

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

JULIA MARIA MANIEZZI HESPANHOL

**ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE O MÉTODO DE DIMENSIONAMENTO
NACIONAL DE PAVIMENTOS – MEDINA E MÉTODO DNER**

APUCARANA

2023

JULIA MARIA MANIEZZI HESPANHOL

**ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE O MÉTODO DE DIMENSIONAMENTO
NACIONAL DE PAVIMENTOS – MEDINA E MÉTODO DNER**

**Comparative analysis between the National Floor Sizing Method – MeDiNa and
DNER method**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentada como requisito para obtenção do título
Bacharel em Engenharia Civil pela Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).
Orientador(a): Prof. Msc. Lucas Lauer Verdade

APUCARANA

2023



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

JULIA MARIA MANIEZZI HESPANHOL

**ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE O MÉTODO DE DIMENSIONAMENTO
NACIONAL DE PAVIMENTOS – MEDINA E MÉTODO DNER**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentada como requisito para obtenção do título
Bacharel em Engenharia Civil pela Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 12/junho/2023

Lucas Lauer Verdade
Mestre
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Adriana Macedo Patriota Faganello
Doutora
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Priscila Pini Pereira
Mestre
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

APUCARANA

2023

Dedico esse trabalho ao meu pai e minha mãe,
que juntos enfrentaram tantas dificuldades para
que eu pudesse estudar.

AGRADECIMENTOS

A conclusão da minha graduação foi, sem sombras de dúvidas, uma tarefa árdua, mas muito gratificante e realizadora. Aos meus pais, Álvaro e Cintia, os principais responsáveis por isso, eu dedico meu primeiro agradecimento. As palavras não podem expressar o quão grato sou a vocês. Mesmo diante de todas as dificuldades passadas aos longos desses anos, vocês não mediram esforços para me ver feliz e fazer meu sonho se tornar realidade. Vocês são meu exemplo de vida.

Meus agradecimentos também pelo Professor Msc. Lucas Lauer Verdade, na qual gostaria de expressar minha sincera gratidão pelo apoio contínuo ao meu estudo, por aceitar o convite de fazer parte desse trabalho e passar seu conhecimento nessa área que tenho grande afinidade. Por toda orientação durante todo o período final do curso que ajudou a chegar ao fim deste trabalho.

Agradeço a Universidade Tecnológica Federal do Paraná, na qual pude fazer parte dessa instituição tão grandiosa, que me trouxe desafios dentro e fora da sala de aula que me ajudaram no meu crescimento profissional e pessoal.

Ao meu namorado, que esteve presente desde o início da graduação, por toda ajuda até o fim, por sempre estar presente acreditando e incentivando em todos os momentos, você foi essencial durante todos os anos da faculdade, sem isso eu não conseguiria.

A todos os meus amigos, em especial as minhas amigas da UTFPR, Amanda, e Maria Fernanda, que estiveram presente em todos os momentos da graduação, dos mais fáceis ao mais difícil, me trazendo leveza até quando parecia impossível, e, em especial, a Isabela, por aceitar partilhar sua vida pessoal e acadêmica, por cada trabalho juntas, e por sempre acreditar em mim e ver um potencial que nem eu consigo ver.

Agradeço a Deus, que foi minha maior força nos momentos de angústia e desespero, por iluminar todos os passos durante esses anos de graduação.

Tudo o que um sonho precisa para ser realizado é
alguém que acredite que ele possa ser realizado.
(SHINYASHIKI; ROBERTO, 1997).

RESUMO

As rodovias possuem uma das maiores relevâncias entre as principais obras de infraestrutura do país. Dessa forma, devido ao grande volume de tráfego é possível compreender a importância da qualidade e segurança da pavimentação. Neste cenário, torna-se cada vez mais necessário um projeto adequado, capaz de atender com qualidade os usuários da via durante toda a vida útil para a qual o pavimento foi projetado. Para que isso seja possível, é necessário métodos de dimensionamento eficazes que possam avaliar a estrutura em todos os aspectos. Durante anos, a metodologia adotada para o dimensionamento foi empírica, na qual foram utilizadas experiências acontecidas para definir o dimensionamento dos pavimentos. Porém, a maior deficiência desse modelo de dimensionamento é a realização de uma melhor análise em relação aos materiais utilizados e as tensões e deformações. Dessa forma, foram necessários estudos de outros métodos de dimensionamento mecanicistas que levasse em consideração uma melhor avaliação da estrutura do pavimento, devido a sua alta complexibilidade. Assim, o presente trabalho tem como objetivo estabelecer uma comparação entre o atual método do DNER e o novo Método de Dimensionamento Nacional de Pavimento (Medina), que possui como base uma metodologia mecanicista-empírica. Em decorrência disso, o trabalho propôs uma análise e dimensionamento do pavimento de 5 projetos realizado por metodologias empíricas. Com isso, buscou-se evidenciar as divergências existentes entre os dois métodos e avaliar os resultados obtidos através do programa Medina e o método atual vigente. Dessa forma, foi possível comprovar que, de fato, há divergências entre as metodologias na qual 3 dos 5 projetos analisados não conseguiram atingir o critério de parada do programa para o fim da vida útil.

Palavras-chave: Pavimentação; Método DNER; Método de Dimensionamento Nacional de Pavimento (Medina).

ABSTRACT

Highways have one of the greatest relevance among the main infrastructure works in the country. Thus, due to the large volume of traffic, it is possible to understand the importance of paving quality and safety. In this scenario, an adequate design becomes increasingly necessary, capable of serving road users with quality throughout the useful life for which the pavement was designed. For this to be possible, it is necessary to have effective dimensioning methods that can evaluate the structure in all aspects. For years, the methodology adopted for dimensioning was empirical, in which past experiences were used to define the dimensioning of floors. However, the greatest deficiency of this dimensioning model is the performance of a better analysis in relation to the materials used and the stresses and deformations. Thus, it was necessary to study other mechanistic design methods that took into account a better evaluation of the pavement structure, due to its high complexity. Thus, the present work aims to establish a comparison between the current DNER method and the new National Pavement Dimensioning Method (Medina), which is based on a mechanistic-empirical methodology. As a result, the work proposed an analysis and dimensioning of the pavement of 5 projects carried out by empirical methodologies. With this, we sought to highlight the differences between the two methods and evaluate the results obtained through the Medina program and the current method in force. In this way, it was possible to prove that, in fact, there are divergences between the methodologies in which 3 of the 5 projects analyzed failed to reach the program stop criterion for the end of the useful life.

Keywords: Paving; Sizing; DNER method; National Pavement Sizing Method (Medina).

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Esforços nas camadas dos pavimentos.	12
Figura 2 – Camadas típicas de um pavimento.	12
Figura 3 - Via Appia em 2020.	15
Figura 4 – Estrada Caminho do Mar	15
Figura 5 – Tensões pavimento flexível.....	16
Figura 6 – Tensões pavimento rígido.....	17
Figura 7 – Curvas granulométricas	18
Figura 8 – Determinação da espessura do pavimento.....	32
Figura 9 - Simbologia do dimensionamento do pavimento.....	33
Figura 10 – Fluxograma de dimensionamento	35
Figura 11 – Sistema de duas camadas.....	36
Figura 12 - Parâmetros avaliados na análise empírico-mecanicista	37
Figura 13 – Classes de mistura asfálticas.....	46
Figura 14 – Representação ponto entre rodas e ponto sob roda	47
Figura 15 – Tela inicial software Medina	48
Figura 16 – Tabela “Estrutura do pavimento”	49
Figura 17 – Comando “Alterar Estrutura”	49
Figura 18 – Comando “Propriedades”	50
Figura 19 – Dados do Eixo Padrão Rodoviário.....	50
Figura 20 – Comando “Cálculo de Fator de Veículo”	52
Figura 21 – Comado “Cálculo de Fator de Veículo (DNIT).....	53
Figura 22 - – Módulos de Resiliência de referência	58
Figura 23 - Resultados da análise na PR-092	60
Figura 24 - Resultados da análise na PR-160	61
Figura 25 - Resultados da análise na PR-280	63
Figura 26 - Resultados da análise na PR-277	64
Figura 27 - Resultados da análise na PR-151 a PR-090	66
Figura 28 – Aviso de impossibilidade de dimensionamento.....	67
Figura 29 – Estrutura dimensionada PR-280	68
Figura 30 - Estrutura dimensionada PR-277	68
Figura 31 - Estrutura dimensionada PR-151 a PR-090	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Fator climático Regional	25
Tabela 2 – Classificação e condições dos materiais empregados nas camadas do pavimento	29
Tabela 3 – Granulometria para base granular.....	29
Tabela 4 - Coeficientes de equivalência estrutural	30
Tabela 5 – Espessura mínima de revestimento betuminoso.....	31
Tabela 6 – Valores típicos de coeficiente de Poisson.....	39
Tabela 7 – Unidades programa Medina	44
Tabela 8 – Tipos de via	51
Tabela 9 – Projetos selecionados para redimensionamento no Medina	54
Tabela 10 – Materiais inseridos no programa Medina PR-092	59
Tabela 11 – Materiais inseridos no programa Medina PR-160	60
Tabela 12 – Materiais inseridos no programa Medina PR-280	62
Tabela 13 – Materiais inseridos no programa Medina PR-277	64
Tabela 14 – Materiais inseridos no programa Medina PR-151 a PR-090	65
Tabela 15 – Resumo dos resultados obtidos nas análises	66

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Resumo de informações da PR-092.....	55
Quadro 2 - Resumo de informações da PR-160.....	55
Quadro 3 - Resumo de informações da PR-280.....	55
Quadro 4 - Resumo de informações da PR-277.....	56
Quadro 5 - Resumo de informações da PR-151 E PR-090	56
Quadro 6 – Dados de tráfego da rodovia PR-092	59
Quadro 7 – Dados de tráfego da rodovia PR-160	61
Quadro 8 - Dados de tráfego da rodovia PR-280	62
Quadro 9 - Dados de tráfego da rodovia PR-277	64
Quadro 10 - Dados de tráfego da rodovia PR-151 a PR-090	65

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

SNV	Sistema Nacional de Viação
CNT	Confederação Nacional do Transporte
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes
AEMC	Análise Elástica de Múltiplas Camadas
CBR	California Bearing Ratio
FRN	Fundo Rodoviário Nacional
IP	Índice de plasticidade
LL	Limite de liquidez
LP	Limite de plasticidade
IG	Índice de grupo
NBR	Norma brasileira
ISC	Índice de Suporte Califórnia
VMD	Volume médio diário
FV	Fator de veículos
FC	Fator de carga
FR	Fator climático regional
AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
USACE	Corpo de Engenheiros do Exército Americano
TSCE	Teoria de Sistema de Camadas Elásticas
MEF	Método dos Elementos Finitos
MR	Módulo de resiliência
IPR	Instituto de Pesquisas Rodoviárias
COPPE	Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia
CENPES	Centro de Pesquisas da Petrobrás

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	7
1.1	Justificativa.....	9
1.2	Objetivo	9
1.2.1	Objetivos específicos.....	10
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	11
2.1	Pavimentação	11
2.1.1	Revestimento.....	13
2.1.2	Subleito	13
2.1.3	Reforços de subleitos	13
2.1.4	Bases e sub-bases	13
2.1.5	História da pavimentação	14
2.1.6	Pavimento flexível	16
2.1.7	Pavimento rígido.....	16
2.1.8	Pavimento semirrígido.....	17
2.2	Ensaaios em solos para pavimentação	17
2.2.1	Granulometria.....	18
2.2.2	Limites de consistência	18
<u>2.2.2.1</u>	<u>Limite de liquidez (LL)</u>	<u>19</u>
<u>2.2.2.2</u>	<u>Limite de plasticidade (LP)</u>	<u>19</u>
2.2.3	Índice de Grupo (IG).....	19
2.2.4	Califórnia Bearing Ratio (CBR).....	20
2.2.5	Compactação	21
2.3	Tráfego	21
2.3.1	Número N	22
<u>2.3.1.1</u>	<u>Fator de veículos (Fv).....</u>	<u>23</u>
<u>2.3.1.2</u>	<u>Fator climático regional (FR)</u>	<u>24</u>
2.4	Defeitos dos pavimentos	25
2.4.1	Trinca por fadiga.....	25
2.4.2	Deformação permanente	26
2.5	Métodos de dimensionamento	27
2.5.1	Método DNER	27
<u>2.5.1.1</u>	<u>Capacidade de suporte do subleito e dos materiais</u>	<u>28</u>
<u>2.5.1.2</u>	<u>Determinação do tráfego</u>	<u>30</u>

2.5.1.3	Dimensionamento das camadas	31
2.6	Método mecanístico-empírico	33
2.6.1	Módulo de resiliência (MR)	38
2.6.2	Coeficiente de Poisson (ν)	39
2.6.3	Fadiga	39
2.6.4	Deformação permanente	41
2.6.5	Método de dimensionamento nacional de pavimentos (Medina)	42
<u>2.6.5.1</u>	<u>Materiais asfálticos</u>	<u>45</u>
<u>2.6.5.2</u>	<u>Materiais granulares, finos, siltosos e argilosos</u>	<u>46</u>
<u>2.6.5.3</u>	<u>Subleito</u>	<u>47</u>
3	METODOLOGIA	48
3.1	Seleção dos projetos	53
3.2	Compilação de informações	54
4	RESULTADO E DISCUSSÃO	57
4.1	Ajustes para análise e dimensionamento	57
4.2	Análise do Medina	58
4.2.1	Resultado da análise PR-092	59
4.2.2	Resultado da análise PR-160	60
4.2.3	Resultado da análise PR-280	61
4.2.4	Resultado da análise PR-277	63
4.2.5	Resultado da análise PR-151 e PR-090	65
4.3	Dimensionamento das camadas no programa Medina	66
5	CONCLUSÃO	69
5.1	Sugestões para trabalhos futuros	70
	REFERÊNCIAS	71
	ANEXO A – Análise PR-092	75
	ANEXO B – Análise PR-160	81
	ANEXO C – Análise PR-280	87
	ANEXO D – Dimensionamento da PR-280	93
	ANEXO E – Análise PR-090	99
	ANEXO F – Dimensionamento da PR-280	105

1 INTRODUÇÃO

A expansão do modal rodoviário, aliada ao desenvolvimento da indústria automotiva, tem sido acompanhada pelo surgimento de uma indústria de transporte de cargas e passageiros. O transporte rodoviário é responsável por aproximadamente 65% de toda carga no país e 95% de todos os passageiros transportados. De acordo com dados do Sistema Nacional de Viação (SNV) a malha rodoviária brasileira é composta por 1.720.909 quilômetros. Deste, 213.500 km são pavimentados, o que equivale a somente 12,4% da extensão total, enquanto as rodovias não pavimentadas representam a maior parte da malha nacional, com 1.350.100 quilômetros (78,5%) (CNT, 2022).

Através da Pesquisa de Rodovias, realizada pela CNT (2022, p.19), “o crescimento da frota de veículos no país é outro fator que tem contribuído para a maior utilização da sua infraestrutura rodoviária e, conseqüentemente, para o agravamento do aludido processo de degradação das rodovias”. Foi estimado que no período de 2011 a 2021, ocorreu um crescimento de 58,0% na quantidade de veículos leves e pesados no país. Analogicamente, há deficiências de políticas governamentais sobre o investimento em rodovias ao longo dos anos, nos quais têm sido incompatíveis com a necessidade que se tem de conservação e ampliação das vias pavimentadas (CNT, 2022).

Os fatores que determinam os custos de transporte têm sido amplamente discutidos em vários estudos. No modal rodoviário, esses custos são afetados pelas condições da superfície do pavimento. A qualidade do rolamento causa interferência nesses custos, uma vez que, ao deteriorar-se, aumenta o consumo de combustível e manutenção, o risco de acidentes e danos nas cargas bem como as condições de trabalho e qualidade de vida do trabalhador do transporte (SANTOS, 2011).

Com isto, evidenciou a necessidade da evolução de técnicas e projetos utilizados na construção de pavimentos afim de que atinja seu objetivo: proporcionar ao usuário condições de trafegabilidade de forma confortável, econômica e segura (BIEDACHA, 2020; PITAGUI, 2019). Sobre o dimensionamento adequado de um pavimento, pode-se afirmar que:

O dimensionamento adequado de um pavimento visa assegurar que a repetição da passagem dos eixos dos veículos não irá causar o trincamento excessivo da camada de revestimento por fadiga dentro do período de vida

do projeto e, também, garantir que as espessuras das camadas de sua estrutura, bem como suas características, sejam capazes de minimizar os efeitos do afundamento da trilha de roda (acúmulo excessivo de deformação permanente), considerando a compatibilidade entre as deformabilidades dos materiais (FRANCO, 2007, p.1).

Atualmente, os métodos utilizados para dimensionamento foram desenvolvidos com bases empíricas ou mecanística-empírica. O atual método de dimensionamento é conhecido como método do Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER) na qual é configurado como um método empírico. Este, é desenvolvido a partir da observação e experiência em determinados pavimentos, com materiais estabelecidos e climas com condições específicas. No entanto, ao longo dos anos foram observadas carências no método, cuja principal delas está relacionada à não consideração dos efeitos da fadiga nas misturas betuminosas do revestimento, o que causa seu desgaste prematuro e prejudica as camadas inferiores (FERNANDES, 2016; DNIT, 2006; FRANCO, 2007).

A modelagem de uma estrutura de pavimento é complexa devido as variações das características dos materiais constituintes, a difícil previsão do carregamento ao longo da vida útil e a atuação do fator climático no comportamento e característica destes materiais. Desta forma, tem-se uma tendência da substituição dos métodos empíricos por empíricos-mecanísticos cujo dimensionamento visa a combinação entre modelos teóricos com os métodos empíricos, na qual fatores podem ser ajustados com as características dos materiais, estrutura, tráfego e clima (MEDINA; MOTTA, 2015; MATTOS, 2014).

Nesse cenário, surgiu o Método de Dimensionamento Nacional (MEDINA). Desde 2015, o Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes (DNIT) tem trabalhado nesse novo método mecanístico-empírico, para substituir o método vigente. O Medina é um software que realiza a verificação e o dimensionamento mecanístico-empírico de estruturas de pavimentos, por meio da Análise Elástica de Múltiplas Camadas (AEMC), na qual são calculadas as tensões e deformações em estruturas de pavimentos, sob carregamento de rodas do tipo eixo padrão rodoviário, e aplica modelos de fadiga e deformação permanente para ajustar as espessuras das camadas. Atualmente o DNIT encontra-se em uma fase de transição do método, em que ocorre o aperfeiçoamento do software por meio da avaliação dos dados obtidos em laboratório com os dados verificados em campo (FRANCO, 2020; DNIT, 2020).

1.1 Justificativa

Tendo em vista a falta de infraestrutura rodoviária no Brasil, o método de dimensionamento utilizado pode ocasionar o superdimensionamento ou subdimensionamento da estrutura. Portanto, com interferência direta no desenvolvimento do país, entende-se que um novo método de dimensionamento de vias flexíveis nacionais possa trazer melhorias na qualidade da superfície das malhas rodoviárias brasileiras, em que parâmetros que são levados em consideração buscam transformar o dimensionamento mais eficiente, na qual preenche carências presentes no método atual.

De acordo com Pesquisa de Rodovias, realizadas pela CNT (2022), de toda extensão avaliada (110.332 quilômetros), apenas 8,9% (9.770 quilômetros) encontra-se em perfeita condição de trafegabilidade. 91,1% das rodovias encontram-se com algum tipo de deficiência que são divididas em: desgaste (50,5%), trincas (35,0%), afundamentos, ondulações ou buracos (5,0%). Rodovias em estados inadequados afetam negativamente as condições de segurança, desempenho e conforto dos usuários e resultam no desgaste dos veículos, aumento no tempo de viagem, maior necessidade de manutenção dos veículos e elevado consumo de combustível, na qual gera impactos social e econômico para o país.

É nesse sentido que se torna necessário o estudo de métodos de dimensionamento mais eficientes, capazes de oferecer maior durabilidade aos pavimentos dimensionados (PITANGUI, 2019). Posto isto, o presente trabalho justifica-se pela tentativa de encontrar soluções para aliviar o surgimento das patologias no pavimento rodoviário brasileiro, na qual visa compreender e divulgar a metodologia do novo método mecanicista-empírico. Dessa forma, é possível entender as principais diferenças atreladas ao novo método de dimensionamento proposto pelo DNIT, de forma a viabilizar um adequado investimento no âmbito rodoviário.

1.2 Objetivo

O objetivo geral deste trabalho é realizar uma análise comparativa entre o até então método vigente do DNIT (DNER) e o novo Método de Dimensionamento Nacional de Pavimentos – Medina (método mecanístico-empírico brasileiro).

1.2.1 Objetivos específicos

- Estudar as metodologias de dimensionamento de pavimentos flexíveis do método vigente e do novo Método de Dimensionamento Nacional de Pavimentos – Medina;
- Realizar o dimensionamento de um segmento de via, pelo Método de Dimensionamento Nacional (MEDINA);
- Avaliar a estrutura obtida através dos dois métodos;
- Comparar resultados obtidos pelos dois métodos.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo será abordado os conteúdos com o objetivo de contribuir com o entendimento acerca do estudo proposto. Inicialmente, serão apresentados os conceitos gerais como a definição de pavimentação e seus diferentes tipos, seu funcionamento, camadas, materiais e defeitos ao longo do seu ciclo de vida, assim como uma breve conceitualização histórica. Após a conceitualização sobre o assunto, será dissertado sobre métodos empíricos, com foco na explicação do método DNER e a apresentação dos principais parâmetros, assim como suas características.

Para finalizar, será abordado sobre metodologias mecanística-empírica, de modo a apresentar o Método de Dimensionamento Nacional (Medina). Nessa etapa, foi dado ênfase ao funcionamento do software, em que pretende evidenciar de maneira detalhada o método de dimensionamento. Frente a isso, o referencial teórico trará os principais aspectos para que a metodologia seja aplicada.

2.1 Pavimentação

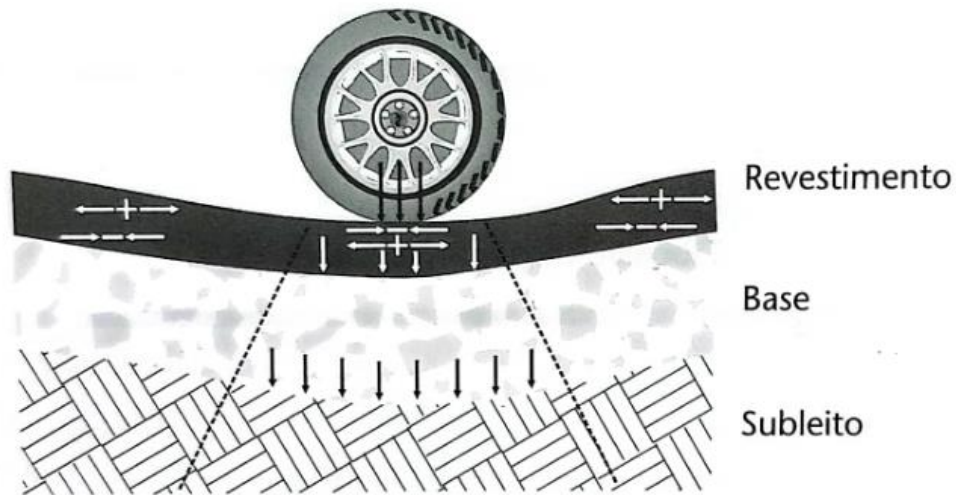
Pavimento é uma estrutura de múltiplas camadas de espessuras finitas de diferentes matérias que possuem características variadas de resistência e deformidade. São construídas sobre a superfície final de terraplenagem, destinada a resistir aos esforços advindos do tráfego de veículos e do clima, e a propiciar aos usuários melhoria nas condições de rolamento, com conforto e segurança, com máxima qualidade e o mínimo custo (BERNUCCI et al, 2006).

Os pavimentos rodoviários podem ser classificados em rígidos e flexíveis, na qual ambos têm o objetivo de possibilitar a melhor condição de uso. Todavia, a utilização de ambas as camadas em uma mesma estrutura é possível, assim classificada como pavimentos semirrígidos. Tais classificações se diferenciam quanto a utilização dos materiais em suas camadas.

Toda camada do pavimento possui caráter exclusivo de receber e transmitir os esforços que lhe foram submetidos de maneira a minimizar as pressões sofridas para as camadas inferiores, que geralmente possuem uma resistência menor do que as demais (Figura 1). Dessa forma, a carga sofrida no pavimento chega na fundação de forma aliviada, na qual impossibilita que aconteça deformações e rupturas. Estas,

podem ser geradas por estado de tensões que não foram previstos inicialmente e que originam em comportamento mecânico inapropriado (BALBO, 2007).

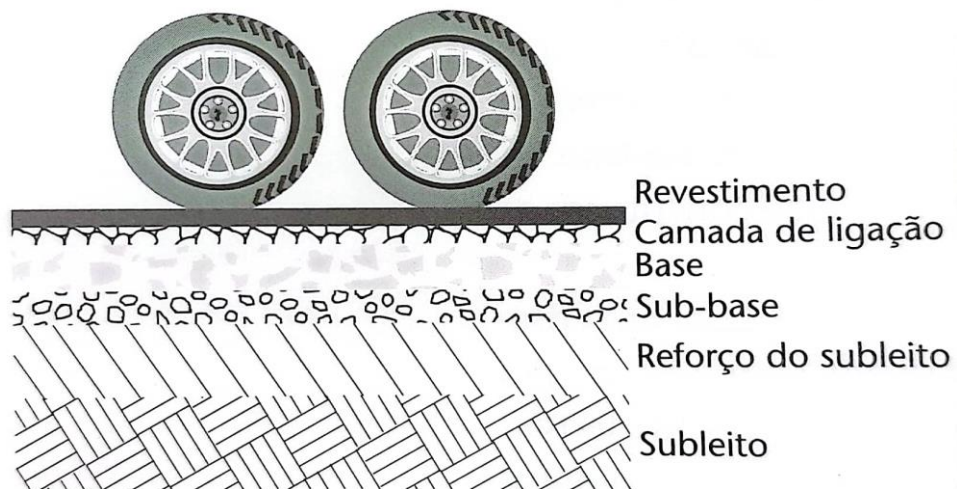
Tabela 1 – Esforços nas camadas dos pavimentos.



Fonte: BALBO (2007, p. 36)

As camadas de um pavimento podem ser nomeadas, da maneira mais completa possível, em: revestimento, base, sub-base, reforço de subleito e subleito. (Figura 2). Estas, dentro das classificações dos pavimentos, possuem suas respectivas funções para que a estrutura final possa ser adequada e suportar os esforços e proporcionar melhores condições de rolamento (BALBO, 2007).

Tabela 2 – Camadas típicas de um pavimento.



Fonte: BALBO (2007, p. 36)

2.1.1 Revestimento

Segundo Manual da Pavimentação:

O revestimento é a camada, tanto quanto possível impermeável, que recebe diretamente a ação do rolamento dos veículos e destinada a melhorá-la, quanto à comodidade e segurança e a resistir ao desgaste (DNIT, 2006, p.106).

Este deve suportar “cargas dinâmicas ou estáticas sem sofrer grandes deformações elásticas ou plásticas, desagregação de componentes ou perda de compactação” (BALBO, 2007, p.36).

Para que seja possível cumprir sua finalidade, os materiais constituídos nesta camada do pavimento devem possuir uma boa aglutinação para que não permita movimentações horizontais. A utilização adequada de uma mistura de agregados e ligantes asfálticos nos pavimentos flexíveis, proporciona uma garantia que os requisitos de impermeabilidade, flexibilidade, estabilidade, durabilidade, resistência à derrapagem, resistência à fadiga e ao trincamento térmico, sejam cumpridos (BERNUCCI *et al.*, 2006).

2.1.2 Subleito

“O subleito é o terreno de fundação do pavimento” (DNIT, 2006, p.106). Todos os esforços submetidos são distribuídos nesta camada, na qual é constituída de material natural consolidado e compactado após os cortes e aterros necessários no projeto geométrico das estradas (BALBO, 2007).

2.1.3 Reforços de subleitos

É a camada acima do subleito que possui a função de complementar a resistência e qualidade do solo da fundação. Sua utilização é opcional, de modo a depender do dimensionamento do pavimento, na qual pode ser feita a utilização de outros métodos que aliviam as pressões para que o subleito, como o aumento das espessuras das camadas superiores (BALBO, 2007).

2.1.4 Bases e sub-bases

Segundo o Manual de pavimentação (DNIT, 2006, p.106), “base é a camada destinada a resistir e distribuir os esforços oriundos do tráfego e sobre a qual se constrói o revestimento” e sub-base “é a camada complementar à base, quando por

circunstâncias técnico-econômicas não for aconselhável construir a base diretamente sobre regularização”. As bases e sub-bases podem ser executadas de diversos materiais, como brita graduada, brita graduada tratada com cimento, solo estabilizado naturalmente ou quimicamente, com ligantes hidráulicos, asfálticos ou concretos (BALBO, 2007).

2.1.5 História da pavimentação

A história da pavimentação, ainda na Antiguidade, está diretamente ligada ao povoamento dos continentes, razões econômicas, culturais, religiosas e militares, na qual a pavimentação se tornou essencial. Em busca desses interesses, os povos egípcios, gregos e romanos construíram vias pavimentadas para facilitar a execução do que lhes interessavam. Em todo império romano, foram construídos, aproximadamente, 87.000 km de vias pavimentadas (BALBO, 2007; COUTINHO, 2011).

Dentre as vias romanas construídas na época, destaca-se a via Appia, ilustrada na Figura 3, que foi umas das pioneiras em técnicas específicas quando se trata de pavimentação (BALBO, 2007). Segundo Bernucci *et al.* (2006, p.13), “a construção foi iniciada no ano 312 a.C. com o objetivo de ligar Roma a Cápuia (195km), permitindo ao exército romano chegar rapidamente, durante o período não-invernoso, às áreas de Campania e Samnium, retornando a Roma no inverno”. As vias romanas eram compostas pela fundação e por camadas nas quais seus materiais variavam de acordo com os disponíveis nas regiões próximas (BERNUCCI *et al.*, 2006).

Após a queda do império romano, a França foi a primeira a reconhecer a importância que o transporte possuía para o desenvolvimento do comércio, na qual reforça a relevância da velocidade de viagem e na construção e conservação das estradas (BERNUCCI *et al.*, 2006). A partir de então, outros países, como a Inglaterra, “observando a forma como eram calçados os caminhos da França, conseguiram então construir as vias mais cômodas, duráveis e velozes da Europa, o que foi importante para o progresso da indústria e comércio do país” (BERNUCCI *et al.*, 2006, p.14).

Tabela 3 - Via Appia em 2020.

Fonte: FORMENTIN (2020)

No Brasil, os primeiros registros de construção de estradas aconteceram com a construção da conhecida como Estrada do Mar, que fazia a ligação de São Vicente ao Planalto Piratininga, conforme ilustrado na Figura 4. O desenvolvimento de melhorias das estradas originou-se com a necessidade de melhorar a economia através do transporte de café e ouro, o que favoreceu e facilitou a ligação entre os estados de São Paulo, Rio de Janeiro e Minas Gerais (PITANGUI, 2019).

Tabela 4 – Estrada Caminho do Mar

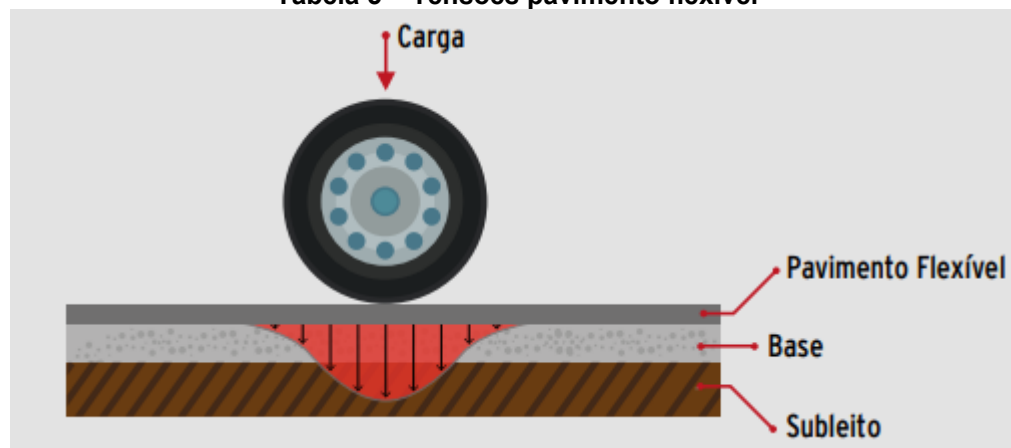
Fonte: ESTRADAS (2020)

O avanço na construção de rodovias no Brasil se deu com o desenvolvimento tecnológico da 2ª Guerra Mundial. Nesse período foi criado o Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER), na década de 1940 foram construídas pistas de aeroportos e estradas na qual foi utilizado o ensaio California Bearing Ratio (CBR). Ainda nesta década, foi criado o Fundo Rodoviário Nacional (FRN), que destinava recursos para o desenvolvimento de estradas. A partir de então, o Brasil passou a estudar métodos de dimensionamento e técnicas para a construção de rodovias pavimentadas (BERNUCCI *et al.*, 2006).

2.1.6 Pavimento flexível

Segundo a definição do Manual de Pavimentação (DNIT, 2006, p.95), pavimento flexível “é aquele em que todas as camadas sofrem deformação elástica significativa sob o carregamento aplicado e, portanto, a carga se distribui em parcelas aproximadamente equivalentes entre as camadas”. Dessa forma, é possível observar um campo de tensões concentrado no ponto de aplicação da carga, conforme Figura 5, na qual exige que as camadas do pavimento seja mais espessas para que o subleito possa ser protegido (CNT, 2017).

Tabela 5 – Tensões pavimento flexível

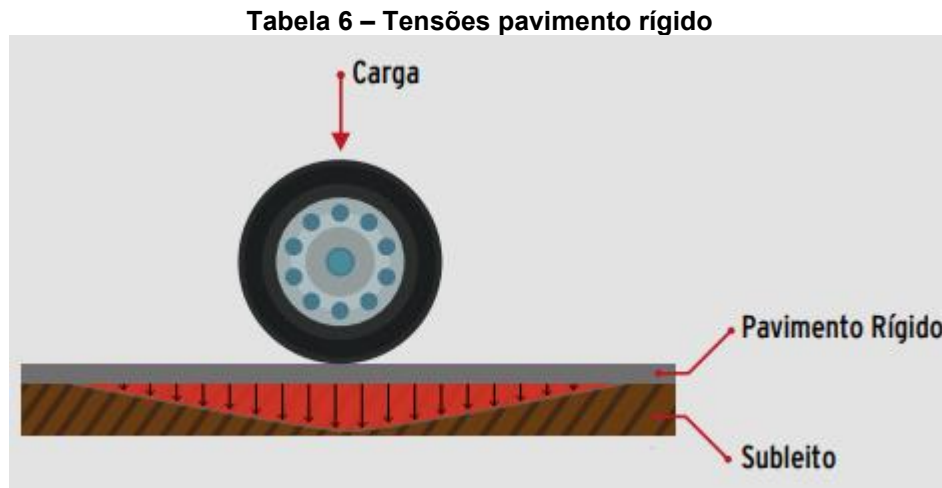


Fonte: CNT (2017)

2.1.7 Pavimento rígido

Segundo a definição do Manual de Pavimentação (DNIT, 2006, p.95), pavimento rígido é “aquele em que o revestimento tem uma elevada rigidez em relação às camadas inferiores e, portanto, absorve praticamente todas as tensões

provenientes do carregamento aplicado”. Essas tensões são distribuídas em uma grande área e ao longo da extensão da placa, conforme Figura 6, o que proporciona menores esforços verticais sobre o subleito, o que possibilita que o número de camadas se torna menor em relação ao pavimento flexível (CNT, 2017).



Fonte: CNT (2017)

2.1.8 Pavimento semirrígido

Segundo a definição do Manual de Pavimentação (DNIT, 2006, p.95), pavimento semirrígido “caracteriza-se por uma base cimentada por algum aglutinante com propriedades cimentícias como por exemplo, por uma camada de solo cimento revestida por uma camada asfáltica”. Pode-se dizer que esse tipo de pavimento apresenta um comportamento entre pavimento flexíveis e rígidos. Isso se deve à estabilização do solo e da brita com ligantes hidráulicos, que não confere as propriedades de rigidez do concreto, como fragilidade e resistência, embora possam fornecer módulo de elasticidade semelhante ao do concreto, mas superiores aos do asfalto (BALBO, 2007).

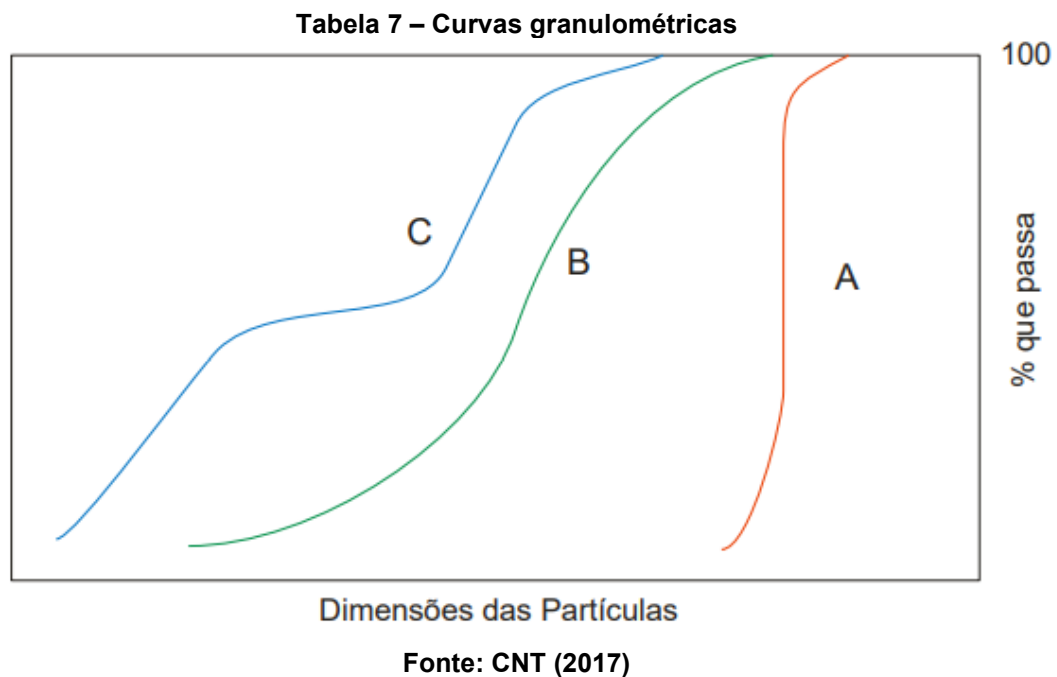
2.2 Ensaios em solos para pavimentação

O dimensionamento dos pavimentos está diretamente ligado a característica do solo no local da implementação. Dessa forma, é necessário a realização de ensaios com amostras coletadas para sua classificação, na qual torna-se importante o conhecimento acerca das propriedades do solo. Para isso, serão descritos os principais ensaios que possuem importância na pavimentação.

2.2.1 Granulometria

A granulometria é caracterizada pelo estudo do tamanho das partículas do solo. Conforme o Manual de Pavimentação (DNIT, 2006, p.31), “a análise granulométrica consiste na determinação das porcentagens, em peso, das diferentes frações constituintes da fase sólida do solo.” A norma que caracteriza esse ensaio é a “DNER - ME 051/94: Solos - Análise granulométrica” e “DNER - ME 080/94: Solos - Análise granulométrica por peneiramento”.

A determinação da granulometria é dada através da curva granulométrica. Essa curva é determinada pelo processo de peneiramento, na qual o solo passará por peneiras com malhas de dimensões padronizadas e as quantidades retidas são pesadas e calculadas em porcentagem. Através dos valores, é realizado a curva granulométrica que caracterizará o solo em: uniforme (curva-A), bem graduada (curva-B) e mal graduada (curva-C), descritas na Figura 7.



2.2.2 Limites de consistência

Segundo a definição do Manual de Pavimentação (DNIT, 2006, p.35), os limites de consistência “permitem avaliar a plasticidade dos solos. Esta propriedade consiste na maior ou menor capacidade de serem moldados sem variação de volume, sob certas condições de umidade”. Dessa forma, a umidade é a propriedade que

caracterizará a condição do solo em quatro estado: estado líquido, estado plástico, estado semissólido e estado sólido (DNIT, 2006).

Outro índice importante dado através da obtenção dos valores das umidades que faz com que o solo passe de um estado para outro, é o índice de plasticidade (IP). Este é dado pela diferença entre o valor de limite de liquidez (LL) e o limite de plasticidade (LP), conforme a Equação 1.

$$IP = LL - LP \quad (1)$$

2.2.2.1 Limite de liquidez (LL)

Segundo a definição do Manual de Pavimentação (DNIT, 2006, p.35), o limite de liquidez é “a umidade correspondente ao limite entre os estados líquido e plástico”. O ensaio para determinação do limite de liquidez é dado pelas normas “NBR 6459:2016: Solo – Determinação do limite de liquidez” e “DNER-ME 122/94: Solos – determinação do limite de liquidez – método de referência e método expedido”.

2.2.2.2 Limite de plasticidade (LP)

Ainda segundo a definição do Manual de Pavimentação (DNIT, 2006, p.35), o limite de plasticidade é “a umidade correspondente ao limite entre os estados líquidos e plásticos”. O ensaio para determinação do limite de plasticidade é dado pelas normas “NBR 7180:2016: Solo – Determinação do limite de plasticidade” e “DNER-ME 082/94: Solos – Determinação do limite de plasticidade”.

2.2.3 Índice de Grupo (IG)

Segundo o Manual de Pavimentação (DNIT, 2006, p.37), “chama-se Índice de Grupo um valor numérico, variando de 0 a 20, que retrata o duplo aspecto de plasticidade e graduação das partículas do solo.” Essa propriedade é calculada pela Equação 2:

$$IG = 0,2a + 0,005ac + 0,01bc \quad (2)$$

Na qual,

a = % de material que passa na peneira nº 200 menos 35. Caso seja maior que 75, adota-se 75, se for menor que 35, adota-se 35.

b = % de material que passa na peneira nº 200 menos 15. Caso seja maior que 55, adota-se 55, se for menor que 15, adota-se 15.

c = Valor do Limite de Liquidez menos 40. Se o Limite de Liquidez for maior que 60, adota-se 60, se for menor que 40, adota-se 40.

d = Valor de Índice de Plasticidade menos 10. Se o índice de Plasticidade for maior que 30, adota-se 30, se for menor que 10, adota-se 10.

2.2.4 Califórnia Bearing Ratio (CBR)

O ensaio de Califórnia Bearing Ratio (CBR) ou Índice Suporte Califórnia foi desenvolvido pelo engenheiro O. J. Porter. Atualmente, as normas vigentes a cerca desse ensaio são “DNIT 172/2016 – ME: Solos – Determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas – Método de ensaio” e “NBR 9895: Solo – Índice de suporte Califórnia”. De acordo com DNIT (2006), “o ensaio de CBR consiste na determinação da relação entre a pressão necessária para produzir uma penetração de um pistão num corpo-de-prova de solo, e a pressão necessária para produzir a mesma penetração numa brita padronizada.” Segundo as normas citadas, o ensaio é dividido em 3 etapas que será resumido a seguir:

- 1) Modelagem do corpo de prova: essa etapa consiste na determinação da curva de compactação do solo. As amostras de solo devem ser as consideradas não trabalhadas, ou seja, que não tenham sido utilizadas em outros ensaios. Dessa forma, são feitos corpos de prova de molde cilíndrico com cinco camadas, na qual cada uma receberá golpes de soquete que variam de acordo com a camada: 12 golpes para material de subleito, 26 golpes para materiais de sub-base e 55 golpes para materiais de base. O soquete deverá ser lançado a uma distância de 45,72 cm. Em seguida, são retirados da moldagem das amostras cerca de 100g para a determinação do teor de umidade. Essas operações são repetidas até atingir o número necessário para caracterizar a curva de compactação.
- 2) Expansão: nessa etapa, os corpos de prova são imersos em água durante 96 horas (quatro dias) e um extensômetro é colocado na borda do cilíndrico que medirá a expansão ocorrida e deverá ser anotada a cada 24 horas.
- 3) Penetração: nessa etapa, o corpo de prova é retirado da imersão em água e escoado durante 15 minutos para que, assim, seja possível iniciar o

processo de medição de resistência a penetração através de um pistão.

Cada leitura é feita através de um tempo especificado para o ensaio.

Através da curva de compactação, a ordenada máxima fornece a massa específica aparente seca máxima e a abscissa a umidade ótima do solo. Para determinar o valor do Índice de Suporte Califórnia final, é necessário a representação dos valores dos Índices de Suporte Califórnia obtidos segundo dados do ensaio, (relação entre a pressão calculada e a pressão padrão), correspondentes aos valores das umidades utilizadas para a criação da curva de compactação. O valor da ordenada dessa curva, correspondente à umidade ótima antes determinada, fornece o Índice de Suporte Califórnia (ISC).

2.2.5 Compactação

Segundo o Manual de Pavimentação (DNIT, 2006, p.41):

Compactação é a operação da qual resulta o aumento da massa específica aparente de um solo (e de outros materiais, como misturas betuminosas) pela aplicação de pressão, impacto ou vibração, o que faz com que as partículas constitutivas do material entrem em contato mais íntimo, pela expulsão de ar; com a redução da percentagem de vazios de ar, consegue-se também reduzir a tendência de variação dos teores de umidade dos materiais integrantes do pavimento, durante a vida de serviço.

A compactação é realizada com o objetivo de melhorar o comportamento hidromecânico do solo e de evitar problemas como recalques excessivos em rodovias e aterros (SIVRIKAYA *et al.*, 2013, apud SILVA *et al.*, 2016). A padronização está nas normas técnicas “NBR 7182/86: Solo - Ensaio de compactação”, “DNIT – ME 162/94: Solos - ensaio de compactação utilizando amostras trabalhadas” e “DNIT – ME 164/13: Solos – Compactação utilizando amostras não trabalhadas – Método de Ensaio”. Segundo a norma da NBR 7182/86, a realização do ensaio pode ser dada em quatro processos: compactação manual com reuso de material, compactação manual sem reuso de material, compactação mecânica com reuso de material e compactação manual sem reuso de material com 24 horas de umedecimento prévio.

2.3 Tráfego

Os estudos de tráfego são realizados com o objetivo de planejar vias eficientes que suportem o transporte de mercadoria e pessoas de forma econômica e segura (DNIT, 2006). O tráfego rodoviário é muito variado quanto ao tipo de veículos e cargas transportadas (MOTTA *et al.*, 2005). Entretanto, para a realização do

dimensionamento dos pavimentos é necessário conhecer e obter os dados do volume do tráfego e do carregamento a partir da contagem e da pesagem de veículos em rodovias (FRANCO, 2007).

O conhecimento das solicitações atuantes na rodovia é um dos principais fatores responsáveis pela deterioração dos pavimentos durante sua vida útil (ADLINGE *et al.*, 2003 apud MOTA *et al.*, 2018). A modelagem do tráfego é complexa, pois envolve diversos fatores como a contagem de veículos, distribuição do peso sobre os eixos, velocidade de passagem, variação lateral em relação ao eixo da rodovia, geometria dos eixos, pressão dos pneus, entre outros (FRANCO, 2007). Dessa forma, vê-se a importância de caracterizar o tráfego corretamente para dimensionar um pavimento que resista às solicitações durante sua vida útil e que reduza a necessidade de manutenção e, conseqüentemente, de investimentos (MOTA *et al.*, 2018).

2.3.1 Número N

Nos métodos de dimensionamento citados na presente pesquisa, o dimensionamento de pavimento é dado em função do número (N) de repetições (ou operações) dos eixos padrão dos veículos rodoviário de 8,2tf (80kN) durante o período considerado de projeto, ou seja, de vida útil do pavimento (BALBO, 2007).

Na determinação do número N são levados em consideração fatores relacionados à composição do tráfego de cada tipo de veículo, o peso da carga transportada e sua distribuição entre os diferentes tipos de eixos. Seus valores anuais e acumulativos para a duração do projeto são calculados a partir de previsões de tráfego e exigem um entendimento qualitativo e quantitativo de sua composição atual e futura. Esse conhecimento é obtido por meio de pesagem, pesquisas de origem e destino, classificações de contagem de volume e estudos de tendências de frotas regionais ou nacionais (DNIT, 2006).

A obtenção do número “N” inicia-se com a categorização das contagens volumétricas efetuadas para as vias existentes, de forma a obter o volume médio diário (VMD). O tráfego atual, obtido por meio de estudos de campo, servirá como ponto de partida para estimar o tráfego futuro. A projeção do tráfego futuro deve ser baseada nas taxas de crescimento do tráfego e na compreensão das possíveis mudanças previstas no sistema de transporte regional. As taxas de crescimento do tráfego

podem ser baseadas em séries temporais existentes, como dados socioeconômicos regionais (DNIT, 2006).

A partir da composição e projeção do tráfego, dos pesos das cargas transportadas e da sua distribuição nos diversos tipos de eixos dos veículos é possível determinar o número N (DNIT, 2006). O valor de N é encontrado através da Equação 3.

$$N = Vp \cdot FV \cdot FR \quad (3)$$

Na qual:

Vp = número de veículos em todo período de projeto;

Fv = fator de veículo;

Fr = fator climático regional.

De acordo com o Manual de Ajuda Programa Medina (2015, p.8), “uma boa estimativa do tráfego é fundamental para se conseguir um bom dimensionamento e fazer uma boa análise, pois os modelos utilizados no programa se mostram sensíveis a pequenas variações do número N”.

2.3.1.1 Fator de veículos (Fv)

De acordo com o Manual de Pavimentação (2006, p.144), fator de veículos é “um número que multiplicado pelo número de veículos que operam, dá, diretamente, o número de eixos equivalentes ao eixo padrão”.

O método do DNER, desenvolvido pelo engenheiro Murillo Lopes de Souza a partir de alterações do método do Corpo dos Engenheiros do Exército Americano, expressa o fator de veículos em função de dois fatores: o fator de eixos e o fator de carga, conforme Equação 4.

$$FV = FE \cdot FC \quad (4)$$

Na qual,

F.E é um fator de eixos;

F.C é um fator de carga.

O fator de carga (FC) transforma o uso do eixo necessário para uma determinada carga para o número de utilizações de eixo padrão que devem produzir resultados equivalentes. As cargas geradas pelos veículos causam deflexões nas camadas do pavimento, alteram o estado de tensões e deformações, que,

consequentemente, provoca um efeito destrutivo no pavimento, além da redução da sua vida útil (DNIT, 2006).

É um fator que transforma o tráfego de número de veículos padrão em número de passagens de eixos equivalentes. Dessa forma, multiplica-se por dois a porcentagem de veículos de dois eixos, multiplica-se por três a porcentagem de veículos de três eixos e assim por diante (SENÇO, 2007).

Fator de eixos é definido como o número que multiplicado pelo número de veículos, dá o número de eixos correspondentes, que nada mais é a média ponderada das quantidades percentuais dos diversos tipos de eixos que atuam no pavimento. O fator de eixo transforma o tráfego de veículos em número de passagens de eixos equivalentes (DNIT, 2006).

2.3.1.2 Fator climático regional (FR)

A chuva aumenta a umidade nas camadas inferiores do pavimento. A diferença no teor de umidade dos materiais de revestimento pode significar uma variação no comportamento resiliente. A pavimentação asfáltica leva em consideração a contribuição da água para o intemperismo da mistura asfáltica (SENÇO, 2007).

Para levar em conta as variações de umidade dos materiais do pavimento durante as diferentes estações do ano, deve-se multiplicar o número equivalente de operações do eixo padrão ou parâmetro de tráfego (N) por um coeficiente (FR). Na pista experimental da AASHTO o valor variou de 0,2 (baixos teores de umidade) a 5,0 (materiais praticamente saturados) (DNIT, 2006).

O coeficiente adotado é resultado da média ponderada dos diferentes coeficientes sazonais, na qual leva-se em consideração o espaço de tempo em que acontece. (DNIT, 2006). De acordo com Senço (2008, p.481), foi sugerido fatores climáticos regionais estipulados em função da altura anual de chuva em mm, conforme Tabela 1.

Tabela 8 – Fator climático Regional

Altura média anual de chuva (mm)	Fator climático regional (FR)
Até 800	0,7
De 800 a 1500	1,4
Mais de 1500	1,8

Fonte: Adaptado de SENÇO (2008)

2.4 Defeitos dos pavimentos

Para Motta (2008), os defeitos superficiais são danos ou desgastes visíveis na camada externa dos pavimentos betuminosos e classificados segundo uma terminologia normatizada (DNIT 005/2003-TER-DNIT, 2003). Eles podem ser provenientes de inúmeros fatores, como baixa qualidade dos materiais empregados, erros durante a seleção, dosagem ou produção dos materiais, além de falhas construtivas, de manutenção ou conservação (BERNUCCI et al, 2006).

As patologias em pavimentos flexíveis podem ser classificadas como: defeitos de superfície, em que há exposição de ligante, agregados ou separação dos mesmos; degradações superficiais, que, geralmente, acontecem durante a construção do pavimento e como consequência tendem a afetar a composição granulométrica dos agregados de maneira que as misturas asfálticas produzidas em campo sejam diferentes daquelas projetadas em laboratórios; ou deformações, devido a compactação complementar de camadas mal compactadas ou devido à ruptura por cisalhamento (NETTO et al, 2020).

Dentre os principais defeitos dos pavimentos, destacam-se para o desenvolvimento deste trabalho as trincas geradas por fadiga e as deformações permanentes.

2.4.1 Trinca por fadiga

O trincamento por fadiga é um defeito comum em pavimentos asfálticos causado pela carga sucessiva do tráfego, que produz tensões de tração na base do revestimento. Inicialmente surgem microtrincas, que podem se transformar em trincas e promover falha mecânica. Durante os períodos sem tráfego ocorre a cura das microtrincas, que pode aumentar a vida útil do revestimento (NUNES et al, 2009).

Trincas são os defeitos mais ocorrentes nos pavimentos betuminosos, e sua principal causa dá-se pelo fenômeno de fadiga. Esse fenômeno acontece devido aos

esforços repetidos de tração por flexão dessa camada. Elas são o primeiro sinal da redução da qualidade estrutural do pavimento (FONTES, 2009).

As trincas por fadiga começam na parte inferior da camada asfáltica e se propagam até o rolamento. Geralmente, elas surgem nas trilhas de rodas de veículos pesados na direção longitudinal da via. Em seu último estágio, essas trincas se assemelham à pele de crocodilo, pois as trincas longitudinais individuais se ramificam e estas, por sua vez, podem produzir trincas transversais. Por fim, as trincas parabólicas na superfície do pavimento podem ser originadas a partir de problemas de estabilidade dos materiais de desgaste, associados ao tráfego pesado, ou através da ligação deficiente entre essa camada e a subjacente (FONTES, 2009).

2.4.2 Deformação permanente

Pinto (1991) afirma que a fadiga é um processo de deterioração estrutural que um material sofre ao ser submetido a sucessivas tensões e deformações que geram trincas ou fratura completa após um número determinado de repetições de carga. Inúmeros defeitos nos pavimentos têm sua origem na repetição de pequenas deformações elásticas (MEDINA e MOTTA, 2015), uma vez que a deformação resiliente está diretamente relacionada ao trincamento por fadiga, que é o principal defeito encontrado em pavimentos.

É crucial realizar uma análise minuciosa do comportamento resiliente dos materiais, uma vez que o carregamento cíclico é característico de pavimentos (BERNUCCI et al., 2006). Todas as camadas de um pavimento podem apresentar deformação permanente devido à carga de tráfego e fatores ambientais. No caso de materiais betuminosos, a deformação permanente é, principalmente, influenciada pela temperatura e, em segundo plano, pelo nível de tensão e tempo de carregamento (BELL, 1978).

Conforme as nomenclaturas sugerem, a diferença entre deformações reversíveis e permanentes é que, nas primeiras, após a passagem dos veículos pesados a via retorna ao seu estado normal, já no segundo caso, ainda se encontrará vestígios de caráter residual (PREUSSLER & PINTO, 2001 *apud* FONTES, 2009). O desenvolvimento das deformações permanentes se caracteriza no aumento da sua profundidade e no aparecimento de outros tipos de defeitos, essa intensificação dá-se com o aumento das solicitações de cargas por eixo e se manifestam como

depressões longitudinais nas trilhas de rodas, com ou sem elevações laterais nas estradas (FONTES, 2009).

A deformação permanente é um fenômeno complexo influenciado pelas propriedades e proporções dos componentes da mistura asfáltica, como agregados, ligante e volume de vazios. É da combinação da resistência do ligante e dos agregados minerais que se resulta a resistência à deformação permanente. Sua ocorrência é intensificada durante o verão, devido à diminuição da viscosidade do ligante em altas temperaturas, o que resulta no suporte da carga promovida pelo tráfego pesado apenas pelos agregados minerais (FONTES, 2009).

2.5 Métodos de dimensionamento

O dimensionamento de um pavimento significa determinar as espessuras das camadas e os materiais a serem executados na construção da estrutura do pavimento, de modo que suporte o volume de tráfego que lhe é submetida, assim como as situações climáticas (BALBO, 2007). A existência de diferentes métodos de dimensionar pavimentos, sejam flexíveis ou rígidos, faz-se com que seja necessária uma revisão dos métodos mais empregados. De acordo com Balbo (2007), as técnicas podem ser classificadas em três tipos:

- Método empírico: Resultado da modelagem estatística da evolução dos parâmetros físicos observados nos pavimentos em serviço;
- Método semiempírico: Resultado da extrapolação e expansão de resultados empíricos com base em uma teoria analítica consistente.
- Método empírico-mecanicista: Resultado da calibração de modelos teóricos com dados experimentais obtidos em campo e em laboratório.

2.5.1 Método DNER

A metodologia adotada para o dimensionamento de pavimentos flexíveis empregado no Brasil tem como base o trabalho "Design of Flexible Pavements Considering Mixed Loads and Traffic Volume", da autoria de W.J. Turnbull, C.R. Foster e R.G. Ahlvin, do Corpo de Engenheiros do Exército dos E.E.U.U. e conclusões obtidas na Pista Experimental da AASHTO, na qual caracteriza o método como empírico (DNIT, 2006). Esse método foi introduzido no Brasil pelo engenheiro Murilo Lopes de Souza, publicado no ano de 1966 e posteriormente atualizado devido ao

surgimento de novos materiais, tecnologias e equipamentos, na qual encontra-se, atualmente, na terceira edição (MOTTA, 1991).

O surgimento dessa metodologia deu-se com a proximidade da Segunda Guerra Mundial, após o exército americano observar que as pistas de pouso nos aeroportos não suportariam os bombardeios. Dessa forma, surgiu a necessidade da implantação de um método de dimensionamento mais eficiente (BALBO, 2007). Em 1942, com a entrada dos EUA na guerra, o Corpo de Engenheiros do Exército Americano (USACE) foi obrigado a desenvolver um método de forma mais rápida, o qual obrigaram a destacar a possibilidade da criação de uma nova metodologia. Dessa forma, passaram a considerar o aprimoramento de uma metodologia já existe, na qual foi escolhido o método do CBR, desenvolvido por O. J. Porter, da Divisão de Estradas do Estado da Califórnia (COUTINHO, 2011).

De acordo com o Manual de Pavimentação do DNIT (2006), o método está segmentado em três etapas: capacidade de suporte do subleito e dos materiais, determinação do tráfego e dimensionamento das camadas do pavimento.

2.5.1.1 Capacidade de suporte do subleito e dos materiais

Em relação a capacidade de suporte do subleito e os materiais constituintes dos pavimentos, o método utiliza o ensaio de CBR, em corpos de prova indeformados ou moldados em laboratório para as condições determinadas no campo (DNIT, 2006). Segundo Bezerra Neto (2004, p.37), “para garantir que o pavimento não sofrerá ruptura precocemente, o método exige que os materiais utilizados na sua construção possuam certas características” conforme demonstrado na Tabela 2.

Tabela 9 – Classificação e condições dos materiais empregados nas camadas do pavimento

Camada	Classificação e condições
Materiais do subleito	Apresentar uma expansão, medida no ensaio C.B.R., menor ou igual a 2% e um C.B.R. $\geq 2\%$.
Materiais para reforço de subleito	Apresentar C.B.R. maior que o do subleito e expansão $\leq 1\%$
Materiais para sub-base	Apresentar C.B.R. $\geq 20\%$, I.G. = 0 e expansão $\leq 1\%$
Materiais para base	Apresentar C.B.R. $\geq 80\%$ e expansão $\leq 0,5\%$, Limite de liquidez $\leq 25\%$ e Índice de plasticidade $\leq 6\%$

Fonte: Adaptado de DNIT (2006)

De acordo com o Manual de Pavimentação do DNIT (2006, p.143), os materiais para base devem ser enquadrados nas faixas granulométricas descritas segundo a Tabela 3.

Tabela 10 – Granulometria para base granular

Peneiras	Porcentagem em peso passante					
	Para $N > 5 \times 10^8$			Para $N < 5 \times 10^6$		
	A	B	C	D	E	F
2" (50mm)	100	100	-	-	-	-
1" (25mm)	-	75-90	100	100	100	100
3/8" (9,5mm)	30-65	40-75	90-85	60-100	-	-
Nº 4 (4,8mm)	25-55	30-60	35-65	50-85	55-100	10-100
Nº 10 (2mm)	15-40	20-45	25-50	40-70	40-100	55-100
Nº 40 (0,42mm)	8-20	15-30	15-30	25-45	20-50	30-70
Nº 200 (0,075mm)	2-8	5-15	5-15	5-20	6-20	8-25

Fonte: Adaptado de DNIT (2006)

Para a realização do dimensionamento das espessuras das camadas do pavimento é necessário, também, ter conhecimento do Coeficiente de Equivalência Estrutural (K). Estes, são atribuídos aos materiais constituintes das camadas do pavimento e indicam a capacidade relativa de um determinado material em distribuir pressões para camadas subjacentes, o que leva a conclusão que quanto maior o módulo de elasticidade do material, menor pressão sobre uma camada inferior (PITANGUI, 2019, apud BALBO *et al.*, 1997).

Na Tabela 4, são elencados os coeficientes de equivalência estrutural para os diferentes materiais constitutivos do pavimento.

Tabela 11 - Coeficientes de equivalência estrutural

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

Fonte: Adaptado de DNIT (2006)

2.5.1.2 Determinação do tráfego

O levantamento do tráfego é realizado a partir do número de veículos, faixas, tipo de veículo (comercial ou passeio) e tipo de eixo (SOUZA, 1981). Dessa forma, o dimensionamento dos pavimentos ocorre em função do número equivalente (N) de operações de um eixo tomado como padrão, durante o período de projeto escolhido

(DNIT, 2006). A determinação do número N ocorre segundo a Equação 4, descrita no item 2.3.1.1 do presente trabalho.

Com a obtenção do valor do Número N determina-se, pelo método DNER, a espessura mínima necessária para proteger a camada de base dos esforços solicitantes do tráfego e evitar a ruptura do revestimento por esforços repetidos de tração na flexão (DNIT, 2006). A Tabela 5 elaborada pelo DNIT (2006), foi realizada após análises na experiência de campo e testes realizados na pista experimental da AASHTO (SOUSA, 2019)

Tabela 12 – Espessura mínima de revestimento betuminoso

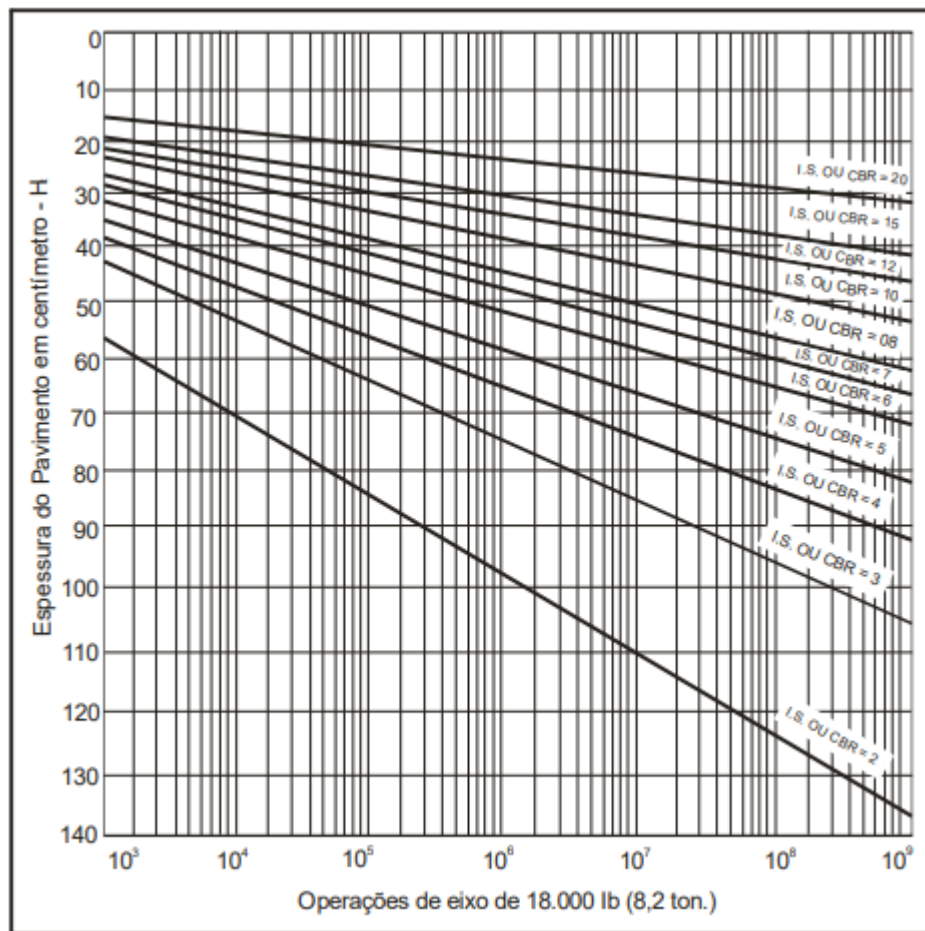
N	Espessura mínima de revestimento betuminoso
$N \leq 10^6$	Tratamento superficiais betuminosos
$10^6 \leq N \leq 5 \times 10^6$	Revestimentos betuminosos com 5,0 cm de espessura
$5 \times 10^6 < N \leq 10^7$	Concreto betuminoso com 7,5 cm de espessura
$10^7 < N \leq 5 \times 10^7$	Concreto betuminoso com 10,0 cm de espessura
$N > 5 \times 10^7$	Concreto betuminoso com 12,5 cm de espessura

Fonte: Adaptado de DNIT (2006)

2.5.1.3 Dimensionamento das camadas

Nesse método, inicialmente é realizado o dimensionamento da espessura total do pavimento, para, posteriormente, determinar o tipo de revestimento e a espessura das demais camadas que compõem o pavimento (SOUSA, 2019). Através dos dados do número N e C.B.R. obtidos, é possível determinar com a utilização de ábacos espessura total do pavimento (Hm), na qual é fornecida em termos de base granular conforme mostrado na Figura 8 (DNIT, 2006).

Tabela 13 – Determinação da espessura do pavimento



Fonte: DNIT (2006)

Uma vez estabelecida a espessura total exigida, a próxima etapa é a determinação das espessuras das camadas de pavimento, representadas pelas letras R (revestimento), B (base), h_{20} (sub-base) e h_n (reforço do subleito), ilustradas na Figura 9. As letras H_{20} , H_n , e H_m representam, respectivamente, a espessura dos pavimentos sobre a sub-base, sobre o reforço do subleito e sobre o subleito (DNIT, 2006).

Tabela 14 - Simbologia do dimensionamento do pavimento



Fonte: CNT (2016)

De acordo com Manual de Pavimentação do DNIT (2006, p.147), “no caso da camada de base, mesmo que o IS ou CBR seja superior a 20, adota-se o valor de 20 para a determinação do pavimento necessário para protegê-la”. Além disso, também é determinado, através do manual citado, que a espessura construtiva mínima para estas camadas é de 15cm.

As demais camadas são obtidas através dos cálculos das seguintes inequações 5, 6 e 7:

$$RK_r + BK_b \geq H_{20} \quad (5)$$

$$RK_r + BK_b + h_{20}K_s \geq H_n \quad (6)$$

$$RK_r + BK_b + h_{20}K_s + h_nK_n \geq H_m \quad (7)$$

Em que,

R, B, h_{20} e h_n são os valores das espessuras das camadas de revestimento, base, sub-base e reforço do subleito;

K_r , K_b , K_s e K_n são os coeficientes de equivalência estrutural dos materiais do pavimento;

H_{20} , H_n e H_m são os valores das espessuras das camadas sobre a sub-base, reforço do subleito e subleito.

2.6 Método mecanístico-empírico

O projeto de estruturas de pavimentos asfálticos é um processo complexo, na qual demanda conhecimento de variáveis de difícil previsão e modelagem, tais como:

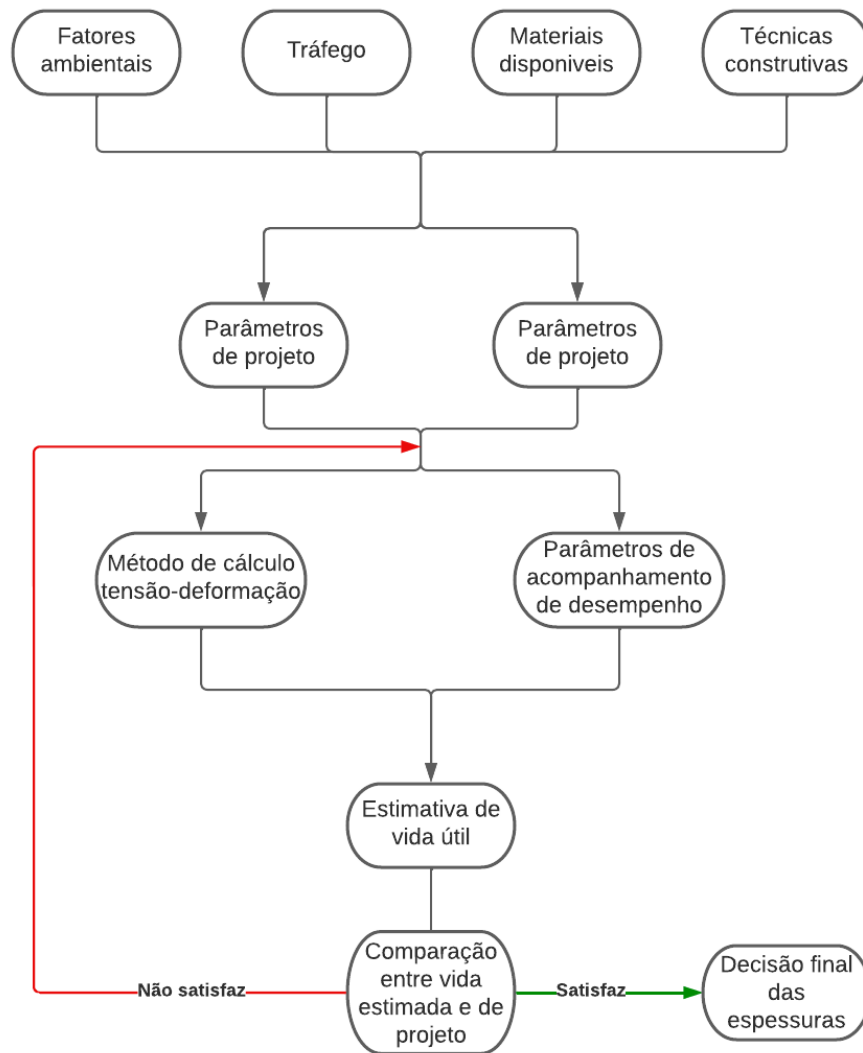
a carga aplicada, a resposta da estrutura ao analisar as mudanças nas condições climáticas e as características dos materiais e seu comportamento durante a aplicação de cargas (FRANCO, 2007). Em decorrência das dificuldades ainda existentes, diversos estudos têm sido desenvolvidos no intuito de aprimorar métodos mais modernos de dimensionamento de pavimentos asfálticos a fim de minimizar o alto nível de empirismo ainda presente nas metodologias utilizadas (PITANGUI, 2019).

O método de dimensionamento do DNER, citado no tópico 2.4, é definido como método empírico, na qual é caracterizado por proteger o subleito de deformações plásticas durante o período de projeto. Contudo, para complementar esse método, é possível realizar análises que permitam considerar o problema do trincamento por fadiga das camadas asfálticas nos pavimentos flexíveis, e das camadas cimentadas, nos pavimentos rígidos. Para isso, o procedimento mais eficaz é a aplicação de modelos de previsão de desempenho do tipo mecanístico-empírico, por ser “um recurso que permite quantificar a redução do nível de serventia ou a geração de defeitos ao longo da vida de serviço do pavimento”. (DNIT, 2006, p.150).

De acordo com Bezerra Neto (2004, p.41), o guia da AASHTO (1986) descreve as seguintes vantagens de se utilizar um método mecanístico 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.

Medina e Motta (2015, p.348) propuseram um fluxograma para dimensionamento de pavimentos conforme Figura 10. Neste, é possível analisar os dados de entrada, o processamento via mecanística e os critérios de decisão a fim de que se possa evitar a degradação do pavimento por quaisquer mecanismos de ruptura.

Tabela 15 – Diagrama de dimensionamento

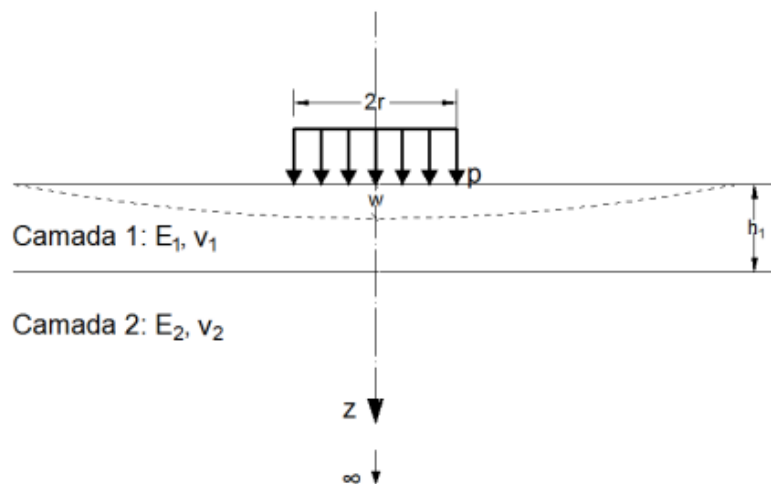
Fonte: Adaptado MEDINA E MOTA (2015)

O método mecanístico-empírico faz uso da análise de tensões e deformações em suas camadas através da Teoria de Sistema de Camadas Elásticas (TSCE). O início desta teoria deu-se em 1885, quando Boussinesq desenvolveu uma teoria de cálculo na qual foi assumida as seguintes hipóteses: um semiespaço, homogêneo, isotrópico e elástico linear, submetido a cargas verticais concentradas ou uniformemente distribuídas na superfície. Porém, de acordo com Medina (1997), por diversas vezes os valores calculados de acordo às expressões de Boussinesq eram muito discrepantes quando comparados às deflexões medidas no campo, principalmente quando se tinha um revestimento asfáltico mais espesso ou uma camada rígida na estrutura do pavimento.

A partir dessa teoria, Burmister desenvolveu, em 1945, soluções para sistemas compostos por duas camadas, conforme Figura 11. De acordo com Balbo (2007, p.303), as principais hipóteses adotadas por Burmister foram:

- Materiais: cada camada é homogênea, elástica, isotrópica, sendo a Lei de Hooke aplicável aos materiais que as constituem;
- Dimensões de camadas: a primeira camada tem espessura finita, sendo, porém, horizontalmente infinitas, e o subleito infinito em todas as direções;
- Condições de superfície: na superfície não existe tensões de cisalhamento, sendo livre de tensões normais fora do limite de aplicação da carga circular distribuída.

Tabela 16 – Sistema de duas camadas



Fonte: SILVA (2014)

Segundo Silva (2014, p.6), o resultado apresentado por Burmister mostra que “a razão entre os módulos das camadas é um fator importante na deformabilidade da estrutura”, o que mostra através de uma situação de duas camadas que, quanto maior for a razão entre o módulo da primeira e da segunda camada (E_1/E_2), menor é a deflexão no centro da área flexível do carregamento (w), pois menor é o fator de deflexão obtido no ábaco elaborado por Burmister.

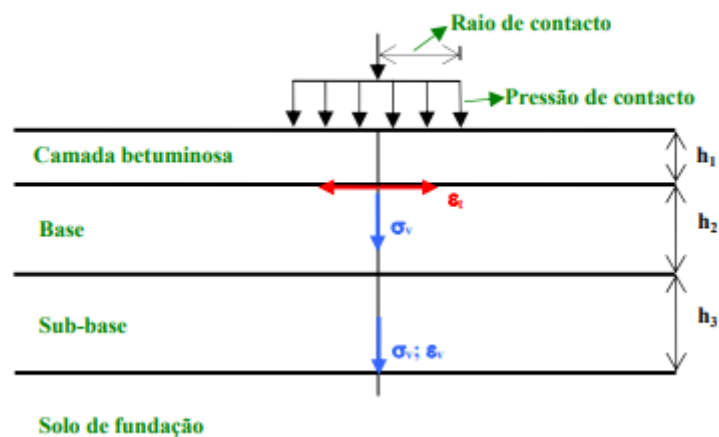
Burmister também desenvolveu a teoria do sistema de três camadas elásticas, numa análise aproximada de deflexões, na qual foi dita como uma extensão da aplicação da teoria de duas camadas. Neste, é visto que a espessura combinada de

revestimento asfáltico e base granular podem ser adotadas de modo a se recair no sistema de duas camadas.

De acordo com Franco (2009, p.485), os principais parâmetros avaliados na análise empírico-mecanicista estão representados na Figura 12:

1. deformação de tração (ϵ_t) na fibra inferior da camada betuminosa, para controle do fendilhamento por fadiga;
2. estado de tensão no topo da camada de base importante em estruturas com revestimentos delgados para se controlar a ruptura por cisalhamento;
3. tensão (σ_v) ou deformação vertical (ϵ_v) no topo do solo de fundação (subleito) para controle da deformação permanente.

Tabela 17 - Parâmetros avaliados na análise empírico-mecanicista



Fonte: FRANCO (2009)

Com o desenvolvimento de computadores com processadores mais potentes, foram criados programas para determinar os parâmetros de comportamento mecânico do material. Em geral, dois métodos de cálculo se destacam: Cálculo analítico com base na teoria de Burmister e cálculo através do Método dos Elementos Finitos (MEF). O primeiro as hipóteses são baseadas na teoria modelada por Burmister, em que se permite considerar múltiplos carregamentos, por meio do princípio da superposição, como é o caso do programa Medina. O segundo método permite distinguir o comportamento mecânico de diferentes camadas a fim de avaliar o estado de tensão ponto a ponto. Isso permite que sejam feitas análises mais complexas que aproximam o modelo das condições reais de campo (PINTANGUI, 2019; BIEDACHA, 2020).

Assim, a caracterização detalhada do comportamento tensão-deformação dos materiais afetados pelo tráfego é muito importante, o que torna o módulo de resiliência (MR) e coeficiente de Poisson (ν) dos materiais uma propriedade importante a ser determinada. Esses dados podem ser obtidos durante os testes de campo, mas a determinação laboratorial é preferível pela possibilidade de obter melhor controle dos resultados (BEZERRA NETO, 2004).

2.6.1 Módulo de resiliência (MR)

Medina e Motta (2015, p. 178) definem que “o termo resiliente significa energia armazenada num corpo deformado elasticamente, a qual é devolvida quando cessam as tensões”. Balbo (2007, p. 227) define o MR como “a capacidade de o material não resguardar deformações depois de cessada a ação da carga”. Dessa forma, pode-se concluir que o módulo de resiliência é a relação entre a carga aplicada periodicamente, e a deformação recuperável do material do pavimento, o que torna um parâmetro que caracteriza o comportamento elástico dos materiais devido às ações das cargas dos veículos diretamente sobre a via. Portanto, conclui-se que trata de uma importante informação utilizada em metodologias mecanísticas-empíricas para projeto de pavimentos asfálticos (MEDINA e MOTTA, 2015).

O módulo de resiliência utiliza a norma “DNIT 134/2018-ME: Pavimentação – Solos – Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio” para estabelecer os procedimentos necessários para obtenção dos dados. Segundo a norma, é definido como a relação entre a tensão-desvio (σ_d) e a sua correspondente deformação recuperável (ε_r), através do ensaio triaxial cíclico, conforme Equação 8.

$$MR = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_r} \quad (8)$$

Na qual,

MR: Módulo de Resiliência;

σ_d : Tensão desvio;

ε_r : Deformação resiliente.

O DNIT também possui outra norma com procedimentos para determinação do módulo de resiliência específica para misturas asfálticas, “DNER135/2018 – ME: Pavimentação asfáltica - Misturas asfálticas Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio”, na qual a obtenção dos dados se dá a partir do ensaio por compressão diametral de carga repetida. O módulo de resiliência dos materiais é

importante para determinação de afundamento da trilha de roda e da área trincada, e, consequentemente, avaliação da fadiga dos pavimentos (MEDINA e MOTA, 2015).

2.6.2 Coeficiente de Poisson (ν)

O coeficiente de Poisson é o parâmetro que determina o quanto o material se deforma no sentido horizontal em relação à deformação no sentido do carregamento. A realização de ensaios para determinação desses coeficientes não é usual, porém seu conhecimento é necessário nas análises de sistema de camadas elásticas. Dessa forma, são apresentados os valores típicos do coeficiente de Poisson para alguns materiais, conforme descrito na Tabela 6.

Tabela 18 – Valores típicos de coeficiente de Poisson	
Material	Faixa de variação
Concreto asfáltico	0,32-0,38
Concreto de cimento Portland	0,15-0,20
BGS, MH, BC	0,35-0,40
CCR, BGTC	0,15-0,20
SC, SMC	0,20-0,30
SCA	0,25-0,30
Solos arenosos	0,30-0,35
Areias compactadas	0,35-0,40
Solos finos	0,40-0,45
Fonte: Adaptado de BALBO (2007)	

2.6.3 Fadiga

A fadiga está relacionada a situações em que os materiais sofrem sucessivas solicitações em níveis de tensão inferiores à de ruptura, porém, com a recorrência da aplicação sofrem alterações em sua estrutura interna. Isso gera uma perda de características estruturais originais destes materiais na qual começa um processo de micro fissuração progressiva que ocasiona o desenvolvimento de fraturas e, consequentemente, rompimento deste material (BALBO, 2007).

A resistência à fadiga de uma mistura asfáltica pode ser definida como a capacidade desta de suportar, sem ruptura, as solicitações repetidas de tráfego. Quando este fato não ocorre, o trincamento por fadiga inicia-se na parte inferior do revestimento e se propaga para cima até atingir a superfície. Em revestimento

asfáltico muito espesso, com 20 cm ou mais, o trincamento pode iniciar na superfície devido a curvatura convexa próximas às rodas (MEDINA e MOTA, 2015).

A fadiga ocorre por meio de ações mecânicas e/ou térmicas que não parecem críticas por si, se comparadas à resistência sob carregamento monotônico, mas na verdade são decisivas para a vida útil do material. A fadiga de misturas asfálticas é considerada um fator importante para o bom dimensionamento de estruturas de pavimentos e, portanto, seu comportamento deve ser conhecido e corretamente caracterizado. Além dos materiais asfálticos, a fadiga também ocorre em camadas de materiais estabilizados quimicamente, como britas graduadas tratadas com cimento ou misturas de solo-cimento (FRANCO, 2007; BERNUCCI *et al.*, 2008).

De acordo com Balbo (2007, p.261), pode ser consideradas três causas principais para o processo de fadiga:

1. O fenômeno de fadiga pode ocorrer por vazios iniciais em misturas, ou mesmo pela presença de fissuras iniciais nos materiais.
2. A deformação plástica excessiva, prematura ou de longo prazo, na estrutura do material, seja composta por ligantes dúcteis, seja por frágeis cristais de silicatos de cálcio hidratado, na qual gera as primeiras fissuras nos materiais. Nesse caso, quanto mais frágil for uma mistura já em sua natureza heterogênea, e quanto mais vazios apresentar em sua matriz, maior será a suscetibilidade à fissuração.
3. Ocorrências de zonas de concentração de tensões na superfície (como ranhuras e sulcos) constituem fator prejudicial para o comportamento à fadiga dos materiais quando sujeitos a esforços de tração naquela zona. Nestas, ocorre concentração de tensões que podem provocar as primeiras fissuras, em um processo que tende à progressão.

As leis de fadiga são aplicadas através de ensaios realizados em laboratório com cargas repetidas que são conduzidas a diversos níveis de tensão ou de deformação, na qual visa reproduzir em campo as condições das misturas betuminosas nas camadas do pavimento. Apesar da grande ocorrência de danos por fadiga, ainda é difícil reproduzir em laboratório as tensões que ocorrem sob a influência do tráfego na via. A vida de fadiga pode ser definida em termos de vida de fratura (N_f), que se refere ao número total de aplicações de uma determinada carga necessária para a falha completa do corpo de prova, ou tempo de vida (NS), que está

associado ao número total de aplicações dessa mesma carga que reduz o desempenho ou a rigidez inicial da amostra a um nível predefinido (FONTES, 2009).

2.6.4 Deformação permanente

A deformação plástica ou deformação permanente é um tipo de deformação que ocorre em um material, devido à ação da carga e não pode ser recuperado depois de removido. A deformação permanente é referente a todas as deflexões que o pavimento sofreu durante sua vida de útil. Dessas deflexões, parte foi do comportamento resiliente (elástico) e outro de natureza plástica, ou seja, permanente. Por isso, muitas das vezes é usado o termo deformação plástica para se referir à deformação permanente no pavimento (BALBO, 2007; BEZERRA NETO, 2004).

A deformação permanente ainda pode ser avaliada indiretamente através das tensões verticais e deformações elásticas resultantes da aplicação de cargas que ocorrem no topo do subleito. Isso ocorre porque a deformação da camada desenhada acima do subleito é insignificante em comparação com a deformação do próprio subleito. O ensaio mais comumente utilizado para determinar essa tensão é o teste de compressão uniaxial, compressão triaxial e teste de simulação de tráfego (COUTINHO, 2011).

Existem vários modelos de previsão de deformação permanente, tanto da tensão vertical quanto da deformação plástica admissível no topo do subleito (FRANCO, 2007). Motta (1991) propõem que as deformações referentes a trilha de roda podem ser contribuídas de todos os materiais que fazem parte da estrutura do pavimento, assim sugeriu que a deformação permanente possa ser calculada pela Expressão 9 descrita.

$$\delta_{total}^p = \sum_{i=1}^n \varepsilon_{pi} \cdot h_i \quad (9)$$

Na qual,

δ_{total}^p = profundidade total do afundamento de trilha de roda sob o carregamento;

ε_{pi} = deformação plástica da subcamada i, calculada através de modelos calibrados a partir de resultado em laboratórios;

h_i = espessura das subcamadas i;

n = número total de subcamadas, o que inclui o subleito.

Outro método bastante utilizado, considera o limite de deformação do afundamento de trilha de roda através da adoção de modelos de deterioração vertical no topo do subleito, ou no conjunto das camadas da estrutura do pavimento asfáltico, que podem ser representadas através das Equações 10 e 11 (FRANCO, 2007):

$$\varepsilon_v = A \cdot N^B \quad (10)$$

$$n = k_1 \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon_v}\right)^{k_2} \quad (11)$$

Na qual,

ε_v = deformação vertical limite no topo do subleito;

A, B = parâmetros experimentais obtidos em ensaios de laboratório (para Equação 10);

k_1 e k_2 = parâmetros experimentais obtidos em ensaios de laboratório (para Equação 11);

n = número admissível de aplicações de carga no laboratório.

2.6.5 Método de dimensionamento nacional de pavimentos (Medina)

O Método de Dimensionamento Nacional (Medina) foi desenvolvido a partir dos estudos de Filipe Franco, do Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR), do Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, da Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE), do Centro de Pesquisas da Petrobrás (CENPES) e de diversas outras universidades do país. O software de dimensionamento de pavimentos permite a determinação das espessuras das camadas de um pavimento e reúne informações sobre o tráfego e os materiais que serão utilizados (QUADROS, 2018).

O Medina realiza a verificação de estruturas de pavimentos asfálticos e opera o dimensionamento mecanístico-empírico delas, na qual realiza análises do sistema por meio do processamento dos cálculos matemáticos que são efetuados a partir da entrada de dados no software. O Medina pode ser utilizado para projetos de reforço de pavimento e para o desenvolvimento de projetos novos. A versão inicial foi publicada em 9 de outubro de 2018 e, desde então, recebeu algumas atualizações

com correções. Foi utilizada nesta pesquisa a versão 1.1.5, publicada em 22 de dezembro de 2020 (DNIT, 2020; PORTO, 2021).

Segundo o Manual de Ajuda do Programa Medina versão 1.1.5 (2020), são consideradas algumas hipóteses que seguem a mesma consideração das soluções de problemas de elasticidade linear de sistemas de múltiplas camadas e contínuas:

- a) os materiais são elásticos lineares, isotrópicos e homogêneos (a modelagem elástica não linear é feita por iterações elásticas lineares);
- b) a lei de Hooke é válida e o módulo de compressão é semelhante ao módulo de tração;
- c) as camadas são ilimitadas na direção horizontal;
- d) todas as camadas possuem uma espessura finita, à exceção da camada inferior que é considerada semi-infinita;
- e) a superfície da camada superior não está sujeita a tensões fora da área carregada;
- f) na área carregada ocorrem apenas tensões normais;
- g) a carga aplicada é considerada estática, uniformemente distribuída em toda a área circular de contato;
- h) a grandes profundidades as tensões e deformações são nulas;
- i) as condições de aderência na interface das camadas podem variar de totalmente aderida para lisa ou sem aderência.

Assim como no método do DNER, o dimensionamento pelo Medina necessita de uma ampla coleta de dados para que os resultados obtidos sejam confiáveis. Estas informações passam desde o subleito, como seu módulo e deformação permanente, nas quais são obtidos através de ensaios em laboratório, até a caracterização de todos os materiais disponíveis para utilização nas camadas de base, sub-base e reforço. Em relação aos materiais produzidos em usinas, como misturas asfáltica, o programa pré-estabelece parâmetros mínimos no qual, posteriormente, é definido pelo projetista. O programa também utiliza o Número N como parâmetro para o dimensionamento, na qual possui grande sensibilidade à pequenas variações, o que torna de grande importância uma estimativa adequada para o correto dimensionamento através do software (DNIT, 2020).

No novo método, os cálculos de tensões, deformações e deslocamentos da estrutura devem ser feitos por meio do software Medina, que utiliza como dados de entrada as dimensões das camadas, as propriedades mecânicas dos materiais

(módulo de resiliência e coeficiente de Poisson), a composição das camadas e as cargas geradas pela passagem dos veículos. Após calcular as tensões, deformações e deslocamentos, o software verifica se o número de aplicações de cargas causará trincas excessivas na camada asfáltica ou nas camadas de concreto ou afundamento na trilha de roda que ultrapasse o limite especificado (KNABBEN E CARPIO, 2020).

Após o lançamento dos dados de estrutura e tráfego, é possível realizar dois tipos de análise: uma análise pura de como a estrutura se comporta com base nos dados lançados, ou o dimensionamento do pavimento de fato. No primeiro caso, o programa realiza os cálculos e verifica os critérios de área trincada e/ou deformação permanente, sem alterar a espessura da camada marcada, na qual apresenta um resumo a ser avaliado pelo projetista. Já no segundo caso, com a camada que se deseja dimensionar marcada, o programa fornece qual a espessura da camada necessária para o projeto.

As unidades padrão utilizadas no programa, segundo o Manual de Ajuda (2020), estão descritas na Tabela 7.

Tabela 19 – Unidades programa Medina	
Grandeza	Unidade
Espessura e distância	cm
Raio de carregamento	cm
Deslocamentos	μm
Deflexões (viga benkelman ou FWD)	0,01mm
Deformações específicas	m/m
Area de contato	cm^2
Pressão de inflação ou tensões	MPa
Carga de eixo ou de roda	ton
Massa especifica aparente seca	g/cm^3
Fonte: Adaptado de MEDINA (2020)	

Como citado, a determinação das propriedades dos materiais e a caracterização do comportamento de tensão-deformação nas camadas de pavimentos possuem grande complexidade. Dessa forma, será explicado como o programa Medina leva em consideração as características do módulo de resiliência, a

fadiga e a deformação permanente dentro dos materiais disponíveis para as camadas. Todas as informações contidas foram retiradas do Manual da Ajuda Programa Medina (2022).

2.6.5.1 Materiais asfálticos

Para os materiais asfálticos, o módulo de resiliência é considerado como elástico linear e seu ensaio segue a norma “DNIT – 135/2018 – ME: Pavimentação asfáltica – Mistura asfálticas – Determinação do modulo de resiliência”. No banco de dados do programa, existem misturas asfálticas já ensaiadas e utilizadas em campo, nas quais são separadas por classes de fadiga para orientar quando não se tem informações necessárias sobre o projeto e execução da mistura.

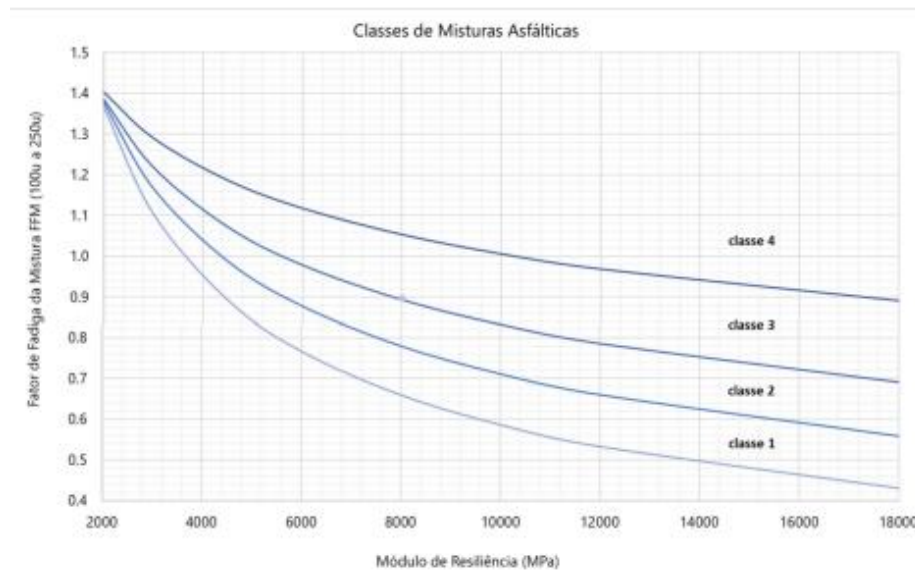
A classe de fadiga é determinada através de dois parâmetros: Fator de Fadiga da Mistura (FFM) e módulo de resiliência. O fator de fadiga é definido como a área da curva de fadiga da mistura entre a deformação de tração de 100μ e 250μ . A curva é obtida através do ensaio de fadiga por compressão diametral à tensão controlada, na qual segue a norma “DNIT – 1833/2018 – ME”. O valor é calculado através das Equações 12, 13 e 14.

$$FFM = 0,2 \cdot [\log(N_{100}) + \log(N_{250})] \quad (12)$$

$$N_{100} = k_1 \cdot 100\mu^{k_2} \quad (13)$$

$$N_{250} = k_1 \cdot 250\mu^{k_2} \quad (14)$$

Com o valor de FM e o módulo de resiliência, é possível utilizar o gráfico e enquadrar a mistura asfáltica em uma das classes (Figura 13). O gráfico foi construído com base nas misturas ensaiadas no laboratório da COPPE e outras publicações em teses. O programa Medina calcula automaticamente os valores e as classes apenas com a inserção dos parâmetros nas propriedades do material.

Tabela 20 – Classes de mistura asfálticas

Fonte: MEDINA (2020)

2.6.5.2 Materiais granulares, finos, siltosos e argilosos

Para as camadas de materiais granulares, os principais parâmetros são o módulo de resiliência, coeficiente de Poisson e deformação permanente. A determinação do módulo de resiliência é obtida por meio do ensaio descrito na norma “DNIT 134/2018 – ME - Pavimentação – Solos - Determinação do módulo de resiliência - Método de ensaio”.

De acordo com o Manual de Ajuda programa Medina (2020), o software utiliza o modelo elaborado por Guimarães (2009) para a deformação permanente de camadas constituídas por materiais granulares, solos finos, siltosos e argilosos. O ensaio característico é definido através da norma “DNIT 179/2018-IE - Pavimentação – Solos – Determinação da deformação permanente – Instrução de ensaio”. De acordo com a norma, a expressão representativa do modelo, descrita na Equação 15, “foi obtida após a análise dos resultados de ensaios de deformação permanente feitos em equipamentos triaxiais de cargas repetidas, com vários níveis de tensão, em solos brasileiros” (DNIT, 2018, p.8).

$$\varepsilon_p(\%) = \psi_1 \cdot \left(\frac{\sigma_3}{\rho_0}\right)^{\psi_2} \cdot \left(\frac{\sigma_d}{\rho_0}\right)^{\psi_3} \cdot N^{\psi_4} \quad (15)$$

Na qual,

$\varepsilon_p(\%)$ = deformação permanente específica;

$\psi_1, \psi_2, \psi_3, \psi_4$ = parâmetros de regressão;

σ_3 = tensão confinante;

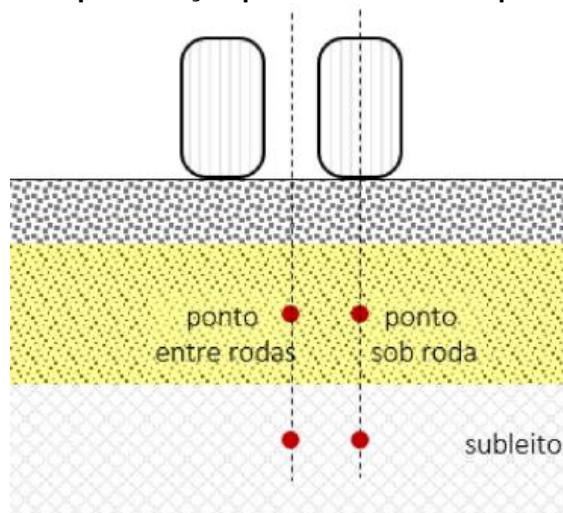
σ_d = tensão desvio;

ρ_0 = tensão de referência (tensão atmosférica);

N = Número de ciclos de aplicação da carga.

O programa Medina, para o cálculo da deformação permanente, utiliza o estado de tensão calculado nos pontos sob roda e entre rodas, conforme Figura 14. Além disso, determina um limite de 5% da espessura, na qual emite um alerta quando a deformação ultrapassa este valor.

Tabela 21 – Representação ponto entre rodas e ponto sob roda



Fonte: DNIT (2020)

2.6.5.3 Subleito

O programa trata o subleito de forma semelhante aos materiais granulares, na qual é possível determinar seus principais parâmetros da mesma forma citada no item 2.5.5.2. Os subleitos não são avaliados no programa em relação ao dano por fadiga e tensão limite no topo.

3 METODOLOGIA

De acordo com os objetivos propostos, a metodologia foi desenvolvida, de modo que, os dados levantados foram significativos para as análises finais do trabalho de conclusão de curso. O desenvolvimento baseou-se na realização da comparação entre os resultados dos dimensionamentos obtidos através do método DNER e, com os mesmos dados, a realização da análise por meio do software Medina. Dessa forma, a metodologia adotada foi as etapas de inserção de dados dentro do programa. A versão utilizada neste trabalho foi a última atualização (versão 1.1.5).

O software utilizado possui duas versões: para projeto de um novo pavimento, chamado de Medina, e para projeto de reforço, denominado BlackMedina. Neste trabalho foi realizado o dimensionamento de um novo pavimento, na qual a tela inicial do programa está representada na Figura 15.

Tabela 22 – Tela inicial software Medina

MeDiNa - v.1.1.5.0 - dezembro/2020

Projeto Editar Análise Ajuda

ESTRUTURA MODELAGEM RESULTADOS

RESPONSÁVEL: Nome do autor ou dos autores do projeto EMPRESA: Nome da empresa projetista

PROJETO: Identificação da via, rodovia, trecho, km, estaca, etc. MODO: Pavimento Novo (Nível A)

Alterar Estrutura >>

CAMADA	DESCRIÇÃO DO MATERIAL	TIPO	ESPESSURA (cm)	MÓDULO (MPa)	COEFICIENTE DE POISSON
>> 1 <<	CONCRETO ASFÁLTICO	RJ CAP 30/45 #12,5mm Sepetiba	10,0	9000	0,30
2	MATERIAL GRANULAR	Brita Graduada - Gnaisse C5	20,0	381	0,35
3	SOLO FINO, SILTOSO OU ARGILOSO	Solo Argiloso LG(1)	20,0	250	0,45
SL	SUBLEITO	Solo Siltoso NS	0,0	189	0,45

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

Projeto novo NÍVEL <A>

Fonte: Autoria própria (2022)

Na tela inicial, é possível observar três abas: estrutura, modelagem e resultados, na qual a abertura sempre se dá na aba estrutura. Essa aba foi informada os dados do projeto, constituída por quatro elementos: o primeiro no qual são inseridos

dados informativos sobre o projeto para sua identificação; o segundo está localizado a tabela de inserção de dados da estrutura do pavimento; o terceiro é a tabela relativa aos dados de tráfego e o último é a janela no qual o programa disponibiliza um resumo sobre resultados de análise e dimensionamento.

Na tabela de inserção de dados da estrutura do pavimento é visto uma estrutura padrão de quatro camadas ao iniciar o programa, conforme Figura 16. Essa estrutura pode ser modificada em “Alterar Estrutura”, na qual se limita a um mínimo de três camadas e máximo de oito, com o subleito.

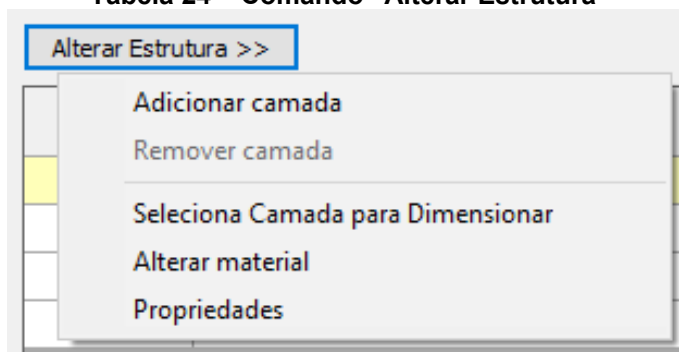
Tabela 23 – Tabela “Estrutura do pavimento”

Alterar Estrutura >>					
CAMADA	DESCRIÇÃO DO MATERIAL	TIPO	ESPESSURA (cm)	MÓDULO (MPa)	COEFICIENTE DE POISSON
>> 1 <<	CONCRETO ASFÁLTICO	RJ CAP 30/45 #12,5mm Sepetiba	10,0	9000	0,30
2	MATERIAL GRANULAR	Brita Graduada - Gnaiss C5	20,0	381	0,35
3	SOLO FINO, SILTOSO OU ARGILOSO	Solo Argiloso LG (1)	20,0	250	0,45
SL	SUBLEITO	Solo Siltoso NS'	0,0	189	0,45

Fonte: Autoria própria (2022)

Através do mesmo comando, foi possível determinar qual camada deseja dimensionar e modificar material e propriedade dessa, conforme ilustrado na Figura 17.

Tabela 24 – Comando “Alterar Estrutura”



Fonte: Autoria própria (2022)

Os materiais que compõem as camadas também podem ser modificados no comando “Propriedades” com a opção de utilizar tipos catalogados pelo programa, como também, com o cadastro de novos materiais, que necessitam de informações específicas como resistência, características físicas e deformação permanente (Figura 18).

Além disso, na mesma tabela, é o local onde será inserido os dados sobre o tráfego analisado. Nesta etapa, foi informado o tipo de via analisada ou dimensionada, conforme Tabela 8, dados nos quais o programa definiu o critério de parada do dimensionamento, assim como os graus de confiabilidade das análises realizadas. O programa tem a capacidade para calcular, de forma automática, o número N, na qual necessita que sejam informados os dados de volume médio diário (VMD) e o fator de veículo (FV). Porém, caso o projetista já tenha o valor anual do número N, também é possível digitá-lo.

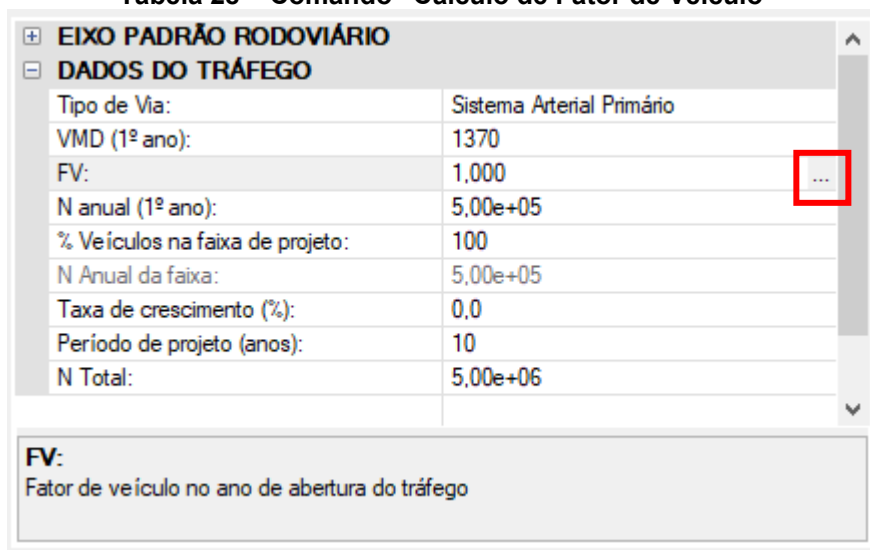
Tabela 27 – Tipos de via

Tipo de via	Confiabilidade	Área trincada	Deformação permanente
Sistema Arterial Principal	95%	30%	10mm
Sistema Arterial Primário	85%	30%	13mm
Sistema Arterial Secundário	75%	30%	20mm
Sistema Coletor Primário	85%	30%	13mm
Sistema Coletor Secundário	75%	30%	20mm
Sistema Local	65%	30%	20mm

Fonte: Adaptado de MEDINA (2020)

Para o valor do Fator de Veículo (FV), é necessário entrar no comando “Cálculo de Fator de Veículo” através dos três pontos que aparecem ao clicar em “FV” na mesma janela de inserção de dados de tráfego, conforme ilustrado em vermelho na Figura 20.

Tabela 28 – Comando “Cálculo de Fator de Veículo”



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

FV:
Fator de veículo no ano de abertura do tráfego

Fonte: Autoria própria (2022)

Através da janela “Cálculo de Fator de Veículo”, ilustrada na Figura 21, o programa dispõe de uma lista de imagens na qual é possível adicionar através de “Inserir>>” o eixo desejado, assim como pode ser feito sua retirada com o botão “<<Remover”. Com os eixos definidos, foi feita a inserção dos Fatores de Eixo (FE) para o primeiro ano e a carga obtida ou estimada. Conforme é lançado os dados, os valores de Fator de Carga (FC), Fator de Veículo individual (FV) e o Fator de Veículo Total, realizado através do método do DNIT.

Depois de todas as informações definidas e inseridas, é necessário escolher qual análise deseja realizar. Para uma análise pura de como a estrutura se comporta com o tráfego, basta ir ao menu “Análise” e na opção “Analisar Estrutura”. Esta, realiza os cálculos e verifica os critérios de área trincada e/ou deformação permanente, sem alterar a estrutura do pavimento e apresenta um resumo para um melhor entendimento sobre os materiais e a estrutura. Para realizar o dimensionamento, é necessário ir ao mesmo menu “Análise” e escolher a opção “Dimensionar” com a camada que deseja realizar selecionada.

Após a análise ou dimensionamento, o programa oferece relatórios para uma maior compreensão dos resultados obtidos. São quatro opções: o primeiro relatório é chamado de “Danos Mensais”, na qual apresenta os resultados do comportamento da área trincada e da deformação permanente total, o segundo relatório é chamado de “ATR”, na qual apresenta um resumo da deformação permanente da estrutura, o terceiro relatório é chamado de “Bacias de campos”, na qual apresenta as deflexões de bacias no topo de cada uma das camadas, e a última opção é o relatório

Tabela 30 – Projetos selecionados para redimensionamento no Medina

Número de projetos	Rodovia	Projeto	Extensão
1	PR-092	Projeto de engenharia para ampliação da capacidade e segurança	127,11 km
2	PR-160	Projeto de engenharia para implantação da rodovia Antônio Eduardo de Brita	28,36 km
3	BR-277	Implantação de duplicação	7,37 km
4	PR-280	Projeto de engenharia para ampliação da capacidade e segurança	190,06 km
5	PR-151 e PR-090	Ligação entre as rodovias PR-151 e PR-090	2,6 km

Fonte: Autoria própria (2023)

3.2 Compilação de informações

Como descrito no referencial teórico, um projeto de um novo pavimento consiste em outros diversos aspectos e subprojetos, como de drenagem, tráfego, pavimentação, entre outros. Dessa forma, foi necessário selecionar as informações demandadas pelo Medina e organizá-las de forma a facilitar o posterior dimensionamento. As informações coletadas se resumiram nos seguintes itens:

- a) Método de dimensionamento utilizado;
- b) Período de projeto;
- c) Camadas da estrutura e respectivas espessuras;

Após a coleta, os dados disponíveis foram compatibilizados em uma tabela para melhor visualização, como mostra os Quadros 1 a 5. Dessa forma, seguiu-se para a análise e dimensionamento no Medina.

Quadro 1 - Resumo de informações da PR-092

Rodovia	Informações Gerais	Método(s) utilizados(s)	Período de projeto (anos)
PR-092	Ampliação da capacidade e segurança da rodovia	Método DNER	5 anos
Camada	Espessura (cm)	Material indicado no projeto	
Revestimento	10	Revestimento CBUQ Faixa "C"	
Base	15	Reciclagem com incorporação de camada asfáltica e adição de cimento e brita	
Sub-base	15	Areia fina argilosa	
Subleito	-	Areia fina argilosa	

Fonte: Autoria própria (2023)

Quadro 2 - Resumo de informações da PR-160

Rodovia	Informações Gerais	Método(s) utilizados(s)	Período de projeto (anos)
PR-160	Implantação da rodovia Antônio Eduardo de Brita	Método DNER	10 anos
Camada	Espessura (cm)	Material indicado no projeto	
Revestimento	10	Asfalto modificado por polímero - faixa C	
Base	18	Brita graduada simples	
Sub-base	34	Macadame seco	
Subleito	-	Solo argiloso ou siltoso	

Fonte: Autoria própria (2023)

Quadro 3 - Resumo de informações da PR-280

Rodovia	Informações Gerais	Método(s) utilizados(s)	Período de projeto (anos)
PR-280	Projeto de engenharia para ampliação da capacidade e segurança	Método da Resiliência Simplificado	5 anos
Camada	Espessura	Material indicado no projeto	
Revestimento	10	Revestimento CAPFLEX SBS 60/85 Faixa "C"	
Base	15	Base de brita graduada tratada com cimento	
Sub-base	15	Sub-base de brita graduada simples	
Subleito	-	Subleito argilo-siltoso	

Fonte: Autoria própria (2023)

Quadro 4 - Resumo de informações da PR-277

Rodovia	Informações Gerais	Método(s) utilizados(s)	Período de projeto (anos)
BR-277	Implantação de duplicação	Método DNER	10 anos
Camada	Espessura	Material indicado no projeto	
Revestimento	5	CAUQ asfalto com CAP 50/70/com polímero	
Revestimento	5	BINDER asfalto com CAP 50/70	
Base	17	Brita graduada tratada com cimento	
Sub-base	15	Brita graduada simples	
Reforço subleito	20	Rachão	
Subleito	-	Latosolos roxos e terra roxa estruturada	

Fonte: Autoria própria (2023)**Quadro 5 - Resumo de informações da PR-151 E PR-090**

Rodovia	Informações Gerais	Método(s) utilizados(s)	Período de projeto (anos)
PR-151 E PR-090	Ligação entre as rodovias PR-151 e PR-090	Método DNER	10 anos
Camada	Espessura	Material indicado no projeto	
Revestimento	10	CBUQ Faixa "C"	
base	15	Brita Graduada Simples	
sub-base	18	Brita Graduada Tratada com Cimento	
subleito	-	Latossolo vermelho	

Fonte: Autoria própria (2023)

4 RESULTADO E DISCUSSÃO

Diante da metodologia e da inserção dos dados expostos no capítulo anterior, são apresentados neste capítulo os resultados obtidos a partir da análise e dimensionamento dos projetos selecionados. Além disso, são apresentados todos os dados adquiridos no decorrer do trabalho, e como chegou-se aos resultados esperados, baseado no que foi apresentado no referencial teórico.

4.1 Ajustes para análise e dimensionamento

O programa Medina necessita de algumas informações dos materiais constituintes das camadas para a realização da análise e dimensionamento, além da limitação da espessura das camadas e informações das curvas de fadiga e dos modelos de deformação permanente. Em virtude da limitação desses dados devido ao método de dimensionamento utilizado e a configuração do programa, foi necessário fazer adequações para uma melhor comparação dos resultados.

Em relação aos materiais, para sua compatibilização o principal ajuste foi o módulo de resiliência do material. Devido a não necessidade do conhecimento desse parâmetro, e como os projetos selecionados para essa análise são realizados pelo método DNER, a maioria dos projetistas não informam esse valor. Dessa forma, foi utilizado os valores médios retirados de Bernucci et al. (2011), conforme Figura 22.

Outro ponto trata das curvas de fadiga e dos modelos de deformação permanente que o Medina precisa para avaliar a falha da estrada. Na maioria dos casos, os projetos pesquisados não possuíam tais informações. A principal razão é que o método de dimensionamento utilizado não exigia tal modelo. Nesse sentido, optou-se por registrar apenas um novo material, o revestimento asfáltico com módulo de elasticidade de 4000 MPa, referente ao projeto de pavimento asfáltico de concreto asfáltico classe 2 e no qual utiliza a curva de fadiga do próprio programa. Isso indica que essa curva se ajusta bem às considerações normais de dano por fadiga no dimensionamento de pavimento asfáltico.

Tabela 31 - Módulos de Resiliência de referência

Tabela 51 - Módulos de Resiliência de Referência				
Características	Faixa (publicação)	MR (MPa)	RT (MPa)	MR/RT
Concreto asfáltico - CAP 30/45	Faixa C (Soares et al., 2000)	3628	1,09	3346
Concreto asfáltico - CAP 50/60		3033	0,89	3425
Concreto asfáltico - CAP 96/100		1488	0,44	3376
Concreto asfáltico - CAP 30/45	Faixa B (Soares et al., 2000)	5105	0,82	6201
Concreto asfáltico - CAP 50/60		4425	0,73	6062
Concreto asfáltico - CAP 85/100		1654	0,21	7755
Misturas densas (moldadas em usina)				
Concreto asfáltico 1	Faixa C (Rede Asfalto, 2005)	3609	1,26	2864
Concreto asfáltico 2		3026	1,23	2460
AAUQ1		1786	1,02	1751
AAUQ2		1682	0,81	2077
SMA – 12 mm	(Vasconcelos, 2004)	4747	0,98	4844
SMA - 9,5 mm		3367	0,82	4106
Concreto asfáltico de referência				
Com 0% fresado	Faixa C (Lima, 2003)	3200	1,2	2667
Com 10% fresado		4776	1,3	3674
Com 30% fresado		7524	1,3	5787
Com 50% fresado		8901	1,6	5663
Concreto asfáltico de referência	Faixa C (Pinheiro, 2004)	3647	0,7	3,76
Asfalto-borracha (úmido)		2393	0,5	4786
Agregado-borracha (seco)		2452	0,8	3,065

Fonte: Adaptado de BERNUCCI (2006)

4.2 Análise do Medina

Com as informações expostas nos Quadros de 1 a 5, descritas no capítulo anterior, e as adequações citadas, foi inserido todas as informações necessárias para uma análise do pavimento dos projetos selecionados. Para isso melhor compreensão, será realizado uma tabela sobre os materiais das camadas e os dados de tráfego de cada pavimento, assim como uma descrição da análise que o programa oferece.

4.2.1 Resultado da análise PR-092

De acordo com os materiais das camadas descritos no Quadro 1 e todas as considerações de adequações que foram descritas no item 4.1, nessa rodovia foi necessário a inserção de um novo material para constituir a camada da base do pavimento. Todos os parâmetros para inserção foram retirados no memorial descrito do dimensionamento dessa rodovia. Para uma melhor compreensão, a Tabela 10 mostra todos os materiais que foram selecionados no programa. Em relação aos dados do tráfego, foi possível obter todas as informações necessários no projeto, como mostra o Quadro 6.

Tabela 32 – Materiais inseridos no programa Medina PR-092

Material indicado no projeto	Espessura (cm)	Camada selecionada no Medina	Material selecionado no Medina
Revestimento CBUQ Faixa “C” - CAP 50/70	10	Concreto asfáltico	RJ CAP 50/70 #12,5mm Sepetiba
Reciclagem com incorporação de camada asfáltica e adição de cimento e brita	15	Brita Graduada Tratada com Cimento (BGTC)	Reciclagem com incorporação de camada asfáltica e adição de cimento e brita
Areia fina argilosa	15	Solo fino, siltoso ou argiloso	Solo areno-siltoso LG(2)
Areia fina argilosa	-	Subleito	Solo areno-siltoso

Fonte: Autoria própria (2023)

Quadro 6 – Dados de tráfego da rodovia PR-092

VDM (volume diário médio)	466
Taxa de crescimento (%)	3,1
Período de projeto (anos)	5
N anual (1º ano)	2,64E+0,6

Fonte: Autoria própria (2023)

Para a PR-092, o resultado calculado pelo programa Medina indicou uma porcentagem de área trincada do pavimento no fim do período de 10 anos de 27,1%, ou seja, dentro dos critérios exigidos pelo programa, pois antes do fim do período não alcançou os 30% de área trincada. No caso do afundamento de trilha de roda, o critério

também foi atendido, pois programa retornou 6,5mm, um valor menor em relação ao limite máximo (Figura 23).

Tabela 33 - Resultados da análise na PR-092

--- ANÁLISE DO PAVIMENTO NOVO --- Seção do pavimento analisada considerando os dados inseridos pelo Engenheiro Projetista no programa MeDiNa. Nível de confiabilidade da análise: 85% Área Trincada Estimada do pavimento no fim do período: 27,1% >>Atenção: o programa não calcula a Área Trincada proveniente da reflexão de trincas da base estabilizada. Afundamento de Trilha de Roda: 6,5mm
--

Fonte: Autoria própria (2023)

4.2.2 Resultado da análise PR-160

Em relação aos materiais descritos no Quadro 2, foi possível selecionar matérias já disponíveis no banco de dados do programa, conforme Tabela 11. Os dados do tráfego foram encontrados no relatório do projeto, na qual foi possível a realização do Quadro 7 com todas as informações necessária para avaliação do dimensionamento do pavimento no programa.

Tabela 34 – Materiais inseridos no programa Medina PR-160

Material indicado no projeto	Espessura (cm)	Camada selecionada no Medina	Material selecionado no Medina
Asfalto modificado por polímero - faixa C	10	Concreto asfáltico	RJ CAPFLEX 65/90 SBS PG 70-22
Brita graduada simples	15	Material granular	Brita Graduada - Gnaisse C4
Macadame seco	15	Material granular	Brita Graduada - Gnaisse C1
Solo argiloso ou siltoso	-	Subleito	Solo siltoso NS'

Fonte: Autoria própria (2023)

Quadro 7 – Dados de tráfego da rodovia PR-160

VDM (volume diário médio)	565
Taxa de crescimento (%)	4,4
Período de projeto (anos)	10
N anual (1º ano)	4,64E+0,5

Fonte: Autoria própria (2023)

Para rodovia PR-160, os resultados da análise mostraram que a estrutura proposta para o tráfego foi suficiente. O pavimento atingiu apenas 23,8% de área trincada, não ultrapassando o limite de 30%. Em relação ao afundamento de trilha de roda, o dano calculado foi 5,8, menor que o limite exigido pelo programa.

Tabela 35 - Resultados da análise na PR-160

--- ANÁLISE DO PAVIMENTO NOVO --- Seção do pavimento analisada considerando os dados inseridos pelo Engenheiro Projetista no programa MeDiNa. Nível de confiabilidade da análise: 85% Área Trincada Estimada do pavimento no fim do período: 23,8% Afundamento de Trilha de Roda: 5,8mm
--

Fonte: Autoria própria (2023)

4.2.3 Resultado da análise PR-280

Assim como a rodovia analisada anteriormente, os materiais das camadas do pavimento selecionado no programa foram os disponíveis no banco de dado do programa (Tabela 12). Os dados do tráfego inseridos no programa foram retidos do relatório do projeto, conforme Quadro 8.

Tabela 36 – Materiais inseridos no programa Medina PR-280

Material indicado no projeto	Espessura (cm)	Camada selecionada no Medina	Material selecionado no Medina
Revestimento CAPFLEX SBS 60/85 Faixa “C”	10	Concreto asfáltico	RJ CAPFLEX 65/90 SBS PG 70-22
Brita graduada simples 4% cimento	15	Brita Graduada Tratada com Cimento (BGTC)	Brita Graduada - Gnaiss C4
Brita graduada simples Faixa I	15	Material granular	Brita Graduada - Gnaiss C1
Argilas siltosas amarela	-	Subleito	Solo fino NS'

Fonte: Autoria própria (2023)

Quadro 8 - Dados de tráfego da rodovia PR-280

VDM (volume diário médio)	1009
Taxa de crescimento (%)	3,4
Período de projeto (anos)	10
N anual (1º ano)	5,67E+06

Fonte: Autoria própria (2023)

Para a estrutura proposta, o tráfego foi considerado muito alto para a estrutura de pavimento proposta, resultando na ruptura do pavimento antes do fim da vida útil de projeto de 5 anos. Além disso, o programa gerou um alerta em relação ao módulo da camada estabilizada, que decaiu rapidamente em um período. Neste caso, no 45º mês a estrutura atingiu o limite de 30%. Além disso, também foi alcançado 99% de área trincada antes do fim do período. Já na análise do afundamento de trilha de roda, o resultado calculado foi de 6,0 mm, valor distante do critério estabelecido pelo Medina (Figura 25).

Tabela 37 - Resultados da análise na PR-280

--- ANÁLISE DO PAVIMENTO NOVO --- Seção do pavimento analisada considerando os dados inseridos pelo Engenheiro Projetista no programa MeDiNa. Nível de confiabilidade da análise: 85% Área Trincada Estimada do pavimento no fim do período: 99,0% >>Atenção: o programa não calcula a Área Trincada proveniente da reflexão de trincas da base estabilizada. Afundamento de Trilha de Roda: 6,0mm --- ALERTAS --- Tráfego elevado para a estrutura proposta. Módulo da camada estabilizada decaiu rapidamente em um período.
--

Fonte: Autoria própria (2023)

4.2.4 Resultado da análise PR-277

Conforme os materiais das camadas descritos no Quadro 4, nessa rodovia foi necessário atenção nos materiais selecionados para o dimensionamento. Para seleção, utilizou os parâmetros das camadas que fossem mais próximos dos parâmetros do material indicado no projeto. Para uma melhor compreensão, a Tabela 13 mostra a relação dos materiais selecionados e o Quadro 9, os dados de tráfego retirado do estudo feito para o dimensionamento do pavimento.

O resultado fornecido para a análise da PR 277 (Figura 26) não atendeu aos critérios exigidos pelo Medina, com uma porcentagem de área trincada calculada pelo software de 45,3%, enquanto o limite máximo é de 30%. Para afundamento de trilha de roda, o programa calculou um valor de 2,6mm, abaixo do limite máximo para esse tipo de via. De acordo aos resultados detalhados mostrados pelo programa, o pavimento ultrapassou o limite de 30% no 95º mês, próximo ao fim de sua vida útil. Além disso, o programa fez um alerta em relação ao elevado tráfego e a deflexão acima do limite 70 da camada de suporte do material estabilizado.

Tabela 38 – Materiais inseridos no programa Medina PR-277

Material indicado no projeto	Espessura (cm)	Camada selecionada no Medina	Material selecionado no Medina
CAUQ asfalto com CAP 50/70/com polímero	5	Concreto asfáltico modificado	RJ CAPFLEX 65/90 SBS PG 70-22
BINDER asfalto com CAP 50/70	5	Concreto asfáltico	RJ CAP 50/70 #19,1mm Sepatida
Brita tratada com cimento	15	Brita Graduada Tratada com Cimento (BGTC)	Balbo, 1993 c: 80kg/m³
Brita graduada simples	15	Material granular	Brita Graduada - Gnaisse C1
Rachão	15	Material granular	Brita Graduada - Gnaisse C4
Latossolos roxos e terra roxa estruturada	-	Subleito	Solo fino NS'

Fonte: Autoria própria (2023)

Quadro 9 - Dados de tráfego da rodovia PR-277

VDM (volume diário médio)	2151
Taxa de crescimento (%)	3
Período de projeto (anos)	10
N anual (1º ano)	2,18+E06

Fonte: Autoria própria (2023)

Tabela 39 - Resultados da análise na PR-277

--- ANÁLISE DO PAVIMENTO NOVO --- Seção do pavimento analisada considerando os dados inseridos pelo Engenheiro Projetista no programa MeDiNa. Nível de confiabilidade da análise: 85% Área Trincada Estimada do pavimento no fim do período: 45,3% >>Atenção: o programa não calcula a Área Trincada proveniente da reflexão de trincas da base estabilizada. Afundamento de Trilha de Roda: 2,6mm --- ALERTAS --- Tráfego elevado para a estrutura proposta. Deflexão acima do limite 70 (0,01mm) da camada de suporte do material estabilizado.
--

Fonte: Autoria própria (2023)

4.2.5 Resultado da análise PR-151 e PR-090

Para essa rodovia, os materiais selecionados para a avaliação do dimensionamento no programa foram disponíveis no banco de dado do programa (Tabela 14). Os dados do tráfego inseridos no programa foram retidos do relatório do projeto (Quadro 10).

Tabela 40 – Materiais inseridos no programa Medina PR-151 a PR-090

Material indicado no projeto	Espessura (cm)	Camada selecionada no Medina	Material selecionado no Medina
CBUQ Faixa “C”	5	Concreto asfáltico modificado	RJ CAPFLEX 65/90 SBS PG 70-22
Brita Graduada Simples	15	Material granular	Brita Graduada - Gnaiss C1
Brita Graduada Tratada com Cimento	15	Brita Graduada Tratada com Cimento (BGTC)	Balbo, 1993 c: 80kg/m³
Latossolo vermelho	-	Subleito	Solo fino NS'

Fonte: Autoria própria (2023)

Quadro 10 - Dados de tráfego da rodovia PR-151 a PR-090

VDM (volume diário médio)	2182
Taxa de crescimento (%)	3,5
Período de projeto (anos)	10
N anual (1º ano)	3,76+E06

Fonte: Autoria própria (2023)

Nesse projeto de ligação entre rodovia PR-151 e PR-090, os resultados obtidos da análise verificou que a estrutura proposta para o tráfego não foi suficiente. O pavimento atingiu 99% de área trincada, sendo que o limite de 30% ocorreu no 28º mês. Em relação ao afundamento de trilha de roda, o dano calculado foi 7,3mm, menor que o limite exigido pelo programa. Um alerta foi emitido no programa em relação ao elevado tráfego para estrutura proposta (Figura 27).

Tabela 41 - Resultados da análise na PR-151 a PR-090

--- ANÁLISE DO PAVIMENTO NOVO --- Seção do pavimento analisada considerando os dados inseridos pelo Engenheiro Projetista no programa MeDiNa. Nível de confiabilidade da análise: 85% Área Trincada Estimada do pavimento no fim do período: 99,0% >>Atenção: o programa não calcula a Área Trincada proveniente da reflexão de trincas da base estabilizada. Afundamento de Trilha de Roda: 7,3mm --- ALERTAS --- Tráfego elevado para a estrutura proposta.

Fonte: Autoria própria (2023)

4.3 Dimensionamento das camadas no programa Medina

Na Tabela 15 está resumida os resultados obtidos por meio do programa, nas quais indicam que quatro das cinco rodovias analisadas, tiveram o critério de parada do programa ultrapassado. Em relação a análise da deformação permanente, nenhum projeto ultrapassou o limite de 13mm dado pelo programa.

Tabela 42 – Resumo dos resultados obtidos nas análises

Número do projeto	Rodovia	Área Trincada estimada do pavimento no fim do período (%)	Afundamento de Trilha de Roda (mm)	Mês que alcançou o limite de 30%
1	PR-092	27,1	6,5	-
2	PR-160	23,8	5,2	-
3	PR-280	99	6,0	45
4	PR-277	45,3	2,6	95
5	PR-092	99	7,3	51

Fonte: Autoria própria (2023)

Para os projetos que não atenderam os critérios estabelecidos pelo programa, foi realizado o dimensionamento da camada de revestimento asfálticos. Como o programa limita a espessura das camadas a 15cm, ao realizar o dimensionamento, em alguns casos, a espessura necessária para um melhor dimensionamento é maior

que o valor máximo permitido. Dessa forma, é emitido um aviso para rever as estruturas pois a camada atingiu o valor máximo (Figura 28).

Tabela 43 – Aviso de impossibilidade de dimensionamento

MeDiNa - v.1.1.5.0 - dezembro/2020

Projeto Editar Análise Ajuda

RESPONSÁVEL: Julia Maria Maniezzi Hespanhol EMPRESA: UTFPR

PROJETO: PR-280 MODO: Pavimento Novo (Nível A)

Alterar Estrutura >>

CAMADA	DESCRIÇÃO DO MATERIAL	TIPO	ESPESSURA (cm)	MÓDULO (MPa)	COEFICIENTE DE POISSON
>> 1 <<	CONCRETO ASFÁLTICO MODIFICADO	RJ CAPFLEX 65/90 SBS PG 70-22	15,0	3184	0,30
2	BRITA GRADUADA TRATADA COM CIMENTO (BGTC)	Balbo, 1993 c: 80 kg/m³	15,0	Sigmoidal	0,25
3	MATERIAL GRANULAR	Brita Graduada - Gnaisse C4	15,0	311	0,35
SL	SUBLEITO			Resiliente Não Linear	0,45

MeDiNa

A espessura da camada selecionada atingiu o limite superior previsto! Reveja a estrutura.

OK

EIXO PADRÃO RODOVIÁRIO

DADOS DO TRÁFEGO

Tipo de Via:	Sistema Arterial Primário
VMD (1º ano):	1009
FV:	15,403
N anual (1º ano):	5,67e+06
% Veículos na faixa de projeto:	100
N Anual da faixa:	5,67e+06
Taxa de crescimento (%):	3,4
Período de projeto (anos):	10
N Total:	6,62e+07

C:\Users\juhes\OneDrive\Área de Trabalho\280.pvt NÍVEL <A>

Fonte: Autoria própria (2023)

Apesar dos limites de espessura especificados no programa, alguns ajustes foram feitos para obter os melhores resultados possíveis no dimensionamento. Para os projetos com apenas uma camada de revestimento asfáltico que o Medina não conseguiu medir, optou-se por dividi-lo em duas camadas e manter o material em ambas as camadas, o que permitiu ao programa aumentar as dimensões.

Para a rodovia PR-280, foi necessário realizar a duplicação das camadas de revestimento asfáltico em que se manteve a espessura total de 10cm. Dessa forma, foi possível realizar o dimensionamento da camada na qual o programa chegou à espessura de 16,7cm para o revestimento asfáltico (Figura 29). Com o dimensionamento, o programa gera automaticamente uma nova análise na qual informa a área trincada para o fim de projeto de 28,9% e o afundamento de trilha e roda de 3,5mm.

Tabela 44 – Estrutura dimensionada PR-280

CAMADA	DESCRIÇÃO DO MATERIAL	TIPO	ESPESSURA (cm)	MÓDULO (MPa)	COEFICIENTE DE POISSON
>> 1 <<	CONCRETO ASFÁLTICO MODIFICADO	RJ CAPFLEX 65/90 SBS PG 70-22	11,7	3184	0,30
2	CONCRETO ASFÁLTICO MODIFICADO	RJ CAPFLEX 65/90 SBS PG 70-22	5,0	3184	0,30
3	BRITA GRADUADA TRATADA COM CIMENTO (BGTC)	Balbo, 1993 c: 80 kg/m³	15,0	Sigmoidal	0,25
4	MATERIAL GRANULAR	Brita Graduada - Gnaisse C4	15,0	311	0,35
SL	SUBLEITO	Solo Fino NA	0,0	Resiliente Não Linear	0,45

Fonte: Autoria própria (2023)

Em relação ao projeto da rodovia PR-277, não foi necessário o acréscimo de camada, visto que o projeto possui duas camadas de revestimento asfáltico. Dessa forma, com o dimensionamento da camada superior, programa calculou um acréscimo de 2,2cm na espessura (Figura 30). Com isso, os resultados de área trincada estimada para o fim de projeto foram de 28,8% e o afundamento de trilha de 2,4mm, não ultrapassando o critério de parada do programa.

Tabela 45 - Estrutura dimensionada PR-277

CAMADA	DESCRIÇÃO DO MATERIAL	TIPO	ESPESSURA (cm)	MÓDULO (MPa)	COEFICIENTE DE POISSON
>> 1 <<	CONCRETO ASFÁLTICO MODIFICADO	RJ CAPFLEX 65/90 SBS PG 70-22	7,2	3184	0,30
2	CONCRETO ASFÁLTICO	RJ CAP 50/70 #19,1mm Sepetiba	10,0	9588	0,30
3	BRITA GRADUADA TRATADA COM CIMENTO (BGTC)	Balbo, 1993 c: 80 kg/m³	15,0	Sigmoidal	0,25
4	MATERIAL GRANULAR	Brita Graduada - Gnaisse C4	15,0	311	0,35
5	MATERIAL GRANULAR	Brita Graduada - Gnaisse C1	20,0	259	0,35
SL	SUBLEITO	Solo Siltsoso NS'	0,0	189	0,45

Fonte: Autoria própria (2023)

Para o projeto de ligação das rodovias PR-151 a PR-090, não foi necessário a duplicação de camadas. O programa realizou o dimensionamento do revestimento asfáltico na qual chegou a um acréscimo de 7,1cm da dimensão projetada com o Método DNER (Figura 31). Dessa forma, a estrutura atendeu ao critério de parada do programa com os resultados de área trincada estimada para o fim de projeto foram de 28,4% e o afundamento de trilha de 2,3mm.

Tabela 46 - Estrutura dimensionada PR-151 a PR-090

CAMADA	DESCRIÇÃO DO MATERIAL	TIPO	ESPESSURA (cm)	MÓDULO (MPa)	COEFICIENTE DE POISSON
>> 1 <<	CONCRETO ASFÁLTICO	RJ CAP 30/45 #12,5mm Sepetiba	12,1	9000	0,30
2	CONCRETO ASFÁLTICO	RJ CAP 30/45 #12,5mm Sepetiba	5	9000	0,30
3	MATERIAL GRANULAR	Brita Graduada - Gnaisse C4	15,0	311	0,35
4	BRITA GRADUADA TRATADA COM CIMENTO (BGTC)	Balbo, 1993 c: 80 kg/m³	18,0	Sigmoidal	0,25
SL	SUBLEITO	Solo Fino NA	0,0	Resiliente Não Linear	0,45

Fonte: Autoria própria (2023)

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho visou estabelecer uma comparação do método de dimensionamento vigente do DNIT (DNER) com o novo Método de Dimensionamento Nacional de Pavimentos (Medina) que realiza verificações mecanístico-empíricas. Nas metodologias de dimensionamento do método do DNER, as considerações em relação ao desempenho do pavimento em relação a fadiga eram simplificadas, além de não preverem modelos para danos durante a vida útil do pavimento. O método de dimensionamento do Medina, ao apresentar modelos de curva de fadiga e de deformação permanente para materiais, consegue uma melhor avaliação de desempenho das estruturas de pavimentos asfálticos.

Com os resultados obtidos conforme, conforme Quadro 11, foi possível observar a diferença nas análises obtidas pelos projetos, na qual apenas as rodovias em verde passaram no critério de parada e não houve a necessidade de um novo dimensionamento. Tais resultados indicam um dano de fadiga, dado pela porcentagem de área trincada estimada para o fim do período de projeto na qual indicou em alguns casos a ruptura total do pavimento antes do fim do período. Já quanto à deformação permanente, dado pelo cálculo do afundamento de trilha de roda nas quais tiveram valores consideravelmente pequenos. Ainda no quadro ilustrado, é possível observar a nova espessura da camada de revestimento asfáltico no dimensionamento realizado.

Quadro 11 – Resultados do dimensionamento

Número do projeto	Rodovia	Espessura da camada asfáltica	Nova espessura da camada asfáltica dimensionada	Área Trincada estimada do pavimento no fim do período (%)	Afundamento de Trilha de Roda (mm)
1	PR-092	10	-	27,1	6,5
2	PR-160	10	-	23,8	5,2
3	PR-280	10	16,5	28,9	3,5
4	PR-277	15	17,2	28,8	2,4
5	PR-092	10	17,1	28,4	2,3

Fonte: Autoria própria (2023)

Contudo, conclui-se que, a incompatibilidade de certas informações, como os parâmetros dos materiais constituintes das camadas, o programa Medina, principalmente para tráfegos muito elevados, pode vir a apresentar resultados superdimensionados. No atual método os problemas de fadiga e área trincada não são avaliados e nem previstos durante a vida útil do projeto, o que é uma característica extremamente importante para o método mecanístico-empírico, visto que o Medina apresenta curvas de fadiga e de deformação permanente para diversos materiais e consegue fazer uma avaliação de desempenho mais assertiva e menos empírica. Além disso, pode-se concluir que a implantação do Medina exige uma mudança de comportamento significativa no dimensionamento de pavimentos, pois são necessárias informações completas a respeito dos materiais utilizados na estrutura, como curvas de fadiga e aos modelos de deformação permanente.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Para que sejam alcançados novos resultados, de forma a agregar ainda mais o meio acadêmico, sugere-se outros tópicos para dar continuidade a pesquisa apresentada, uma análise da determinação do número N por meio do próprio software do Medina, a utilização de ensaios mais completos dos materiais para as camadas dos pavimentos e uma análise do pavimento durante sua vida útil afim de validar os dados mostrados pelo programa, assim como o impacto financeiro dado pelo dimensionamento inadequado da estrutura do pavimento.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6459**: Solo - Determinação do limite de liquidez. ABNT, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7180**: Solo – Determinação do limite de plasticidade. ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7182**: Solo – Ensaio de compactação. ABNT, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 9895**: Solo – Índice de suporte Califórnia. ABNT, 1987.

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

BERNUCCI, L. M. G. *et al.* **Pavimentação asfáltica**: formação básica para engenheiros. 3. ed. Rio de Janeiro: Petrobras: Abeda, 2006.

BEZERRA NETO, R. S. **Análise comparativa de pavimentos dimensionados através dos métodos empírico do DNER e mecanístico e proposta de um catálogo simplificado de pavimentos para região de campo grande (MS)**. 2004. Dissertação (Mestre em Engenharia de Transporte), Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

BIEDACHA, M. M. **Dimensionamento de pavimento asfáltico pelo método DNER e comparativo com o atual método mecanístico-empírico Medina**. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Civil), Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2020.

CNT. Confederação Nacional do Transporte. **Pesquisa CNT de Rodovias 2017**: Relatório Gerencial. [Brasília]: [CNT], 2017. Disponível em: <https://pesquisarodovias.cnt.org.br/conteudo>. Acesso em: 5 out. 2022.

CNT. Confederação Nacional do Transporte. **Pesquisa de rodovias 2022**: Relatório Gerencial. [Brasília]: [CNT], 2022. Disponível em: <https://pesquisarodovias.cnt.org.br/conteudo>. Acesso em: 14 nov. 2022.

COUTINHO, J. C. P. **Dimensionamento de pavimento asfáltico**: comparação do método do DNER com um método mecanístico-empírico aplicada a um trecho. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geotécnica) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2011.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER - ME 051/94**: Solos – Análise granulométrica. Brasília: DNIT, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER - ME 080:** Solos – Análise granulométrica por peneiramento. Brasília: DNIT, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER – ME 082/94:** Solos – Determinação do limite de plasticidade. Brasília: DNIT, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER - ME 122:** Solos – determinação do limite de liquidez – método de referência e método expedido. Brasília: DNIT, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 134 – ME:** Pavimentação – Solos – Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio. Brasília: DNIT, 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 135 – ME:** Pavimentação asfáltica - Misturas asfálticas Determinação do módulo de resiliência – 38 Método de ensaio. Brasília: DNIT, 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 162 – ME:** Solos – Ensaio de compactação utilizando amostras trabalhadas. Brasília: DNIT, 1984.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 164 – ME:** Solos – Compactação utilizando amostras não trabalhadas – Método de Ensaio. Brasília: DNIT, 2013.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 172 – ME:** Solos – Determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas – Método de ensaio. Brasília: DNIT, 2016.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 179 – ME:** Pavimentação – Solos – Determinação da deformação permanente – Instrução de ensaio. Brasília: DNIT, 2018.

DNIT. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **Manual de Pavimentação.** [Rio de Janeiro]: [DNIT], 2006. Disponível em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-manuais/publicacao-ipr-719-manual-de-pavimentacao>. Acesso em: 20 set. 2022.

DNIT. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **Manual de Ajuda Programa Medina.** [Rio de Janeiro]: [DNIT], 2020. Disponível em: https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/medina/manual_medina_1_1_5.pdf. Acesso em: 28 set. 2022.

FERNANDES, W. D. **Análise comparativa entre os métodos de dimensionamento de pavimentos flexíveis do Brasil e o método da AASHTO.** 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2016.

FONTES, L. P. T. L. **Optimização do desempenho de misturas betuminosas com betume modificado com borracha para reabilitação de pavimentos.** 2009.

Dissertação (Doutorado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia, Universidade do Minho, Minho, 2009.

FRANCO, F. A. C. P. **Método de dimensionamento mecanístico-empírico de pavimentos asfálticos - SisPav**. 2007. Dissertação (Doutor em Ciência em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

FRANCO, F. A. C. P.; MOTTA, L. M. G. **Execução de estudos e pesquisas para elaboração de método mecanístico-empírico de dimensionamento de pavimentos asfálticos**. 2020.

KNABBEN, R. M.; CARPIO, J. A. V. **Como utilizar o software Medina**. Criciúma, 2019. E-book. Disponível em: https://metodomedina.com.br/ebook_wt. Acesso em: 25 out 2022.

MATTOS, J. R. G. **Monitoramento e análise de desempenho de pavimentos flexíveis da ampliação da rodovia BR – 290 / RS**. 2014. Dissertação (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

MEDINA, J. **Mecânica dos pavimentos**. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 1997.

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

MOTA, E. V.; *et al.* Efeito do tráfego no dimensionamento de pavimentos asfálticos utilizando dados de pedágio. *In*: CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTE. 32., 2018, Gramado. **ANPET** Gramado: USP, 2018. p. 1230-1241.

MOTTA, L. M. G. **Método de dimensionamento de pavimentos flexíveis: critério de confiabilidade e ensaios de cargas repetidas**. 1991. Dissertação (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1991.

PITANGUI, L. C. **Análise comparativa do método do DNER com o método mecanístico-empírico Medina**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Brasília, Brasília, 2019.

PORTO, A. A. **Método de dimensionamento DNIT x Método mecanístico-empírico: comparação direta da simulação de desempenho mecânico de um trecho de rodovia**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Civil), Centro Universitário Christus, Fortaleza, 2021.

QUADROS, M.G. **Dimensionamento de pavimentos asfálticos com o método mecanístico-empírico: uso do novo método de dimensionamento nacional**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2018.

SANTOS, C. R. G. **Dimensionamento e análise do ciclo de vida de pavimentos rodoviários**: abordagem probabilística. 2011. Dissertação (Doutorado em Engenharia) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

SENÇO, W. **Manual de técnicas de pavimentação**. 2. ed. São Paulo: Pini, 2007.

SHINYASHIKI, R. **O sucesso é ser feliz**. São Paulo: Editora Gente, 1997.

SILVA, A. M. Estudo de parâmetros de compactação de solo para uso em pavimentos rodoviários. **Revista Transporte**, São Paulo, v. 24, n. 4, p. 95-103, 2016.

SILVA, C. F. S. C. **Análise de tensões em pavimentos a partir de modelo físico instrumentado**. 2014. Dissertação (Mestre em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

SOUSA, M. N. **Dimensionamento de estruturas de pavimento**: aplicação do método DNER (1981) e do método Medina. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Civil), Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, Florianópolis, 2019.

ANEXO A – Análise PR-092

Análise do pavimento

Empresa: **UTFPR**

Nome do Projeto: **PR-092**

Responsável pelo projeto: **Julia Maria Maniezzi Hespanhol**

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

Tipo de via: **Sistema Arterial Primário**

Nível de confiabilidade: **85%**

Período de projeto: **5 anos.** - **O autor do projeto declara estar ciente do tempo de projeto lançado no programa.**

Análise realizada em **01/06/2023 às 20:47:48** no modo: **Pavimento Novo (Nível A)**

Área trincada prevista no pavimento no fim do período: **27,1%**

>>Atenção: o programa não calcula a Área Trincada proveniente da reflexão de trincas da base estabilizada.

Afundamento de Trilha de Roda previsto no pavimento no fim do período: **6,5mm**

ALERTAS

- Esta análise não constitui o dimensionamento da estrutura do pavimento!

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

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

Estrutura do pavimento

Cam	Material	Espessura (cm)	Módulo de Resiliência	Coef de Poisson
1	CONCRETO ASFÁLTICO RJ CAP 50/70 #19,1mm Sepetiba	10,0	Resiliente Linear MR = 9588 MPa	0,30
2	BRITA GRADUADA TRATADA COM CIMENTO (BGTC) Reciclagem com incorporação de camada asfáltica e adição de cimento e brita	15,0	Sigmoidal Ei (MPa) = 7000 (1º mês) Ef (MPa) = 6849 (fim período)	0,20
3	SOLO FINO, SILTOSO OU ARGILOSO Solo Areno-argiloso LG'(2)	15,0	Resiliente Linear MR = 248 MPa	0,45
4	SUBLEITO Solo Areno-argiloso	SL	Resiliente Linear MR = 248 MPa	0,45

Materiais

1 - CONCRETO ASFÁLTICO: RJ CAP 50/70 #19,1mm Sepetiba

Propriedades	Modelos
Tipo de CAP = CAP 50/70 - PG 64-16	Ensaio de Fadiga
Massa específica (g/cm ³) = 2,4	-Modelo: $k_1 \cdot (e \cdot t)^{k_2}$
Resistência à tração (MPa) = 2,04	-Coeficiente de Regressão (k1): ≥ 1,0e-12
Teor de asfalto (%) = 6,0	-Coeficiente de Regressão (k2): ≥ -3,599
Volume de vazios (%) = 5,0	-Classe de Fadiga: ≥ 1
Faixa Granulométrica = #19,1mm	-FFM (100μ a 250μ): ≥ 0,67
Abrasão Los Angeles (%) = 40,0	Flow Number Mínimo
Norma ou Especificação = DNIT ES 31	- Condição de Tráfego Normal: ≥ 328 ciclos
	- Condição de Tráfego Severa: ≥ 881 ciclos

2 - BRITA GRADUADA TRATADA COM CIMENTO (BGTC): Reciclagem com incorporação de camada asfáltica e adição de cimento e brita

Propriedades	Modelos
Descrição do Material = ...	
Teor ótimo de cimento = 46	
Resistência à tração (MPa) = 1	
Massa específica (g/cm ³) = 2,30	
Umidade Ótima (%) = 6	
Energia Compactação = Modificada	
Norma ou Especificação = -	

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

Propriedades	Modelos
Descrição do Material = Areia Argilosa - ES	Ensaio de Deformação Permanente
Grupo MCT = LG'	Modelo: $ep = \psi_1 \cdot (s_3^{\psi_2}) \cdot (sd^{\psi_3}) \cdot (N^{\psi_4})$
MCT - Coeficiente c' = 2,05	Coeficiente de Regressão (k1 ou ψ_1): 0,453
MCT - Índice e' = 0,97	Coeficiente de Regressão (k2 ou ψ_2): -0,186
Massa específica (g/cm ³) = 1,8	Coeficiente de Regressão (k3 ou ψ_3): 1,084
Umidade Ótima (%) = 18,0	Coeficiente de Regressão (k4 ou ψ_4): 0,058
Energia Compactação = Normal	
Norma ou Especificação = DNIT ES 139	

4 - SUBLEITO: Solo Areno-argiloso

Propriedades	Modelos
Descrição do Material = Solo Areno-Areno-argiloso	Ensaio de Deformação Permanente
Grupo MCT = LG''	Modelo: $ep = \psi_1 \cdot (s_3^{\psi_2}) \cdot (sd^{\psi_3}) \cdot (N^{\psi_4})$
MCT - Coeficiente c' = 2,05	Coeficiente de Regressão (k1 ou ψ_1): 0,453
MCT - Índice e' = 0,97	Coeficiente de Regressão (k2 ou ψ_2): -0,186
Massa específica (g/cm ³) = 1,8	Coeficiente de Regressão (k3 ou ψ_3): 1,084
Umidade Ótima (%) = 18	Coeficiente de Regressão (k4 ou ψ_4): 0,058
Energia Compactação = ...	
Norma ou Especificação = DNIT ES 137	

Definição do tráfego

Volume Médio Diário no ano de abertura do tráfego: VMD (1º ano) = **446**

Fator de veículo no ano de abertura do tráfego: FV = **16,22**

Número de passagens anual do eixo padrão (1º ano): **2,64e+06**

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

Número de passagens anual do eixo padrão na faixa de projeto: **2,64e+06**

Taxa de crescimento do tráfego: **3,1%**

Número Equivalente total de passagens do eixo padrão na faixa de projeto: N Eq = **1,40e+07**

Eixo	Tipo	FE	Carga (ton)	FC	FVi
1	Eixo Simples	100%	6,00	0,278	0,278
2	Eixo Simples	4%	6,00	0,278	0,011
3	Eixo simples de roda dupla	91%	10,00	3,289	2,993
4	Dois eixos duplos em tandem	100%	17,00	8,549	8,549
5	Dois eixos duplos em tandem	22%	17,00	8,549	1,881
6	Três eixos duplos em tandem	27%	25,50	9,300	2,511

Evolução dos danos no pavimento

Mês	N Equiv	Área Trincada	ATR (mm)
1	2,170e+05	1,51%	5,1
6	1,310e+06	3,28%	5,6
12	2,641e+06	4,90%	5,9
18	3,992e+06	6,60%	6,0
24	5,364e+06	8,51%	6,1
30	6,757e+06	10,69%	6,2
36	8,171e+06	13,20%	6,3
42	9,607e+06	16,08%	6,3
48	1,107e+07	19,35%	6,4
54	1,255e+07	23,03%	6,4
60	1,405e+07	27,11%	6,5

Análise de Afundamento de Trilha de Roda

Cam	Material	Afundamento de Trilha de Roda (mm)
1	CONCRETO ASFÁLTICO	0,00
2	BRITA GRADUADA TRATADA COM CIMENTO (BGTC)	0,00
3	SOLO FINO, SILTOSO OU ARGILOSO	2,03
4	SUBLEITO	4,46
Afundamento de Trilha de Roda (mm)		6,5

Deflexões

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

Deflexões esperadas (0,01 mm) no topo da camada: CONCRETO ASFÁLTICO - RJ CAP 50/70 #19,1mm Sepetiba

Equipamento	Sensor 1 0 cm	Sensor 2 20 cm	Sensor 3 30 cm	Sensor 4 45 cm	Sensor 5 60 cm	Sensor 6 90 cm	Sensor 7 120 cm	Sensor 8 150 cm	Sensor 9 180 cm
Viga Benkelman Raio = 10,8 cm Carga = 8,2 ton	21	18	16	13	11	8	6	5	4
FWD Raio = 15,0 cm Carga = 4,0 ton	20	17	15	11	9	5	4	3	2

Deflexões esperadas (0,01 mm) no topo da camada: BRITA GRADUADA TRATADA COM CIMENTO (BGTC) - Reciclagem com incorporação de camada asfáltica e adição de cimento e brita

Equipamento	Sensor 1 0 cm	Sensor 2 20 cm	Sensor 3 30 cm	Sensor 4 45 cm	Sensor 5 60 cm	Sensor 6 90 cm	Sensor 7 120 cm	Sensor 8 150 cm	Sensor 9 180 cm
Viga Benkelman Raio = 10,8 cm Carga = 8,2 ton	23	20	17	14	11	7	6	5	4

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

Equipamento	Sensor 1 0 cm	Sensor 2 20 cm	Sensor 3 30 cm	Sensor 4 45 cm	Sensor 5 60 cm	Sensor 6 90 cm	Sensor 7 120 cm	Sensor 8 150 cm	Sensor 9 180 cm
Viga Benkelman Raio = 10,8 cm Carga = 8,2 ton	37	22	16	11	9	7	5	5	4

Deflexões esperadas (0,01 mm) no topo da camada: SUBLEITO - Solo Areno-argiloso

Equipamento	Sensor 1 0 cm	Sensor 2 20 cm	Sensor 3 30 cm	Sensor 4 45 cm	Sensor 5 60 cm	Sensor 6 90 cm	Sensor 7 120 cm	Sensor 8 150 cm	Sensor 9 180 cm
Viga Benkelman Raio = 10,8 cm Carga = 8,2 ton	37	23	17	12	9	7	5	5	4

ANEXO B – Análise PR-160

Análise do pavimento

Empresa: **UTFPR**

Nome do Projeto: **PR-160**

Responsável pelo projeto: **Julia Maria Maniezzi Hespanhol**

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

Tipo de via: **Sistema Arterial Primário**

Nível de confiabilidade: **85%**

Período de projeto: **10** anos.

Análise realizada em **01/06/2023 às 20:51:25** no modo: **Pavimento Novo (Nível A)**

Área trincada prevista no pavimento no fim do período: **23,8%**

Afundamento de Trilha de Roda previsto no pavimento no fim do período: **5,8mm**

ALERTAS

- Esta análise não constitui o dimensionamento da estrutura do pavimento!

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

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

Estrutura do pavimento

Cam	Material	Espessura (cm)	Módulo de Resiliência	Coef de Poisson
1	CONCRETO ASFÁLTICO MODIFICADO RJ CAPFLEX 65/90 SBS PG 70-22	10,0	Resiliente Linear MR = 3184 MPa	0,30
2	MATERIAL GRANULAR Brita Graduada - Gnaisse C4	18,0	Resiliente Linear MR = 311 MPa	0,35
3	MATERIAL GRANULAR Brita Graduada - Gnaisse C1	34,0	Resiliente Linear MR = 259 MPa	0,35
4	SUBLEITO Solo Siltoso NS'	SL	Resiliente Linear MR = 189 MPa	0,45

Materiais

1 - CONCRETO ASFÁLTICO MODIFICADO: RJ CAPFLEX 65/90 SBS PG 70-22

Propriedades

Tipo de CAP = CAPFLEX 65-90 SBS PG 70-22
Aditivo Modificador = Polímero SBS
Massa específica (g/cm³) = 2,4
Resistência à tração (MPa) = 1,28
Faixa Granulométrica = Faixa B DNIT
Norma ou Especificação = DNIT ES 385

Modelos

Ensaio de Fadiga
-Modelo: $k_1 \cdot (e^t \wedge k_2)$
-Coeficiente de Regressão (k1): $\geq 3,0e-11$
-Coeficiente de Regressão (k2): $\geq -3,535$
-Classe de Fadiga: ≥ 2
-FFM (100μ a 250μ): $\geq 1,16$
Flow Number Mínimo
- Condição de Tráfego Normal: ≥ 221 ciclos
- Condição de Tráfego Severa: ≥ 606 ciclos

2 - MATERIAL GRANULAR: Brita Graduada - Gnaiss C4

Propriedades

Descrição do Material = Brita Graduada
Massa específica (g/cm³) = 2,296
Umidade Ótima (%) = 5,4
Energia Compactação = Modificada
Abrasão Los Angeles (%) = 41,0
Norma ou Especificação = DNIT ES 141

Modelos

Ensaio de Deformação Permanente
Modelo: $ep = psi1 \cdot (s3 \wedge psi2) \cdot (sd \wedge psi3) \cdot (N \wedge psi4)$
Coeficiente de Regressão (k1 ou psi1): **0,1010**
Coeficiente de Regressão (k2 ou psi2): **-0,1825**
Coeficiente de Regressão (k3 ou psi3): **0,9091**
Coeficiente de Regressão (k4 ou psi4): **0,0753**

3 - MATERIAL GRANULAR: Brita Graduada - Gnaiss C1

Propriedades

Descrição do Material = Brita Graduada
Massa específica (g/cm³) = 2,268
Umidade Ótima (%) = 5,8
Energia Compactação = Modificada
Abrasão Los Angeles (%) = 41,0
Norma ou Especificação = DNIT ES 141

Modelos

Ensaio de Deformação Permanente
Modelo: $ep = psi1 \cdot (s3 \wedge psi2) \cdot (sd \wedge psi3) \cdot (N \wedge psi4)$
Coeficiente de Regressão (k1 ou psi1): **0,1608**
Coeficiente de Regressão (k2 ou psi2): **-0,097**
Coeficiente de Regressão (k3 ou psi3): **0,525**
Coeficiente de Regressão (k4 ou psi4): **0,0752**

4 - SUBLEITO: Solo Siltoso NS'

Propriedades

Descrição do Material = Solo siltoso Papucaia - RJ
Grupo MCT = NS'
MCT - Coeficiente c' = 1,00
MCT - Índice e' = 1,68
Massa específica (g/cm³) = 1,8
Umidade Ótima (%) = 13,0
Energia Compactação = Normal
Norma ou Especificação = DNIT ES 137

Modelos

Ensaio de Deformação Permanente
Modelo: $ep = psi1 \cdot (s3 \wedge psi2) \cdot (sd \wedge psi3) \cdot (N \wedge psi4)$
Coeficiente de Regressão (k1 ou psi1): **0,244**
Coeficiente de Regressão (k2 ou psi2): **0,419**
Coeficiente de Regressão (k3 ou psi3): **1,309**
Coeficiente de Regressão (k4 ou psi4): **0,069**

Definição do tráfego

Volume Médio Diário no ano de abertura do tráfego: VMD (1º ano) = **565**
Fator de veículo no ano de abertura do tráfego: FV = **2,25**
Número de passagens anual do eixo padrão (1º ano): **4,64e+05**
% Veículos na faixa de projeto: **100%**

Número de passagens anual do eixo padrão na faixa de projeto: **4,64e+05**

Taxa de crescimento do tráfego: **4,4%**

Número Equivalente total de passagens do eixo padrão na faixa de projeto: N Eq = **5,67e+06**

Eixo	Tipo	FE	Carga (ton)	FC	FVi
1	Eixo Simples	100%	6,00	0,278	0,278
2	Dois eixos duplos em tandem	10%	17,00	8,549	0,855
3	Três eixos duplos em tandem	12%	25,50	9,300	1,116

Evolução dos danos no pavimento

Mês	N Equiv	Área Trincada	ATR (mm)
1	3,789e+04	1,09%	4,0
6	2,294e+05	2,15%	4,5
12	4,638e+05	2,94%	4,8
18	7,033e+05	3,63%	4,9
24	9,480e+05	4,31%	5,0
30	1,198e+06	4,99%	5,1
36	1,454e+06	5,71%	5,2
42	1,715e+06	6,46%	5,3
48	1,981e+06	7,27%	5,3
54	2,254e+06	8,13%	5,4
60	2,532e+06	9,06%	5,4
66	2,817e+06	10,07%	5,5
72	3,107e+06	11,17%	5,5
78	3,405e+06	12,35%	5,5
84	3,708e+06	13,64%	5,6
90	4,018e+06	15,03%	5,6
96	4,335e+06	16,54%	5,6
102	4,659e+06	18,16%	5,7
108	4,989e+06	19,92%	5,7
114	5,327e+06	21,81%	5,7
120	5,673e+06	23,83%	5,8

Análise de Afundamento de Trilha de Roda

Cam	Material	Afundamento de Trilha de Roda (mm)
1	CONCRETO ASFÁLTICO MODIFICADO	0,00
2	MATERIAL GRANULAR	1,46
3	MATERIAL GRANULAR	2,94
4	SUBLEITO	1,35
Afundamento de Trilha de Roda (mm)		5,8

Deflexões

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

Deflexões esperadas (0,01 mm) no topo da camada: CONCRETO ASFÁLTICO MODIFICADO - RJ CAPFLEX 65/90 SBS PG 70-22

Equipamento	Sensor 1 0 cm	Sensor 2 20 cm	Sensor 3 30 cm	Sensor 4 45 cm	Sensor 5 60 cm	Sensor 6 90 cm	Sensor 7 120 cm	Sensor 8 150 cm	Sensor 9 180 cm
Viga Benkelman Raio = 10,8 cm Carga = 8,2 ton	42	33	27	19	14	9	7	6	5
FWD Raio = 15,0 cm Carga = 4,0 ton	48	34	26	17	12	7	5	4	3

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

Equipamento	Sensor 1 0 cm	Sensor 2 20 cm	Sensor 3 30 cm	Sensor 4 45 cm	Sensor 5 60 cm	Sensor 6 90 cm	Sensor 7 120 cm	Sensor 8 150 cm	Sensor 9 180 cm
Viga Benkelman Raio = 10,8 cm Carga = 8,2 ton	47	33	25	18	14	9	7	6	5

Deflexões esperadas (0,01 mm) no topo da camada: MATERIAL GRANULAR - Brita Graduada - Gnaiss C1

Equipamento	Sensor 1 0 cm	Sensor 2 20 cm	Sensor 3 30 cm	Sensor 4 45 cm	Sensor 5 60 cm	Sensor 6 90 cm	Sensor 7 120 cm	Sensor 8 150 cm	Sensor 9 180 cm
Viga Benkelman Raio = 10,8 cm Carga = 8,2 ton	43	29	23	17	13	9	7	6	5

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

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

ANEXO C – Análise PR-280

Análise do pavimento

Empresa: **UTFPR**

Nome do Projeto: **PR-280**

Responsável pelo projeto: **Julia Maria Maniezzi Hespanhol**

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

Tipo de via: **Sistema Arterial Primário**

Nível de confiabilidade: **85%**

Período de projeto: **10** anos.

Análise realizada em **01/06/2023 às 20:59:22** no modo: **Pavimento Novo (Nível A)**

Área trincada prevista no pavimento no fim do período: **99,0%**.

>>Atenção: o programa não calcula a Área Trincada proveniente da reflexão de trincas da base estabilizada.

Afundamento de Trilha de Roda previsto no pavimento no fim do período: **6,0mm**

ALERTAS

- Esta análise não constitui o dimensionamento da estrutura do pavimento!
- Tráfego elevado para a estrutura proposta.
- Módulo da camada estabilizada decaiu rapidamente em um período.

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

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

Estrutura do pavimento

Cam	Material	Espessura (cm)	Módulo de Resiliência	Coef de Poisson
1	CONCRETO ASFÁLTICO MODIFICADO RJ CAPFLEX 65/90 SBS PG 70-22	10,0	Resiliente Linear MR = 3184 MPa	0,30
2	BRITA GRADUADA TRATADA COM CIMENTO (BGTC) Balbo, 1993 c: 80 kg/m ³	15,0	Sigmoidal Ei (MPa) = 7000 (1º mês) Ef (MPa) = 3459 (fim período)	0,25
3	MATERIAL GRANULAR Brita Graduada - Gnaisse C4	15,0	Resiliente Linear MR = 311 MPa	0,35
4	SUBLEITO Solo Fino NA	SL	Resiliente Não Linear MR = 235 MPa (1º mês) k1 = 784,88 k2 = 0,340 k3 = 0,000 k4 = 0,000	0,45

Materiais

1 - CONCRETO ASFÁLTICO MODIFICADO: RJ CAPFLEX 65/90 SBS PG 70-22

Propriedades	Modelos
Tipo de CAP = CAPFLEX 65-90 SBS PG 70-22 Aditivo Modificador = Polímero SBS Massa específica (g/cm ³) = 2,4 Resistência à tração (MPa) = 1,28 Faixa Granulométrica = Faixa B DNIT Norma ou Especificação = DNIT ES 385	Ensaio de Fadiga -Modelo: $k_1 \cdot (e^t)^{k_2}$ -Coeficiente de Regressão (k1): ≥ 3,0e-11 -Coeficiente de Regressão (k2): ≥ -3,535 -Classe de Fadiga: ≥ 2 -FFM (100μ a 250μ): ≥ 1,16 Flow Number Mínimo - Condição de Tráfego Normal: ≥ 646 ciclos - Condição de Tráfego Severa: ≥ 1668 ciclos

2 - BRITA GRADUADA TRATADA COM CIMENTO (BGTC): Balbo, 1993 c: 80 kg/m³

Propriedades	Modelos
Descrição do Material = Estudo Balbo (1993) Teor ótimo de cimento = 80,0 Resistência à tração (MPa) = 1,25 Massa específica (g/cm ³) = 2,230 Umidade Ótima (%) = 4,48 Energia Compactação = Modificada Norma ou Especificação = -	

3 - MATERIAL GRANULAR: Brita Graduada - Gnaisse C4

Propriedades	Modelos
Descrição do Material = Brita Graduada Massa específica (g/cm ³) = 2,296 Umidade Ótima (%) = 5,4 Energia Compactação = Modificada Abrasão Los Angeles (%) = 41,0 Norma ou Especificação = DNIT ES 141	Ensaio de Deformação Permanente Modelo: $ep = \psi_1 \cdot (s_3^{\psi_2}) \cdot (sd^{\psi_3}) \cdot (N^{\psi_4})$ Coeficiente de Regressão (k1 ou ψ_1): 0,1010 Coeficiente de Regressão (k2 ou ψ_2): -0,1825 Coeficiente de Regressão (k3 ou ψ_3): 0,9091 Coeficiente de Regressão (k4 ou ψ_4): 0,0753

4 - SUBLEITO: Solo Fino NA

Propriedades	Modelos
Descrição do Material = Areia Fina de Campo Azul - MG Grupo MCT = NA MCT - Coeficiente c' = 0,25 MCT - Índice e' = 1,67 Massa específica (g/cm ³) = 1,820 Umidade Ótima (%) = 10,0 Energia Compactação = Intenormal Norma ou Especificação = DNIT ES 137	Ensaio de Deformação Permanente Modelo: $ep = \psi_1 \cdot (s_3^{\psi_2}) \cdot (sd^{\psi_3}) \cdot (N^{\psi_4})$ Coeficiente de Regressão (k1 ou ψ_1): 0,097 Coeficiente de Regressão (k2 ou ψ_2): -1,600 Coeficiente de Regressão (k3 ou ψ_3): 1,900 Coeficiente de Regressão (k4 ou ψ_4): 0,063

Definição do tráfego

Volume Médio Diário no ano de abertura do tráfego: VMD (1º ano) = **1009**

Fator de veículo no ano de abertura do tráfego: FV = **15,40**

Número de passagens anual do eixo padrão (1º ano): **5,67e+06**

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

Número de passagens anual do eixo padrão na faixa de projeto: **5,67e+06**

Taxa de crescimento do tráfego: **3,4%**

Número Equivalente total de passagens do eixo padrão na faixa de projeto: N Eq = **6,62e+07**

Eixo	Tipo	FE	Carga (ton)	FC	FVi
1	Eixo Simples	100%	6,00	0,278	0,278
2	Eixo simples de roda dupla	88%	10,00	3,289	2,895
3	Dois eixos duplos em tandem	100%	17,00	8,549	8,549
4	Três eixos duplos em tandem	23%	25,50	9,300	2,139
5	Eixo Simples	1%	6,00	0,278	0,003
6	Dois eixos duplos em tandem	18%	17,00	8,549	1,539

Evolução dos danos no pavimento

Mês	N Equiv	Área Trincada	ATR (mm)
1	4,653e+05	1,29%	3,3
6	2,811e+06	3,71%	4,6
12	5,670e+06	5,87%	4,9
18	8,577e+06	8,41%	5,0
24	1,153e+07	11,55%	5,1
30	1,454e+07	15,47%	5,2
36	1,759e+07	20,27%	5,3
42	2,070e+07	26,02%	5,4
48	2,386e+07	32,72%	5,5
54	2,708e+07	40,26%	5,5
60	3,034e+07	48,47%	5,6
66	3,367e+07	57,08%	5,6
72	3,705e+07	65,79%	5,7
78	4,048e+07	74,27%	5,7
84	4,398e+07	82,22%	5,8
90	4,753e+07	89,40%	5,8
96	5,114e+07	95,64%	5,8
102	5,481e+07	99,00%	5,9
108	5,855e+07	99,00%	5,9
114	6,235e+07	99,00%	5,9
120	6,621e+07	99,00%	6,0

Análise de Afundamento de Trilha de Roda

Cam	Material	Afundamento de Trilha de Roda (mm)
1	CONCRETO ASFÁLTICO MODIFICADO	0,00
2	BRITA GRADUADA TRATADA COM CIMENTO (BGTC)	0,00
3	MATERIAL GRANULAR	0,99
4	SUBLEITO	4,99
Afundamento de Trilha de Roda (mm)		6,0

Deflexões

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

Deflexões esperadas (0,01 mm) no topo da camada: CONCRETO ASFÁLTICO MODIFICADO - RJ CAPFLEX 65/90 SBS PG 70-22

Equipamento	Sensor 1 0 cm	Sensor 2 20 cm	Sensor 3 30 cm	Sensor 4 45 cm	Sensor 5 60 cm	Sensor 6 90 cm	Sensor 7 120 cm	Sensor 8 150 cm	Sensor 9 180 cm
Viga Benkelman Raio = 10,8 cm Carga = 8,2 ton	23	20	17	14	11	8	6	5	4
FWD Raio = 15,0 cm Carga = 4,0 ton	23	18	16	12	9	6	4	3	2

Deflexões esperadas (0,01 mm) no topo da camada: BRITA GRADUADA TRATADA COM CIMENTO (BGTC) - Balbo, 1993 c: 80 kg/m³

Equipamento	Sensor 1 0 cm	Sensor 2 20 cm	Sensor 3 30 cm	Sensor 4 45 cm	Sensor 5 60 cm	Sensor 6 90 cm	Sensor 7 120 cm	Sensor 8 150 cm	Sensor 9 180 cm
Viga Benkelman Raio = 10,8 cm Carga = 8,2 ton	23	20	18	14	12	8	6	5	4

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

Equipamento	Sensor 1 0 cm	Sensor 2 20 cm	Sensor 3 30 cm	Sensor 4 45 cm	Sensor 5 60 cm	Sensor 6 90 cm	Sensor 7 120 cm	Sensor 8 150 cm	Sensor 9 180 cm
Viga Benkelman Raio = 10,8 cm Carga = 8,2 ton	38	23	17	12	9	7	6	5	4

Deflexões esperadas (0,01 mm) no topo da camada: SUBLEITO - Solo Fino NA

Equipamento	Sensor 1 0 cm	Sensor 2 20 cm	Sensor 3 30 cm	Sensor 4 45 cm	Sensor 5 60 cm	Sensor 6 90 cm	Sensor 7 120 cm	Sensor 8 150 cm	Sensor 9 180 cm
-------------	------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	--------------------	--------------------	--------------------

Equipamento	Sensor 1 0 cm	Sensor 2 20 cm	Sensor 3 30 cm	Sensor 4 45 cm	Sensor 5 60 cm	Sensor 6 90 cm	Sensor 7 120 cm	Sensor 8 150 cm	Sensor 9 180 cm
Viga Benkelman Raio = 10,8 cm Carga = 8,2 ton	38	24	18	13	10	7	6	5	4

ANEXO D – Dimensionamento da PR-280

Dimensionamento do pavimento

Empresa: **UTFPR**

Nome do Projeto: **PR-280**

Responsável pelo projeto: **Julia Maria Maniezzi Hespanhol**

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

Tipo de via: **Sistema Arterial Primário**

Nível de confiabilidade: **85%**

Período de projeto: **10** anos.

Análise realizada em **01/06/2023 às 21:00:40** no modo: **Pavimento Novo (Nível A)**

Área trincada prevista no pavimento no fim do período: **28,8%**

>>Atenção: o programa não calcula a Área Trincada proveniente da reflexão de trincas da base estabilizada.

Afundamento de Trilha de Roda previsto no pavimento no fim do período: **3,5mm**

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

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

Estrutura do pavimento

Cam	Material	Espessura (cm)	Módulo de Resiliência	Coef de Poisson
1	CONCRETO ASFÁLTICO MODIFICADO RJ CAPFLEX 65/90 SBS PG 70-22	11,7	Resiliente Linear MR = 3184 MPa	0,30
2	CONCRETO ASFÁLTICO MODIFICADO RJ CAPFLEX 65/90 SBS PG 70-22	5,0	Resiliente Linear MR = 3184 MPa	0,30
3	BRITA GRADUADA TRATADA COM CIMENTO (BGTC) Balbo, 1993 c: 80 kg/m ³	15,0	Sigmoidal Ei (MPa) = 7000 (1º mês) Ef (MPa) = 6511 (fim período)	0,25
4	MATERIAL GRANULAR Brita Graduada - Gnaisse C4	15,0	Resiliente Linear MR = 311 MPa	0,35
5	SUBLEITO Solo Fino NA	SL	Resiliente Não Linear MR = 236 MPa (1º mês) k1 = 784,88 k2 = 0,340 k3 = 0,000 k4 = 0,000	0,45

Materiais

1 - CONCRETO ASFÁLTICO MODIFICADO: RJ CAPFLEX 65/90 SBS PG 70-22

Propriedades	Modelos
Tipo de CAP = CAPFLEX 65-90 SBS PG 70-22 Aditivo Modificador = Polímero SBS Massa específica (g/cm ³) = 2,4 Resistência à tração (MPa) = 1,28 Faixa Granulométrica = Faixa B DNIT Norma ou Especificação = DNIT ES 385	Ensaio de Fadiga -Modelo: $k_1 \cdot (e^t)^{k_2}$ -Coeficiente de Regressão (k1): ≥ 3,0e-11 -Coeficiente de Regressão (k2): ≥ -3,535 -Classe de Fadiga: ≥ 2 -FFM (100μ a 250μ): ≥ 1,16 Flow Number Mínimo - Condição de Tráfego Normal: ≥ 646 ciclos - Condição de Tráfego Severa: ≥ 1668 ciclos

2 - CONCRETO ASFÁLTICO MODIFICADO: RJ CAPFLEX 65/90 SBS PG 70-22

Propriedades	Modelos
Tipo de CAP = CAPFLEX 65-90 SBS PG 70-22 Aditivo Modificador = Polímero SBS Massa específica (g/cm ³) = 2,4 Resistência à tração (MPa) = 1,28 Faixa Granulométrica = Faixa B DNIT Norma ou Especificação = DNIT ES 385	Ensaio de Fadiga -Modelo: $k_1 \cdot (e^t)^{k_2}$ -Coeficiente de Regressão (k1): ≥ 3,0e-11 -Coeficiente de Regressão (k2): ≥ -3,535 -Classe de Fadiga: ≥ 2 -FFM (100μ a 250μ): ≥ 1,16 Flow Number Mínimo - Condição de Tráfego Normal: ≥ 646 ciclos - Condição de Tráfego Severa: ≥ 1668 ciclos

3 - BRITA GRADUADA TRATADA COM CIMENTO (BGTC): Balbo, 1993 c: 80 kg/m³

Propriedades	Modelos
Descrição do Material = Estudo Balbo (1993) Teor ótimo de cimento = 80,0 Resistência à tração (MPa) = 1,25 Massa específica (g/cm ³) = 2,230 Umidade Ótima (%) = 4,48 Energia Compactação = Modificada Norma ou Especificação = -	

4 - MATERIAL GRANULAR: Brita Graduada - Gnaisse C4

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

5 - SUBLEITO: Solo Fino NA

Propriedades

Descrição do Material = Areia Fina de Campo Azul - MG
Grupo MCT = NA
MCT - Coeficiente $c' = 0,25$
MCT - Índice $e' = 1,67$
Massa específica (g/cm^3) = 1,820
Umidade Ótima (%) = 10,0
Energia Compactação = Internormal
Norma ou Especificação = DNIT ES 137

Modelos

Ensaio de Deformação Permanente
Modelo: $ep = psi1.(s3^{psi2}).(sd^{psi3}).(N^{psi4})$
Coeficiente de Regressão ($k1$ ou $psi1$): **0,097**
Coeficiente de Regressão ($k2$ ou $psi2$): **-1,600**
Coeficiente de Regressão ($k3$ ou $psi3$): **1,900**
Coeficiente de Regressão ($k4$ ou $psi4$): **0,063**

Definição do tráfego

Volume Médio Diário no ano de abertura do tráfego: VMD (1º ano) = **1009**

Fator de veículo no ano de abertura do tráfego: FV = **15,40**

Número de passagens anual do eixo padrão (1º ano): **5,67e+06**

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

Número de passagens anual do eixo padrão na faixa de projeto: **5,67e+06**

Taxa de crescimento do tráfego: **3,4%**

Número Equivalente total de passagens do eixo padrão na faixa de projeto: N Eq = **6,62e+07**

Eixo	Tipo	FE	Carga (ton)	FC	FVi
1	Eixo Simples	100%	6,00	0,278	0,278
2	Eixo simples de roda dupla	88%	10,00	3,289	2,895
3	Dois eixos duplos em tandem	100%	17,00	8,549	8,549
4	Três eixos duplos em tandem	23%	25,50	9,300	2,139
5	Eixo Simples	1%	6,00	0,278	0,003
6	Dois eixos duplos em tandem	18%	17,00	8,549	1,539

Evolução dos danos no pavimento

Mês	N Equiv	Área Trincada	ATR (mm)
1	4,653e+05	1,14%	2,5
6	2,811e+06	2,25%	2,8
12	5,670e+06	3,13%	2,9
18	8,577e+06	3,89%	3,0
24	1,153e+07	4,65%	3,1
30	1,454e+07	5,43%	3,1
36	1,759e+07	6,26%	3,2
42	2,070e+07	7,14%	3,2
48	2,386e+07	8,09%	3,3
54	2,708e+07	9,12%	3,3
60	3,034e+07	10,25%	3,3
66	3,367e+07	11,48%	3,3
72	3,705e+07	12,82%	3,4
78	4,048e+07	14,29%	3,4

Mês	N Equiv	Área Trincada	ATR (mm)
84	4,398e+07	15,89%	3,4
90	4,753e+07	17,64%	3,4
96	5,114e+07	19,54%	3,4
102	5,481e+07	21,60%	3,5
108	5,855e+07	23,84%	3,5
114	6,235e+07	26,24%	3,5
120	6,621e+07	28,83%	3,5

Análise de Afundamento de Trilha de Roda

Cam	Material	Afundamento de Trilha de Roda (mm)
1	CONCRETO ASFÁLTICO MODIFICADO	0,00
2	CONCRETO ASFÁLTICO MODIFICADO	0,00
3	BRITA GRADUADA TRATADA COM CIMENTO (BGTC)	0,00
4	MATERIAL GRANULAR	0,71
5	SUBLEITO	2,80
Afundamento de Trilha de Roda (mm)		3,5

Controle por Deflexões

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

Deflexões esperadas (0,01 mm) no topo da camada: CONCRETO ASFÁLTICO MODIFICADO - RJ CAPFLEX 65/90 SBS PG 70-22

Equipamento	Sensor 1 0 cm	Sensor 2 20 cm	Sensor 3 30 cm	Sensor 4 45 cm	Sensor 5 60 cm	Sensor 6 90 cm	Sensor 7 120 cm	Sensor 8 150 cm	Sensor 9 180 cm
Viga Benkelman Raio = 10,8 cm Carga = 8,2 ton	21	18	16	14	11	8	6	5	4
FWD Raio = 15,0 cm Carga = 4,0 ton	21	17	14	12	9	6	4	3	2

Deflexões esperadas (0,01 mm) no topo da camada: CONCRETO ASFÁLTICO MODIFICADO - RJ CAPFLEX 65/90 SBS PG 70-22

Equipamento	Sensor 1 0 cm	Sensor 2 20 cm	Sensor 3 30 cm	Sensor 4 45 cm	Sensor 5 60 cm	Sensor 6 90 cm	Sensor 7 120 cm	Sensor 8 150 cm	Sensor 9 180 cm
Viga Benkelman Raio = 10,8 cm Carga = 8,2 ton	23	20	18	14	11	8	6	5	4

Deflexões esperadas (0,01 mm) no topo da camada: BRITA GRADUADA TRATADA COM CIMENTO (BGTC) - Balbo, 1993 c: 80 kg/m³

Equipamento	Sensor 1 0 cm	Sensor 2 20 cm	Sensor 3 30 cm	Sensor 4 45 cm	Sensor 5 60 cm	Sensor 6 90 cm	Sensor 7 120 cm	Sensor 8 150 cm	Sensor 9 180 cm
Viga Benkelman Raio = 10,8 cm Carga = 8,2 ton	23	20	18	14	12	8	6	5	4

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

Equipamento	Sensor 1 0 cm	Sensor 2 20 cm	Sensor 3 30 cm	Sensor 4 45 cm	Sensor 5 60 cm	Sensor 6 90 cm	Sensor 7 120 cm	Sensor 8 150 cm	Sensor 9 180 cm
Viga Benkelman Raio = 10,8 cm Carga = 8,2 ton	38	23	17	12	9	7	6	5	4

Deflexões esperadas (0,01 mm) no topo da camada: SUBLEITO - Solo Fino NA

Equipamento	Sensor 1 0 cm	Sensor 2 20 cm	Sensor 3 30 cm	Sensor 4 45 cm	Sensor 5 60 cm	Sensor 6 90 cm	Sensor 7 120 cm	Sensor 8 150 cm	Sensor 9 180 cm
Viga Benkelman Raio = 10,8 cm Carga = 8,2 ton	38	24	18	13	10	7	6	5	4

ANEXO E – Análise PR-090

Análise do pavimento

Empresa: **UTFPR**

Nome do Projeto: **PR-151 e PR-090**

Responsável pelo projeto: **Julia Maria Maniezzi Hespanhol**

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

Tipo de via: **Sistema Arterial Primário**

Nível de confiabilidade: **85%**

Período de projeto: **10** anos.

Análise realizada em **01/06/2023 às 21:10:46** no modo: **Pavimento Novo (Nível A)**

Área trincada prevista no pavimento no fim do período: **65,2%**.

>>Atenção: o programa não calcula a Área Trincada proveniente da reflexão de trincas da base estabilizada.

Afundamento de Trilha de Roda previsto no pavimento no fim do período: **2,7mm**

ALERTAS

- Esta análise não constitui o dimensionamento da estrutura do pavimento!
- Tráfego elevado para a estrutura proposta.

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

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

Estrutura do pavimento

Cam	Material	Espessura (cm)	Módulo de Resiliência	Coef de Poisson
1	CONCRETO ASFÁLTICO RJ CAP 30/45 #12,5mm Sepetiba	15,0	Resiliente Linear MR = 9000 MPa	0,30
2	MATERIAL GRANULAR Brita Graduada - Gnaiss C4	15,0	Resiliente Linear MR = 311 MPa	0,35
3	BRITA GRADUADA TRATADA COM CIMENTO (BGTC) Balbo, 1993 c: 80 kg/m ³	18,0	Sigmoidal Ei (MPa) = 7000 (1º mês) Ef (MPa) = 6998 (fim período)	0,25
4	SUBLEITO Solo Fino NA	SL	Resiliente Não Linear MR = 231 MPa (1º mês) k1 = 784,88 k2 = 0,340 k3 = 0,000 k4 = 0,000	0,45

Materiais

1 - CONCRETO ASFÁLTICO: RJ CAP 30/45 #12,5mm Sepetiba

Propriedades	Modelos
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	Ensaio de Fadiga -Modelo: $k_1 \cdot (e^t \wedge k_2)$ -Coeficiente de Regressão (k1): $\geq 5,0e-14$ -Coeficiente de Regressão (k2): $\geq -3,992$ -Classe de Fadiga: ≥ 2 -FFM (100μ a 250μ): $\geq 0,75$ Flow Number Mínimo - Condição de Tráfego Normal: ≥ 541 ciclos - Condição de Tráfego Severa: ≥ 1411 ciclos

2 - MATERIAL GRANULAR: Brita Graduada - Gnaise C4

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

3 - BRITA GRADUADA TRATADA COM CIMENTO (BGTC): Balbo, 1993 c: 80 kg/m³

Propriedades	Modelos
Descrição do Material = Estudo Balbo (1993) Teor ótimo de cimento = 80,0 Resistência à tração (MPa) = 1,25 Massa específica (g/cm ³) = 2,230 Umidade Ótima (%) = 4,48 Energia Compactação = Modificada Norma ou Especificação = -	

4 - SUBLEITO: Solo Fino NA

Propriedades	Modelos
Descrição do Material = Areia Fina de Campo Azul - MG Grupo MCT = NA MCT - Coeficiente c' = 0,25 MCT - Índice e' = 1,67 Massa específica (g/cm ³) = 1,820 Umidade Ótima (%) = 10,0 Energia Compactação = Intenormal Norma ou Especificação = DNIT ES 137	Ensaio de Deformação Permanente Modelo: $ep = psi1 \cdot (s3^psi2) \cdot (sd^psi3) \cdot (N^psi4)$ Coeficiente de Regressão (k1 ou psi1): 0,097 Coeficiente de Regressão (k2 ou psi2): -1,600 Coeficiente de Regressão (k3 ou psi3): 1,900 Coeficiente de Regressão (k4 ou psi4): 0,063

Definição do tráfego

Volume Médio Diário no ano de abertura do tráfego: VMD (1º ano) = **2182**

Fator de veículo no ano de abertura do tráfego: FV = **4,72**

Número de passagens anual do eixo padrão (1º ano): **3,76e+06**

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

Número de passagens anual do eixo padrão na faixa de projeto: **3,76e+06**

Taxa de crescimento do tráfego: **3,5%**

Número Equivalente total de passagens do eixo padrão na faixa de projeto: N Eq = **4,41e+07**

Eixo	Tipo	FE	Carga (ton)	FC	FVi
1	Eixo simples de roda dupla	100%	8,20	1,000	1,000
2	Três eixos duplos em tandem	10%	25,50	9,300	0,930
3	Três eixos duplos em tandem	10%	25,50	9,300	0,930
4	Três eixos duplos em tandem	10%	25,50	9,300	0,930
5	Três eixos duplos em tandem	10%	25,50	9,300	0,930

Evolução dos danos no pavimento

Mês	N Equiv	Área Trincada	ATR (mm)
1	3,084e+05	1,42%	1,9
6	1,864e+06	2,98%	2,2
12	3,760e+06	4,36%	2,3
18	5,689e+06	5,73%	2,3
24	7,652e+06	7,22%	2,4
30	9,648e+06	8,88%	2,4
36	1,168e+07	10,76%	2,4
42	1,375e+07	12,88%	2,5
48	1,585e+07	15,28%	2,5
54	1,799e+07	17,97%	2,5
60	2,016e+07	20,98%	2,5
66	2,238e+07	24,30%	2,5
72	2,463e+07	27,93%	2,6
78	2,692e+07	31,87%	2,6
84	2,925e+07	36,10%	2,6
90	3,162e+07	40,58%	2,6
96	3,403e+07	45,28%	2,6
102	3,649e+07	50,15%	2,6
108	3,899e+07	55,14%	2,6
114	4,153e+07	60,18%	2,7
120	4,411e+07	65,23%	2,7

Análise de Afundamento de Trilha de Roda

Cam	Material	Afundamento de Trilha de Roda (mm)
1	CONCRETO ASFÁLTICO	0,00
2	MATERIAL GRANULAR	1,00
3	BRITA GRADUADA TRATADA COM CIMENTO (BGTC)	0,00
4	SUBLEITO	1,66
Afundamento de Trilha de Roda (mm)		2,7

Deflexões

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

Deflexões esperadas (0,01 mm) no topo da camada: CONCRETO ASFÁLTICO - RJ CAP 30/45 #12,5mm Sepetiba

Equipamento	Sensor 1 0 cm	Sensor 2 20 cm	Sensor 3 30 cm	Sensor 4 45 cm	Sensor 5 60 cm	Sensor 6 90 cm	Sensor 7 120 cm	Sensor 8 150 cm	Sensor 9 180 cm
Viga Benkelman Raio = 10,8 cm Carga = 8,2 ton	19	17	16	13	11	8	6	5	4
FWD Raio = 15,0 cm Carga = 4,0 ton	19	16	14	11	9	6	4	3	3

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

Equipamento	Sensor 1 0 cm	Sensor 2 20 cm	Sensor 3 30 cm	Sensor 4 45 cm	Sensor 5 60 cm	Sensor 6 90 cm	Sensor 7 120 cm	Sensor 8 150 cm	Sensor 9 180 cm
Viga Benkelman Raio = 10,8 cm Carga = 8,2 ton	24	18	16	13	11	8	6	5	4

Deflexões esperadas (0,01 mm) no topo da camada: BRITA GRADUADA TRATADA COM CIMENTO (BGTC) - Balbo, 1993 c: 80 kg/m³

Equipamento	Sensor 1 0 cm	Sensor 2 20 cm	Sensor 3 30 cm	Sensor 4 45 cm	Sensor 5 60 cm	Sensor 6 90 cm	Sensor 7 120 cm	Sensor 8 150 cm	Sensor 9 180 cm
Viga Benkelman Raio = 10,8 cm Carga = 8,2 ton	20	18	16	14	12	8	6	5	5

Deflexões esperadas (0,01 mm) no topo da camada: SUBLEITO - Solo Fino NA

Equipamento	Sensor 1 0 cm	Sensor 2 20 cm	Sensor 3 30 cm	Sensor 4 45 cm	Sensor 5 60 cm	Sensor 6 90 cm	Sensor 7 120 cm	Sensor 8 150 cm	Sensor 9 180 cm
Viga Benkelman Raio = 10,8 cm Carga = 8,2 ton	38	24	18	13	10	7	6	5	4

ANEXO F – Dimensionamento da PR-280

Dimensionamento do pavimento

Empresa: **UTFPR**

Nome do Projeto: **PR-280**

Responsável pelo projeto: **Julia Maria Maniezzi Hespanhol**

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

Tipo de via: **Sistema Arterial Primário**

Nível de confiabilidade: **85%**

Período de projeto: **10** anos.

Análise realizada em **01/06/2023 às 21:00:40** no modo: **Pavimento Novo (Nível A)**

Área trincada prevista no pavimento no fim do período: **28,8%**

>>Atenção: o programa não calcula a Área Trincada proveniente da reflexão de trincas da base estabilizada.

Afundamento de Trilha de Roda previsto no pavimento no fim do período: **3,5mm**

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

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

Estrutura do pavimento

Cam	Material	Espessura (cm)	Módulo de Resiliência	Coef de Poisson
1	CONCRETO ASFÁLTICO MODIFICADO RJ CAPFLEX 65/90 SBS PG 70-22	11,7	Resiliente Linear MR = 3184 MPa	0,30
2	CONCRETO ASFÁLTICO MODIFICADO RJ CAPFLEX 65/90 SBS PG 70-22	5,0	Resiliente Linear MR = 3184 MPa	0,30
3	BRITA GRADUADA TRATADA COM CIMENTO (BGTC) Balbo, 1993 c: 80 kg/m ³	15,0	Sigmoidal Ei (MPa) = 7000 (1º mês) Ef (MPa) = 6511 (fim período)	0,25
4	MATERIAL GRANULAR Brita Graduada - Gnaisse C4	15,0	Resiliente Linear MR = 311 MPa	0,35
5	SUBLEITO Solo Fino NA	SL	Resiliente Não Linear MR = 236 MPa (1º mês) k1 = 784,88 k2 = 0,340 k3 = 0,000 k4 = 0,000	0,45

Materiais

1 - CONCRETO ASFÁLTICO MODIFICADO: RJ CAPFLEX 65/90 SBS PG 70-22

Propriedades	Modelos
Tipo de CAP = CAPFLEX 65-90 SBS PG 70-22 Aditivo Modificador = Polímero SBS Massa específica (g/cm ³) = 2,4 Resistência à tração (MPa) = 1,28 Faixa Granulométrica = Faixa B DNIT Norma ou Especificação = DNIT ES 385	Ensaio de Fadiga -Modelo: $k_1 \cdot (e^t)^{k_2}$ -Coeficiente de Regressão (k1): ≥ 3,0e-11 -Coeficiente de Regressão (k2): ≥ -3,535 -Classe de Fadiga: ≥ 2 -FFM (100μ a 250μ): ≥ 1,16 Flow Number Mínimo - Condição de Tráfego Normal: ≥ 646 ciclos - Condição de Tráfego Severa: ≥ 1668 ciclos

2 - CONCRETO ASFÁLTICO MODIFICADO: RJ CAPFLEX 65/90 SBS PG 70-22

Propriedades	Modelos
Tipo de CAP = CAPFLEX 65-90 SBS PG 70-22 Aditivo Modificador = Polímero SBS Massa específica (g/cm ³) = 2,4 Resistência à tração (MPa) = 1,28 Faixa Granulométrica = Faixa B DNIT Norma ou Especificação = DNIT ES 385	Ensaio de Fadiga -Modelo: $k_1 \cdot (e^t)^{k_2}$ -Coeficiente de Regressão (k1): ≥ 3,0e-11 -Coeficiente de Regressão (k2): ≥ -3,535 -Classe de Fadiga: ≥ 2 -FFM (100μ a 250μ): ≥ 1,16 Flow Number Mínimo - Condição de Tráfego Normal: ≥ 646 ciclos - Condição de Tráfego Severa: ≥ 1668 ciclos

3 - BRITA GRADUADA TRATADA COM CIMENTO (BGTC): Balbo, 1993 c: 80 kg/m³

Propriedades	Modelos
Descrição do Material = Estudo Balbo (1993) Teor ótimo de cimento = 80,0 Resistência à tração (MPa) = 1,25 Massa específica (g/cm ³) = 2,230 Umidade Ótima (%) = 4,48 Energia Compactação = Modificada Norma ou Especificação = -	

4 - MATERIAL GRANULAR: Brita Graduada - Gnaisse C4

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

5 - SUBLEITO: Solo Fino NA

Propriedades

Descrição do Material = Areia Fina de Campo Azul - MG
Grupo MCT = NA
MCT - Coeficiente $c' = 0,25$
MCT - Índice $e' = 1,67$
Massa específica (g/cm^3) = 1,820
Umidade Ótima (%) = 10,0
Energia Compactação = Internormal
Norma ou Especificação = DNIT ES 137

Modelos

Ensaio de Deformação Permanente
Modelo: $ep = psi1.(s3^{psi2}).(sd^{psi3}).(N^{psi4})$
Coeficiente de Regressão ($k1$ ou $psi1$): **0,097**
Coeficiente de Regressão ($k2$ ou $psi2$): **-1,600**
Coeficiente de Regressão ($k3$ ou $psi3$): **1,900**
Coeficiente de Regressão ($k4$ ou $psi4$): **0,063**

Definição do tráfego

Volume Médio Diário no ano de abertura do tráfego: VMD (1º ano) = **1009**

Fator de veículo no ano de abertura do tráfego: FV = **15,40**

Número de passagens anual do eixo padrão (1º ano): **5,67e+06**

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

Número de passagens anual do eixo padrão na faixa de projeto: **5,67e+06**

Taxa de crescimento do tráfego: **3,4%**

Número Equivalente total de passagens do eixo padrão na faixa de projeto: N Eq = **6,62e+07**

Eixo	Tipo	FE	Carga (ton)	FC	FVi
1	Eixo Simples	100%	6,00	0,278	0,278
2	Eixo simples de roda dupla	88%	10,00	3,289	2,895
3	Dois eixos duplos em tandem	100%	17,00	8,549	8,549
4	Três eixos duplos em tandem	23%	25,50	9,300	2,139
5	Eixo Simples	1%	6,00	0,278	0,003
6	Dois eixos duplos em tandem	18%	17,00	8,549	1,539

Evolução dos danos no pavimento

Mês	N Equiv	Área Trincada	ATR (mm)
1	4,653e+05	1,14%	2,5
6	2,811e+06	2,25%	2,8
12	5,670e+06	3,13%	2,9
18	8,577e+06	3,89%	3,0
24	1,153e+07	4,65%	3,1
30	1,454e+07	5,43%	3,1
36	1,759e+07	6,26%	3,2
42	2,070e+07	7,14%	3,2
48	2,386e+07	8,09%	3,3
54	2,708e+07	9,12%	3,3
60	3,034e+07	10,25%	3,3
66	3,367e+07	11,48%	3,3
72	3,705e+07	12,82%	3,4
78	4,048e+07	14,29%	3,4

Mês	N Equiv	Área Trincada	ATR (mm)
84	4,398e+07	15,89%	3,4
90	4,753e+07	17,64%	3,4
96	5,114e+07	19,54%	3,4
102	5,481e+07	21,60%	3,5
108	5,855e+07	23,84%	3,5
114	6,235e+07	26,24%	3,5
120	6,621e+07	28,83%	3,5

Análise de Afundamento de Trilha de Roda

Cam	Material	Afundamento de Trilha de Roda (mm)
1	CONCRETO ASFÁLTICO MODIFICADO	0,00
2	CONCRETO ASFÁLTICO MODIFICADO	0,00
3	BRITA GRADUADA TRATADA COM CIMENTO (BGTC)	0,00
4	MATERIAL GRANULAR	0,71
5	SUBLEITO	2,80
Afundamento de Trilha de Roda (mm)		3,5

Controle por Deflexões

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

Deflexões esperadas (0,01 mm) no topo da camada: CONCRETO ASFÁLTICO MODIFICADO - RJ CAPFLEX 65/90 SBS PG 70-22

Equipamento	Sensor 1 0 cm	Sensor 2 20 cm	Sensor 3 30 cm	Sensor 4 45 cm	Sensor 5 60 cm	Sensor 6 90 cm	Sensor 7 120 cm	Sensor 8 150 cm	Sensor 9 180 cm
Viga Benkelman Raio = 10,8 cm Carga = 8,2 ton	21	18	16	14	11	8	6	5	4
FWD Raio = 15,0 cm Carga = 4,0 ton	21	17	14	12	9	6	4	3	2

Deflexões esperadas (0,01 mm) no topo da camada: CONCRETO ASFÁLTICO MODIFICADO - RJ CAPFLEX 65/90 SBS PG 70-22

Equipamento	Sensor 1 0 cm	Sensor 2 20 cm	Sensor 3 30 cm	Sensor 4 45 cm	Sensor 5 60 cm	Sensor 6 90 cm	Sensor 7 120 cm	Sensor 8 150 cm	Sensor 9 180 cm
Viga Benkelman Raio = 10,8 cm Carga = 8,2 ton	23	20	18	14	11	8	6	5	4

Deflexões esperadas (0,01 mm) no topo da camada: BRITA GRADUADA TRATADA COM CIMENTO (BGTC) - Balbo, 1993 c: 80 kg/m³

Equipamento	Sensor 1 0 cm	Sensor 2 20 cm	Sensor 3 30 cm	Sensor 4 45 cm	Sensor 5 60 cm	Sensor 6 90 cm	Sensor 7 120 cm	Sensor 8 150 cm	Sensor 9 180 cm
Viga Benkelman Raio = 10,8 cm Carga = 8,2 ton	23	20	18	14	12	8	6	5	4

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

Equipamento	Sensor 1 0 cm	Sensor 2 20 cm	Sensor 3 30 cm	Sensor 4 45 cm	Sensor 5 60 cm	Sensor 6 90 cm	Sensor 7 120 cm	Sensor 8 150 cm	Sensor 9 180 cm
Viga Benkelman Raio = 10,8 cm Carga = 8,2 ton	38	23	17	12	9	7	6	5	4

Deflexões esperadas (0,01 mm) no topo da camada: SUBLEITO - Solo Fino NA

Equipamento	Sensor 1 0 cm	Sensor 2 20 cm	Sensor 3 30 cm	Sensor 4 45 cm	Sensor 5 60 cm	Sensor 6 90 cm	Sensor 7 120 cm	Sensor 8 150 cm	Sensor 9 180 cm
Viga Benkelman Raio = 10,8 cm Carga = 8,2 ton	38	24	18	13	10	7	6	5	4