



**ABNER LUCAS SILVA COSTA
JAKYSON OLIVEIRA DIAS**

**UTILIZAÇÃO DO NOVO MÉTODO DE
DIMENSIONAMENTO NACIONAL – MEDINA PARA
AVALIAR A INTERAÇÃO ENTRE AS CAMADAS DO
PAVIMENTO FLEXÍVEL A PARTIR DA VARIAÇÃO DO
SUBLEITO**

**LAVRAS–MG
2021**

**ABNER LUCAS SILVA COSTA
JAKYSON OLIVEIRA DIAS**

**UTILIZAÇÃO DO NOVO MÉTODO DE DIMENSIONAMENTO NACIONAL –
MEDINA PARA AVALIAR A INTERAÇÃO ENTRE AS CAMADAS DO
PAVIMENTO FLEXÍVEL A PARTIR DA VARIAÇÃO DO SUBLEITO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado 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

Me. Marina Donato

Coorientador

**LAVRAS–MG
2021**

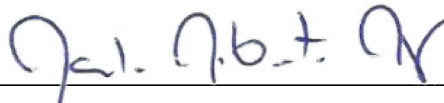
**ABNER LUCAS SILVA COSTA
JAKYSON OLIVEIRA DIAS**

**UTILIZAÇÃO DO NOVO MÉTODO DE DIMENSIONAMENTO NACIONAL –
MEDINA PARA AVALIAR A INTERAÇÃO ENTRE AS CAMADAS DO
PAVIMENTO FLEXÍVEL A PARTIR DA VARIAÇÃO DO SUBLEITO**

**USE OF THE NEW NATIONAL DIMENSIONING METHOD - MEDINA TO
EVALUATE THE INTERACTION BETWEEN FLEXIBLE FLOOR LAYERS FROM
THE SUBSTITUTE VARIATION**

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

Aprovado em 17 de novembro de 2021.
Prof. Dr. Paulo Roberto Borges – UFLA
Ma. Marina Donato – UFRJ
Prof. Dr. Keoma Defaveri do Carmo e Silva – UFLA



Prof. Dr. Paulo Roberto Borges

Orientador

**LAVRAS–MG
2021**

RESUMO

O presente trabalho propõe a elaboração de uma revisão da literatura a respeito do método de dimensionamento de pavimentos flexíveis, bem como aprofundar o conhecimento sobre o novo Método de Dimensionamento Nacional – MeDiNa. O principal objetivo desta pesquisa é realizar simulações de dimensionamento dos pavimentos flexíveis utilizando o *software* MeDiNa, com o intuito de investigar as interações entre as camadas verificando a área trincada do pavimento, espessura da camada, vida útil e uma análise econômica de cada situação. Para alcançar essa finalidade, será utilizado o próprio banco de dados do *software* para escolha dos materiais, as camadas do pavimento (revestimento asfáltico, base e sub-base) serão mantidas com os mesmos materiais, variando somente o material que compõe o subleito. Nesse sentido, foram utilizados 4 tipos de subleitos, revestimento asfáltico CAP 30/45, base com material de solo Brita Graduada Gnaisse C5 e sub-base de solo Argiloso LG'. Para cada subleito foram realizadas simulações de dimensionamento, avaliando a espessura necessária para que o pavimento atingisse uma área trincada de 20%, 25%, 30%, 35% e 40% em um período de projeto de 10 anos. Na sequência, com a espessura já determinada para cada situação, avaliou-se a vida útil do pavimento considerando a percentagem de 30% de área trincada, critério de parada do *software*. Com isso, foi possível uma análise de custos para as estruturas em estudo, os cálculos foram realizados por quilômetro construído e baseados nos valores da tabela Setop do Estado de Minas Gerais, atualizada em julho de 2021. Por meio dos resultados obtidos, verificou-se que alguns solos performaram melhores que outros, necessitando, para uma mesma percentagem de área trincada e período de projeto, camadas com espessuras menores, o que está diretamente ligada ao custo do pavimento, já que o revestimento asfáltico é o que mais impacta no orçamento. Por fim, conclui-se que subleitos que demandam uma menor espessura de revestimento asfáltica, gera um menor custo do projeto da via, e a partir disso temos que o método utilizado é eficiente para avaliação da vida útil, dimensionamento das espessuras e os devidos custos acarretados, permitindo então, ter informações mais concretas do seu projeto.

Palavras-chave: Dimensionamento. MeDiNa. Pavimento flexível. Vida Útil. Durabilidade.

ABSTRACT

The present work proposes the elaboration of a literature review regarding the flexible pavement design method, as well as deepening the knowledge about the new National Design Method - MeDiNa. The main objective of this research is to carry out some design simulations of flexible pavements using the MeDiNa software, in order to investigate the interactions between the layers, verifying the cracked area of the pavement, layer thickness, service life and an economic analysis of each situation. To achieve this goal, the software's own database will be used to choose the materials, as pavement layers (asphalt coating, base and sub-base) will be kept with the same materials, varying only the material that makes up the subgrade. In this sense, 4 types of sub-grades were used, asphalt coating CAP 30/45, base with soil material Graded Gravel Gnaisse C5 and sub-base with clayey soil LG'. For each subgrade, dimensioning simulations were carried out, evaluating the thickness needed for the pavement to reach a cracked area of 20%, 25%, 30%, 35% project and 40% in a period of 10 years. Then, with a thickness already specified for each situation, life span of the pavement was evaluated considering a percentage of 30% of the cracked area, the software stop criterion. Thus, it was possible to carry out a cost analysis for the structures under study, the calculations were performed per kilometer built and based on the values of the Setop table for the State of Minas Gerais, updated in July 2021. Through the results obtained, it was verified that some soils performed better than others, requiring, for the same percentage of cracked area and project period, layers with smaller thicknesses, which is directly linked to the cost of the pavement, since the asphalt coating is the one that most impacts the budget. Finally, we conclude that subgrades that require a lower asphalt coating thickness generate a lower cost of the road project, and from this we have that the method used is efficient for the evaluation of the service life, dimensioning of the thicknesses, and the costs involved, allowing us to have more concrete information about the project.

Keywords: Sizing. MeDiNa. Flexible Pavement. Life Span. Durability.

Sumário

| | |
|---|-----------|
| 1. INTRODUÇÃO..... | 7 |
| 1.1. Considerações Iniciais | 7 |
| 1.2. Objetivos..... | 8 |
| 1.3. Estrutura do Trabalho | 8 |
| 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 10 |
| 2.1. Pavimento Rodoviário no Brasil | 10 |
| 2.2. Pavimento Flexível..... | 12 |
| 2.2.1. Estrutura das Camadas | 13 |
| 2.3. Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis..... | 16 |
| 2.3.1. Método Empírico | 17 |
| 2.3.2. Método Mecanístico..... | 18 |
| 2.3.3. Método Mecanístico-Empírico | 19 |
| 2.4. Método Medina | 20 |
| 2.4.1. Critério de Fadiga..... | 25 |
| 2.4.2. Critério de Aderência | 28 |
| 2.4.3. Módulo Resiliente | 29 |
| 2.4.4. Critério de Parada | 31 |
| 2.5. Estimativa e Análise de Custos..... | 31 |
| 3. METODOLOGIA..... | 32 |
| 3.1. Determinação dos Materiais | 33 |
| 3.2. Dimensionamento | 35 |
| 3.3. Análise de Custo | 36 |
| 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES | 39 |
| 4.1. Comparativo dos Dimensionamentos das Espessuras..... | 39 |

| | |
|---|-----------|
| 4.2. Comparativo dos Danos Mensais | 40 |
| 4.3. Análise Comparativa dos Custos | 42 |
| 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS | 44 |
| 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 46 |
| APÊNDICE A | 50 |
| A.1 – Materiais e suas devidas propriedades inseridas no MeDiNa..... | 50 |

1. INTRODUÇÃO

1.1. Considerações Iniciais

No Brasil, a malha rodoviária é a maior matriz de transporte do país, correspondendo a 61% da movimentação de mercadorias e 95% da de passageiros. Entretanto, apenas 12,4% da extensão total de rodovias são pavimentados. Esses dados ressaltam a necessidade e a importância da infraestrutura rodoviária para o desenvolvimento econômico do país, evidenciando que ainda há uma grande área a ser pavimentada, e a preocupação com um bom dimensionamento se torna recorrente (CNT, 2019).

Para isso, o engenheiro ao realizar o dimensionamento deve oferecer segurança e conforto ao usuário durante a vida útil prevista em projeto, sendo assim, a estrutura do pavimento tem a obrigação de resistir os esforços solicitantes e sua camada de revestimento não deve apresentar trincamentos e afundamentos excessivos, quando submetida a um determinado número de passagens de eixo de carga (FRANCO, 2007).

No Brasil, como em grande parte do mundo, os métodos utilizados para dimensionamento de pavimentos flexíveis fundamentam-se em modelos empíricos baseados em ensaios como o *California Bearing Ratio* (CBR) e de experiências em pistas de testes como a da AASHTO (*American Association of State Highway and Transportation Officials*). No entanto, essas metodologias apresentam falhas no que se diz respeito a análise das tensões, deformações e deslocamentos do pavimento. Esse fato, fez com que o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) fosse em busca de alguma maneira para corrigir esses erros, assim surgiram como soluções os métodos empíricos-mecanicistas, que conseguem relacionar os ensaios de caracterização com as análises das tensões e deformações da estrutura (MOTTA, 1991).

Com isso, desde 2018, um novo *software* chamado MeDiNa (Método de Dimensionamento Nacional de Pavimentos) vem revolucionando a forma de dimensionar pavimentos, tendo sua origem de um convênio entre o Instituto de Pesquisas Rodoviárias do DNIT (IPR/DPP) e a Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). A sua implementação visa acrescentar melhorias na qualidade dos projetos a serem executados (FRANCO e MOTTA, 2020).

Por sua recente implementação, o modo de projetar está em fase de transição, deixando de se utilizar apenas o antigo método do DNIT. Diante disso, ressalta-se a importância da academia para a expansão do aprendizado do novo método de dimensionamento de pavimentos

flexíveis. Neste momento, várias universidades tem promovido cursos e treinamentos sobre essa nova ferramenta (FRANCO e MOTTA, 2020).

Portanto, salienta a importância do aprendizado e avaliação do Método MeDiNa. Propõe-se neste trabalho realizar as simulações a partir dos materiais de cada camada do pavimento. Para cada simulação foi aferido as variações de sua vida útil, espessura de cada camada e percentagem de área trincada, sendo possível assim, realizar uma análise de custos para cada caso.

1.2. Objetivos

Este trabalho tem como objetivo a avaliação do método MeDiNa, por meio de simulações de dimensionamento para um pavimento flexível, utilizando a metodologia mecanística-empírica presente nesse novo método de pavimentação asfáltica do DNIT. Para as análises serão utilizados 4 tipos de subleitos e materiais fixos para as camadas de base, sub-base e revestimento asfáltico.

Com isso, como objetivos secundários, espera-se obter:

- Investigação das principais alterações nas espessuras das camadas asfálticas dimensionadas;
- Inspeção do percentual de área trincada para cada simulação de dimensionamento realizada;
- Verificação do impacto das variações dos materiais da camada do subleito na vida útil do pavimento;
- Avaliação do custo do pavimento a partir das diversas variações de subleitos que foram realizadas.

1.3. Estrutura do Trabalho

Este trabalho está ordenado em cinco capítulos, cujos conteúdos são detalhados a seguir.

Capítulo 1: Contém as considerações gerais sobre o tema, apresentação dos objetivos e estrutura do trabalho.

Capítulo 2: Será discutido sobre pavimento flexível e seus métodos de dimensionamento utilizados no Brasil, sua evolução temporal e fundamentação teórica para se ter um bom entendimento da metodologia aplicada neste trabalho.

Capítulo 3: Trata da metodologia e procedimentos utilizados para alcançar os objetivos do trabalho. Neste capítulo serão apresentados os materiais, suas características e os procedimentos de cálculos utilizados para cada simulação de dimensionamento.

Capítulo 4: Mostra os resultados e discussões das simulações realizadas pelo método empírico-mecanicistas e suas análises no *software* MeDiNa.

Capítulo 5: Apresenta as considerações finais e recomendações para trabalhos futuros que podem ser desenvolvidos na área.

Por fim são apresentadas as referências bibliográficas utilizadas na elaboração do trabalho.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

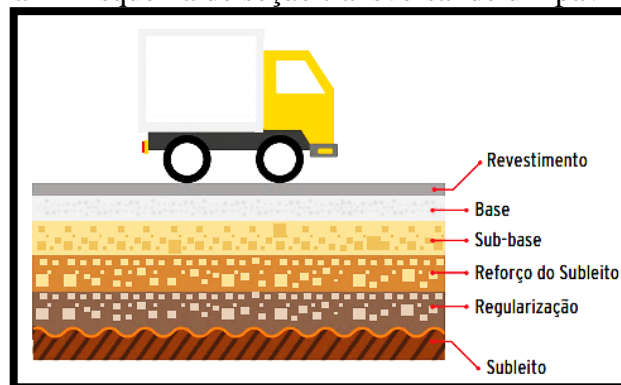
2.1. Pavimento Rodoviário no Brasil

Pavimento é o nome que se dá a uma estrutura formada por múltiplas camadas de espessuras finitas construída sobre uma base horizontal, dimensionado para resistir aos esforços oriundos do tráfego de veículos e desgastes causados pelo clima. Além disso, o pavimento é responsável também por propiciar conforto, economia e segurança aos usuários (BERNUCCI *et al.*, 2010).

No Brasil, os trechos pavimentados ainda enfrentam grandes problemas devido à falta de recursos financeiros e a incompetência do dimensionamento realizado, enquanto a rodovia brasileira é projetada para durar entre 8 e 12 anos, em outros países, a exemplo os Estados Unidos, os pavimentos são dimensionados para 25 anos (CNT, 2019).

Um exemplo de seção transversal com todas as camadas pode ser visto na Figura 1, cada camada tem sua devida importância na constituição do pavimento e serão explicadas no decorrer desse trabalho.

Figura 1 - Esquema de seção transversal de um pavimento.

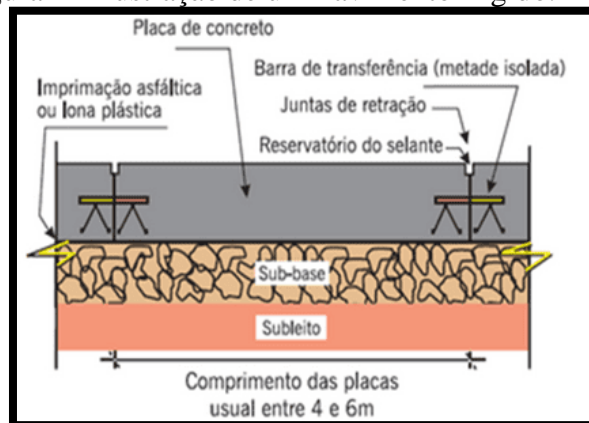


Fonte: CNT (2019).

Os tipos de pavimentos são classificados em:

Pavimento Rígido (FIGURA 2) é aquele em que o revestimento tem uma elevada rigidez em relação às camadas inferiores, absorvendo praticamente todas as tensões provenientes do carregamento aplicado. O dimensionamento deste tipo de pavimento é baseado nas propriedades resistentes de placas de concreto, as quais são apoiadas sobre a sub-base. Os pavimentos rígidos são constituídos por camadas que trabalham essencialmente à tração, são pouco deformáveis e com uma vida útil maior, devido o cimento *Portland* de sua última camada (BERNUCCI *et al.*, 2010).

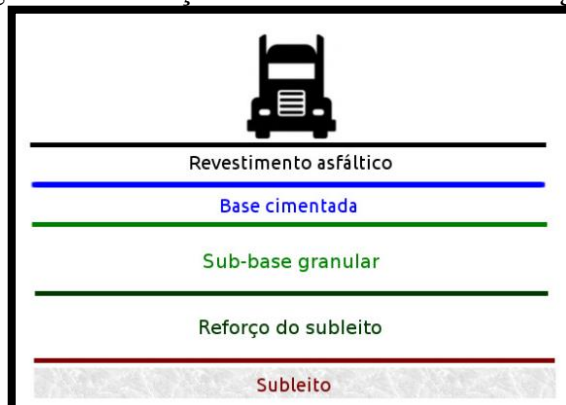
Figura 2 - Ilustração de um Pavimento Rígido.



Fonte: BERNUCCI *et al.*, (2010).

Pavimento Semirrígido (FIGURA 3) caracteriza-se por uma base cimentada quimicamente, como por exemplo, por uma camada de solo cimento revestida por uma camada asfáltica (CNT, 2019).

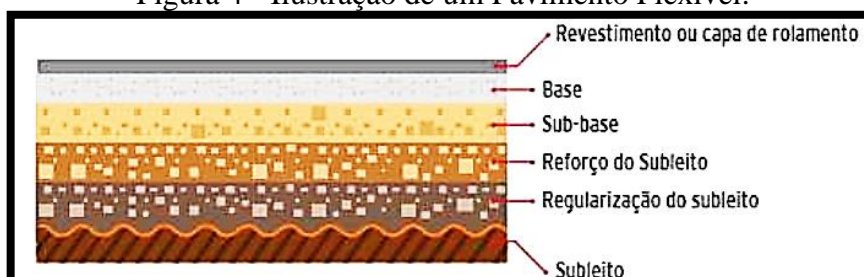
Figura 3 - Ilustração de um Pavimento Semirrígido.



Fonte: CNT (2019).

Pavimento Flexível (FIGURA 4) é aquele em que todas as camadas sofrem uma deformação elástica significativa sob o carregamento aplicado e, portanto, a carga se distribui em parcelas aproximadamente equivalentes entre as camadas (CNT, 2019).

Figura 4 - Ilustração de um Pavimento Flexível.



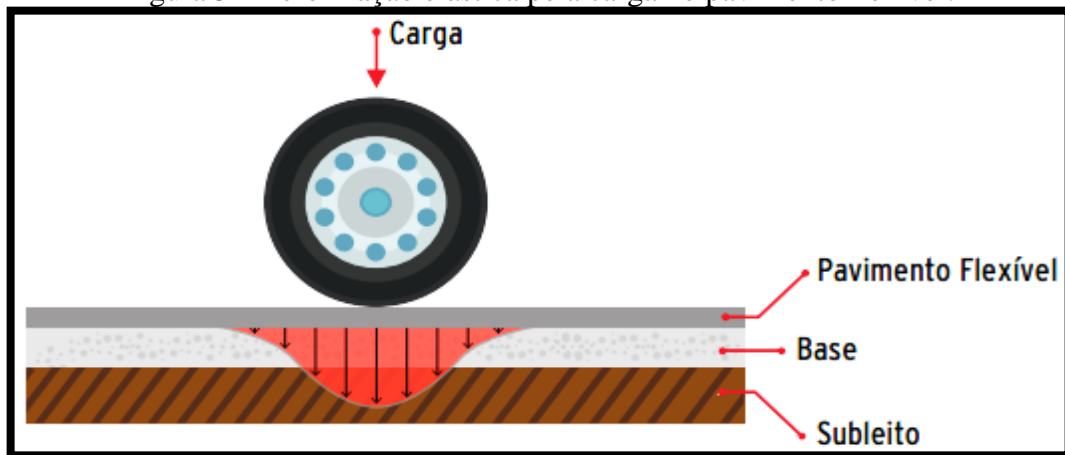
Fonte: CNT (2019).

2.2. Pavimento Flexível

Pavimentos Flexíveis, normalmente, são constituídos por uma ou mais camadas de misturas betuminosas apoiadas sobre camadas de material granular. A distribuição das tensões nesta estrutura é feita pela camada de base, dado que a camada de revestimento asfáltico não possui rigidez suficiente para resistir e distribuir as tensões (FONTES, 2009).

Com isso, a carga advinda do tráfego se distribui de forma equivalente entre elas, o que permite observar uma área de tensões bem concentrada próximo ao ponto de aplicação da carga (FIGURA 5) (CNT, 2019).

Figura 5 - Deformação elástica pela carga no pavimento flexível.



Fonte: CNT (2019).

Esses pavimentos flexíveis são formados por camadas que não trabalham à tração, normalmente, por revestimento betuminoso delgado sobre uma base granular ou de solo estabilizado granulometricamente. Uma de suas características é o fato de seu tipo de ruptura ser essencialmente o afundamento proveniente das deformações permanentes (MEDINA *et al.*, 2015).

O glossário de termos técnicos rodoviários, presente na norma DNER - CLA 259 (DNER, 1996) as define como:

- Subleito: parte de terra usada de fundação para o pavimento ou revestimento;
- Reforço de subleito: camada granular do pavimento feita com o objetivo da melhora da capacidade de suporte de carga do subleito e conseqüentemente a redução da espessura da sub-base;
- Sub-base: camada corretiva do subleito e complementar à base, com as mesmas funções desta, e executada quando for conveniente reduzir a espessura de base, visando a economia;

- Base: camada destinada a resistir aos esforços verticais provenientes dos veículos, distribuindo-os às demais camadas, e sobre a qual se constrói o revestimento;
- Revestimento: camada superior do pavimento, que recebe diretamente as ações verticais e horizontais dos veículos, visando a melhoria das condições de rolamento dos automóveis, proporcionando conforto e segurança.

2.2.1. Estrutura das Camadas

Nesse tópico serão explicados cada camada do pavimento flexível, importância estrutural dessas e os materiais comumente utilizados em suas construções.

Começando pelo subleito, terreno de fundação onde será apoiado todo o pavimento. É a camada responsável por absorver definitivamente os esforços verticais do tráfego e é delimitado superiormente pelo pavimento. Segundo o Manual de Pavimentação do DNIT, o subleito deve ser estudado até a profundidade onde as cargas impostas são significativas, essa espessura varia entre 0,6 e 1,5 m (FRANCO e MOTTA, 2020).

Acima do subleito é encontrado uma faixa de nivelamento denominada regularização, é construída para moldar transversal e longitudinalmente a camada, corrigindo falhas do terreno com o propósito de deixá-lo o mais regular possível. No entanto, a regularização não é considerada uma camada do pavimento (FRANCO e MOTTA, 2020).

Sendo assim, para uma melhor distinção dos materiais empregados, analisamos as características tecnológicas destes, de modo a se garantir a escolha de um material que resista de forma adequada as cargas que o pavimento irá suportar. Seguem as características que devem ser levadas em consideração no processo de pavimentação presentes na norma DNER - CLA 259 (DNER, 1996):

- Granulometria: é a proporção relativa, em porcentagem, dos diferentes tamanhos dos grãos que constituem o agregado.
- Forma: é avaliada pelo Índice de Forma, cuja determinação se faz por meio de ensaio específico normalizado pelo DNER.
- Absorção de água: indica a quantidade de água que um agregado é capaz de absorver.
- Resistência ao choque e ao desgaste: estas estão associadas aos esforços solicitados pelo tráfego. A resistência ao choque é avaliada pelo ensaio Treton e a resistência ao desgaste pelo ensaio Los Angeles, ambos normalizados pelo DNER.

- Durabilidade: relacionada a resistência ao intemperismo, avaliada por meio de um ensaio em que o agregado é submetido ao ataque de uma solução padronizada de sulfatos de sódio ou de magnésio, ensaio normalizado pelo DNER.
- Limpeza: para serem usados na pavimentação betuminosa, os agregados devem estar livres de substâncias nocivas, como argila, matéria orgânica, etc.
- Adesividade: propriedade que tem o agregado de ser aderido por material betuminoso (ligante). É avaliada pelo não deslocamento da película betuminosa que recobre o agregado, quando a mistura agrega-ligante é submetida à ação de água destilada fervente.
- Massa específica aparente: identifica o material do qual se obteve o agregado. É necessária para transformação de unidades gravimétricas em volumétricas e vice-versa.

Partindo para as camadas superiores, temos a sub-base e a base. A sub-base é uma camada complementar a base, é executada para atender circunstâncias técnico-econômicas, visando regularizar e reduzir a espessura da base, conseqüentemente os custos da obra. Já a base, é uma camada destinada a resistir e distribuir os esforços verticais oriundos do tráfego, sobre ela é construído o revestimento (BALBO, 2007).

Em alguns casos, é necessário a execução da imprimação ou da pintura de ligação entre as camadas. Ambas consistem na aplicação de uma camada fina de material asfáltico sobre a superfície, a imprimação serve para aumentar a coesão, fixar as partículas eventualmente soltas e impermeabilizar a camada antes da execução da camada superior, geralmente executada entre a base e a camada asfáltica. Já a pintura de ligação tem a função de promover aderência entre as camadas, normalmente executada sobre o revestimento asfáltico ou não asfáltico impermeável. Os procedimentos são bem semelhantes, diferenciando devido as condições das camadas subjacentes e pelo fato que na imprimação ocorre penetração do material na camada enquanto que na pintura de ligação isso não ocorre (FRANKLIM, 2007).

Para a base e sub-base de pavimentos flexíveis o Manual de restauração de pavimentos asfálticos do DNIT estabelece os seguintes materiais (FIGURA 6) (DNIT, 2006).

Figura 6 - Tipos de bases e sub-bases flexíveis.

| Tipos de bases e sub-bases flexíveis | | | |
|--------------------------------------|------------------------------|------------------------------|----------------------------|
| Bases e Sub-bases Flexíveis | Granulares | Estabilização granulométrica | Solo brita |
| | | | Brita graduada |
| | | | Brita corrida |
| | | Macadame hidráulico | |
| | Estabilizados (com aditivos) | Com cimento | Solo cimento |
| | | | Solo melhorado com cimento |
| | | Com cal | Solo-cal |
| | | | Solo melhorado com cal |
| Com betume | | Solo-betume | |
| Bases betuminosas diversas | | | |

Fonte: DNIT (2006).

Em solos argilosos, a estabilização granulométrica é realizada adicionando um material mais bem graduado, no caso, a brita da base. Com a adição dessa, diminui-se a quantidade de finos e aumenta a resistência da camada, transferindo mais segurança na construção.

Por último, tem-se o revestimento, camada que recebe diretamente a ação do tráfego e é responsável principalmente pela qualidade da condição de rolamento da pista. Como essa é uma camada superficial, está em contato direto com as cargas e com as ações ambientais, o que torna necessário ser dimensionada para resistir a essas solicitações e ao intemperismo, visando aumentar assim sua durabilidade e o conforto proporcionado aos usuários (BERNUCCI *et al.*, 2010).

Para o revestimento de pavimentos flexíveis o Manual de restauração de pavimentos asfálticos do DNIT estabelece os seguintes materiais (FIGURA 7) (DNIT, 2006).

Figura 7 - Tipos de revestimentos flexíveis.

| Tipos de revestimentos flexíveis | | | | |
|----------------------------------|----------------|-----------------------|-------------------------------------|--|
| Revestimento flexíveis | Betuminosos | Por penetração | Tratamento superficiais betuminosos | |
| | | | Macadames betuminosos | |
| | | Por mistura | Na usina | Pré-misturado de graduação tipo aberta |
| | | | | Pré-misturado de graduação tipo densa |
| | | | | Areia betume |
| | | | Concreto betuminoso | |
| | | | Sheet-asphalt | |
| | Por calçamento | Alvenaria polidétrica | | |
| | | Paralelepípedos | Pedra | |
| | | | Betume | |
| Cimento | | | | |
| Cerâmica | | | | |

Fonte: DNIT (2006).

Como exemplo, o revestimento asfáltico CAP 30/45 é um cimento obtido pela destilação do petróleo e detentor de propriedades como impermeabilização, flexibilidade, durabilidade e alta resistência a intemperismos. Devido a essas qualidades e consistências, ele é comumente

indicado para uso em construção e manutenção de pavimentos asfálticos (BERNUCCI *et al.*, 2010).

Definida toda a estrutura de um pavimento flexível, próximo passo é determinar a espessura de cada camada, para isso devemos entender os métodos de dimensionamento utilizados, a metodologia e as considerações particulares de cada um.

2.3. Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis

O dimensionamento do pavimento estabelece a espessura e os materiais de cada camada, destinadas técnica e economicamente a resistir, transmitir e distribuir as pressões resultantes do tráfego ao subleito, evitando deformações, rupturas e/ou desgastes superficiais consideráveis. Além de suportar todas as solicitações do tráfego, o pavimento deverá oferecer aos usuários conforto e segurança, o que torna o processo de dimensionamento de extrema importância na construção da via (CNT, 2019).

Para a execução de um bom dimensionamento deve-se levar em consideração às condições ambientais, geológicas e de tráfego. Portanto, é necessário a avaliação das características dos materiais, o comportamento deles em relação à aplicação de cargas, o carregamento demandado pelo tráfego e como será a resposta da estrutura, além de considerar todas as variações climáticas do local da obra (FONTES, 2009).

Portanto, como visto, são considerados muitos fatores, o que torna a aplicação do processo uma etapa crucial, pois erros de projeto podem ocasionar: qualidade de rolamento inadequada, excesso de defeitos de superfície, redução do coeficiente de atrito entre pneu e pavimento, necessidade excessiva de serviços de conservação, custos elevados para o usuário e capacidade estrutural inadequada para a solicitação de tráfego prevista (FRANCO, 2007).

Atualmente, no Brasil e no mundo, existem vários métodos de dimensionamento de pavimentos flexíveis. Há anos atrás eram utilizados apenas os métodos empíricos, baseados na experiência em campo, por meio da observação do desempenho do pavimento ao longo da vida de projeto. No entanto, esses métodos eram limitados em relação ao seu campo de aplicação, pois apenas poderiam ser reproduzidos adequadamente em locais com condições climáticas relativamente semelhantes às do local onde foram realizadas as observações (CNT, 2019).

Dessa forma, tornou-se necessário o desenvolvimento de metodologias mais completas, que fossem capazes de atender melhor às diferentes necessidades de projeto. Num primeiro momento, foi-se desenvolvido os métodos mecânicos, que visam incluir ao dimensionamento do pavimento o problema da ruptura por fadiga das camadas asfálticas, considerando as

propriedades mecânicas, principalmente quanto ao comportamento elástico, dos solos e dos materiais de pavimentação.

Dando sequência as pesquisas de desenvolvimento, foi se estabelecida uma implementação na maneira de execução do dimensionamento, a análise de tensões e deformações através de modelos de cálculo baseados na teoria da elasticidade, admitindo o comportamento das camadas do pavimento como não linear ou linear, surgindo assim os métodos empírico-mecanicistas (FONTES, 2009).

2.3.1. Método Empírico

Os métodos empíricos são baseados nas experiências acumuladas e fazem a associação do desempenho do pavimento a determinadas características dos materiais utilizados na construção. A correlação direta entre alguns parâmetros estruturais, de tráfego e de vida útil do pavimento existente analisado, estimulou a criação de ábacos, tabelas e fórmulas para esses projetos estruturais (BEZERRA, 2004).

A propagação do uso dos métodos empíricos foi fortemente difundida pela facilidade de operação e pelo fato de trabalharem com dados de ensaios de caracterização mais simples, como exemplo, ensaios de classificação do solo e ensaio CBR (BEZERRA, 2004).

Como vantagens apresentadas pelo método empírico pode-se pontuar o fato de que os testes de caracterização necessários são de fácil execução e não requerem equipamentos complexos. Além disso, em um pavimento que exhibe as mesmas condições da parte experimental na qual o método empírico se baseia, a reprodução da performance é apresentada em uma magnitude real (BEZERRA, 2004; HARTMANN, 2009).

No entanto, este método apresenta algumas limitações em relação ao uso de novos materiais, diferentes tipos de veículo, condições do tráfego, condições climáticas distintas, dentre outras variáveis (COUTINHO, 2011).

Além disso, sua precisão matemática é baixa e não consegue analisar a tensão e a deformação da estrutura do pavimento. Isso ocorre devido a metodologia empírica tratar o pavimento como uma estrutura única, não contemplando teorias acerca do comportamento elástico de cada camada do pavimento (BEZERRA, 2004).

Outra observação importante são que os métodos empíricos estão defasados, a falta de atualização faz com que seus dados de projeto não correspondem a atual realidade, pois com a evolução da tecnologia e o crescimento demográfico, tem-se novas considerações em relação

ao volume de tráfego, cargas e materiais utilizados na pavimentação. Um exemplo disso é o método de dimensionamento do DNIT (PELISSON *et al.*, 2015; MOTA *et al.*, 2018).

2.3.2. Método Mecanístico

O projeto do pavimento asfáltico é denominado mecanístico no seguinte caso: quando esse prever as tensões e deformações causados pelo tráfego e clima na estrutura, procurando, assim, torná-las compatíveis com a resistência dos materiais utilizados na construção. (BEZERRA, 2004).

Ao adotar este método de observação, você pode compreender os aspectos funcionais da estrutura quando solicitado, isso pode resultar em alterações nas propriedades do material, composição e a espessura da camada. Sendo assim, utilizando a metodologia mecanística é possível alterar a composição ou dimensão da estrutura de tal forma a conseguir um desempenho melhor dos materiais, contribuindo diretamente na vida útil do projeto (BEZERRA, 2004).

Segundo o guia AASHTO (1986), pode-se descrever como vantagens de se utilizar um método mecanísticos no dimensionamento de pavimentos flexíveis:

- melhor confiabilidade no projeto;
- possibilidade de prever defeitos específicos;
- possibilidade de extrapolação de resultados de laboratório e de campo;
- maior compatibilização entre custo e benefício das obras;
- possibilidade de prever as consequências de novas configurações de carregamento;
- melhor utilização dos materiais disponíveis;
- possibilidade de se considerar explicitamente os defeitos sazonais.

Em razão de todas essas vantagens proporcionada pela nova maneira de analisar o problema e realizar o dimensionamento, os métodos mecanísticos tem-se tornado uma tendência, tanto para pavimentos flexíveis quanto para rígidos. A parcela de empirismo prende-se principalmente à correta avaliação do tráfego e aos parâmetros experimentais do modelo matemático, que são determinados no laboratório e no campo. Já as investigações mecanísticas são auxiliadas por meio de ferramentas de análises estruturais no cálculo de tensões e deformações (MEDINA e MOTTA, 2015).

2.3.3. Método Mecânico-empírico

Os métodos mecânicos-empíricos surgiram por meio de uma gama de estudos voltados ao desenvolvimento de análises mais modernas para o dimensionamento de pavimento asfáltico, com a intenção de reduzir a grande quantidade de empirismo existente nos métodos utilizados (FRANCO, 2007).

As formas de dimensionamento até então utilizadas eram falhas em relação a investigação das tensões, deformações e deslocamento do pavimento. Desta forma, a implementação de ensaios de caracterização concomitantemente às análises de tensões e deformações do sistema de camadas se tornou necessária no aperfeiçoamento dos métodos de dimensionamento de pavimentos flexíveis (MOTTA, 1991).

A metodologia mecânica-empírica, é baseada em modelos matemáticos obtidos a partir de regressões de dados de ensaios laboratoriais, buscando converter as tensões, deformações e deslocamento, afim de torná-los compatíveis com o estado de tensões e deformações admissíveis para uma determinada vida de projeto. Quanto ao empirismo, esse se encontra no fator de calibração entre o campo e o laboratório (FRANCO, 2007).

Nos métodos empírico-mecanicistas o processo é realizado com o auxílio de *softwares*, assim permite a calibração e validação com dados de campo, trazendo muitos benefícios no dimensionamento, pois permitem prever os danos que podem ocorrer no pavimento ao longo de sua vida de projeto. O seu uso ainda traz uma maior confiabilidade nos projetos de pavimentação, melhoram a escolha e utilização dos materiais de acordo com as suas características e previsão de falhas provocadas na estrutura (HAAS *et al.*, 2007).

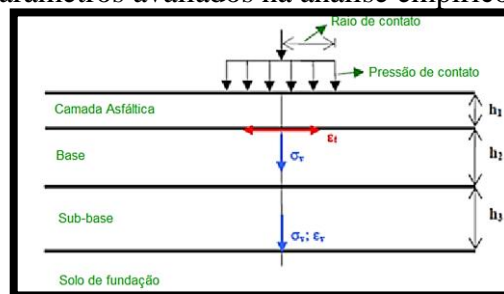
O dimensionamento de um pavimento por meio do método empírico-mecanicista pode ser definido em cinco passos básicos (FRANCO, 2007):

- agrupamento de dados da região de estudo;
- correlação entre o tráfego e os dados de resistência dos materiais;
- escolha da espessura das camadas e cálculo das tensões e deformações;
- relação dos valores críticos de tensões e deformações com os danos obtidos pela repetição de carga;
- verificação das espessuras escolhidas e sua validação com as condições impostas no dimensionamento.

Os principais parâmetros avaliados na análise empírico-mecanicista (FIGURA 8), são (FONTES, 2009):

- deformação de tração (ϵ_t) na fibra inferior da camada asfáltica, para controle do trincamento por fadiga – o fenômeno da fadiga é um processo de deterioração estrutural que sofre um material, quando submetido a um estado de tensões e de deformações elásticas repetidas, resultando em trincas ou fratura completa, após um número suficiente de repetições do carregamento, ou seja, é a perda de resistência que o material sofre, quando solicitado repetidamente por uma carga (PINTO, 2016);
- estado de tensão (σ_r) no topo da camada de base, importante nas estruturas que possuem revestimentos delgados para se controlar a ruptura por cisalhamento;
- tensão (σ_v') ou deformação vertical (ϵ_v) no topo do solo de fundação (subleito) para controle da deformação permanente.

Figura 8 - Parâmetros avaliados na análise empírico-mecanicista.



Fonte: MEDINA e MOTTA (2015).

No entanto, a metodologia empírico-mecanicista traz uma crítica ao custo-benefício entre os custos de pesquisa e a qualidade do projeto que será gerado, devido aos diversos desafios em termos de investimento em ensaios laboratoriais, coletas de dados em campo e pesquisas experimentais (PEREIRA, 2017).

Entretanto, em termos de eficiência estrutural, esta metodologia contempla o estudo e a avaliação de variáveis não analisadas nos métodos empíricos utilizados no Brasil, permitindo o uso de materiais cujo desempenho de campo não é conhecido pela falta de experiência, além de considerar os efeitos das condições de tráfego e clima no dimensionamento (FRANCO, 2007).

2.4. Método Medina

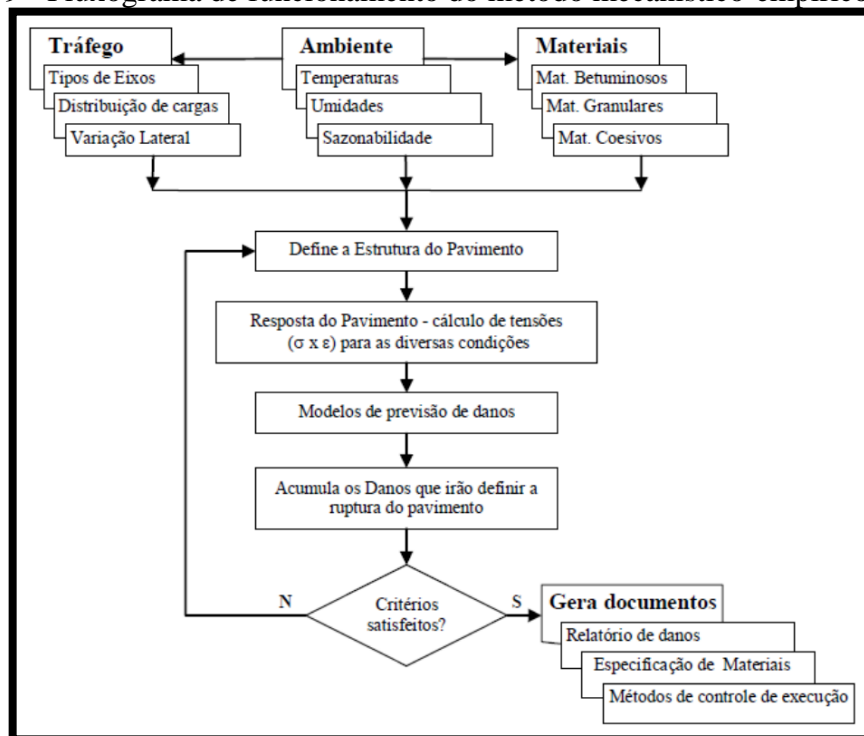
O método de Dimensionamento Nacional (MeDiNa) é desenvolvido a partir da cláusula de fiscalização descentralizada, assinada pelo instituto Pesquisa Rodoviária-IPR e Instituto

Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, da Universidade Federal do Rio de Janeiro-COPPE, é nomeado em homenagem ao professor Jean Jacques de Medina (FRANCO, 2007; MOTTA, 2020).

O método Medina foi criado com o objetivo de garantir a integridade do pavimento, auxiliado por ferramentas computacionais, baseando-se na metodologia mecanístico-empírica. Busca compatibilizar a resistência dos materiais utilizados com os esforços que agem no pavimento de forma equilibrada, evitando a ruptura precoce decorrente de níveis elevados de tensões impostas sobre a estrutura (BEZERRA, 2004).

Essa nova forma de dimensionamento foi desenvolvida por meio de uma atualização do programa computacional SisPav. O *software* leva em consideração definições cuja origem está sediada na mecânica dos pavimentos. O programa possui mecanismos de manipulação de fácil entendimento, com simples inserção de dados e parâmetros indicados para efeitos de anteprojeto. Além disso, segue um ponto de vista que tem como premissa a análise elástica não linear para o dimensionamento das camadas com base nas informações detalhadas do tráfego, das condições ambientais e das características dos materiais, de forma a reduzir a parcela de empirismo utilizada no dimensionamento de pavimentos (FRANCO, 2007). O funcionamento do método-empírico SisPav é detalhado a seguir (FIGURA 9):

Figura 9 - Fluxograma de funcionamento do método mecanístico-empírico SisPav.



Fonte: FRANCO (2007).

O MeDiNa, diferente do SisPav, não considera os critérios de deformação máxima no topo do subleito e deflexão máxima admissível no topo do revestimento, e houve também um ajuste nos critérios de deformação permanente e fadiga (MACHADO *et al.*, 2020).

Com a intenção de reduzir os custos e aumentar a vida útil do pavimento, o *software* MeDiNa utiliza uma modelagem física que permite calcular o movimento horizontal relativo na *interface* entre duas camadas, sendo possível estabelecer o critério de aderência, que será apresentada no Subitem 2.4.2. (FRANCO, 2007; MOTTA, 2020).

São duas possibilidades de operação do *software*, a primeira apresenta a avaliação da estrutura realizando os cálculos e a verificação de área trincada e/ou deformação permanente sem alteração das espessuras. A segunda maneira, seria o dimensionamento da estrutura de tal forma que o critério de fadiga seja atendido, alterando as espessuras das camadas, que será apresentada no Subitem 2.4.1. (FRANCO, 2007; MOTTA, 2020).

No entanto, para que o método seja bem executado e lhe ofereça resultados confiáveis, é necessário o entendimento acerca dos dados de entrada de cada camada. Em relação ao subleito, são necessários, o módulo e a curva de deformação permanente, obtidos por meio de ensaios laboratoriais. Além do subleito, os materiais utilizados nas estruturas do pavimento, provenientes de jazidas, pedreiras ou areais também podem ter suas propriedades, de módulo e deformação permanente, conhecidas por meio dos ensaios. Outra informação importante que deverá ser inserida no *software* é o número de eixos dos veículos, esse dado tem que ser bem definido pois os modelos utilizados no programa são sensíveis as variações desse (FRANCO e MOTTA, 2020).

Para as misturas asfálticas, os dados de entrada necessários são:

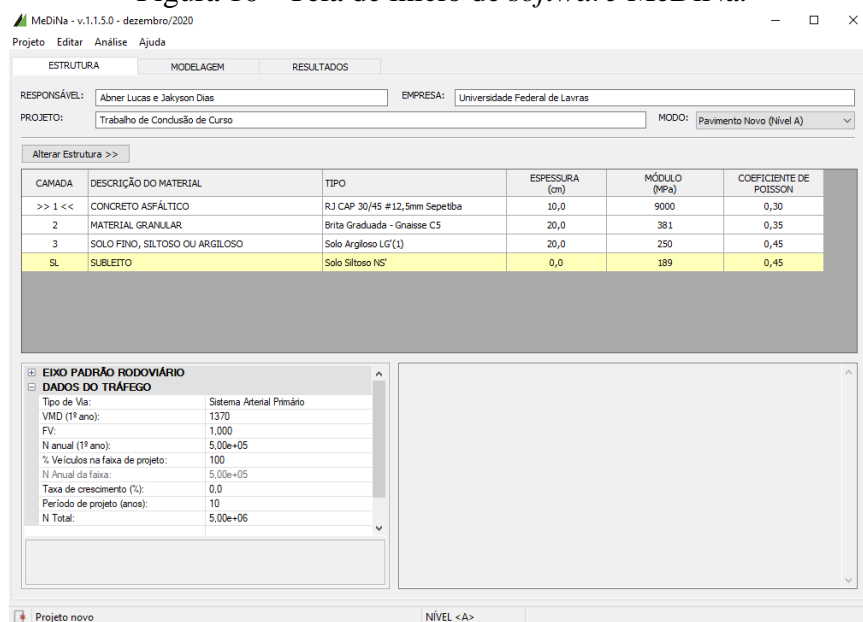
- espessura;
- coeficiente de Poisson - razão entre a deformação transversal associada a uma deformação longitudinal na direção do esforço de tração;
- módulo de resiliência - considerado como elástico linear e deve ser obtido através de ensaios por compressão direta (ITEM 2.4.4.);
- granulometria da mistura;
- viscosidade do ligante;
- teor de asfalto;
- volume de vazios;
- abrasão Los Angeles;
- curva de fadiga.

Para as demais camadas, os dados necessários são:

- espessura;
- coeficiente de Poisson;
- características dos materiais;
- módulo resiliente;
- indicar se a análise do módulo de resiliência seguirá o modelo elástico linear ou não linear.

O *software* é dividido nas abas Estrutura, Modelagem e Resultados, a tela inicial do programa apresenta uma estrutura padrão, conforme Figura 10, onde as camadas inseridas na imagem são exemplos hipotéticos de pavimento. No primeiro momento, são inseridas as informações de projeto na aba Estrutura, essa *interface* se resume em quatro elementos: um painel com o resumo dos resultados, a identificação do projeto, dados sobre as informações do tráfego e da estrutura do pavimento. Próximo passo é a seleção do modo de operação do programa, são duas opções: Pavimento Novo – Nível A (dimensionamento do pavimento a partir dos dados de ensaios laboratoriais do solo) e Projeto de Reforço (realização de retro análise das camadas existentes e elaboração de reforço para a estrutura) (FRANCO e MOTTA, 2020).

Figura 10 - Tela de início de *software* MeDiNa.



Fonte: Do autor (2021).

Dentre os valores obtidos no dimensionamento do pavimento pelo programa MeDiNa destaca-se importantes conceitos, que serão utilizados para análise dos resultados e conclusões a respeito da qualidade e custo das obras (FRANCO e MOTTA, 2020):

- **Espessuras das camadas:** O dimensionamento de um pavimento consiste basicamente na determinação das espessuras das camadas da estrutura, estas estão relacionadas diretamente a resistência do pavimento, dependendo da espessura das camadas, a resistência pode aumentar ou diminuir. Vale ressaltar que a espessura da camada de revestimento, independentemente do tipo de pavimento, vai estar diretamente ligada a qualidade do subleito, visto que quanto melhor a qualidade do subleito, menor a necessidade de grandes espessuras para o revestimento e para as outras camadas. Sendo assim, o contrário também é válido, já que espessuras maiores de camadas superiores poderiam, em tese, aliviar as pressões sobre um subleito medíocre.

- **Vida Útil:** Define-se vida útil de um pavimento como sendo o intervalo de tempo entre duas restaurações, ou ainda, como o período decorrido entre sua execução inicial e a sua primeira restauração. No Brasil, geralmente os projetos de dimensionamento levam em consideração um período de 10 anos, essa longevidade está diretamente ligada à diversidade e à intensidade de influências que atingem o pavimento.

- **Área trincada:** Os valores para área trincada são considerados através de equações e relações inscritas no *software* MeDiNa, que variam de acordo com as características dos materiais e das espessuras de cada camada. Os critérios admissíveis dependem do nível de confiabilidade do projeto e do nível de rodovia. A classificação adotada foi obtida por meio de simulações que possibilitou obter os valores de tráfego suportados pela estrutura até que a mesma atingisse uma área trincada igual a 30%, com 85% de confiabilidade.

Para o *software* MeDiNa, como um programa computacional de análise linear, é importante a definição das unidades de medida (FIGURA 11) e das hipóteses de cálculo.

Figura 11 - Grandezas e unidades de medida do programa MeDiNa

| Grandeza | Unidade |
|-----------------------------------|-------------------|
| Espessura e distâncias | cm |
| Raio do carregamento | cm |
| Deslocamentos | μm |
| Deflexões (Viga Benkelman ou FWD) | 0,01 mm |
| Deformações específicas | m/m |
| Área de contato | cm ² |
| Pressão de inflação e tensões | MPa |
| Carga de eixo ou de roda | ton |
| Massa específica aparente seca | g/cm ³ |

Fonte: FRANCO e MOTTA (2020).

Em relação as hipóteses de cálculos, o MeDiNa considera que (FRANCO e MOTTA, 2020):

- Os materiais são elásticos lineares, isotrópicos e homogêneos;
- A lei de Hooke é válida e o módulo de compressão é semelhante ao módulo de tração;
- As camadas são ilimitadas na direção horizontal;
- Todas as camadas possuem uma espessura finita, com exceção da camada inferior que é considerada semi-infinita;
- A superfície da camada superior não está sujeita a tensões fora da área carregada;
- Na área carregada ocorrem apenas tensões normais;
- A carga aplicada é considerada estática, uniformemente distribuída em toda a área circular de contato;
- Em grandes profundidades as tensões e deformações são nulas;
- As condições de aderência na *interface* das camadas podem variar de totalmente aderida para lisa ou sem aderência.

Já em relação aos parâmetros de análise, o método leva em consideração o critério de fadiga na camada asfáltica, deformação elástica, deformação permanente no subleito e a deformação permanente total das camadas granulares (resultado da soma da deformação permanente de cada camada), vale ressaltar que no programa não são avaliados os danos por fadiga e tensão limite no topo do subleito. Além disso, é importante entender os critérios que fazem parte da execução da metodologia empírica-mecanicista utilizada pelo MeDiNa e discutidas nesse trabalho: Critério de Fadiga, Critério de Aderência, Critério de Parada e Módulo Resiliente (FRANCO e MOTTA, 2020).

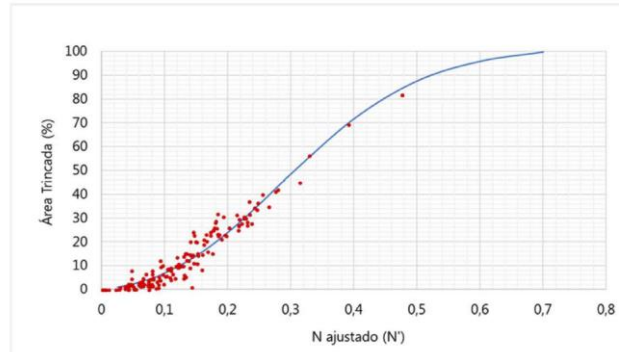
2.4.1. Critério de Fadiga

Para definição da vida útil do pavimento, conseqüentemente a percentagem de área trincada, o programa usa o critério de fadiga. A área trincada é representada por uma curva sigmoide, dada por uma função de transferência. O gráfico da curva (FIGURA 12) relaciona a percentagem de área trincada com o número N ajustado. O número N é definido como a quantidade de passagens do eixo padrão em um período de tempo convencional, nesse cálculo devem ser consideradas outras vias ditas secundárias que passam a tributar o seu tráfego à primeira (FRANCO, 2007; MOTTA 1991).

Ao número N, é multiplicado em todas as sessões avaliadas que apresentaram uma leitura de área trincada fatores de deslocamentos, gerando assim um valor de número N

ajustado. Com isso, é possível visualizar a relação da área trincada com o número N ajustado (FRANCO e MOTTA, 2020).

Figura 12 – Numero N x Área Trincada



Fonte: FRANCO e MOTTA (2020)

Outra relação executada pelo *software* é a área trincada com informações estrutural do pavimento, para isso utiliza-se a Função de Transferência (EQUAÇÃO 1) que transforma o dano médio em área trincada.

$$fS = C1 \times (Dmédio)^2 \quad (1)$$

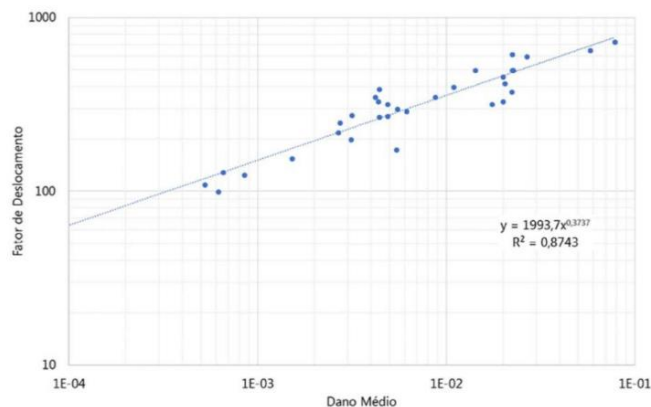
Onde: fS: fator de deslocamento

C1: constante (1993,7)

Dmédio: dano médio

A relação entre os fatores de deslocamentos e o dano médio, conseqüentemente as constantes C1 e C2, são representadas na Figura 13 (FRANCO e MOTTA, 2020).

Figura 13 – Função de transferência proposta para previsão de área trincada

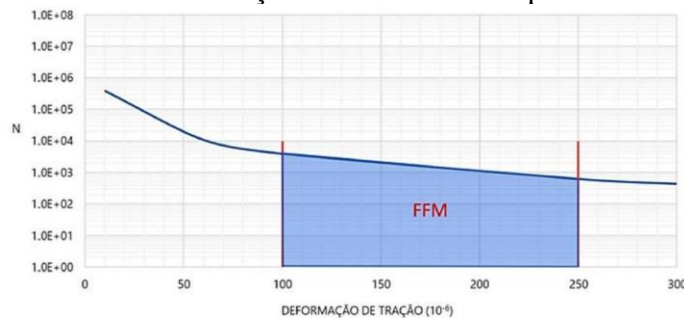


Fonte: FRANCO e MOTTA (2020)

A fadiga é calculada utilizando a média do dano calculado em vinte pontos de tensões, dez localizados na superfície e outros dez na fibra inferior da última camada asfáltica. Com essa análise da fadiga, o *software* calcula a área trincada com base na função de transferência. A fadiga normalmente inicia-se em zonas máximas de tensões ou deformações por tração, já que se pode comprovar que os materiais resistem melhor a carregamentos repetidos de compressão do que de tração (BORDIM, 2010).

O programa utiliza quatro classes de fadiga de acordo com as propriedades do material asfáltico. A performance do pavimento é definida relacionando dois fatores, o Fator da Mistura (FM) e o Módulo de Resiliência. O FM é obtido pelo cálculo da área formada pela curva de fadiga e as deformações de tração, na Figura 14 tem-se o exemplo para as deformações de 100 μ e de 250 μ (FRANCO e MOTTA, 2020).

Figura 14 – Gráfico de definição do FFM adotado pelo método MeDiNa.



Fonte: FRANCO e MOTTA (2020).

Dessa forma, o *software* oferece de forma automática as classes de fadiga (FIGURA 15), vale ressaltar que a classificação adotada pelo programa foi estabelecida relacionando simulações que possibilitou obter valores de tráfego suportados pela estrutura até que a mesma atingisse uma área trincada igual a 30%, com 85% de confiabilidade. No MeDiNa não são avaliados em relação aos danos por fadiga materiais granulares, solos finos, siltosos e argilosos, além de não considerar em seus cálculos tensão no topo do subleito (FRANCO e MOTTA, 2020).

Figura 15 – Classes de Misturas Asfáltica.

| Classe | Repetições de eixo padrão (RP) |
|--------|---|
| 1 | $4,5 \times 10^6 \leq RP < 6,0 \times 10^6$ |
| 2 | $6,0 \times 10^6 \leq RP < 7,5 \times 10^6$ |
| 3 | $7,5 \times 10^6 \leq RP < 1,0 \times 10^7$ |
| 4 | $RP \geq 1,0 \times 10^7$ |

Fonte: FRANCO e MOTTA (2020).

A deterioração do material sobre carregamento contínuo e repetido associado à drenagem inadequada faz da fadiga uma das principais causas da degradação dos pavimentos. Quando o fissuramento se encontra em um estágio muito avançado, ocorre aberturas no revestimento que deixam à mostra a base, surgem quando a composição individual do revestimento se separa do material circunvizinho e são levados pelo tráfego (WESSELING, 2002).

2.4.2. Critério de Aderência

Para os cálculos de tensões, deformações e deslocamentos o programa faz uma modelagem física baseada na teoria de molas, a fim de permitir o movimento horizontal relativo na *interface* entre duas camadas. A mola atua na direção radial resistindo ao deslocamento relativo ao longo da *interface* entre duas camadas (EQUAÇÃO 2) (FRANCO e MOTTA, 2020):

$$\tau_i = k_i \times (U_i - U_{i+1}) \quad (2)$$

Onde: τ_i é a tensão de cisalhamento radial entre as camadas i e $i+1$;

$U_i - U_{i+1}$ é o deslocamento radial relativo ao longo da *interface* das camadas i e $i+1$;

K_i é o módulo de rigidez da "mola" que resiste ao deslocamento radial relativo ao longo da *interface*.

O programa faz uma transformação na variável k , utilizando um parâmetro adimensional l_i (EQUAÇÃO 3), facilitando os cálculos.

$$k_i = \frac{l_i}{(1-l_i)} \quad (3)$$

No *software* não é possível que o projetista insira valores numéricos para o critério de aderência, este é definido por duas situações: Aderido ou Não Aderido. Ao se atribuir o valor de $l_i = 0$, o valor de k_i será nulo e, portanto $\tau_i = 0$, o que significa que não haverá cisalhamento na *interface*, logo as camadas não estão aderidas. Se, por outro lado, $l_i = 1$, tem-se k_i e τ_i tendendo ao infinito, que significa que há aderência entre as camadas. Assim, para simular a aderência entre camadas, o projetista deve entrar com um valor entre 0 para camadas não aderidas e 1 para camadas aderidas.

As condições para inserção dessas informações são pré-estabelecidas conforme mostra a Figura 16.

Figura 16 – Critérios para definir a aderência entre as camadas.

| Camada | Condição |
|--|-------------|
| Camadas asfáltica sobre outra camada asfáltica | Aderido |
| Camada asfáltica sobre camada cimentada | Não Aderido |
| Camada asfáltica sobre camada antirreflexão de trincas | Aderido |
| Camada asfáltica sobre camadas de solos ou granulares | Não Aderido |
| Tratamento superficial sobre camadas asfálticas | Aderido |
| Tratamento superficial sobre camadas de solos ou granulares | Não Aderido |
| Camada estabilizada sobre outra camada estabilizada | Não Aderido |
| Camada estabilizada sobre camadas de solos ou granulares | Não Aderido |
| Camada antirreflexão de trincas sobre camadas estabilizadas | Não Aderido |
| Camada de solos ou granulares sobre camadas asfálticas, cimentadas, de solos ou granulares | Não Aderido |

Fonte: FRANCO e MOTTA (2020).

2.4.3. Módulo Resiliente

Na análise mecanística-empírica para dimensionamento de pavimentos, é essencial o estudo da deformação elástica dos materiais empregados, já que a deformabilidade resiliente é a que condiciona a vida de fadiga das camadas superficiais ou as mais rijas dos pavimentos, sujeitas a flexões sucessivas. A elasticidade, também chamada de módulo de elasticidade, é a propriedade que mede a rigidez de um material sólido. É dada pela razão entre a tensão ou força aplicada pela deformação longitudinal do corpo de prova (CNT, 2019).

O módulo resiliente é definido como a relação entre a tensão desvio aplicada em um corpo de prova e a correspondente deformação específica vertical recuperável, obtido a partir da Equação 4 e de ensaios triaxiais dinâmicos (FIGURA 17) (MOTTA, 2015).

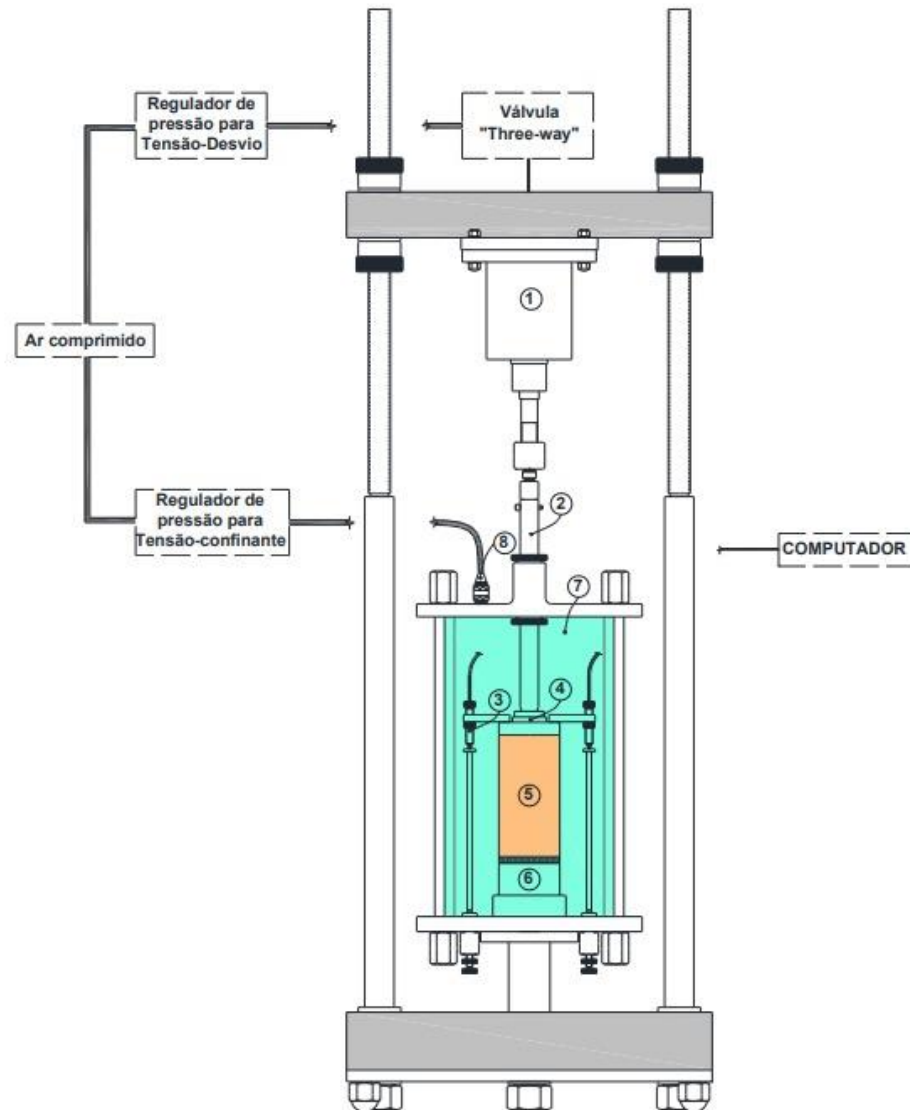
$$M_R = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_r} \quad (4)$$

Onde: M_R – Módulo Resiliente

σ_d – Tensão desvio aplicada repetidamente

ε_r – Deformação específica axial resiliente.

Figura 17 – Aparelhagem para determinação do Módulo de Resiliência dos Solos.



Fonte: DNIT (2018).

Para os materiais granulares, solos finos, siltosos ou argilosos o MeDiNa permite caracterizar o módulo de Resiliência como elástico linear ou elástico não linear (FRANCO e MOTTA, 2020).

No comportamento elástico linear, o módulo de resiliência é constante ao longo de toda a espessura da camada, por outro lado, quando se considera o comportamento não-linear acontece variações do módulo de resiliência dentro da camada, dependendo então da variação do estado de tensões a que o pavimento está submetido (MOTTA, 2015).

Já para as camadas asfálticas, o módulo de resiliência deve ser obtido através de ensaios por compressão direta e ele é considerado, para o dimensionamento realizado pelo *software*, como elástico linear. Seu valor deve ser inserido junto aos dados de entrada dos materiais utilizados (FRANCO e MOTTA, 2020).

2.4.4. Critério de Parada

O critério de parada no MeDiNa é definido de acordo com o tipo de via, definidas em conformidade com a hierarquia dos sistemas funcionais do DNIT. Cada caso o *software* analisa o percentual de 30% de área trincada, sua confiabilidade e deformação permanente varia em relação as particularidades da via em estudo (FIGURA 18).

Figura 18 – Critério de parada do *software* MeDiNa em relação ao tipo de via.

| 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: FRANCO e MOTTA (2020).

2.5. Estimativa e Análise de Custos

A estimativa de custo é um cálculo expedito para a avaliação de um serviço ou obra, podendo, para tanto, ser adotado como base índices conhecidos no mercado, deve ser utilizada em etapas iniciais dos estudos de um empreendimento, ou seja, na viabilidade econômica ou projeto básico, quando as informações ainda não são completas para a elaboração do orçamento detalhado (CONFEA, 2005).

O custo final é igual a soma dos gastos com materiais, mão de obra e equipamentos utilizados (custos direto) e os gastos vinculados a serviços indiretos, como mobilização de equipamentos e salários (custos indiretos). Para determinação do custo final (FIGURA 19), soma-se o lucro que a empresa irá obter com a obra (CONFEA, 2005).

Figura 19 – Custo de uma obra.

| Parcelas | Componentes | Subcomponentes | Caracterização |
|----------------|---------------|--|--|
| Custo Direto | Serviços | Custo dos Materiais | Referente aos custos dos materiais aplicados na execução dos serviços. |
| | | Custo da Mão-de-Obra | Referente à remuneração da mão-de-obra empregada na realização dos serviços, incorporando-se ainda os custos devidos aos encargos sociais. |
| | Equipamentos | Custo Horário de Depreciação | Calculado com base no valor de aquisição do equipamento, seu valor residual, da vida útil e da taxa de juros anual considerada. |
| | | Custo Horário de Manutenção | Calculado como um percentual do custo de aquisição do equipamento, incluindo os gastos com a manutenção preventiva e corretiva. |
| | | Custo Horário de Material | Referente ao combustível consumido, variando com o tipo e a potência do equipamento utilizado. |
| | | Custo Horário de Mão-de-Obra | Custo da remuneração da mão-de-obra utilizada na operação dos equipamentos. |
| Custo Indireto | Mobilização | Corresponde ao transporte dos equipamentos até o canteiro da obra. | |
| | Administração | Corresponde ao custo com a administração da obra, que em geral varia de 5 a 10% do custo direto da construção. | |
| | Eventuais | Admitido como um percentual de 1 a 5% do custo direto de construção, mais administração, para fazer face aos gastos não-previstos. | |
| | Impostos | Admitido como um percentual do custo direto de construção, mais administração, e eventuais, para fazer face aos impostos incidentes. | |
| Lucro | | | Admitido como um percentual de 5 a 12% do custo direto de construção. |

Fonte: CONFEA (2005).

Os custos analisados normalmente, são determinados por quilômetro de pavimento construído e se referem a parcela em função dos tipos de materiais utilizados em cada camada, assim como a espessura de cada uma. Para tal análise tem-se as planilhas referenciais de preços relativo a cada estado, já que os valores variam de acordo com os custos de transporte e dos materiais de cada região. Atualmente no mercado encontra-se algumas opções, como a SICRO (Sistema de Custos Referenciais de Obras) criada pelo DNIT, a Tabela Referencial de Preços do DER e a planilha referencial da Secretaria de Estado de Transportes e Obras Públicas (SETOP).

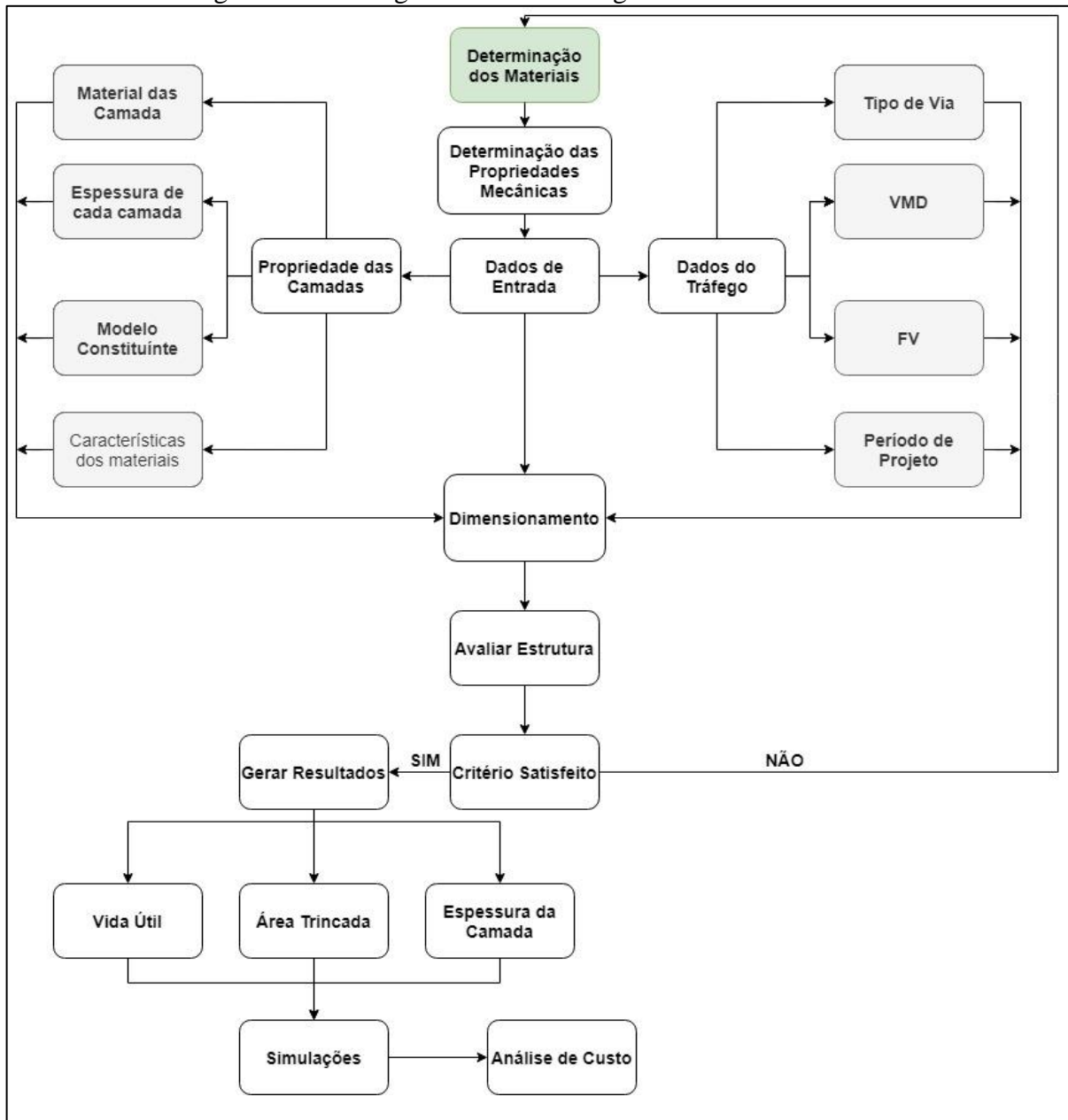
3. METODOLOGIA

Nesse tópico, serão explicados os processos realizados no desenvolvimento desse trabalho com intuito de alcançar os objetivos propostos, que são a simulação do dimensionamento de projeto de um pavimento flexível, utilizando a metodologia mecanística-empírica presente no novo método de pavimentação asfáltica do DNIT- MeDiNa.

As simulações foram realizadas mantendo constante os materiais da base, sub-base e revestimento asfáltico, variando apenas o material do subleito para cada situação. Assim, foi possível a investigação das principais alterações nas espessuras das camadas dimensionadas, inspeção do percentual de área trincada, verificação do impacto na vida útil do pavimento e avaliação do custo da obra, isso claro, a partir das diversas variações de subleitos que foram realizadas.

Para a realização desse trabalho dividiu-se a metodologia em três partes: Determinação dos materiais, Dimensionamento do pavimento flexível e Análise de Custo. A Figura 20 a seguir mostra o fluxograma da metodologia utilizada nesse trabalho que será mais detalhada nos tópicos 3.1, 3.2 e 3.3.

Figura 20 – Fluxograma da metodologia utilizada no trabalho



Fonte: Do Autor (2021)

3.1. Determinação dos materiais

O primeiro passo para o dimensionamento pelo MeDiNa é a determinação dos materiais e suas propriedades. Para esse estudo foi utilizado a versão v.1.1.5.0 – dezembro/2020 do

software, obtido gratuitamente no site do DNIT. Nesta versão são disponibilizados alguns tipos de materiais para cada camada.

Tanto o concreto asfáltico, a base e a sub-base tiveram suas características determinadas a partir das opções existentes no banco de dados do próprio *software* e serão os mesmos para todas as simulações realizadas (APÊNDICE A.1). O concreto asfáltico (Figura A.1 - APÊNDICE A.1) utilizado foi o CAP 30/45 #12,5 mm com espessura variável de acordo com cada simulação de dimensionamento, a base (Figura A.2 - APÊNDICE A.1) do pavimento com espessura fixa de 15 cm, constituída de material granular brita graduada gnaisse C5 e a sub-base (Figura A.3 - APÊNDICE A.1), também com espessura fixa, nesse caso de 30 cm e constituída pelo solo Argiloso LG', um tipo de solo de comportamento laterítico (GOUVEIA et al., 2021).

Na *interface* do programa, logo de início pede-se as informações referente aos dados dos tipos de materiais e sua respectiva espessura na estrutura, para o trabalho foram avaliados 4 diferentes tipos de subleitos: Solo 1 - LA - Arenoso Laterítico (Figura A.4 - APÊNDICE A.1), Solo 2 - LG' - Argiloso Laterítico (Figura A.5 - APÊNDICE A.1), Solo 3 - LG' - Argiloso Laterítico (Figura A.6 - APÊNDICE A.1) e Solo 4 - LA' - Arenoso Laterítico (Figura A.7 - APÊNDICE A.1), tais solos podem ser melhor visualizados na Tabela 1 (GOUVEIA et al., 2021).

Tabela 1 – Materiais do subleito.

| Subleito | Solo 1 | Solo 2 | Solo 3 | Solo 4 |
|--|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Classificação MCT | LA | LG' | LG' | LA' |
| Umidade ótima (%) | 11.4 | 17.78 | 29.3 | 26.98 |
| Massa específica (g/cm³) | 2.16 | 1.76 | 1.44 | 1.44 |

Fonte: GOUVEIA et al., (2021).

Esses tipos de subleito, já tinham suas características específicas coletadas em revisões de literatura, e pelo fato de terem suas espessuras semi-infinitas, o método utiliza o valor da espessura de sua camada como zero. Dessa forma os dados de propriedades mecânicas de cada solo foram inseridos no *software*, os quais possuem atributos diferentes entre si, trazendo à pesquisa uma gama maior de possibilidades, na intenção de demonstrar as diferenças acarretadas no valor da espessura, vida útil e no quantitativo necessário de pavimento.

Posteriormente, foram determinados os valores a respeito dos dados do tráfego, sendo esses valores, fixados durante toda pesquisa. Para o estudo foi-se considerado uma via de

Sistema Arterial Primário, apresentando de acordo com o DNIT e adotado pelo MeDiNa, uma confiabilidade de 85% e área trincada de 30% (FRANCO e MOTTA, 2020).

Outro valor considerado é o volume médio diário no ano de abertura do tráfego (VMD 1ºano), sendo, de acordo com o tipo de via, de 1370 automóveis, não havendo acréscimos durante o decorrer do tempo, pelo fato de ter considerado a taxa de crescimento de 0%.

Por fim temos o fator de veículo (FV), a partir desse valor o programa consegue, juntamente com o VMD, calcular automaticamente o “Número Equivalente de Passagens do Eixo Padrão Rodoviário (N)”. Para o trabalho considerou-se um FV igual a 1, sendo essa uma configuração de eixo simples de roda dupla com carga de 8,20 toneladas, essa configuração é inserida na aba mostrada no Apêndice H. Nessa aba temos vários tipos de configurações de eixos e suas características especificadas, todos esses valores já são pré-determinados pelo próprio *software* quando inicializado.

Além disso, temos que 100% dos veículos estão na faixa de tráfego de projeto, pelo fato de não extrapolar o número de duas faixas de rolamento na via, assim o tráfego não se divide para outras faixas.

Portanto, para um período de projetos de 10 anos, o número total de passagens (N Total) será o VMD multiplicado por FV, igual a 5×10^6 . No Apêndice I é exibido a aba onde tais dados do tráfego são inseridos no programa.

3.2. Dimensionamento

Com os dados inseridos no *software* realizou-se as simulações de dimensionamento da estrutura para cada subleito. As propriedades dos materiais utilizados que pertenciam a base de dados do *software* (base, sub-base e revestimento asfáltico) não podem ser alteradas, exceto o valor da espessura e o módulo resiliente.

Em relação a análise do módulo resiliente, foi-se considerado elástico linear para a camada asfáltica, com valor de 9000 MPa para o material empregado. Já para as outras camadas, considerou-se elástico não-linear, ou seja, o módulo resiliente é variável dentro da espessura da própria camada.

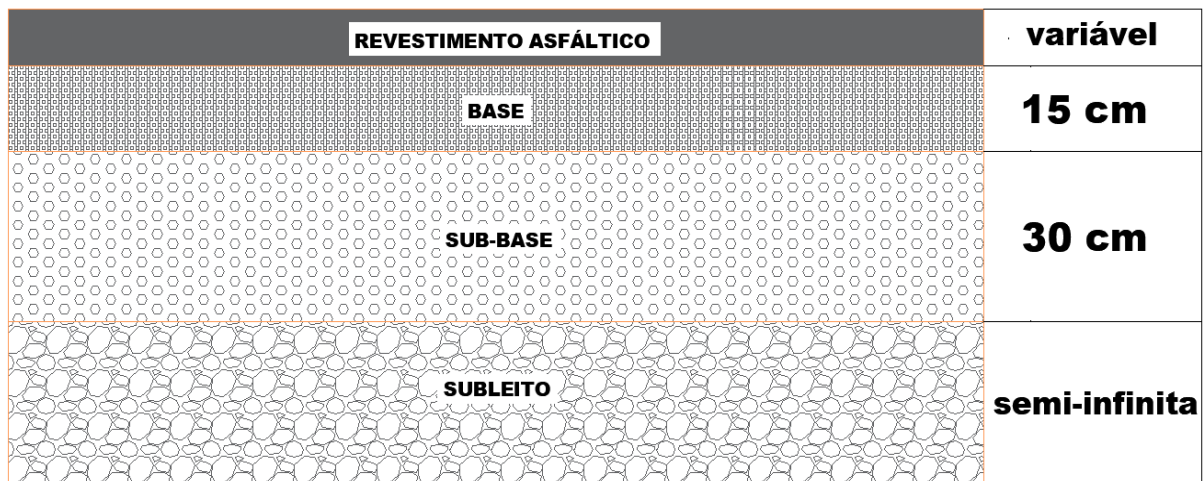
A critério de pesquisa, foram testados diferentes tipos de espessuras para a camada asfáltica, arredondadas de meio em meio cm, a fim de atender aos valores de 20%, 25%, 30%, 35% e 40% de área trincada (%AT). Para cada simulação, o *software* retorna na aba Resultados um relatório detalhado a respeito da evolução dos danos mensais para aquela análise, sendo

possível uma avaliação da vida útil do pavimento em relação ao tipo de subleito empregado e o valor da espessura dimensionada.

Para efeito de comparação entre os solos utilizados no subleito, foi aferido para cada simulação um comparativo entre as espessuras necessárias para atender o valor de área trincada pré-determinada (20%, 25%, 30%, 35% e 40%) e a vida útil, em meses, para que essa estrutura apresentasse um percentual de área trincada de 30% e confiabilidade de 85%, sendo esse o critério de parada do *software* considerando uma via de Sistema Arterial Primário.

Com os valores obtidos por essas simulações, o próximo passo foi a estimativa de custo da obra, afim de aferir o solo melhor recomendado para as situações de projeto consideradas no estudo. Para isso determinou-se os valores das espessuras para as camadas de base e sub-base com 15cm e 30 cm, respectivamente. Na análise do subleito, o *software* considera esse com espessura semi-infinita e o revestimento asfáltico, por sua vez, sendo variável de acordo com as simulações de dimensionamento realizadas (FIGURA 21).

Figura 21 – Representação do pavimento em corte com as espessuras adotadas.



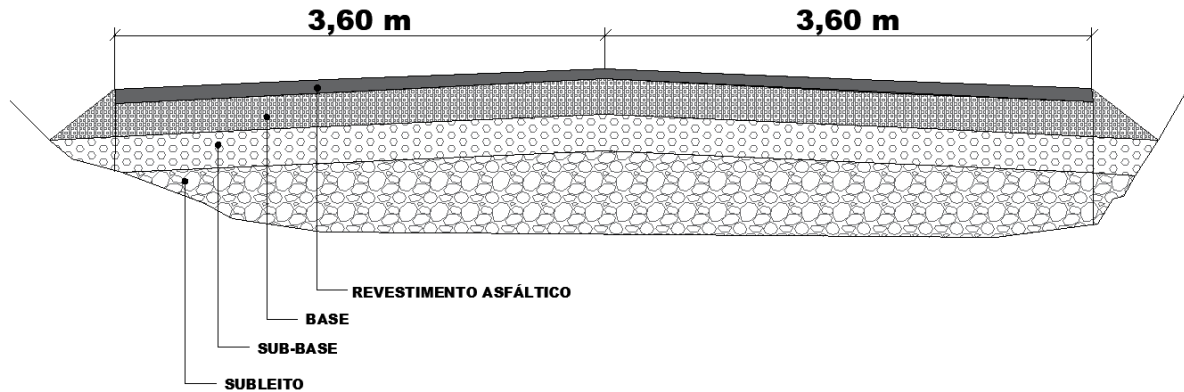
Fonte: Do Autor (2021).

3.3. Análise de Custo

Com o intuito de apresentar informações mais palpáveis relacionado ao impacto da variação da espessura da camada de concreto asfáltico, apresentou-se uma comparação de custo de acordo com a variação de subleito e as diferentes percentagens de área trincada escolhida para análise no trabalho.

Nesse estudo optamos por utilizar um pavimento de pista simples com largura de 3,60 m, não considerando o acostamento. A representação da estrutura do pavimento pode ser visualizada na Figura 22.

Figura 22 – Representação da estrutura do pavimento.



Fonte: Do Autor (2021).

Para isso, utilizou-se os valores presentes na tabela de preços da Secretaria de Estado de Transportes e Obras Públicas (SETOP) do Estado de Minas Gerais de julho de 2021. A consulta na tabela SETOP se dá pela análise dos materiais utilizados no projeto e seus devidos valores representados na (TABELA 2). Os cálculos foram realizados considerando pista simples e sem o acostamento.

Tabela 2 – Valores de custo e descrição de serviços pela Setop.

| CAMADA | DESCRIÇÃO DO SERVIÇO - SETOP | UNIDADE | VALOR (R\$) |
|------------------|---|----------------|-------------|
| CAMADA ASFÁLTICA | EXECUÇÃO E APLICAÇÃO DE CONCRETO BETUMINOSO USINADO A QUENTE (CBUQ), MASSA COMERCIAL, INCLUINDO FORNECIMENTO E TRANSPORTE DOS AGREGADOS E MATERIAL BETUMINOSO, EXCLUSIVE TRANSPORTE DA MASSA ASFÁLTICA ATÉ A PISTA | m ³ | 1163.73 |
| BASE | BASE DE SOLO COM MISTURA EM USINA, COMPACTADA NA ENERGIA DO PROCTOR INTERMEDIÁRIO (EXECUÇÃO, INCLUINDO ESCAVAÇÃO, CARGA, DESCARGA, ESPALHAMENTO E COMPACTAÇÃO DA MISTURA; EXCLUI AQUISIÇÃO E TRANSPORTE DO MATERIAL E DA MISTURA) | m ³ | 18.45 |
| SUB-BASE | SUB-BASE DE SOLO, COM MISTURA NA PISTA, COMPACTADA NA ENERGIA DE PROCTOR INTERMODIFICADO (EXECUÇÃO, INCLUINDO ESCAVAÇÃO, CARGA E DESCARGA DO MATERIAL DE JAZIDA, ESPALHAMENTO, UMIDECIMENTO, HOMOGENIZAÇÃO E COMPACTAÇÃO DA MISTURA; EXCLUI AQUISIÇÃO E TRANSPORTE DO MATERIAL) | m ³ | 17.72 |
| SUBLEITO | REGULARIZAÇÃO DO SUB-LEITO (PROCTOR INTERNORMAL) | m ² | 0.93 |

Fonte: Do Autor (2021).

No dimensionamento realizado pelo MeDiNa, a camada de subleito por ser ilimitada verticalmente, o *software* considera para os cálculos seu valor de espessura igual a zero. No entanto, nesse estudo para a estimativa de custos da camada de subleito serão considerados os valores relacionados a regularização desta estrutura. Na SETOP, o custo referente a regularização do subleito é dado por m quadrados, dessa forma para determinação do valor gasto (EQUAÇÃO 5), multiplica-se pela largura da via, de 3,60 m.

$$\text{Custo}_{\text{Subleito}} = \text{Custo por m}^2 \text{ (R\$)} \times \text{largura da via (m)} \quad (5)$$

Como os materiais e as espessuras da base e sub-base foram fixadas, o seu custo será o mesmo para todas as simulações realizadas, esse custo se dá pelo valor por metro cúbico retirado da SETOP multiplicado pela espessura e pela largura da via (EQUAÇÕES 6 e 7).

$$\text{Custo}_{\text{Base}} = \text{Custo por m}^3 \text{ (R\$)} \times \text{largura da via (m)} \times \text{espessura da camada (m)} \quad (6)$$

$$\text{Custo}_{\text{Sub-Base}} = \text{Custo por m}^3 \text{ (R\$)} \times \text{largura da via (m)} \times \text{espessura da camada (m)} \quad (7)$$

Já para as camadas asfálticas, foi retirado da SETOP o valor em reais para a execução e aplicação do Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ) por metro cúbico, incluso os custos de fornecimento e transporte até a pista. Com esse valor, juntamente com as espessuras dimensionadas para a via em análise, chegamos ao valor do CBUQ por metro (EQUAÇÃO 8).

$$\text{Custo}_{\text{asfalto}} = \text{Custo por m}^3 \text{ (R\$)} \times \text{largura da via (m)} \times \text{espessura da camada (m)} \quad (8)$$

Os quantitativos calculados no trabalho foram determinados por quilômetro construído de pavimento, dessa forma, deve-se fazer a conversão de custos em m encontrados nas equações citadas para km. Para essa conversão, sabendo que 1 km corresponde a 1000 m, basta multiplicar os valores encontrados por 1000, como no exemplo abaixo (EQUAÇÃO 9).

$$\text{Custo}_{\text{asfalto}} \text{ por km} = \text{Custo por metro (R\$)} \times 1000 \quad (9)$$

Por fim, somou-se todos os valores referente as espessuras de cada camada, determinando o custo total para a execução da via. Com o custo e a vida útil referente a cada simulação realizada, foi possível uma análise qualitativa a respeito dos subleitos, além da relação entre o tamanho das camadas e a vida útil do pavimento.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados os resultados do dimensionamento das estruturas montadas através do método MeDiNa, bem como a comparação e discussão dos custos relativos à espessura das camadas, aos materiais utilizados e seus respectivos valores de vida útil.

4.1. Comparativo dos Dimensionamentos das Espessuras

A seguir, os valores de espessura e área trincada seguem apresentados na Tabela 3 com os valores de espessuras de revestimento asfáltico dimensionadas para cada subleito, atendendo suas respectivas percentagens de área trincada pré-determinadas dentro do tempo de projeto de 10 anos.

Tabela 3 – Espessuras do Revestimento Asfáltico x %Área Trincada.

| %AT | Espessuras (cm) | | | |
|-----------|-----------------|--------|--------|--------|
| | Solo 1 | Solo 2 | Solo 3 | Solo 4 |
| 20 | 10 | 11.5 | 12.5 | 14.5 |
| 25 | 9 | 10.5 | 11.5 | 13 |
| 30 | 8.5 | 9.5 | 10.5 | 12 |
| 35 | 8 | 9 | 10 | 11 |
| 40 | 7 | 8 | 9.5 | 10 |

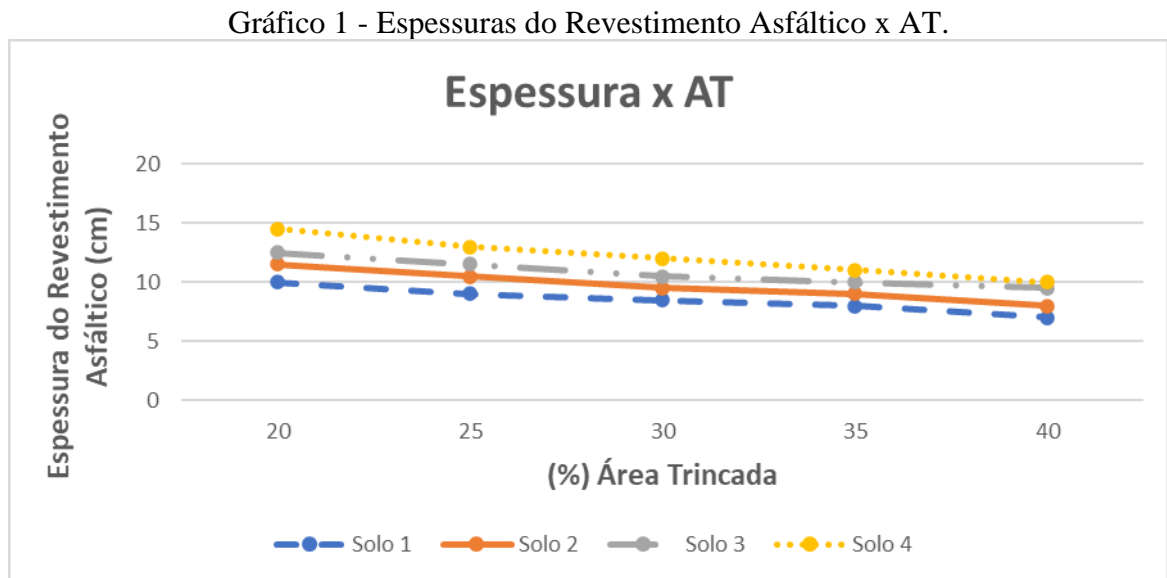
Fonte: Do Autor (2021).

A partir desses dados encontrados, percebe-se uma variação nas espessuras entre 0,5 cm a 1,5 cm quando ocorre a mudança da área trincada em análise, a exemplo o Solo 4 variando de 14,5 cm em 20% de AT para 13 cm em 25% AT, mostrando, assim, que a variação de 5% na área trincada pode demandar uma diminuição de 1,5 cm na espessura do revestimento. Dessa forma, percebe-se que a área trincada definida para o dimensionamento implica de forma direta na espessura da camada, sendo que para áreas trincada menores, necessitam de camadas maiores para resistir melhor aos esforços durante o período de projeto.

Além disso, é notório a menor necessidade de uma camada de revestimento asfáltico, para as mesmas percentagens de área trincada, demandado pelo Solo 1. Tendo ele os menores valores de espessura comparados aos demais solos, e como outro extremo, o Solo 4 apresentou a necessidade de uma camada mais robusta de revestimento para os mesmos critérios de

dimensionamento. Com isso, nota-se a influência do tipo de solo do subleito empregado na qualidade e dimensionamento do pavimento.

A seguir temos o Gráfico 1, onde é exibido a variação da espessura do revestimento quanto a percentagem área trincada.



Fonte: Do Autor (2021).

Por meio do gráfico, temos visualmente um melhor entendimento da variação da espessura do revestimento asfáltico em cada tipo de subleito. Para o Solo 4, com uma curva acima das demais em todo intervalo, são observados, para os mesmos valores de área trincada, camadas maiores de revestimento. Já os Solos 2 e 3 apresentaram um comportamento mediano em relação aos demais, e por fim, o Solo 1 necessitou de espessuras menores para resistir aos mesmos esforços, apresentando uma curva localizada abaixo das outras. Assim, percebe-se por essa análise que o solo 1 seria economicamente melhor, pois demanda uma espessura menor de concreto asfáltico para resistir, dentro do tempo de projeto estabelecido, com os mesmos valores de área trincada considerada para os outros solos.

4.2. Comparativo das Danos Mensais

Para o comparativo dos danos mensais, segue a Tabela 4, relacionando a espessura do revestimento asfáltico determinada devido a cada tipo de subleito e a influência dessa na vida útil do pavimento. Lembrando que todos os solos foram analisados para uma área trincada de 30%, a fim de comparar a relação dos subleitos, espessura da camada e vida útil.

Tabela 4 - Impacto na vida útil para cada espessura dimensionada.

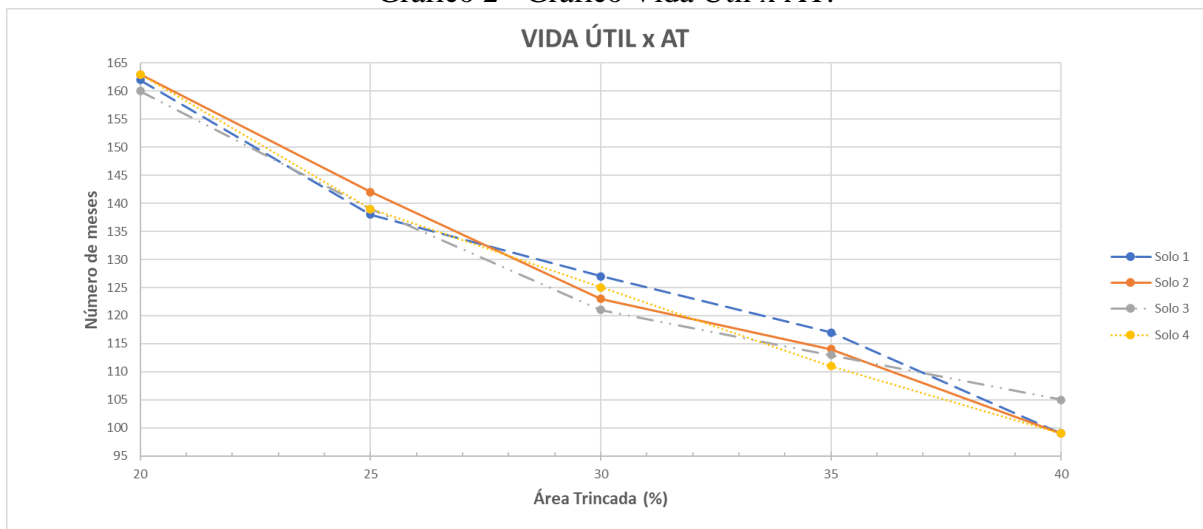
| %AT | Solo 1 | | Solo 2 | | Solo 3 | | Solo 4 | |
|-----|----------------|-------------------|----------------|-------------------|----------------|-------------------|----------------|-------------------|
| | Espessura (cm) | Vida Útil (meses) | Espessura (cm) | Vida Útil (meses) | Espessura (cm) | Vida Útil (meses) | Espessura (cm) | Vida Útil (meses) |
| 20 | 10 | 162 | 11.5 | 163 | 12.5 | 160 | 14.5 | 163 |
| 25 | 9 | 138 | 10.5 | 142 | 11.5 | 139 | 13 | 139 |
| 30 | 8.5 | 127 | 9.5 | 123 | 10.5 | 121 | 12 | 125 |
| 35 | 8 | 117 | 9 | 114 | 10 | 113 | 11 | 111 |
| 40 | 7 | 99 | 8 | 99 | 9.5 | 105 | 10 | 99 |

Fonte: Do Autor (2021).

Com a Tabela 4, percebe-se o impacto causado pelo tipo de solo no subleito, juntamente com a espessura do revestimento asfáltico necessário para atender aos critérios do *software*, de 30% de área trincada e 85% de confiabilidade. Com os resultados obtidos, nota-se uma diferença na vida útil de até 6 meses de um solo para o outro, como é o caso dos Solos 1 e 3, cujo para uma área trincada de 30%, apresentaram, respectivamente, uma vida útil de 127 meses e 121 meses. Portanto, mesmo tendo uma espessura menor de revestimento asfáltico, o Solo 1 possuiu uma vida útil maior.

No Gráfico 2, temos a variação da vida útil em relação a área trincada de cada solo analisado, mostrando melhor esse impacto do tipo de subleito na longevidade da via.

Gráfico 2 - Gráfico Vida Útil x AT.



Fonte: Do Autor (2021).

Com base nos dados apresentados pelo Gráfico 2, nota-se que a variação da vida útil em relação a área trincada depende diretamente do valor da espessura da camada para cada subleito. No entanto, analisando para um percentual de área trincada de 30%, critério de parada do *software* e valor recomendado nesse método, temos que o Solo 1 se destacou frente aos demais,

pois mesmo com uma camada de revestimento menor, apresentou uma maior vida útil. Nesse caso, cabe-se frisar a qualidade desse material em comparação aos outros.

4.3. Análise Comparativa dos Custos

Como análise final deste trabalho, temos a comparação dos custos gerados por cada simulação de dimensionamento realizada. A seguir, na Tabela 5, são apresentados os valores que seriam gastos na execução da regularização do subleito, da sub-base e da base.

Tabela 5 – Custos referentes a Subleito, Sub-base e Base por km.

| SUBLEITO | | SUB-BASE | | BASE | |
|-----------------|----------|-----------------|-----------|-------------|----------|
| R\$ | 3.348.00 | R\$ | 19.137.60 | R\$ | 9.963.00 |

Fonte: Do Autor (2021).

Como esperado, foram obtidos valores de custo iguais em cada camada para as diferentes percentagens de área trincada, isso devido ao fato dessas terem suas espessuras e materiais fixados para todas as simulações.

Pela Tabela 5, nota-se que a regularização do subleito é a etapa mais barata da obra, com um valor de R\$ 3.348,00 por km. Já para a execução da base e sub-base, como temos o dobro de espessura na sub-base e valores por m³ próximos (R\$ 18,45 para a base e R\$ 17,72 para a sub-base), é aceitável que o seu custo final seja quase o dobro. Todos esses valores são iguais para os 4 tipos de subleitos, independente da variação da %AT, justamente pelo motivo de terem seus materiais e espessuras fixados.

Na variação do custo, tem-se o valor do concreto asfáltico a ser executado na obra, como sua espessura varia de acordo com o tipo de solo presente no subleito e com a percentagem de área trincada analisada, são obtidos diferentes valores de custo para cada simulação realizada (TABELA 6).

Tabela 6 - Custos referentes a camada asfáltica para subleito por km.

| VALOR DO CUSTO CONCRETO ASFÁLTICO | | | | |
|--|----------------|----------------|----------------|----------------|
| % AT | Solo 1 | Solo 2 | Solo 3 | Solo 4 |
| 20 | R\$ 418.942.80 | R\$ 481.784.22 | R\$ 523.678.50 | R\$ 607.467.06 |
| 25 | R\$ 377.048.52 | R\$ 439.889.94 | R\$ 481.784.22 | R\$ 544.625.64 |
| 30 | R\$ 356.101.38 | R\$ 397.995.66 | R\$ 439.889.94 | R\$ 502.731.36 |
| 35 | R\$ 335.154.24 | R\$ 377.048.52 | R\$ 418.942.80 | R\$ 460.837.08 |
| 40 | R\$ 293.259.96 | R\$ 335.154.24 | R\$ 397.995.66 | R\$ 418.942.80 |

Fonte: Do Autor (2021).

Na Tabela 6, o valor da execução do revestimento asfáltico para o Solo 1 é o mais econômico, justamente pelo fato dos valores das espessuras dessa camada, serem os menores em comparação com os demais solos, demonstrando quão impactante é o tipo de subleito na estrutura da via.

Como já mencionado, a espessura de cada camada varia de acordo com a percentagem de área trincada, dessa forma, para um mesmo solo é possível analisar os diferentes custos do revestimento de acordo com cada simulação. Como exemplo, tem-se o Solo 1, que para 20% de área trincada apresenta uma espessura de 10 cm e custo de R\$ 418.942,80. Esse mesmo solo, quando avaliado para uma percentagem de 40% de área trincada, nos retorna 7 cm de espessura e custo de R\$ 293.259,96. Portanto, para um mesmo subleito, é possível valores de custo até 30% menores de acordo com as espessuras dimensionadas.

Analisando os custos necessários para todos os subleitos em relação a 30% de área trincada, notamos que o Solo 4 apresenta o maior custo, R\$ 502.731,36, enquanto que o Solo 1 seria economicamente melhor, R\$ 356.101,38.

Assim, com o custo do revestimento asfáltico somado aos valores fixos das demais camadas, pode-se estimar o valor total do custo para execução de uma via arterial primária com 3,60 m de largura, esses valores são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 - Custos totais para cada subleito por km.

| VALOR DO CUSTO TOTAL | | | | |
|-----------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| % AT | Solo 1 | Solo 2 | Solo 3 | Solo 4 |
| 20 | R\$ 451.391.40 | R\$ 514.232.82 | R\$ 556.127.10 | R\$ 639.915.66 |
| 25 | R\$ 409.497.12 | R\$ 472.338.54 | R\$ 514.232.82 | R\$ 577.074.24 |
| 30 | R\$ 388.549.98 | R\$ 430.444.26 | R\$ 472.338.54 | R\$ 535.179.96 |
| 35 | R\$ 367.602.84 | R\$ 409.497.12 | R\$ 451.391.40 | R\$ 493.285.68 |
| 40 | R\$ 325.708.56 | R\$ 367.602.84 | R\$ 430.444.26 | R\$ 451.391.40 |

Fonte: Do Autor (2021).

Pela análise desses valores encontrados, nota-se diferentes custos entre os 4 tipos de subleito e também, para o mesmo solo, resultados variados, de acordo com a área trincada e sua respectiva espessura.

Avaliando os custos das simulações entre os solos, percebe-se que para uma mesma área trincada, tem-se valores discrepantes. Como exemplo, comparando os custos referentes ao Solo 1, esses correspondem a 70% do custo relativo ao Solo 4. Em relação aos Solos 2 e 3, essa taxa

chega a 88% e 80%, respectivamente. Dessa forma, o Solo 1 seria a melhor escolha em termos econômicos.

Por fim, para cada subleito tem a variação de gastos referentes ao percentual de área trincada. Tomando como base o Solo 1 nota-se que para 20% de área trincada os gastos estimados são R\$ 491.391,40, já quando esse apresenta um percentual de 40% de área trincada, seus custos reduzem para R\$ 325.708,56. Com isso, para um mesmo subleito os gastos podem variar até 35% a partir de suas devidas espessuras.

Como custo total das simulações realizadas temos que para o solo 4, o dimensionamento ultrapassou meio milhão de reais, o que é economicamente inviável comparado as mesmas simulações realizadas com os demais solos. Assim, é correto afirmar que o Solo 1 seria o mais indicado, pois apresentou de uma forma geral menores dimensões de espessuras, maior tempo de vida útil e ainda, o menor custo dentre todos os subleitos avaliados.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O trabalho desenvolvido buscou comparar no dimensionamento, realizado pelo novo método de dimensionamento de pavimento flexíveis – MeDiNa, a influência do subleito no revestimento asfáltico da via. Para isso, realizou-se simulações nas quais as camadas de sub-base, base e revestimento asfáltico eram fixadas, enquanto que o subleito era testado com quatro diferentes tipos de solo.

Dessa forma, foram realizadas análises referentes as espessuras dimensionadas para áreas trincadas de 20%, 25%, 30%, 35% e 40%, a avaliação se deu em relação em um período de projeto de 10 anos. Assim, as espessuras encontradas foram comparadas entre os diferentes solos avaliados, e também, as variações para um mesmo subleito, relacionado a área trincada.

No geral, por meio dessas investigações, foi possível verificar que, quanto maior a espessura da camada asfáltica, maior será sua vida útil, ou seja, o pavimento resistirá melhor aos esforços solicitantes pelo tráfego. Diante dos resultados encontrados, infere-se que o Solo 1 foi o que apresentou o melhor comportamento, já que para um mesmo período de projeto e percentual de área trincada que os outros solos, esse foi o que necessitou de menor espessura da camada de revestimento, comprovando assim, melhor qualidade em seu material de subleito.

Neste trabalho foi possível avaliar a estrutura já dimensionada, quanto aos seus danos mensais. Para isso, foi analisado qual o período em meses para o pavimento atingir uma área trincada de 30%, com as espessuras que já haviam sido determinadas. O percentual de 30% para área trincada foi escolhido devido ser o critério de parada do *software*, que para esse valor

retorna uma confiabilidade de 85%. Perante os resultados obtidos, concluiu-se que o Solo 1 performou melhor em comparação aos demais, pois, mesmo com valores menores de espessura apresentou uma vida útil maior que os outros.

Por fim, realizou-se depois das simulações de dimensionamento executadas, a análise de custo dos pavimentos, sendo que, a camada que interferiu diretamente nos custos foi o revestimento asfáltico. No mais, como já era de se esperar, os solos que necessitaram de maior espessura para a camada asfáltica, conseqüentemente apresentariam o maior custo, e vice-versa. Outra vez, o Solo 1 se destacou, em todas as comparações esse teve custo menor.

Portanto, conclui-se que o propósito da pesquisa foi bem sucedida, conseguiu-se realizar todos os objetivos pré-definidos. Como sugestão para futuros trabalhos é proposto o dimensionamento de solos cujo suas propriedades ainda não sejam conhecidas, levando assim a necessidade de realização de ensaios laboratoriais antes das simulações feitas no *software*, além disso, propõem-se também utilizar e dimensionar uma via com dados reais, sendo possível fazer a análise financeira de acordo com a região da obra.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AASHTO – American Association of State Highway and Transportation Officials. **AASHTO guide for design of pavement structures**. Washington, USA, 1986.

BALBO, J. T. **Pavimentação asfáltica: materiais, projetos e restauração**. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.

BERNUCCI, L. L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**. Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA, 2010.

BEZERRA N. 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)**. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

BORDIM, C. **Utilização de método de elementos finitos na avaliação das respostas estruturais de pavimentos flexíveis**. 2010. 103p. Dissertação (Mestre em modelagem matemática) – Universidade Regional do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí.

CNT, Confederação Nacional do Transporte. **Transporte rodoviário: por que os pavimentos das rodovias do Brasil não duram?** Brasília: CNT, 2019.

COUTINHO, J. C. P. **Dimensionamento de pavimento asfáltico: comparação do método DNER com um método mecanístico-empírico aplicada a um trecho**. Ouro Preto, Minas Gerais, 2011. 214 p. Dissertação (Mestrado) Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Núcleo de Geotecnia.

DNER. **Norma DNER - CLA 259: Classificação de solos tropicais para finalidades rodoviárias utilizando corpos de prova compactados em equipamento miniatura**. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro, 1996.

DNIT - DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES.
DNIT – IPR 720. **Manual de restauração de pavimentos asfálticos**. 2ª Edição. Rio de Janeiro, 2006.

DNIT - DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES.
DNIT 108/2009 - ES: **Terraplanagem – Aterros- Especificação de serviço**. Rio de Janeiro, 2009.

DNIT - DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES.
DNIT 172/2016 - ME: **Solos – Determinação do índice de suporte califórnia utilizando amostras não trabalhadas – método de ensaio**. Brasília, 2016.

DNIT - DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES.
DNIT 134/2018 - ME: **Pavimentação - Solos – Determinação do módulo de resiliência – método de ensaio**. Rio de Janeiro, 2018.

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

FRANCO F.A.C.P. **Método do dimensionamento mecanístico-empírico de pavimentos asfáltico SISPAV**. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2007

FRANCO, F. A. C. P.; MOTTA, L. M. G. **Execução de estudos e pesquisa para elaboração de método de análise mecanístico-empírico de dimensionamento de pavimentos asfálticos: Manual para utilização do Método Mecanístico-Empírico MeDiNa: Apresentação dos programas**. Rio de Janeiro: COPPE/IPR, 78p, 2020.

FRANKLIM, T. N. **Avaliação da adesividade ligante-agregado e misturas asfálticas por técnicas de análise de superfícies**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – Programa de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio do Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

GOUVEIA, B. G.; DONATO, M.; DIAS, F. C.; MEDEIROS, A. S.; SILVA, M. A. V. **Avaliação do efeito da umidade do subleito na análise de ciclo de vida de pavimentos rodoviários.** 35° ANPET - Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, 2021.

HARTMANN, D. A. **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.

HAAS, R. *et al.* **Mechanistic-empirical pavement design: evolution and future challenges.** Annual Conference Transportation Association of Canada. Saskatoon, Canada, 2007.

MACHADO, T. F. O. *et al.* **Projeto de reforço para o pavimento flexível do anel viário da UFJF baseado no novo método de dimensionamento mecanísticoempírico nacional.** Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes, Brasil, v. 28, n. 1, p. 1-13, 30 abr. 2020. Anual.

MEDINA, J.; MOTTA, L. M. G. **Mecânica dos pavimentos.** 3ª Edição. Rio de Janeiro: Interciência, 2015.

MOTTA, L. M. G. **Método de dimensionamento de pavimentos flexíveis; Critério de confiabilidade e ensaios de cargas repetidas.** 1991. 366p. Tese (Doutorado em ciências em engenharia civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

MOTA, R. V. *et al.* **Efeito do tráfego no dimensionamento de pavimentos asfálticos utilizando dados de pedágio.** In: 32° Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte, ANPET, 2018, Gramado. Anais Eletrônicos. p. 1-12.

PELISSON, N. D. *et al.* **Avaliação de desempenho pelo MEPDG: o efeito da variação de espessuras de pavimentos flexíveis.** International Transport Planning Society. The Journal of Transport Literature, 5p, 2015.

PEREIRA, P.; PAIS, J. **Main flexible pavement and mix design methods in Europe and challenges for the development of an European method**. ELSEVIER. ScienceDirect, 31p, 2017.

PINTO, R. L. **Comparação entre o dimensionamento de reforço de pavimentos asfálticos pelo método mecanístico-empírico e os métodos dner-pro 11/79 e DNER-PRO 269/94 para um segmento homogêneo da BR-222/CE e análise de sensibilidade do programa SisPavBR**. 125 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

TAVARES, L. R. S. **Pavimentação Urbana: Orçamento e custos**. Brasília: CONFEA/CREA, 2005. Disponível em: <https://www.confea.org.br/sites/default/files/2019-05/LIVRO RONALDO ORCAMENTOS E CUSTOS.pdf>. Acesso em: 10 out. 2021.

WESSELING, D. H. **Avaliação laboratorial do comportamento de misturas em concreto asfáltico**. 2002. 94p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí.

APÊNDICE A

A.1 – MATERIAIS E SUAS DEVIDAS PROPRIEDADES INSERIDAS NO MEDINA

| | |
|---------------------------------------|-------------------------------|
| CONCRETO ASFÁLTICO | |
| Material | RJ CAP 30/45 #12,5mm Sepetiba |
| Parâmetros | |
| Espessura (cm) | 8,5 |
| Coefficiente de Poisson | 0,30 |
| Contato | Não Aderido |
| Módulo (MPa) | |
| Modelo Constituinte | Resiliente Linear |
| Módulo (MPa) | 9000 |
| Características | |
| Tipo de CAP | CAP 30/45 - PG 70-16 |
| Massa específica (g/cm ³) | 2,4 |
| Resistência à tração (MPa) | 2,08 |
| 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 |
| Curva de Fadiga | |
| Modelo: | $k_1 \cdot (e^{k_2})$ |
| Coefficiente de Regressão (k1): | 5,0e-14 |
| Coefficiente de Regressão (k2): | -3,992 |
| Classe de Fadiga: | 2 |
| FFM (100μ a 250μ): | 0,75 |

Figura A.1 – Material da camada de revestimento asfáltico.

| | |
|---|---|
| MATERIAL GRANULAR | |
| Material | Brita Graduada - Gnaisse C5 |
| Parâmetros | |
| Espessura (cm) | 15,0 |
| Coefficiente de Poisson | 0,35 |
| Contato | Não Aderido |
| Módulo (MPa) | |
| Modelo Constituinte | Resiliente Não Linear |
| Coefficiente de Regressão (k1): | 1149,00 |
| Coefficiente de Regressão (k2): | 0,530 |
| Coefficiente de Regressão (k3): | -0,180 |
| Coefficiente de Regressão (k4): | 0,000 |
| Características | |
| 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 |
| Deformação Permanente | |
| Modelo: | $ep = \psi_1 \cdot (s_3^{\psi_2}) \cdot (sd^{\psi_3}) \cdot (N^{\psi_4})$ |
| Coefficiente de Regressão (k1 ou psi1): | 0,0868 |
| Coefficiente de Regressão (k2 ou psi2): | -0,2801 |
| Coefficiente de Regressão (k3 ou psi3): | 0,8929 |
| Coefficiente de Regressão (k4 ou psi4): | 0,0961 |

Figura A.2 – Material da camada base.

| SOLO FINO, SILTOSO OU ARGILOSO | |
|---|---|
| Material | Solo Argiloso LG'(1) |
| Parâmetros | |
| Espessura (cm) | 30,0 |
| Coefficiente de Poisson | 0,45 |
| Contato | Não Aderido |
| Módulo (MPa) | |
| Modelo Constituinte | Resiliente Não Linear |
| Coefficiente de Regressão (k1): | 446,50 |
| Coefficiente de Regressão (k2): | 0,262 |
| Coefficiente de Regressão (k3): | -0,086 |
| Coefficiente de Regressão (k4): | 0,000 |
| Características | |
| 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 |
| Deformação Permanente | |
| Modelo: | $ep = \psi_1 \cdot (s_3^{\psi_2}) \cdot (sd^{\psi_3}) \cdot (N^{\psi_4})$ |
| Coefficiente de Regressão (k1 ou psi1): | 0,206 |
| Coefficiente de Regressão (k2 ou psi2): | -0,24 |
| Coefficiente de Regressão (k3 ou psi3): | 1,34 |
| Coefficiente de Regressão (k4 ou psi4): | 0,038 |

Figura A.3 – Material da camada sub-base.

| | |
|---|--|
| SUBLEITO | |
| Material | Solo-1 LA |
| Parâmetros | |
| Espessura (cm) | 0,0 |
| Coefficiente de Poisson | 0,45 |
| Contato | - |
| Módulo (MPa) | |
| Modelo Constituinte | Resiliente Não Linear |
| Coefficiente de Regressão (k1): | 564,97 |
| Coefficiente de Regressão (k2): | -0,388 |
| Coefficiente de Regressão (k3): | 0,209 |
| Coefficiente de Regressão (k4): | 0,000 |
| Características | |
| Descrição do Material | Areia LA 23 |
| Grupo MCT | LA |
| MCT - Coeficiente c' | 0,4 |
| MCT - Índice e' | 1,108 |
| Massa específica (g/cm ³) | 2,16 |
| Umidade Ótima (%) | 11,4 |
| Energia Compactação | Normal |
| Norma ou Especificação | DNIT ES 137 |
| Deformação Permanente | |
| Modelo: | $ep = psi1.(s3^{psi2}).(sd^{psi3}).(N^{psi4})$ |
| Coefficiente de Regressão (k1 ou psi1): | 0,097 |
| Coefficiente de Regressão (k2 ou psi2): | -1,600 |
| Coefficiente de Regressão (k3 ou psi3): | 1,900 |
| Coefficiente de Regressão (k4 ou psi4): | 0,063 |

Figura A.4 – Material da camada subleito (Solo 1).

| | |
|---|---|
| SUBLEITO | |
| Material | Solo-2 LG' |
| Parâmetros | |
| Espessura (cm) | 0,0 |
| Coefficiente de Poisson | 0,45 |
| Contato | - |
| Módulo (MPa) | |
| Modelo Constituinte | Resiliente Não Linear |
| Coefficiente de Regressão (k1): | 820,30 |
| Coefficiente de Regressão (k2): | -0,124 |
| Coefficiente de Regressão (k3): | 0,638 |
| Coefficiente de Regressão (k4): | 0,000 |
| Características | |
| Descrição do Material | Solo Argiloso |
| Grupo MCT | LG'''''' |
| MCT - Coeficiente c' | 1,529 |
| MCT - Índice e' | 1,098 |
| Massa específica (g/cm ³) | 1,76 |
| Umidade Ótima (%) | 17,78 |
| Energia Compactação | Normal |
| Norma ou Especificação | DNIT ES 137 |
| Deformação Permanente | |
| Modelo: | $ep = \psi_1 \cdot (s_3^{\psi_2}) \cdot (sd^{\psi_3}) \cdot (N^{\psi_4})$ |
| Coefficiente de Regressão (k1 ou psi1): | 0,097 |
| Coefficiente de Regressão (k2 ou psi2): | -1,600 |
| Coefficiente de Regressão (k3 ou psi3): | 1,900 |
| Coefficiente de Regressão (k4 ou psi4): | 0,063 |

Figura A.5 – Material da camada subleito (Solo 2).

| SUBLEITO | |
|---|--|
| Material | Solo-3 LG' |
| Parâmetros | |
| Espessura (cm) | 50,0 |
| Coefficiente de Poisson | 0,45 |
| Contato | - |
| Módulo (MPa) | |
| Modelo Constituinte | Resiliente Não Linear |
| Coefficiente de Regressão (k1): | 61,85 |
| Coefficiente de Regressão (k2): | -0,259 |
| Coefficiente de Regressão (k3): | 0,224 |
| Coefficiente de Regressão (k4): | 0,000 |
| Características | |
| Descrição do Material | Solo Argiloso LAterítico |
| Grupo MCT | Normal |
| MCT - Coeficiente c' | 1,993 |
| MCT - Índice e' | 0,933 |
| Massa específica (g/cm ³) | 1,44 |
| Umidade Ótima (%) | 29,30 |
| Energia Compactação | LG ^m |
| Norma ou Especificação | DNIT ES 137 |
| Deformação Permanente | |
| Modelo: | $ep = \psi_1 \cdot (s_3^{\psi_2}) \cdot (s_d^{\psi_3}) \cdot (N^{\psi_4})$ |
| Coefficiente de Regressão (k1 ou psi1): | 0,097 |
| Coefficiente de Regressão (k2 ou psi2): | -1,600 |
| Coefficiente de Regressão (k3 ou psi3): | 1,900 |
| Coefficiente de Regressão (k4 ou psi4): | 0,063 |

Figura A.6 – Material da camada subleito (Solo 3).

| | |
|--|---|
| SUBLEITO | |
| Material | Solo-4 LA' |
| Parâmetros | |
| Espessura (cm) | 50,0 |
| Coefficiente de Poisson | 0,45 |
| Contato | - |
| Módulo (MPa) | |
| Modelo Constituinte | Resiliente Não Linear |
| Coefficiente de Regressão (k1): | 889,78 |
| Coefficiente de Regressão (k2): | 0,059 |
| Coefficiente de Regressão (k3): | 0,784 |
| Coefficiente de Regressão (k4): | 0,000 |
| Características | |
| Descrição do Material | Solo Arenoso Laterítico |
| Grupo MCT | LA' |
| MCT - Coeficiente c' | 1,147 |
| MCT - Índice e' | 1,110 |
| Massa específica (g/cm ³) | 1,44 |
| Umidade Ótima (%) | 26,98 |
| Energia Compactação | Normal |
| Noma ou Especificação | DNIT ES 137 |
| Defomação Permanente | |
| Modelo: | $ep = \psi_1 \cdot (s_3^{\psi_2}) \cdot (sd^{\psi_3}) \cdot (N^{\psi_4})$ |
| Coefficiente de Regressão (k1 ou ψ_1): | 0,097 |
| Coefficiente de Regressão (k2 ou ψ_2): | -1,600 |
| Coefficiente de Regressão (k3 ou ψ_3): | 1,900 |
| Coefficiente de Regressão (k4 ou ψ_4): | 0,063 |

Figura A.7 – Material da camada subleito (Solo 4).

MeDiNa - Cálculo do Fator de Veículo (DNIT)

| EIXO | CONFIGURAÇÃO | RODAS | FATOR DE EIXO (%) (1º Ano) | CARGA (ton) | FATOR DE CARGA (FC) | FATOR DE VEÍCULO (FV) |
|------|----------------------------|-------|-------------------------------|----------------|------------------------|--------------------------|
| 1 | Eixo simples de roda dupla | 4 | 100,0 | 8,20 | 1,000 | 1,000 |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |

Figura A.8 – Local de inserção dos dados do FV.

| EIXO PADRÃO RODOVIÁRIO | |
|---------------------------------|---------------------------|
| DADOS DO TRÁFEGO | |
| Tipo de Via: | Sistema Arterial Primário |
| VMD (1º ano): | 1370 |
| FV: | 1,000 |
| N anual (1º ano): | 5,00e+05 |
| % Veículos na faixa de projeto: | 100 |
| N Anual da faixa: | 5,00e+05 |
| Taxa de crescimento (%): | 0,0 |
| Período de projeto (anos): | 10 |
| N Total: | 5,00e+06 |

Figura A.9 – Dados do tráfego no software MeDiNa.