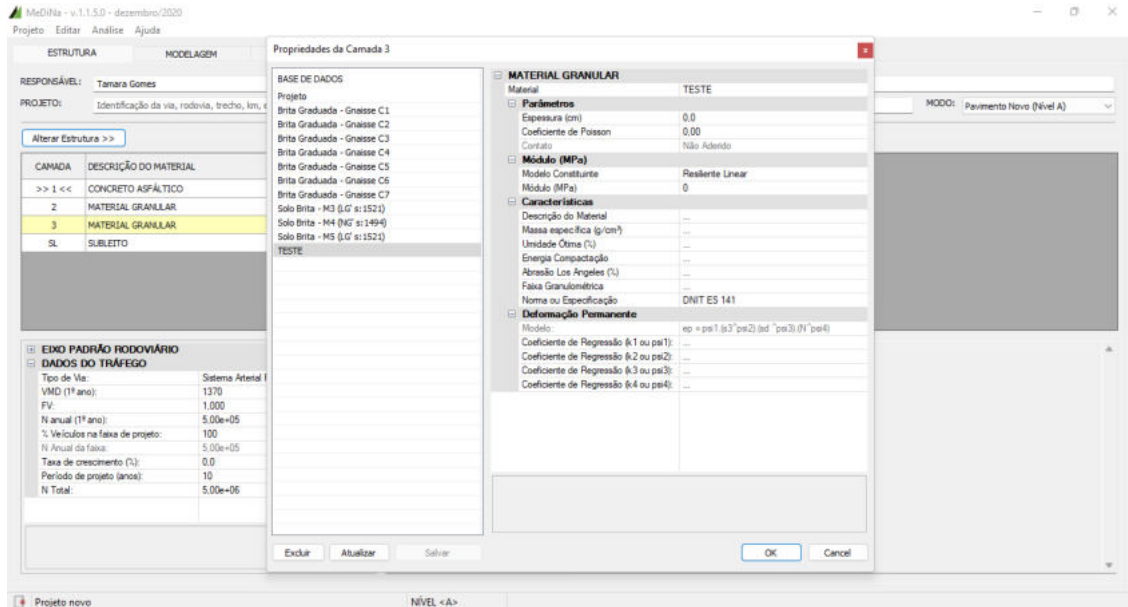
Para o dimensionamento realizado nesse estudo é utilizado o modo “Pavimento Novo”. Primeiro foram inseridos os materiais das quatro camadas estruturais, com suas respectivas propriedades. Em seguida foi adicionado o valor do número N nos dados de tráfego, sendo ele $N=1,10 \times 10^7$, padronizado para todas as estruturas em estudo.

3.3.2 Materiais da estrutura

O software MeDiNa já possui uma base de dados de materiais cadastrados com suas características obtidas a partir de ensaios. Para selecionar o material, basta dar um duplo click em cima do nome do material na camada de desejo e as opções do banco de dados são apresentadas, como mostra a Figura 15. O programa permite que novos materiais sejam adicionados.

Os materiais selecionados para o desenvolvimento do trabalho são apresentados na seção 3.1.

Figura 15 - Definição de materiais da estrutura no programa MeDiNa.



Fonte: Do autor (2023).

3.3.3 Tráfego

Pelo programa é possível calcular automaticamente o número equivalente de passagens do eixo padrão a partir do Volume Médio Diário (VMD) e do Fator de Veículo (FV). A partir desses dois valores é calculado o Número Anual Equivalente de Eixos (N anual) que também pode ser fornecido pelo projetista.

Para o presente trabalho, foi estabelecido um número N padrão de $1,10 \times 10^7$, dessa forma, os valores de VMD e FV foram adotados de forma a fornecer esse valor, visto que não é possível inserir diretamente o valor do número N (FIGURA 16).

Figura 16 - Dados do tráfego pelo programa MeDiNa.

EIXO PADRÃO RODOVIÁRIO	
DADOS DO TRÁFEGO	
Tipo de Via:	Sistema Arterial Primário
VMD (1º ano):	3000
FV:	1,000
N anual (1º ano):	1,10e+06
% Veículos na faixa de projeto:	100
N Anual da faixa:	1,10e+06
Taxa de crescimento (%):	0,0
Período de projeto (anos):	10
N Total:	1,10e+07

Fonte: Do autor (2023).

3.3.4 Dimensionamento e análise da estrutura

As estruturas foram montadas com a escolha dos materiais constituintes de cada combinação, presentes no próprio banco de dados do programa. Os dados de tráfego foram inseridos, tendo em vista um valor de N já determinado.

Na aba “Análise” foi selecionada inicialmente a opção “Dimensionar” que, através das espessuras de base e sub-base inseridas, forneceu a espessura da camada de revestimento necessária. Posteriormente na mesma aba, foi selecionada a opção “Avaliar a estrutura”, que promove resultados do dimensionamento frente aos critérios de parada. Realizando-se configurações diferentes de espessuras das camadas, chegou-se à solução que atendia os critérios de parada de área trincada e afundamento de trilha de roda com o melhor custo-benefício.

3.3.5 Critérios de parada

O MeDiNa possui critérios de parada e grau de confiabilidade das análises realizadas, que são definidos pelo tipo de vias que está sendo analisado. A Tabela 6 apresenta os critérios e a confiabilidade de cada via.

Tabela 6 – Critérios e confiabilidade dos tipos de vias.

TIPO DE VIA	CONFIABILIDADE	ÁREA TRINCADA	DEF. PERMANENTE
Sistema Arterial Principal	95%	30%	10 mm
Sistema Arterial Primário	85%	30%	13 mm
Sistema Arterial Secundário	75%	30%	20 mm
Sistema Coletor Primário	85%	30%	13 mm
Sistema Coletor Secundário	75%	30%	20 mm
Sistema Local	65%	30%	20 mm

Fonte: Manual de Utilização do programa MeDiNa (2020).

Para o trabalho em questão foi adotada uma via do tipo arterial primário que possui grau de confiabilidade de 85%, área trincada de 30% e deformação permanente de 13mm. Esses parâmetros são utilizados na avaliação das espessuras das camadas, se estas estão dentro dos limites de dimensionamento.

3.3.6 Relatórios

Após análise e dimensionamento da estrutura, o programa gera três tipos de relatórios na aba “Resultados” sobre a evolução mensal dos danos, o resumo da deformação permanente e as bacias de deflexão. Por fim, o programa também gera o “Relatório Completo da Análise”, onde constam todas as informações utilizadas no dimensionamento ou na análise da estrutura.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados do dimensionamento dos pavimentos pelas duas metodologias são apresentados a seguir.

4.1 Dimensionamento pelo método do DNIT

O valor de N foi predefinido sendo igual a $1,10 \times 10^7$ para as cinco estruturas. Em seguida, foram determinados os coeficientes de equivalência estrutural para o revestimento, base e sub-base, e a espessura da camada de revestimento. Os resultados para ambos os parâmetros foram iguais para as cinco estruturas e são apresentados na Tabela 7 e Tabela 8.

Tabela 7 - Coeficientes de equivalência estrutural das camadas dos pavimentos.

K_r	K_b	K_s
2,00	1,00	1,00

Fonte: Do autor (2023).

Tabela 8 – Espessura da camada de revestimento.

Camada	Espessura (cm)
Revestimento (R)	10,00

Fonte: Do autor (2023).

A espessura total do pavimento (H_m) e a espessura necessária para proteger a sub-base (H_{20}) foram determinadas pelo ábaco da Figura 12. Seus resultados são apresentados nas Tabelas 9 e 10.

Tabela 9 - Resultados de H_m e H_{20} dos pavimentos “continua”.

CBR (%)	H	Espessura (cm)
Estrutura 01		
41,26	H_m	26,00
63,87	H_{20}	26,00
Estrutura 02		
41,26	H_m	26,00
86,25	H_{20}	26,00
Estrutura 03		
41,26	H_m	26,00
63,08	H_{20}	26,00

Fonte: Do autor (2023).

Tabela 10 - Resultados de H_m e H_{20} dos pavimentos “conclusão”.

Estrutura 04		
41,26	H_m	26,00
63,87	H_{20}	26,00
Estrutura 05		
41,26	H_m	26,00
63,08	H_{20}	26,00

Fonte: Do autor (2023).

Após isso, foi possível calcular as espessuras das camadas de base (B) e sub-base (h_{20}) aplicando-se as equações 9 e 11. Vale ressaltar que foi usada a recomendação onde, para $N > 10^7$, substitui-se H_{20} na inequação 9 por $1,2 * H_{20}$. Pelo fato de todas as cinco estruturas possuírem o mesmo N, o mesmo subleito e os materiais constituintes da sub-base terem o CBR maior que 20%, o resultado das espessuras das camadas dimensionadas pelo método do DNIT foi o mesmo para os cinco pavimentos, repercutindo em estruturas iguais. O resultado dos dimensionamentos dos pavimentos é apresentado na Tabela 11.

Tabela 11 - Resultado das estruturas dimensionadas pelo método do DNIT.

Camada	Espessura calculada (cm)	Espessura adotada (cm)
Revestimento	10,00	10,00
Base	11,20	15,00
Sub-base	-9,00	15,00
Subleito	∞	∞

Fonte: Do autor (2023).

A espessura inicial calculada para a base foi de 11,20cm, esse valor foi ajustado para 15,00cm que é o mínimo recomendado pelo método. A espessura calculada para a sub-base foi de -9,00cm. O valor negativo mostra que a camada de sub-base não é necessária ao pavimento, que apenas a camada de revestimento junto a camada de base é suficiente para o desempenho da estrutura. Isso se deve a qualidade do material usado como base, que possui um alto valor de CBR. Contudo, foi adotado o valor mínimo de 15,00cm para espessura da sub-base para uma melhor comparação com a metodologia mecanístico-empírica.

4.2 Dimensionamento pelo método MeDiNa

Inicialmente, foram introduzidos os dados de tráfego no programa, como mostra a Figura 17.

Figura 17 – Dados do tráfego.

EIXO PADRÃO RODOVIÁRIO	
DADOS DO TRÁFEGO	
Tipo de Via:	Sistema Arterial Primário
VMD (1º ano):	3000
FV:	1,000
N anual (1º ano):	1,10e+06
% Veículos na faixa de projeto:	100
N Anual da faixa:	1,10e+06
Taxa de crescimento (%):	0,0
Período de projeto (anos):	10
N Total:	1,10e+07

Fonte: Do autor (2023).

Em seguida, foram definidas as estruturas dos pavimentos selecionando os materiais das camadas e sua espessura inicial. As cinco estruturas são apresentadas na Figura 18 até a Figura 22.

Figura 18 - Configuração da Estrutura 01.

CAMADA	DESCRIÇÃO DO MATERIAL	TIPO	ESPESSURA (cm)	MÓDULO (MPa)	COEFICIENTE DE POISSON
>> 1 <<	CONCRETO ASFÁLTICO	RJ CAP 50/70 #12,5mm Sepetiba	15,0	8289	0,30
2	MATERIAL GRANULAR	Brita Graduada - Gnaisse C5	25	381	0,35
3	SOLO FINO, SILTOSO OU ARGILOSO	Solo Argiloso LG(1)	30	250	0,45
SL	SUBLEITO	Solo Siltoso NS'	0,0	189	0,45

Fonte: Do autor (2023).

Figura 19 - Configuração da Estrutura 02.

CAMADA	DESCRIÇÃO DO MATERIAL	TIPO	ESPESSURA (cm)	MÓDULO (MPa)	COEFICIENTE DE POISSON
>> 1 <<	CONCRETO ASFÁLTICO	RJ CAP 50/70 #12,5mm Sepetiba	15,0	8289	0,30
2	MATERIAL GRANULAR	Brita Graduada - Gnaisse C4	30,0	311	0,35
3	SOLO FINO, SILTOSO OU ARGILOSO	Solo NG' (s:1494)	35,0	303	0,45
SL	SUBLEITO	Solo Siltoso NS'	0,0	189	0,45

Fonte: Do autor (2023).

Figura 20 - Configuração da Estrutura 03.

MeDiNa - v.1.1.5.0 - dezembro/2020

Projeto Editar Análise Ajuda

ESTRUTURA MODELAGEM RESULTADOS

RESPONSÁVEL: Tamara Gomes EMPRESA: UFLA

PROJETO: Estrutura 03 MODO: Pavimento Novo (Nível A)

Alterar Estrutura >>

CAMADA	DESCRIÇÃO DO MATERIAL	TIPO	ESPESSURA (cm)	MÓDULO (MPa)	COEFICIENTE DE POISSON
>> 1 <<	CONCRETO ASFÁLTICO	RJ CAP 50/70 #12,5mm Sepetiba	15,0	8289	0,30
2	MATERIAL GRANULAR	Brita Graduada - Gnaisse C7	30,0	350	0,35
3	SOLO FINO, SILTOSO OU ARGILOSO	Solo Areno-argiloso LG'(2)	30,0	248	0,45
SL	SUBLEITO	Solo Siltoso NS'	0,0	189	0,45

Fonte: Do autor (2023).

Figura 21 - Configuração da Estrutura 04.

MeDiNa - v.1.1.5.0 - dezembro/2020

Projeto Editar Análise Ajuda

ESTRUTURA MODELAGEM RESULTADOS

RESPONSÁVEL: Tamara Gomes EMPRESA: UFLA

PROJETO: Estrutura 04 MODO: Pavimento Novo (Nível A)

Alterar Estrutura >>

CAMADA	DESCRIÇÃO DO MATERIAL	TIPO	ESPESSURA (cm)	MÓDULO (MPa)	COEFICIENTE DE POISSON
>> 1 <<	CONCRETO ASFÁLTICO	RJ CAP 50/70 #12,5mm Sepetiba	15,0	8289	0,30
2	SOLO FINO, SILTOSO OU ARGILOSO	Solo Argiloso LG'(4)	20,0	435	0,45
3	SOLO FINO, SILTOSO OU ARGILOSO	Solo Argiloso LG'(1)	20,0	250	0,45
SL	SUBLEITO	Solo Siltoso NS'	0,0	189	0,45

Fonte: Do autor (2023).

Figura 22 - Configuração da Estrutura 05.

MeDiNa - v.1.1.5.0 - dezembro/2020

Projeto Editar Análise Ajuda

ESTRUTURA MODELAGEM RESULTADOS

RESPONSÁVEL: Tamara Gomes EMPRESA: UFLA

PROJETO: Estrutura 05 MODO: Pavimento Novo (Nível A)

Alterar Estrutura >>

CAMADA	DESCRIÇÃO DO MATERIAL	TIPO	ESPESSURA (cm)	MÓDULO (MPa)	COEFICIENTE DE POISSON
>> 1 <<	CONCRETO ASFÁLTICO	RJ CAP 50/70 #12,5mm Sepetiba	15,0	8289	0,30
2	MATERIAL GRANULAR	Solo Brita - M5 (LG' s: 1521)	25,0	385	0,35
3	SOLO FINO, SILTOSO OU ARGILOSO	Solo Areno-argiloso LG'(2)	30,0	248	0,45
SL	SUBLEITO	Solo Siltoso NS'	0,0	189	0,45

Fonte: Do autor (2023).

Após a inserção de todos os dados necessários no software MeDiNa, foi realizado o dimensionamento da estrutura e sua avaliação, onde foram fornecidas as seguintes observações, apresentadas na Figura 23 até a Figura 27, para cada estrutura.

Figura 23 - Análise da Estrutura 01.

--- 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: 30,0%
 Afundamento de Trilha de Roda: 3,1mm

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

Fonte: Do autor (2023).

Figura 24 - Análise da Estrutura 02.

--- 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: 29,8%
 Afundamento de Trilha de Roda: 2,8mm

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

Fonte: Do autor (2023).

Figura 25 - Análise da Estrutura 03.

--- 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: 29,7%
 Afundamento de Trilha de Roda: 4,3mm

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

Fonte: Do autor (2023).

Figura 26 - Análise da Estrutura 04.

--- 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: 29,9%
 Afundamento de Trilha de Roda: 1,9mm

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

Fonte: Do autor (2023).

Figura 27 - Análise da Estrutura 05.

--- 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: 29,9%
Afundamento de Trilha de Roda: 4,9mm

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

Fonte: Do autor (2023).

Vale ressaltar que foram feitas tentativas variando-se as espessuras das camadas da estrutura até chegar na melhor configuração, respeitando os critérios de parada para a via do tipo arterial primário, sendo eles área trincada máxima de 30% e deformação permanente (afundamento de trilha de roda) de 13mm.

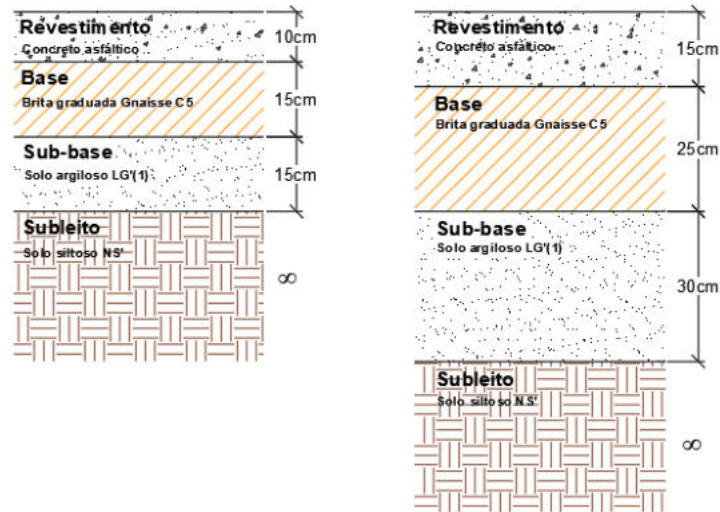
Os relatórios de dimensionamento das estruturas fornecido pelo programa são apresentados no Anexo A até o Anexo E.

4.3 Comparativo

As estruturas dimensionadas pela metodologia empírica usada pelo DNIT e pela metodologia mecanístico-empírica aplicada pelo MeDiNa, foram configuradas com quatro camadas, revestimento, base, sub-base e subleito, com as mesmas combinações de materiais para a análise.

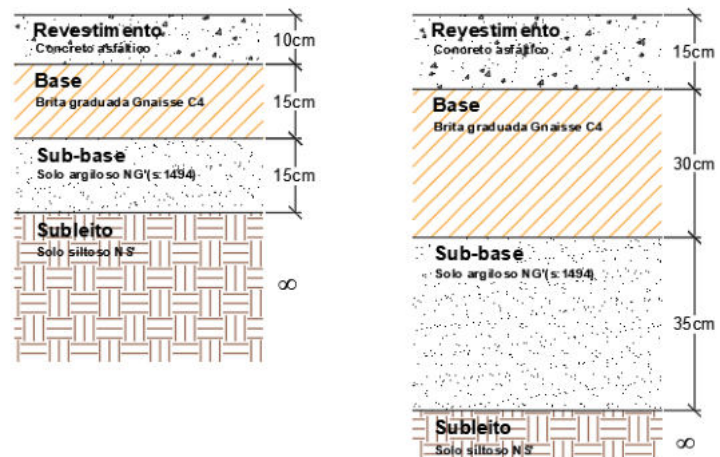
Os resultados dos dimensionamentos mostraram diferenças significativas entre as metodologias. Os pavimentos dimensionados pelo método do DNIT apresentaram camadas com espessura inferiores em comparação ao dimensionamento pelo método MeDiNa. A discrepância entre os pavimentos fornecidos pelos dois métodos é ilustrada na Figura 28 até a Figura 32.

Figura 28 - Estrutura 01 dimensionada pelos métodos do DNIT e MeDiNa, respectivamente.



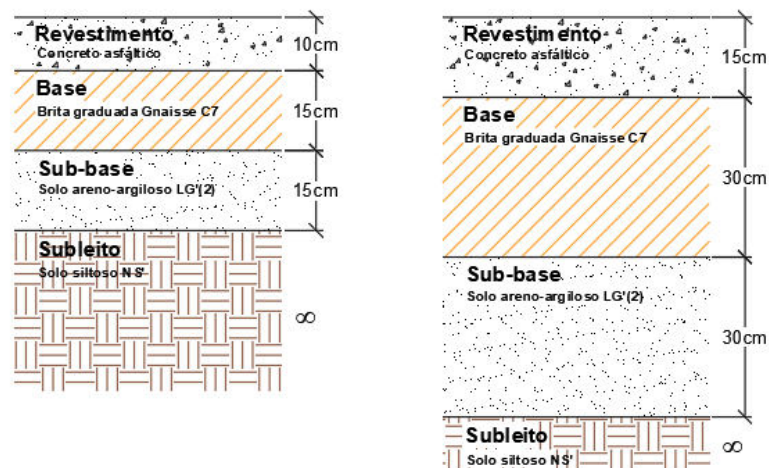
Fonte: Do autor (2023).

Figura 29 - Estrutura 02 dimensionada pelos métodos do DNIT e MeDiNa, respectivamente.



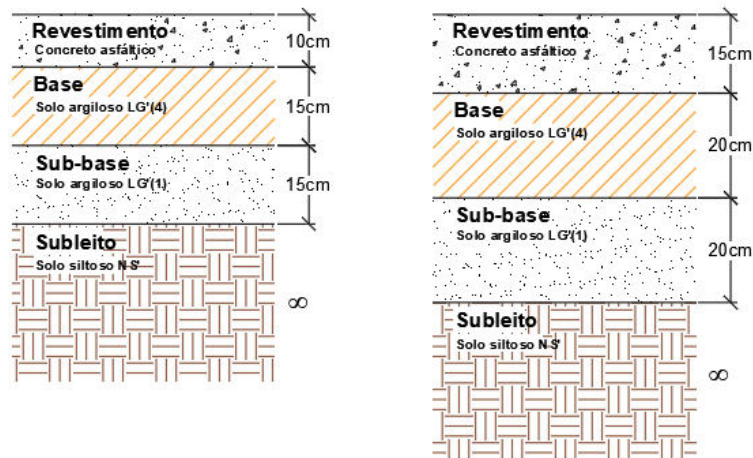
Fonte: Do autor (2023).

Figura 30 - Estrutura 03 dimensionada pelos métodos do DNIT e MeDiNa, respectivamente.



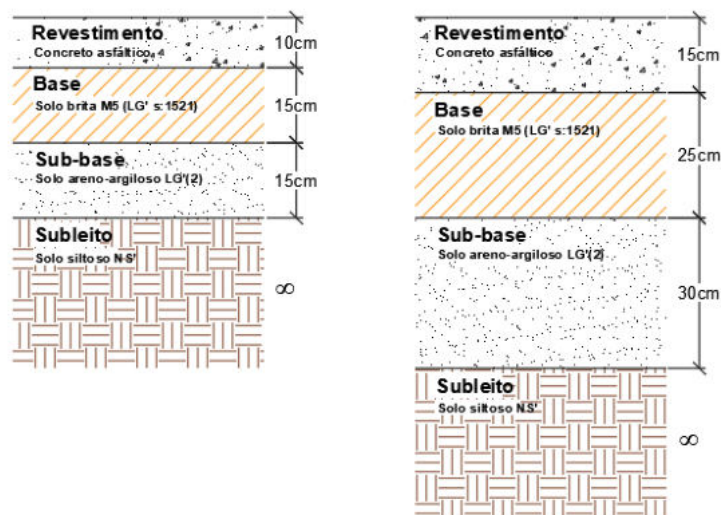
Fonte: Do autor (2023).

Figura 31 - Estrutura 04 dimensionada pelos métodos do DNIT e MeDiNa, respectivamente.



Fonte: Do autor (2023).

Figura 32 - Estrutura 05 dimensionada pelos métodos do DNIT e MeDiNa, respectivamente.



Fonte: Do autor (2023).

A grande discrepância entre os resultados se deve ao fato das duas metodologias se fundamentarem em parâmetros diferentes. O método empírico do DNIT leva em consideração apenas a resistência dos materiais empregados nas camadas, incluindo a capacidade de suporte do subleito. Já o método MeDiNa realiza uma análise levando em conta a ação das tensões e deformações do tráfego na estrutura e busca combatê-las através das tensões resistentes dos materiais das camadas trabalhando em conjunto no pavimento, além de considerar o efeito da fadiga.

Dessa forma, o método MeDiNa possui uma análise mais complexa através das verificações diante aos critérios de parada determinados pelo programa em relação a fadiga e a deformação permanente, prevendo o desempenho do pavimento no decorrer de sua vida útil, o

que justifica seus resultados de pavimentos com camadas mais espessas. Mas vale ressaltar que, o valor de N foi adotado e não calculado para as metodologias, o que também interferiria nas diferenças resultantes, visto o cálculo de N para os dois métodos serem diferentes.

Em termos econômicos, o pavimento dimensionado pelo MeDiNa apresenta um custo executivo mais elevado, devido a demanda de um volume maior de material nas camadas. A camada de maior impacto orçamentário tende a ser a camada de revestimento, ocasionado pelo elevado valor do concreto betuminoso.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O desenvolvimento do trabalho possibilitou a análise dos métodos de dimensionamento de pavimentos flexíveis usados no Brasil, sendo eles o método empírico proposto pelo DNIT e o método mecanístico-empírico do MeDiNa.

A proposta de serem dimensionadas cinco estruturas e não apenas uma, vem para reforçar os resultados do estudo. Os cinco pavimentos dimensionados com a mesma combinação de materiais apresentaram diferenças significativas nos resultados das espessuras de suas camadas para os dois métodos. Vale ressaltar que, ambos os métodos forneceram estruturas que devem prover um desempenho satisfatório dentro do período de vida útil para o qual foram projetadas.

O intuito desse estudo não foi dizer qual metodologia é melhor a ser empregada para o dimensionamento de pavimentos flexíveis, mas sim evidenciar a diferença entre os resultados advindos de suas aplicações e a mesma se justificar devido a alteridade das considerações do método empírico e do método mecanístico-empírico, o que foi atingido com sucesso.

Sugere-se para futuros trabalhos a realização do mesmo estudo, porém utilizando materiais com CBR e MR obtidos através de ensaios em laboratório e não por correlação, visto a existência de uma certa imprecisão nas formulações.

REFERÊNCIAS

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO guide for design of pavement structures**. Washington, USA, 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575**: Edificações habitacionais – Desempenho. Parte 1: Requisitos gerais. Rio de Janeiro, 2013. Disponível em: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/5660736/mod_folder/content/0/NBR%2015575/NBR15575-1.pdf?forcedownload=1. Acesso: 07 out. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7207**: Terminologia e classificação de pavimentação. Rio de Janeiro, 1982. Disponível em: <https://www.normas.com.br/visualizar/abnt-nbr-nm/7937/nbr7207-terminologia-e-classificacao-de-pavimentacao>. Acesso: 02 out. 2022.

BALBO, José Tadeu. **Pavimentação Asfáltica: materiais, projeto e restauração**. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.

BARBOSA, D. S.; SILVA, D. C. da. **Análise comparativa entre o novo método de dimensionamento nacional de pavimentos – MeDiNa e o método do DNER**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2021.

BERNUCCI, Liedi B. *et al.* **Pavimentação Asfáltica: Formação básica para engenheiros**. 1. ed. Rio de Janeiro: PETROBRAS:ABEDA, 2008.

BEZERRA NETO, R. S.; **Análise Comparativa de Pavimentos Dimensionados através dos Métodos Empírico do DNER e Mecanístico e Proposta de um Catálogo Simplificado de Pavimentos para a Região de Campo Grande (MS)**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. **Por que os pavimentos das rodovias do Brasil não duram?** Brasília, 24 ago. 2017. Disponível em: <https://cnt.org.br/agencia-cnt/cnt-divulga-estudo-por-que-pavimento-rodovias-brasil-nao-duram-resultados>. Acesso: 05 nov. 2022.

COUTINHO, João Camilo Penna. **Dimensionamento de Pavimento Asfáltico: Comparação do Método do DNER com um Método Mecanístico – Empírico aplicada a um trecho**. Mestrado Profissional em Engenharia Geotécnica da UFOP - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2011.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de Pavimentação**. 3. ed. 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_corrige_errata_1.pdf. Acesso: 14 set. 2022.

FERNANDES, Wagner Dambros. **Análise comparativa entre os métodos de dimensionamento de pavimentos flexíveis do Brasil e o método da AASHTO**. Dissertação (Mestre em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2016.

FRANCO, F. A. C. de P; MOTTA, L. M. G. da. **Execução de estudos e pesquisas para elaboração de método mecanístico - empírico de dimensionamento de pavimentos asfálticos**. Rio de Janeiro: DNIT, 2018.

FRANCO, Filipe Augusto Cinque de Proença. **Método de dimensionamento mecanístico-empírico de pavimentos asfálticos - SisPav**. Tese (Doutor em Ciências em Engenharia Civil), - Coordenação dos Programas de Pós-graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

FRANÇA, João Lucas Amorim de. **Estudo comparativo entre o método vigente de dimensionamento de pavimentos e o novo método Medina**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Civil) - Universidade Ceuma, São Luís, 2018.

HARTMANN, Diego Arthur. **Análise dos defeitos e da irregularidade de pavimentos flexíveis a partir do Guia da AASHTO de 2004**. 2009. 75p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, 2009.

JÚNIOR, José Geraldo de Souza. **Aplicação do novo método de dimensionamento de pavimentos asfálticos a trechos de uma rodovia federal**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Coordenação dos Programas de Pós-graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.

LANIX ENGENHARIA CONSULTIVA LTDA. **Memorial de cálculo do projeto de pavimentação - pista interna provisória do campus araras da UFU**. Belo Horizonte, 22 de julho de 2016. 26 p.

MEDINA, J.; MOTTA, L. M. G. **Mecânica dos Pavimentos**. 3. ed. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2015.

MORAIS, Vanessa Ariadne. **Análise comparativa dos métodos de dimensionamento empírico e empírico-mecanístico de pavimentos flexíveis**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Pampa, Alegrete, 2014.

MOTTA, Laura Maria Goretti da. **Método de dimensionamento de pavimentos flexíveis; Critério de confiabilidade e ensaios de cargas repetidas**. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil) – Coordenação dos Programas de Pós-graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1991.

OLIVEIRA, Karoline Ribeiro de. **Análise comparativa entre os métodos de dimensionamento de pavimentos flexíveis em um trecho: método mecanístico-empírico do DNIT e o método da AASHTO**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Civil) – Centro Universitário Luterano de Palmas, Palmas, 2019.

POWELL, Warren B. A stochastic formulation of the dynamic assignment problem, with an application to truckload motor carrier. **Transportation Science**, New Jersey, v. 30, 1996. Disponível em: <https://pubsonline.informs.org/doi/epdf/10.1287/trsc.30.3.195>. Acesso: 19 dez. 2022.

RESENDE, D. C. C; CARDOZO, L. G. E. **Análise comparativa entre métodos de dimensionamento de pavimentos flexíveis: método DNIT (1981) e método Medina (2018).** Trabalho de conclusão de curso (Bacharel em Engenharia Civil) - Universidade Federal de São João Del-Rei, Ouro Branco, 2021.

SILVA, José Emerson Gonçalves. **Método Nacional de Dimensionamento de Pavimentos – MeDiNa, avaliação da duplicação da AL-145.** Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Alagoas, Delmiro Gouveia, 2018.

SOUZA, Murillo Lopes de. **Método de Projeto de Pavimentos Flexíveis.** 3. ed. Rio de Janeiro: IPR, 1981.

YODER, E .J.; WITCZACK, M. W. **Principles of Pavement Design.** 2. ed. New York: John Wiley & Sons, 1975.

Programa MeDiNa v.1.1.5.0 - dezembro/2020

Cópia registrada para Tamara Gomes (tamara.gomes@estudante.ufla.br), da empresa UFLA - Universidade Federal de Lavras..

Dimensionamento do pavimento

Empresa: **UFLA**
 Nome do Projeto: **Estrutura 01**
 Responsável pelo projeto: **Tamara Gomes**

Seção do pavimento dimensionada considerando os dados inseridos pelo Engenheiro Projetista no programa MeDiNa.

Tipo de via: **Sistema Arterial Primário**
 Nível de confiabilidade: **85%**
 Período de projeto: **10** anos.

Análise realizada em **05/02/2023 às 19:10:12** no modo: **Pavimento Novo (Nível A)**
 Área trincada prevista no pavimento no fim do período: **30,0%**
 Afundamento de Trilha de Roda previsto no pavimento no fim do período: **3,1mm**

ATENÇÃO: O programa MeDiNa é apenas uma ferramenta de cálculo que auxilia o projetista no dimensionamento ou na avaliação de pavimentos, conforme descrito no Guia do Método Mecnístico Empírico. O conhecimento das propriedades dos materiais a serem aplicados na estrutura do pavimento, por meio de ensaios de laboratório, assim como o conhecimento detalhado do tráfego são imprescindíveis para a elaboração do projeto. O sucesso do projeto somente será alcançado se as propriedades dos materiais consideradas no dimensionamento sejam aplicadas no campo e verificadas a partir de ensaios geotécnicos com um controle de qualidade rigoroso. Portanto, a responsabilidade pelo projeto é exclusivamente do engenheiro projetista, que deve entender e avaliar criteriosamente os resultados gerados pelo programa, antes de aprovar o projeto para a execução no campo.

Estrutura do pavimento

Cam	Material	Espessura (cm)	Módulo de Resiliência	Coef de Poisson
1	CONCRETO ASFÁLTICO RJ CAP 50/70 #12,5mm Sepetiba	15,0	Resiliente Linear MR = 8289 MPa	0,30
2	MATERIAL GRANULAR Brita Graduada - Gnaisse C5	25,0	Resiliente Linear MR = 381 MPa	0,35
3	SOLO FINO, SILTOSO OU ARGILOSO Solo Argiloso LG'(1)	30,0	Resiliente Linear MR = 250 MPa	0,45
4	SUBLEITO Solo Siltoso NS'	SL	Resiliente Linear MR = 189 MPa	0,45

Materiais

1 - CONCRETO ASFÁLTICO: RJ CAP 50/70 #12,5mm Sepetiba

Propriedades

Modelos

Propriedades	Modelos
Tipo de CAP = CAP 50/70 - PG 64-16 Massa específica (g/cm ³) = 2,4 Resistência à tração (MPa) = 1,91 Teor de asfalto (%) = 6,0 Volume de vazios (%) = 5,0 Faixa Granulométrica = #12,5mm Abrasão Los Angeles (%) = 40,0 Norma ou Especificação = DNIT ES 31	Ensaio de Fadiga -Modelo: $k1 \cdot (et \wedge k2)$ -Coeficiente de Regressão (k1): $\geq 3,0e-13$ -Coeficiente de Regressão (k2): $\geq -3,78$ -Classe de Fadiga: ≥ 1 -FFM (100 μ a 250 μ): $\geq 0,73$ Flow Number Mínimo - Condição de Tráfego Normal: ≥ 295 ciclos - Condição de Tráfego Severa: ≥ 795 ciclos

2 - MATERIAL GRANULAR: Brita Graduada - Gnaisse C5

Propriedades	Modelos
Descrição do Material = Brita Graduada Massa específica (g/cm ³) = 2,223 Umidade Ótima (%) = 5,0 Energia Compactação = Modificada Abrasão Los Angeles (%) = 43,0 Norma ou Especificação = DNIT ES 141	Ensaio de Deformação Permanente Modelo: $ep = psi1 \cdot (s3 \wedge psi2) \cdot (sd \wedge psi3) \cdot (N \wedge psi4)$ Coeficiente de Regressão (k1 ou psi1): 0,0868 Coeficiente de Regressão (k2 ou psi2): -0,2801 Coeficiente de Regressão (k3 ou psi3): 0,8929 Coeficiente de Regressão (k4 ou psi4): 0,0961

3 - SOLO FINO, SILTOSO OU ARGILOSO: Solo Argiloso LG'(1)

Propriedades	Modelos
Descrição do Material = Argila de Ribeirão Preto - SP Grupo MCT = LG' MCT - Coeficiente c' = 1,81 MCT - Índice e' = 1,08 Massa específica (g/cm ³) = 1,665 Umidade Ótima (%) = 24,0 Energia Compactação = Normal Norma ou Especificação = DNIT ES 139	Ensaio de Deformação Permanente Modelo: $ep = psi1 \cdot (s3 \wedge psi2) \cdot (sd \wedge psi3) \cdot (N \wedge psi4)$ Coeficiente de Regressão (k1 ou psi1): 0,206 Coeficiente de Regressão (k2 ou psi2): -0,24 Coeficiente de Regressão (k3 ou psi3): 1,34 Coeficiente de Regressão (k4 ou psi4): 0,038

4 - SUBLEITO: Solo Siltoso NS'

Propriedades	Modelos
Descrição do Material = Solo siltoso Papucaia - RJ Grupo MCT = NS' MCT - Coeficiente c' = 1,00 MCT - Índice e' = 1,68 Massa específica (g/cm ³) = 1,8 Umidade Ótima (%) = 13,0 Energia Compactação = Normal Norma ou Especificação = DNIT ES 137	Ensaio de Deformação Permanente Modelo: $ep = psi1 \cdot (s3 \wedge psi2) \cdot (sd \wedge psi3) \cdot (N \wedge psi4)$ Coeficiente de Regressão (k1 ou psi1): 0,244 Coeficiente de Regressão (k2 ou psi2): 0,419 Coeficiente de Regressão (k3 ou psi3): 1,309 Coeficiente de Regressão (k4 ou psi4): 0,069

Definição do tráfego

Volume Médio Diário no ano de abertura do tráfego: VMD (1º ano) = **3000**

Fator de veículo no ano de abertura do tráfego: FV = **1,00**

Número de passagens anual do eixo padrão (1º ano): **1,10e+06**

% Veículos na faixa de projeto: **100%**

Número de passagens anual do eixo padrão na faixa de projeto: **1,10e+06**

Taxa de crescimento do tráfego: **0,0%**

Número Equivalente total de passagens do eixo padrão na faixa de projeto: N Eq = **1,10e+07**

Eixo	Tipo	FE	Carga (ton)	FC	FVi
1	Eixo simples de roda dupla	100%	8,20	1,000	1,000

Evolução dos danos no pavimento

Mês	N Equiv	Área Trincada	ATR (mm)
1	9,125e+04	1,25%	2,2
6	5,475e+05	2,52%	2,5
12	1,095e+06	3,52%	2,6
18	1,643e+06	4,44%	2,7
24	2,190e+06	5,35%	2,8
30	2,738e+06	6,30%	2,8
36	3,285e+06	7,30%	2,9
42	3,833e+06	8,36%	2,9
48	4,380e+06	9,49%	2,9
54	4,928e+06	10,71%	2,9
60	5,475e+06	12,01%	3,0
66	6,023e+06	13,39%	3,0
72	6,570e+06	14,87%	3,0
78	7,118e+06	16,44%	3,0
84	7,665e+06	18,11%	3,0
90	8,213e+06	19,86%	3,1
96	8,760e+06	21,71%	3,1
102	9,308e+06	23,65%	3,1
108	9,855e+06	25,68%	3,1
114	1,040e+07	27,79%	3,1
120	1,095e+07	29,98%	3,1

Análise de Afundamento de Trilha de Roda

Cam	Material	Afundamento de Trilha de Roda (mm)
1	CONCRETO ASFÁLTICO	0,00
2	MATERIAL GRANULAR	1,64
3	SOLO FINO, SILTOSO OU ARGILOSO	0,79
4	SUBLEITO	0,69
Afundamento de Trilha de Roda (mm)		3,1

Controle por Deflexões

As bacias foram calculadas considerando as camadas aderidas e um fator de segurança, após avaliados dados de campo comparativos entre FWD e Viga Benkelman. Os resultados apresentados estão a favor do dimensionamento.

Deflexões esperadas (0,01 mm) no topo da camada: CONCRETO ASFÁLTICO - RJ CAP 50/70 #12,5mm Sepetiba

Equipamento	Sensor 1 0 cm	Sensor 2 20 cm	Sensor 3 30 cm	Sensor 4 45 cm	Sensor 5 60 cm	Sensor 6 90 cm	Sensor 7 120 cm	Sensor 8 150 cm	Sensor 9 180 cm
Viga Benkelman Raio = 10,8 cm Carga = 8,2 ton	27	24	22	18	15	11	8	6	5
FWD Raio = 15,0 cm Carga = 4,0 ton	26	22	19	16	12	8	5	4	3

Deflexões esperadas (0,01 mm) no topo da camada: MATERIAL GRANULAR - Brita Graduada - Gnaisse C5

Equipamento	Sensor 1 0 cm	Sensor 2 20 cm	Sensor 3 30 cm	Sensor 4 45 cm	Sensor 5 60 cm	Sensor 6 90 cm	Sensor 7 120 cm	Sensor 8 150 cm	Sensor 9 180 cm
Viga Benkelman Raio = 10,8 cm Carga = 8,2 ton	42	31	25	19	14	9	7	6	5

Deflexões esperadas (0,01 mm) no topo da camada: SOLO FINO, SILTOSO OU ARGILOSO - Solo Argiloso LG'(1)

Equipamento	Sensor 1 0 cm	Sensor 2 20 cm	Sensor 3 30 cm	Sensor 4 45 cm	Sensor 5 60 cm	Sensor 6 90 cm	Sensor 7 120 cm	Sensor 8 150 cm	Sensor 9 180 cm
Viga Benkelman Raio = 10,8 cm Carga = 8,2 ton	42	30	23	17	13	9	7	6	5

Deflexões esperadas (0,01 mm) no topo da camada: SUBLEITO - Solo Siltoso NS'

Equipamento	Sensor 1 0 cm	Sensor 2 20 cm	Sensor 3 30 cm	Sensor 4 45 cm	Sensor 5 60 cm	Sensor 6 90 cm	Sensor 7 120 cm	Sensor 8 150 cm	Sensor 9 180 cm
Viga Benkelman Raio = 10,8 cm Carga = 8,2 ton	49	31	23	15	12	9	7	6	5

ANEXO B – Relatório da estrutura 02.

Programa MeDiNa v.1.1.5.0 - dezembro/2020

Cópia registrada para Tamara Gomes (tamara.gomes@estudante.ufla.br), da empresa UFLA - Universidade Federal de Lavras..

Dimensionamento do pavimento

Empresa: **UFLA**
 Nome do Projeto: **Estrutura 02**
 Responsável pelo projeto: **Tamara Gomes**

Seção do pavimento dimensionada considerando os dados inseridos pelo Engenheiro Projetista no programa MeDiNa.

Tipo de via: **Sistema Arterial Primário**
 Nível de confiabilidade: **85%**
 Período de projeto: **10** anos.

Análise realizada em **05/02/2023 às 19:10:55** no modo: **Pavimento Novo (Nível A)**
 Área trincada prevista no pavimento no fim do período: **29,8%**
 Afundamento de Trilha de Roda previsto no pavimento no fim do período: **2,8mm**

ATENÇÃO: O programa MeDiNa é apenas uma ferramenta de cálculo que auxilia o projetista no dimensionamento ou na avaliação de pavimentos, conforme descrito no Guia do Método Mecânico Empírico. O conhecimento das propriedades dos materiais a serem aplicados na estrutura do pavimento, por meio de ensaios de laboratório, assim como o conhecimento detalhado do tráfego são imprescindíveis para a elaboração do projeto. O sucesso do projeto somente será alcançado se as propriedades dos materiais consideradas no dimensionamento sejam aplicadas no campo e verificadas a partir de ensaios geotécnicos com um controle de qualidade rigoroso. Portanto, a responsabilidade pelo projeto é exclusivamente do engenheiro projetista, que deve entender e avaliar criteriosamente os resultados gerados pelo programa, antes de aprovar o projeto para a execução no campo.

Estrutura do pavimento

Cam	Material	Espessura (cm)	Módulo de Resiliência	Coef de Poisson
1	CONCRETO ASFÁLTICO RJ CAP 50/70 #12,5mm Sepetiba	15,0	Resiliente Linear MR = 8289 MPa	0,30
2	MATERIAL GRANULAR Brita Graduada - Gnaisse C4	30,0	Resiliente Linear MR = 311 MPa	0,35
3	SOLO FINO, SILTOSO OU ARGILOSO Solo NG' (s:1494)	35,0	Resiliente Linear MR = 303 MPa	0,45
4	SUBLEITO Solo Siltoso NS'	SL	Resiliente Linear MR = 189 MPa	0,45

Materiais

1 - CONCRETO ASFÁLTICO: RJ CAP 50/70 #12,5mm Sepetiba

Propriedades

Modelos

Propriedades	Modelos
Tipo de CAP = CAP 50/70 - PG 64-16 Massa específica (g/cm ³) = 2,4 Resistência à tração (MPa) = 1,91 Teor de asfalto (%) = 6,0 Volume de vazios (%) = 5,0 Faixa Granulométrica = #12,5mm Abrasão Los Angeles (%) = 40,0 Norma ou Especificação = DNIT ES 31	Ensaio de Fadiga -Modelo: $k1 \cdot (et \wedge k2)$ -Coeficiente de Regressão (k1): ≥ 3,0e-13 -Coeficiente de Regressão (k2): ≥ -3,78 -Classe de Fadiga: ≥ 1 -FFM (100μ a 250μ): ≥ 0,73 Flow Number Mínimo - Condição de Tráfego Normal: ≥ 295 ciclos - Condição de Tráfego Severa: ≥ 795 ciclos

2 - MATERIAL GRANULAR: Brita Graduada - Gnaisse C4

Propriedades	Modelos
Descrição do Material = Brita Graduada Massa específica (g/cm ³) = 2,296 Umidade Ótima (%) = 5,4 Energia Compactação = Modificada Abrasão Los Angeles (%) = 41,0 Norma ou Especificação = DNIT ES 141	Ensaio de Deformação Permanente Modelo: $ep = psi1 \cdot (s3 \wedge psi2) \cdot (sd \wedge psi3) \cdot (N \wedge psi4)$ Coeficiente de Regressão (k1 ou psi1): 0,1010 Coeficiente de Regressão (k2 ou psi2): -0,1825 Coeficiente de Regressão (k3 ou psi3): 0,9091 Coeficiente de Regressão (k4 ou psi4): 0,0753

3 - SOLO FINO, SILTOSO OU ARGILOSO: Solo NG' (s:1494)

Propriedades	Modelos
Descrição do Material = Solo argiloso não laterítico Grupo MCT = NG' MCT - Coeficiente c' = 1,67 MCT - Índice e' = 1,29 Massa específica (g/cm ³) = 1,68 Umidade Ótima (%) = 19,5 Energia Compactação = Intermediária Norma ou Especificação = DNIT ES 139	Ensaio de Deformação Permanente Modelo: $ep = psi1 \cdot (s3 \wedge psi2) \cdot (sd \wedge psi3) \cdot (N \wedge psi4)$ Coeficiente de Regressão (k1 ou psi1): 0,39 Coeficiente de Regressão (k2 ou psi2): 0,84 Coeficiente de Regressão (k3 ou psi3): 0,54 Coeficiente de Regressão (k4 ou psi4): 0,06

4 - SUBLEITO: Solo Siltoso NS'

Propriedades	Modelos
Descrição do Material = Solo siltoso Papucaia - RJ Grupo MCT = NS' MCT - Coeficiente c' = 1,00 MCT - Índice e' = 1,68 Massa específica (g/cm ³) = 1,8 Umidade Ótima (%) = 13,0 Energia Compactação = Normal Norma ou Especificação = DNIT ES 137	Ensaio de Deformação Permanente Modelo: $ep = psi1 \cdot (s3 \wedge psi2) \cdot (sd \wedge psi3) \cdot (N \wedge psi4)$ Coeficiente de Regressão (k1 ou psi1): 0,244 Coeficiente de Regressão (k2 ou psi2): 0,419 Coeficiente de Regressão (k3 ou psi3): 1,309 Coeficiente de Regressão (k4 ou psi4): 0,069

Definição do tráfego

Volume Médio Diário no ano de abertura do tráfego: VMD (1º ano) = **3000**
 Fator de veículo no ano de abertura do tráfego: FV = **1,00**

Número de passagens anual do eixo padrão (1º ano): **1,10e+06**

% Veículos na faixa de projeto: **100%**

Número de passagens anual do eixo padrão na faixa de projeto: **1,10e+06**

Taxa de crescimento do tráfego: **0,0%**

Número Equivalente total de passagens do eixo padrão na faixa de projeto: N Eq = **1,10e+07**

Eixo	Tipo	FE	Carga (ton)	FC	FVi
1	Eixo simples de roda dupla	100%	8,20	1,000	1,000

Evolução dos danos no pavimento

Mês	N Equiv	Área Trincada	ATR (mm)
1	9,125e+04	1,25%	2,0
6	5,475e+05	2,51%	2,3
12	1,095e+06	3,51%	2,4
18	1,643e+06	4,42%	2,4
24	2,190e+06	5,33%	2,5
30	2,738e+06	6,28%	2,5
36	3,285e+06	7,27%	2,6
42	3,833e+06	8,32%	2,6
48	4,380e+06	9,45%	2,6
54	4,928e+06	10,65%	2,6
60	5,475e+06	11,94%	2,6
66	6,023e+06	13,32%	2,7
72	6,570e+06	14,78%	2,7
78	7,118e+06	16,34%	2,7
84	7,665e+06	17,99%	2,7
90	8,213e+06	19,73%	2,7
96	8,760e+06	21,57%	2,7
102	9,308e+06	23,49%	2,7
108	9,855e+06	25,50%	2,8
114	1,040e+07	27,60%	2,8
120	1,095e+07	29,77%	2,8

Análise de Afundamento de Trilha de Roda

Cam	Material	Afundamento de Trilha de Roda (mm)
1	CONCRETO ASFÁLTICO	0,00
2	MATERIAL GRANULAR	1,32
3	SOLO FINO, SILTOSO OU ARGILOSO	0,86
4	SUBLEITO	0,61
Afundamento de Trilha de Roda (mm)		2,8

Controle por Deflexões

As bacias foram calculadas considerando as camadas aderidas e um fator de segurança, após avaliados dados de campo comparativos entre FWD e Viga Benkelman. Os resultados apresentados estão a favor do dimensionamento.

Deflexões esperadas (0,01 mm) no topo da camada: CONCRETO ASFÁLTICO - RJ CAP 50/70 #12,5mm Sepetiba

Equipamento	Sensor 1 0 cm	Sensor 2 20 cm	Sensor 3 30 cm	Sensor 4 45 cm	Sensor 5 60 cm	Sensor 6 90 cm	Sensor 7 120 cm	Sensor 8 150 cm	Sensor 9 180 cm
Viga Benkelman Raio = 10,8 cm Carga = 8,2 ton	27	24	22	18	15	11	8	6	5
FWD Raio = 15,0 cm Carga = 4,0 ton	26	22	19	16	12	8	5	4	3

Deflexões esperadas (0,01 mm) no topo da camada: MATERIAL GRANULAR - Brita Graduada - Gnaisse C4

Equipamento	Sensor 1 0 cm	Sensor 2 20 cm	Sensor 3 30 cm	Sensor 4 45 cm	Sensor 5 60 cm	Sensor 6 90 cm	Sensor 7 120 cm	Sensor 8 150 cm	Sensor 9 180 cm
Viga Benkelman Raio = 10,8 cm Carga = 8,2 ton	41	30	24	18	14	10	7	6	5

Deflexões esperadas (0,01 mm) no topo da camada: SOLO FINO, SILTOSO OU ARGILOSO - Solo NG' (s:1494)

Equipamento	Sensor 1 0 cm	Sensor 2 20 cm	Sensor 3 30 cm	Sensor 4 45 cm	Sensor 5 60 cm	Sensor 6 90 cm	Sensor 7 120 cm	Sensor 8 150 cm	Sensor 9 180 cm
Viga Benkelman Raio = 10,8 cm Carga = 8,2 ton	38	28	23	17	14	9	7	6	5

Deflexões esperadas (0,01 mm) no topo da camada: SUBLEITO - Solo Siltoso NS'

Equipamento	Sensor 1 0 cm	Sensor 2 20 cm	Sensor 3 30 cm	Sensor 4 45 cm	Sensor 5 60 cm	Sensor 6 90 cm	Sensor 7 120 cm	Sensor 8 150 cm	Sensor 9 180 cm
Viga Benkelman Raio = 10,8 cm Carga = 8,2 ton	49	31	23	15	12	9	7	6	5

ANEXO C – Relatório da estrutura 03.

Programa MeDiNa v.1.1.5.0 - dezembro/2020

Cópia registrada para Tamara Gomes (tamara.gomes@estudante.ufla.br), da empresa UFLA - Universidade Federal de Lavras..

Dimensionamento do pavimento

Empresa: **UFLA**
 Nome do Projeto: **Estrutura 03**
 Responsável pelo projeto: **Tamara Gomes**

Seção do pavimento dimensionada considerando os dados inseridos pelo Engenheiro Projetista no programa MeDiNa.

Tipo de via: **Sistema Arterial Primário**
 Nível de confiabilidade: **85%**
 Período de projeto: **10** anos.

Análise realizada em **05/02/2023 às 19:12:09** no modo: **Pavimento Novo (Nível A)**
 Área trincada prevista no pavimento no fim do período: **29,7%**
 Afundamento de Trilha de Roda previsto no pavimento no fim do período: **4,3mm**

ATENÇÃO: O programa MeDiNa é apenas uma ferramenta de cálculo que auxilia o projetista no dimensionamento ou na avaliação de pavimentos, conforme descrito no Guia do Método Mecnístico Empírico. O conhecimento das propriedades dos materiais a serem aplicados na estrutura do pavimento, por meio de ensaios de laboratório, assim como o conhecimento detalhado do tráfego são imprescindíveis para a elaboração do projeto. O sucesso do projeto somente será alcançado se as propriedades dos materiais consideradas no dimensionamento sejam aplicadas no campo e verificadas a partir de ensaios geotécnicos com um controle de qualidade rigoroso. Portanto, a responsabilidade pelo projeto é exclusivamente do engenheiro projetista, que deve entender e avaliar criteriosamente os resultados gerados pelo programa, antes de aprovar o projeto para a execução no campo.

Estrutura do pavimento

Cam	Material	Espessura (cm)	Módulo de Resiliência	Coef de Poisson
1	CONCRETO ASFÁLTICO RJ CAP 50/70 #12,5mm Sepetiba	15,0	Resiliente Linear MR = 8289 MPa	0,30
2	MATERIAL GRANULAR Brita Graduada - Gnaísse C7	30,0	Resiliente Linear MR = 350 MPa	0,35
3	SOLO FINO, SILTOSO OU ARGILOSO Solo Areno-argiloso LG'(2)	30,0	Resiliente Linear MR = 248 MPa	0,45
4	SUBLEITO Solo Siltoso NS'	SL	Resiliente Linear MR = 189 MPa	0,45

Materiais

1 - CONCRETO ASFÁLTICO: RJ CAP 50/70 #12,5mm Sepetiba

Propriedades

Modelos

Propriedades	Modelos
Tipo de CAP = CAP 50/70 - PG 64-16 Massa específica (g/cm ³) = 2,4 Resistência à tração (MPa) = 1,91 Teor de asfalto (%) = 6,0 Volume de vazios (%) = 5,0 Faixa Granulométrica = #12,5mm Abrasão Los Angeles (%) = 40,0 Norma ou Especificação = DNIT ES 31	Ensaio de Fadiga -Modelo: $k1 \cdot (et \wedge k2)$ -Coeficiente de Regressão (k1): $\geq 3,0e-13$ -Coeficiente de Regressão (k2): $\geq -3,78$ -Classe de Fadiga: ≥ 1 -FFM (100 μ a 250 μ): $\geq 0,73$ Flow Number Mínimo - Condição de Tráfego Normal: ≥ 295 ciclos - Condição de Tráfego Severa: ≥ 795 ciclos

2 - MATERIAL GRANULAR: Brita Graduada - Gnaise C7

Propriedades	Modelos
Descrição do Material = Brita Graduada Massa específica (g/cm ³) = 2,244 Umidade Ótima (%) = 5,7 Energia Compactação = Modificada Abrasão Los Angeles (%) = 43,0 Norma ou Especificação = DNIT ES 141	Ensaio de Deformação Permanente Modelo: $ep = psi1 \cdot (s3 \wedge psi2) \cdot (sd \wedge psi3) \cdot (N \wedge psi4)$ Coeficiente de Regressão (k1 ou psi1): 0,0775 Coeficiente de Regressão (k2 ou psi2): -0,2304 Coeficiente de Regressão (k3 ou psi3): 1,1428 Coeficiente de Regressão (k4 ou psi4): 0,0857

3 - SOLO FINO, SILTOSO OU ARGILOSO: Solo Areno-argiloso LG'(2)

Propriedades	Modelos
Descrição do Material = Areia Argilosa - ES Grupo MCT = LG' MCT - Coeficiente c' = 2,05 MCT - Índice e' = 0,97 Massa específica (g/cm ³) = 1,8 Umidade Ótima (%) = 18,0 Energia Compactação = Normal Norma ou Especificação = DNIT ES 139	Ensaio de Deformação Permanente Modelo: $ep = psi1 \cdot (s3 \wedge psi2) \cdot (sd \wedge psi3) \cdot (N \wedge psi4)$ Coeficiente de Regressão (k1 ou psi1): 0,453 Coeficiente de Regressão (k2 ou psi2): -0,186 Coeficiente de Regressão (k3 ou psi3): 1,084 Coeficiente de Regressão (k4 ou psi4): 0,058

4 - SUBLEITO: Solo Siltoso NS'

Propriedades	Modelos
Descrição do Material = Solo siltoso Papucaia - RJ Grupo MCT = NS' MCT - Coeficiente c' = 1,00 MCT - Índice e' = 1,68 Massa específica (g/cm ³) = 1,8 Umidade Ótima (%) = 13,0 Energia Compactação = Normal Norma ou Especificação = DNIT ES 137	Ensaio de Deformação Permanente Modelo: $ep = psi1 \cdot (s3 \wedge psi2) \cdot (sd \wedge psi3) \cdot (N \wedge psi4)$ Coeficiente de Regressão (k1 ou psi1): 0,244 Coeficiente de Regressão (k2 ou psi2): 0,419 Coeficiente de Regressão (k3 ou psi3): 1,309 Coeficiente de Regressão (k4 ou psi4): 0,069

Definição do tráfego

Volume Médio Diário no ano de abertura do tráfego: VMD (1º ano) = **3000**
Fator de veículo no ano de abertura do tráfego: FV = **1,00**

Número de passagens anual do eixo padrão (1º ano): **1,10e+06**

% Veículos na faixa de projeto: **100%**

Número de passagens anual do eixo padrão na faixa de projeto: **1,10e+06**

Taxa de crescimento do tráfego: **0,0%**

Número Equivalente total de passagens do eixo padrão na faixa de projeto: $N_{Eq} = 1,10e+07$

Eixo	Tipo	FE	Carga (ton)	FC	FVi
1	Eixo simples de roda dupla	100%	8,20	1,000	1,000

Evolução dos danos no pavimento

Mês	N Equiv	Área Trincada	ATR (mm)
1	9,125e+04	1,25%	3,1
6	5,475e+05	2,51%	3,5
12	1,095e+06	3,51%	3,7
18	1,643e+06	4,42%	3,8
24	2,190e+06	5,33%	3,9
30	2,738e+06	6,27%	3,9
36	3,285e+06	7,26%	4,0
42	3,833e+06	8,32%	4,0
48	4,380e+06	9,44%	4,0
54	4,928e+06	10,65%	4,1
60	5,475e+06	11,93%	4,1
66	6,023e+06	13,31%	4,1
72	6,570e+06	14,77%	4,2
78	7,118e+06	16,33%	4,2
84	7,665e+06	17,97%	4,2
90	8,213e+06	19,71%	4,2
96	8,760e+06	21,55%	4,2
102	9,308e+06	23,47%	4,3
108	9,855e+06	25,48%	4,3
114	1,040e+07	27,57%	4,3
120	1,095e+07	29,74%	4,3

Análise de Afundamento de Trilha de Roda

Cam	Material	Afundamento de Trilha de Roda (mm)
1	CONCRETO ASFÁLTICO	0,00
2	MATERIAL GRANULAR	1,14
3	SOLO FINO, SILTOSO OU ARGILOSO	2,51
4	SUBLEITO	0,65
Afundamento de Trilha de Roda (mm)		4,3

Controle por Deflexões

As bacias foram calculadas considerando as camadas aderidas e um fator de segurança, após avaliados dados de campo comparativos entre FWD e Viga Benkelman. Os resultados apresentados estão a favor do dimensionamento.

Deflexões esperadas (0,01 mm) no topo da camada: CONCRETO ASFÁLTICO - RJ CAP 50/70 #12,5mm Sepetiba

Equipamento	Sensor 1 0 cm	Sensor 2 20 cm	Sensor 3 30 cm	Sensor 4 45 cm	Sensor 5 60 cm	Sensor 6 90 cm	Sensor 7 120 cm	Sensor 8 150 cm	Sensor 9 180 cm
Viga Benkelman Raio = 10,8 cm Carga = 8,2 ton	27	24	22	18	15	11	8	6	5
FWD Raio = 15,0 cm Carga = 4,0 ton	26	22	19	16	12	8	5	4	3

Deflexões esperadas (0,01 mm) no topo da camada: MATERIAL GRANULAR - Brita Graduada - Gnaisse C7

Equipamento	Sensor 1 0 cm	Sensor 2 20 cm	Sensor 3 30 cm	Sensor 4 45 cm	Sensor 5 60 cm	Sensor 6 90 cm	Sensor 7 120 cm	Sensor 8 150 cm	Sensor 9 180 cm
Viga Benkelman Raio = 10,8 cm Carga = 8,2 ton	41	30	25	19	14	10	7	6	5

Deflexões esperadas (0,01 mm) no topo da camada: SOLO FINO, SILTOSO OU ARGILOSO - Solo Areno-argiloso LG'(2)

Equipamento	Sensor 1 0 cm	Sensor 2 20 cm	Sensor 3 30 cm	Sensor 4 45 cm	Sensor 5 60 cm	Sensor 6 90 cm	Sensor 7 120 cm	Sensor 8 150 cm	Sensor 9 180 cm
Viga Benkelman Raio = 10,8 cm Carga = 8,2 ton	43	30	23	17	13	9	7	6	5

Deflexões esperadas (0,01 mm) no topo da camada: SUBLEITO - Solo Siltoso NS'

Equipamento	Sensor 1 0 cm	Sensor 2 20 cm	Sensor 3 30 cm	Sensor 4 45 cm	Sensor 5 60 cm	Sensor 6 90 cm	Sensor 7 120 cm	Sensor 8 150 cm	Sensor 9 180 cm
Viga Benkelman Raio = 10,8 cm Carga = 8,2 ton	49	31	23	15	12	9	7	6	5

ANEXO D – Relatório da estrutura 04.

Programa MeDiNa v.1.1.5.0 - dezembro/2020

Cópia registrada para Tamara Gomes (tamara.gomes@estudante.ufla.br), da empresa UFLA - Universidade Federal de Lavras..

Dimensionamento do pavimento

Empresa: **UFLA**

Nome do Projeto: **Estrutura 04**

Responsável pelo projeto: **Tamara Gomes**

Seção do pavimento dimensionada considerando os dados inseridos pelo Engenheiro Projetista no programa MeDiNa.

Tipo de via: **Sistema Arterial Primário**

Nível de confiabilidade: **85%**

Período de projeto: **10** anos.

Análise realizada em **05/02/2023 às 19:09:09** no modo: **Pavimento Novo (Nível A)**

Área trincada prevista no pavimento no fim do período: **29,9%**

Afundamento de Trilha de Roda previsto no pavimento no fim do período: **1,9mm**

ATENÇÃO: O programa MeDiNa é apenas uma ferramenta de cálculo que auxilia o projetista no dimensionamento ou na avaliação de pavimentos, conforme descrito no Guia do Método Mecnístico Empírico. O conhecimento das propriedades dos materiais a serem aplicados na estrutura do pavimento, por meio de ensaios de laboratório, assim como o conhecimento detalhado do tráfego são imprescindíveis para a elaboração do projeto. O sucesso do projeto somente será alcançado se as propriedades dos materiais consideradas no dimensionamento sejam aplicadas no campo e verificadas a partir de ensaios geotécnicos com um controle de qualidade rigoroso. Portanto, a responsabilidade pelo projeto é exclusivamente do engenheiro projetista, que deve entender e avaliar criteriosamente os resultados gerados pelo programa, antes de aprovar o projeto para a execução no campo.

Estrutura do pavimento

Cam	Material	Espessura (cm)	Módulo de Resiliência	Coef de Poisson
1	CONCRETO ASFÁLTICO RJ CAP 50/70 #12,5mm Sepetiba	15,0	Resiliente Linear MR = 8289 MPa	0,30
2	SOLO FINO, SILTOSO OU ARGILOSO Solo Argiloso LG'(4)	20,0	Resiliente Linear MR = 435 MPa	0,45
3	SOLO FINO, SILTOSO OU ARGILOSO Solo Argiloso LG'(1)	20,0	Resiliente Linear MR = 250 MPa	0,45
4	SUBLEITO Solo Siltoso NS'	SL	Resiliente Linear MR = 189 MPa	0,45

Materiais

1 - CONCRETO ASFÁLTICO: RJ CAP 50/70 #12,5mm Sepetiba

Propriedades

Modelos

Propriedades	Modelos
Tipo de CAP = CAP 50/70 - PG 64-16 Massa específica (g/cm ³) = 2,4 Resistência à tração (MPa) = 1,91 Teor de asfalto (%) = 6,0 Volume de vazios (%) = 5,0 Faixa Granulométrica = #12,5mm Abrasão Los Angeles (%) = 40,0 Norma ou Especificação = DNIT ES 31	Ensaio de Fadiga -Modelo: k1 .(et ^ k2) -Coeficiente de Regressão (k1): ≥ 3,0e-13 -Coeficiente de Regressão (k2): ≥ -3,78 -Classe de Fadiga: ≥ 1 -FFM (100μ a 250μ): ≥ 0,73 Flow Number Mínimo - Condição de Tráfego Normal: ≥ 295 ciclos - Condição de Tráfego Severa: ≥ 795 ciclos
2 - SOLO FINO, SILTOSO OU ARGILOSO: Solo Argiloso LG'(4)	
Propriedades	Modelos
Descrição do Material = Solo Argiloso Maranhão (EFC) Grupo MCT = LG' MCT - Coeficiente c' = 1,94 MCT - Índice e' = 0,97 Massa específica (g/cm ³) = 1,63 Umidade Ótima (%) = 20% Energia Compactação = Intermediária Norma ou Especificação = DNIT ES 139	Ensaio de Deformação Permanente Modelo: ep = psi1.(s3^psi2).(sd ^psi3).(N^psi4) Coeficiente de Regressão (k1 ou psi1): 0,088 Coeficiente de Regressão (k2 ou psi2): -0,146 Coeficiente de Regressão (k3 ou psi3): 1,618 Coeficiente de Regressão (k4 ou psi4): 0,062
3 - SOLO FINO, SILTOSO OU ARGILOSO: Solo Argiloso LG'(1)	
Propriedades	Modelos
Descrição do Material = Argila de Ribeirão Preto - SP Grupo MCT = LG' MCT - Coeficiente c' = 1,81 MCT - Índice e' = 1,08 Massa específica (g/cm ³) = 1,665 Umidade Ótima (%) = 24,0 Energia Compactação = Normal Norma ou Especificação = DNIT ES 139	Ensaio de Deformação Permanente Modelo: ep = psi1.(s3^psi2).(sd ^psi3).(N^psi4) Coeficiente de Regressão (k1 ou psi1): 0,206 Coeficiente de Regressão (k2 ou psi2): -0,24 Coeficiente de Regressão (k3 ou psi3): 1,34 Coeficiente de Regressão (k4 ou psi4): 0,038
4 - SUBLEITO: Solo Siltoso NS'	
Propriedades	Modelos
Descrição do Material = Solo siltoso Papucaia - RJ Grupo MCT = NS' MCT - Coeficiente c' = 1,00 MCT - Índice e' = 1,68 Massa específica (g/cm ³) = 1,8 Umidade Ótima (%) = 13,0 Energia Compactação = Normal Norma ou Especificação = DNIT ES 137	Ensaio de Deformação Permanente Modelo: ep = psi1.(s3^psi2).(sd ^psi3).(N^psi4) Coeficiente de Regressão (k1 ou psi1): 0,244 Coeficiente de Regressão (k2 ou psi2): 0,419 Coeficiente de Regressão (k3 ou psi3): 1,309 Coeficiente de Regressão (k4 ou psi4): 0,069

Definição do tráfego

Volume Médio Diário no ano de abertura do tráfego: VMD (1º ano) = **3000**

Fator de veículo no ano de abertura do tráfego: FV = **1,00**

Número de passagens anual do eixo padrão (1º ano): **1,10e+06**

% Veículos na faixa de projeto: **100%**

Número de passagens anual do eixo padrão na faixa de projeto: **1,10e+06**

Taxa de crescimento do tráfego: **0,0%**

Número Equivalente total de passagens do eixo padrão na faixa de projeto: N Eq = **1,10e+07**

Eixo	Tipo	FE	Carga (ton)	FC	FVi
1	Eixo simples de roda dupla	100%	8,20	1,000	1,000

Evolução dos danos no pavimento

Mês	N Equiv	Área Trincada	ATR (mm)
1	9,125e+04	1,25%	1,4
6	5,475e+05	2,52%	1,6
12	1,095e+06	3,52%	1,6
18	1,643e+06	4,43%	1,7
24	2,190e+06	5,34%	1,7
30	2,738e+06	6,29%	1,7
36	3,285e+06	7,28%	1,7
42	3,833e+06	8,34%	1,8
48	4,380e+06	9,47%	1,8
54	4,928e+06	10,68%	1,8
60	5,475e+06	11,97%	1,8
66	6,023e+06	13,35%	1,8
72	6,570e+06	14,82%	1,8
78	7,118e+06	16,39%	1,8
84	7,665e+06	18,04%	1,8
90	8,213e+06	19,79%	1,8
96	8,760e+06	21,63%	1,8
102	9,308e+06	23,57%	1,8
108	9,855e+06	25,58%	1,9
114	1,040e+07	27,68%	1,9
120	1,095e+07	29,86%	1,9

Análise de Afundamento de Trilha de Roda

Cam	Material	Afundamento de Trilha de Roda (mm)
1	CONCRETO ASFÁLTICO	0,00
2	SOLO FINO, SILTOSO OU ARGILOSO	0,40
3	SOLO FINO, SILTOSO OU ARGILOSO	0,64
4	SUBLEITO	0,82

Cam Material	Afundamento de Trilha de Roda (mm)
Afundamento de Trilha de Roda (mm)	1,9

Controle por Deflexões

As bacias foram calculadas considerando as camadas aderidas e um fator de segurança, após avaliados dados de campo comparativos entre FWD e Viga Benkelman. Os resultados apresentados estão a favor do dimensionamento.

Deflexões esperadas (0,01 mm) no topo da camada: CONCRETO ASFÁLTICO - RJ CAP 50/70 #12,5mm Sepetiba

Equipamento	Sensor 1 0 cm	Sensor 2 20 cm	Sensor 3 30 cm	Sensor 4 45 cm	Sensor 5 60 cm	Sensor 6 90 cm	Sensor 7 120 cm	Sensor 8 150 cm	Sensor 9 180 cm
Viga Benkelman Raio = 10,8 cm Carga = 8,2 ton	26	24	21	18	15	10	8	6	5
FWD Raio = 15,0 cm Carga = 4,0 ton	25	21	19	15	12	8	5	4	3

Deflexões esperadas (0,01 mm) no topo da camada: SOLO FINO, SILTOSO OU ARGILOSO - Solo Argiloso LG'(4)

Equipamento	Sensor 1 0 cm	Sensor 2 20 cm	Sensor 3 30 cm	Sensor 4 45 cm	Sensor 5 60 cm	Sensor 6 90 cm	Sensor 7 120 cm	Sensor 8 150 cm	Sensor 9 180 cm
Viga Benkelman Raio = 10,8 cm Carga = 8,2 ton	43	31	25	18	13	9	7	6	5

Deflexões esperadas (0,01 mm) no topo da camada: SOLO FINO, SILTOSO OU ARGILOSO - Solo Argiloso LG'(1)

Equipamento	Sensor 1 0 cm	Sensor 2 20 cm	Sensor 3 30 cm	Sensor 4 45 cm	Sensor 5 60 cm	Sensor 6 90 cm	Sensor 7 120 cm	Sensor 8 150 cm	Sensor 9 180 cm
Viga Benkelman Raio = 10,8 cm Carga = 8,2 ton	45	30	23	16	12	9	7	6	5

Deflexões esperadas (0,01 mm) no topo da camada: SUBLEITO - Solo Siltoso NS'

Equipamento	Sensor 1 0 cm	Sensor 2 20 cm	Sensor 3 30 cm	Sensor 4 45 cm	Sensor 5 60 cm	Sensor 6 90 cm	Sensor 7 120 cm	Sensor 8 150 cm	Sensor 9 180 cm
Viga Benkelman Raio = 10,8 cm Carga = 8,2 ton	49	31	23	15	12	9	7	6	5

ANEXO E – Relatório da estrutura 05.

Programa MeDiNa v.1.1.5.0 - dezembro/2020

Cópia registrada para Tamara Gomes (tamara.gomes@estudante.ufla.br), da empresa UFLA - Universidade Federal de Lavras..

Dimensionamento do pavimento

Empresa: **UFLA**

Nome do Projeto: **Estrutura 05**

Responsável pelo projeto: **Tamara Gomes**

Seção do pavimento dimensionada considerando os dados inseridos pelo Engenheiro Projetista no programa MeDiNa.

Tipo de via: **Sistema Arterial Primário**

Nível de confiabilidade: **85%**

Período de projeto: **10** anos.

Análise realizada em **05/02/2023 às 19:11:29** no modo: **Pavimento Novo (Nível A)**

Área trincada prevista no pavimento no fim do período: **29,9%**

Afundamento de Trilha de Roda previsto no pavimento no fim do período: **4,9mm**

ATENÇÃO: O programa MeDiNa é apenas uma ferramenta de cálculo que auxilia o projetista no dimensionamento ou na avaliação de pavimentos, conforme descrito no Guia do Método Mecânico Empírico. O conhecimento das propriedades dos materiais a serem aplicados na estrutura do pavimento, por meio de ensaios de laboratório, assim como o conhecimento detalhado do tráfego são imprescindíveis para a elaboração do projeto. O sucesso do projeto somente será alcançado se as propriedades dos materiais consideradas no dimensionamento sejam aplicadas no campo e verificadas a partir de ensaios geotécnicos com um controle de qualidade rigoroso.

Portanto, a responsabilidade pelo projeto é exclusivamente do engenheiro projetista, que deve entender e avaliar criteriosamente os resultados gerados pelo programa, antes de aprovar o projeto para a execução no campo.

Estrutura do pavimento

Cam	Material	Espessura (cm)	Módulo de Resiliência	Coef de Poisson
1	CONCRETO ASFÁLTICO RJ CAP 50/70 #12,5mm Sepetiba	15,0	Resiliente Linear MR = 8289 MPa	0,30
2	MATERIAL GRANULAR Solo Brita - M5 (LG' s:1521)	25,0	Resiliente Linear MR = 385 MPa	0,35
3	SOLO FINO, SILTOSO OU ARGILOSO Solo Areno-argiloso LG'(2)	30,0	Resiliente Linear MR = 248 MPa	0,45
4	SUBLEITO Solo Siltoso NS'	SL	Resiliente Linear MR = 189 MPa	0,45

Materiais

1 - CONCRETO ASFÁLTICO: RJ CAP 50/70 #12,5mm Sepetiba

Propriedades

Modelos

Propriedades	Modelos
Tipo de CAP = CAP 50/70 - PG 64-16 Massa específica (g/cm ³) = 2,4 Resistência à tração (MPa) = 1,91 Teor de asfalto (%) = 6,0 Volume de vazios (%) = 5,0 Faixa Granulométrica = #12,5mm Abrasão Los Angeles (%) = 40,0 Norma ou Especificação = DNIT ES 31	Ensaio de Fadiga -Modelo: $k1 \cdot (et \wedge k2)$ -Coeficiente de Regressão (k1): $\geq 3,0e-13$ -Coeficiente de Regressão (k2): $\geq -3,78$ -Classe de Fadiga: ≥ 1 -FFM (100 μ a 250 μ): $\geq 0,73$ Flow Number Mínimo - Condição de Tráfego Normal: ≥ 295 ciclos - Condição de Tráfego Severa: ≥ 795 ciclos

2 - MATERIAL GRANULAR: Solo Brita - M5 (LG' s:1521)

Propriedades	Modelos
Descrição do Material = Solo LG' + 30% retido na #3/8", 30% na #4, 10% na #10, 10% na #40 Massa específica (g/cm ³) = 2,25 Umidade Ótima (%) = 7,0 Energia Compactação = Intermediário Abrasão Los Angeles (%) = 40,0 Norma ou Especificação = DNIT ES 141	Ensaio de Deformação Permanente Modelo: $ep = psi1 \cdot (s3 \wedge psi2) \cdot (sd \wedge psi3) \cdot (N \wedge psi4)$ Coeficiente de Regressão (k1 ou psi1): 0,31 Coeficiente de Regressão (k2 ou psi2): 0,06 Coeficiente de Regressão (k3 ou psi3): 0,85 Coeficiente de Regressão (k4 ou psi4): 0,05

3 - SOLO FINO, SILTOSO OU ARGILOSO: Solo Areno-argiloso LG'(2)

Propriedades	Modelos
Descrição do Material = Areia Argilosa - ES Grupo MCT = LG' MCT - Coeficiente c' = 2,05 MCT - Índice e' = 0,97 Massa específica (g/cm ³) = 1,8 Umidade Ótima (%) = 18,0 Energia Compactação = Normal Norma ou Especificação = DNIT ES 139	Ensaio de Deformação Permanente Modelo: $ep = psi1 \cdot (s3 \wedge psi2) \cdot (sd \wedge psi3) \cdot (N \wedge psi4)$ Coeficiente de Regressão (k1 ou psi1): 0,453 Coeficiente de Regressão (k2 ou psi2): -0,186 Coeficiente de Regressão (k3 ou psi3): 1,084 Coeficiente de Regressão (k4 ou psi4): 0,058

4 - SUBLEITO: Solo Siltoso NS'

Propriedades	Modelos
Descrição do Material = Solo siltoso Papucaia - RJ Grupo MCT = NS' MCT - Coeficiente c' = 1,00 MCT - Índice e' = 1,68 Massa específica (g/cm ³) = 1,8 Umidade Ótima (%) = 13,0 Energia Compactação = Normal Norma ou Especificação = DNIT ES 137	Ensaio de Deformação Permanente Modelo: $ep = psi1 \cdot (s3 \wedge psi2) \cdot (sd \wedge psi3) \cdot (N \wedge psi4)$ Coeficiente de Regressão (k1 ou psi1): 0,244 Coeficiente de Regressão (k2 ou psi2): 0,419 Coeficiente de Regressão (k3 ou psi3): 1,309 Coeficiente de Regressão (k4 ou psi4): 0,069

Definição do tráfego

Volume Médio Diário no ano de abertura do tráfego: VMD (1º ano) = **3000**

Fator de veículo no ano de abertura do tráfego: FV = **1,00**

Número de passagens anual do eixo padrão (1º ano): **1,10e+06**

% Veículos na faixa de projeto: **100%**

Número de passagens anual do eixo padrão na faixa de projeto: **1,10e+06**

Taxa de crescimento do tráfego: **0,0%**

Número Equivalente total de passagens do eixo padrão na faixa de projeto: N Eq = **1,10e+07**

Eixo	Tipo	FE	Carga (ton)	FC	FVi
1	Eixo simples de roda dupla	100%	8,20	1,000	1,000

Evolução dos danos no pavimento

Mês	N Equiv	Área Trincada	ATR (mm)
1	9,125e+04	1,25%	3,8
6	5,475e+05	2,52%	4,2
12	1,095e+06	3,52%	4,3
18	1,643e+06	4,44%	4,4
24	2,190e+06	5,35%	4,5
30	2,738e+06	6,30%	4,6
36	3,285e+06	7,29%	4,6
42	3,833e+06	8,35%	4,6
48	4,380e+06	9,49%	4,7
54	4,928e+06	10,70%	4,7
60	5,475e+06	11,99%	4,7
66	6,023e+06	13,38%	4,8
72	6,570e+06	14,85%	4,8
78	7,118e+06	16,42%	4,8
84	7,665e+06	18,08%	4,8
90	8,213e+06	19,84%	4,9
96	8,760e+06	21,69%	4,9
102	9,308e+06	23,62%	4,9
108	9,855e+06	25,65%	4,9
114	1,040e+07	27,76%	4,9
120	1,095e+07	29,94%	4,9

Análise de Afundamento de Trilha de Roda

Cam	Material	Afundamento de Trilha de Roda (mm)
1	CONCRETO ASFÁLTICO	0,00
2	MATERIAL GRANULAR	1,48
3	SOLO FINO, SILTOSO OU ARGILOSO	2,76
4	SUBLEITO	0,70

Cam Material	Afundamento de Trilha de Roda (mm)
Afundamento de Trilha de Roda (mm)	4,9

Controle por Deflexões

As bacias foram calculadas considerando as camadas aderidas e um fator de segurança, após avaliados dados de campo comparativos entre FWD e Viga Benkelman. Os resultados apresentados estão a favor do dimensionamento.

Deflexões esperadas (0,01 mm) no topo da camada: CONCRETO ASFÁLTICO - RJ CAP 50/70 #12,5mm Sepetiba

Equipamento	Sensor 1 0 cm	Sensor 2 20 cm	Sensor 3 30 cm	Sensor 4 45 cm	Sensor 5 60 cm	Sensor 6 90 cm	Sensor 7 120 cm	Sensor 8 150 cm	Sensor 9 180 cm
Viga Benkelman Raio = 10,8 cm Carga = 8,2 ton	27	24	22	18	15	11	8	6	5
FWD Raio = 15,0 cm Carga = 4,0 ton	26	22	19	16	12	8	5	4	3

Deflexões esperadas (0,01 mm) no topo da camada: MATERIAL GRANULAR - Solo Brita - M5 (LG' s:1521)

Equipamento	Sensor 1 0 cm	Sensor 2 20 cm	Sensor 3 30 cm	Sensor 4 45 cm	Sensor 5 60 cm	Sensor 6 90 cm	Sensor 7 120 cm	Sensor 8 150 cm	Sensor 9 180 cm
Viga Benkelman Raio = 10,8 cm Carga = 8,2 ton	42	31	25	19	14	9	7	6	5

Deflexões esperadas (0,01 mm) no topo da camada: SOLO FINO, SILTOSO OU ARGILOSO - Solo Areno-argiloso LG'(2)

Equipamento	Sensor 1 0 cm	Sensor 2 20 cm	Sensor 3 30 cm	Sensor 4 45 cm	Sensor 5 60 cm	Sensor 6 90 cm	Sensor 7 120 cm	Sensor 8 150 cm	Sensor 9 180 cm
Viga Benkelman Raio = 10,8 cm Carga = 8,2 ton	43	30	23	17	13	9	7	6	5

Deflexões esperadas (0,01 mm) no topo da camada: SUBLEITO - Solo Siltoso NS'

Equipamento	Sensor 1 0 cm	Sensor 2 20 cm	Sensor 3 30 cm	Sensor 4 45 cm	Sensor 5 60 cm	Sensor 6 90 cm	Sensor 7 120 cm	Sensor 8 150 cm	Sensor 9 180 cm
Viga Benkelman Raio = 10,8 cm Carga = 8,2 ton	49	31	23	15	12	9	7	6	5