



GUSTAVO PEREIRA COSTA

LARA MARQUES ELIAS

**ANÁLISE DE ESTRUTURAS DIMENSIONADAS PELO
MÉTODO DNER/DNIT NO *SOFTWARE* MEDINA**

LAVRAS - MG

2023

**GUSTAVO PEREIRA COSTA
LARA MARQUES ELIAS**

**ANÁLISE DE ESTRUTURAS DIMENSIONADAS PELO MÉTODO DNER/DNIT NO
SOFTWARE MEDINA**

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

Prof. Dr. Paulo Roberto Borges
Orientador

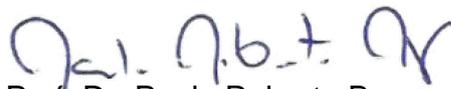
**LAVRAS - MG
2023**

**GUSTAVO PEREIRA COSTA
LARA MARQUES ELIAS**

**ANÁLISE DE ESTRUTURAS DIMENSIONADAS PELO MÉTODO DNER/DNIT NO
SOFTWARE MEDINA**

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

APROVADA em 28 de julho de 2023.



Prof. Dr. Paulo Roberto Borges
Orientador

**LAVRAS - MG
2023**

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo fazer um estudo sobre os métodos de dimensionamento de estruturas de pavimentos flexíveis, uma vez que o sistema rodoviário é o mais utilizado no Brasil e suas estruturas apresentaram pioras nos últimos anos; em 2022, 66% das rodovias foram classificadas como regular, ruim ou péssima. Vê-se então a necessidade de cada vez mais buscar alternativas para garantir o dimensionamento das suas estruturas de maneira eficaz, garantindo segurança e conforto para os usuários. Atualmente, o Método do DNER/DNIT (Departamento Nacional de Estradas de Rodagem/Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes) é o mais empregado, ele foi desenvolvido no ano de 1981 e se trata de um método empírico, baseado na experiência e na observação; o método utiliza dos valores dos ensaios do CBR (*California Bearing Ratio*) de cada material da estrutura e do valor do número de repetição de um eixo padrão de 80kN. Foi desenvolvida uma alternativa por especialistas na área de pavimentação que é o Método MeDiNa, um método mecanístico-empírica que envolve o uso de parâmetros como Módulo de Resiliência e deformação permanente para dimensionar as estruturas. No presente trabalho foi realizado o dimensionamento das estruturas pelo Método do DNER/DNIT e então, feita uma análise do dimensionamento no *Software* MeDiNa. Com o intuito de garantir uma maior precisão dos resultados, buscou-se materiais que continham resultados dos ensaios de laboratórios necessários para ambos os métodos, elaborando estruturas com camadas selecionadas. Conforme dimensionamento recomendado pelo DNER/DNIT, utilizou-se os resultados previamente conhecidos dos ensaios do CBR de cada solo constituinte das estruturas a fim de encontrar as alturas relativas de cada camada que suportariam o tráfego adotado como referência. Com as estruturas dimensionadas e com os parâmetros necessários, avaliou-se as mesmas no *Software* MeDiNa para conferir a durabilidade e tendências de patologias. Os resultados demonstraram que, após as análises, as estruturas dimensionadas pelo Método do DNER/DNIT não teriam uma vida útil longa e ficariam comprometidas diante dos esforços gerados pelo tráfego de acordo com os parâmetros do *Software*, além de apresentarem patologias com altos valores de incidência, como Afundamento de Trilha de Roda e Área Trincada.

Palavra-chave: Pavimentação. Método do DNER/DNIT. *Software* MeDiNa.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Representação dos Pavimentos.....	8
Figura 2 -	Camadas do pavimento flexível.....	9
Figura 3 -	Ilustração do Ensaio CBR.....	12
Figura 4 -	Representação gráfica das espessuras mínimas e alturas.....	14
Figura 5 -	Ábaco de espessuras mínimas.....	15
Figura 6 -	Ilustração do Ensaio Triaxial do tipo Módulo de Resiliência.....	17
Figura 7 -	Representação dos parâmetros e caracterização do solo no Software.....	18
Figura 8 -	Grandezas e suas respectivas unidades.....	18
Figura 9 -	Representação dos Dados do Tráfego no <i>Software</i> MeDiNa.....	19
Figura 10 -	Representação das alturas no ábaco.....	24
Figura 11 -	Descrição do material da base 1.....	26
Figura 12 -	Descrição do material da sub-base 1.....	27
Figura 13 -	Descrição do material do reforço do sub-leito 1.....	27
Figura 14 -	Descrição do material do sub-leito 1.....	28
Figura 15 -	Descrição do eixo padrão rodoviário.....	28
Figura 16 -	Dados do tráfego.....	29
Figura 17 -	Descrição do material do revestimento asfáltico.....	29
Figura 18 -	Dados finais da estrutura 1 no <i>Software</i> MeDiNa.....	30
Figura 19 -	Dados finais da estrutura 2 no <i>Software</i> MeDiNa.....	30
Figura 20 -	Dados finais da estrutura 3 no <i>Software</i> MeDiNa.....	31
Figura 21 -	Dados finais da estrutura 4 no <i>Software</i> MeDiNa.....	31
Figura 22 -	Esboço da estrutura 1.....	32
Figura 23 -	Dados de cálculo da estrutura 1 no <i>Software</i>	33
Figura 24 -	Resumo das análises do <i>Software</i> da estrutura 1.....	34
Figura 25 -	Evolução dos danos ao decorrer dos meses da estrutura 1.....	35
Figura 26 -	Análise de ATR da estrutura 4.....	35
Figura 27 -	Esboço da estrutura 2.....	36
Figura 28 -	Dados de cálculo da estrutura 2 no <i>Software</i>	37
Figura 29 -	Resumo das análises do <i>Software</i> da estrutura 2.....	37
Figura 30 -	Evolução dos danos ao decorrer dos meses da estrutura 2.....	38
Figura 31 -	Análise de ATR da estrutura 2.....	38
Figura 32 -	Esboço da estrutura 3.....	39
Figura 33 -	Dados de cálculo da estrutura 3 no <i>Software</i>	40
Figura 34 -	Resumo das análises do <i>Software</i> da estrutura 3.....	40
Figura 35 -	Evolução dos danos ao decorrer dos meses da estrutura 3.....	41
Figura 36 -	Análise de ATR da estrutura 3.....	41
Figura 37 -	Esboço da estrutura 4.....	42
Figura 38 -	Dados de cálculo da estrutura 4 no <i>Software</i>	43
Figura 39 -	Resumo das análises do <i>Software</i> da estrutura 4.....	43
Figura 40 -	Evolução dos danos ao decorrer dos meses da estrutura 4.....	44
Figura 41 -	Análise de ATR da estrutura 4.....	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Granulometria para base granular.....	13
Tabela 2 -	Espessura mínima com base no N.....	13
Tabela 3 -	Coefficiente de equivalência estrutural.....	15
Tabela 4 -	Valores recomendados de coeficiente de Poisson.....	17
Tabela 5 -	Características da estrutura 1.....	21
Tabela 6 -	Características da estrutura 2.....	22
Tabela 7 -	Características da estrutura 3.....	22
Tabela 8 -	Características da estrutura 4.....	23
Tabela 9 -	Valores de CBR da estrutura 1.....	23
Tabela 10 -	Resumos das análises.....	45

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	7
2	REFERENCIAL TEÓRICO	8
2.1	Pavimento	8
2.2	Camadas do Pavimento Flexível	9
2.3	Métodos de dimensionamento	10
2.3.1	Método do DNER/DNIT	10
2.3.2	Método MeDiNa	15
3	MATERIAL E MÉTODOS	21
3.1	Método do DNER/DNIT	23
3.2	<i>Software</i> MeDiNa	26
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	32
4.1	Estrutura 1	32
4.2	Estrutura 2	36
4.3	Estrutura 3	38
4.4	Estrutura 4	41
5	ANÁLISE DOS RESULTADOS	45
6	CONCLUSÃO	47
	REFERÊNCIAS	48

1 INTRODUÇÃO

O sistema rodoviário tornou-se o principal meio de deslocamento no Brasil desde o seu ápice na década de 1950, durante o governo de Juscelino Kubitschek, o qual visava integrar as regiões brasileiras e também incentivar as indústrias automobilísticas. Nesse contexto, a evolução das rodovias depende de novos métodos e processos a fim de garantir maior resistência e durabilidade dos pavimentos, além de qualidade no transporte, seja ele de cargas ou pessoas.

Em se tratando da qualidade das rodovias brasileiras, de acordo com uma pesquisa da Confederação Nacional do Transporte (CNT) e o SEST SENAT, foi constatado que o sistema rodoviário piorou no ano de 2022 comparado ao ano de 2021, sendo que o percentual de quilômetros classificados como regulares, ruins ou péssimos foi de 61,8% para 66,0%. O estudo avaliou cerca de 110.333 quilômetros, considerando 100% da malha rodoviária pavimentada federal e as principais rodovias estaduais.

Atualmente, a maior parte dos pavimentos flexíveis do Brasil tiveram seu dimensionamento baseado no tradicional Método do DNER (Departamento Nacional de Estradas de Rodagem), atualmente denominado DNIT (Departamento Nacional de Infraestrutura e Trânsito). Diante ao cenário crítico das rodovias do país, visando um melhor dimensionamento dos pavimentos e analisando com mais precisão a influência dos tráfego ao longo dos anos, o novo método MeDiNa (Método de Dimensionamento Nacional), nomeado em homenagem ao professor Jacques de Medina, referência no estudo da Mecânica dos pavimentos, tem ganhado espaço no mercado, uma vez que possibilita um dimensionamento com base em fatores como tráfego e resistência dos materiais utilizados e possibilitando analisar suas patologias como afundamento de trilha de roda e área trincada durante sua vida útil de projeto.

Assim, neste trabalho, tem-se como objetivo principal fazer um dimensionamento através do Método do DNER/DNIT e avaliar sua performance através do *Software* Medina, avaliando diferentes montagens de estruturas de pavimentos, baseados em artigos e estudos de materiais com potencial para utilização na construção das rodovias e analisando seu desempenho durante o período de projeto estimado.

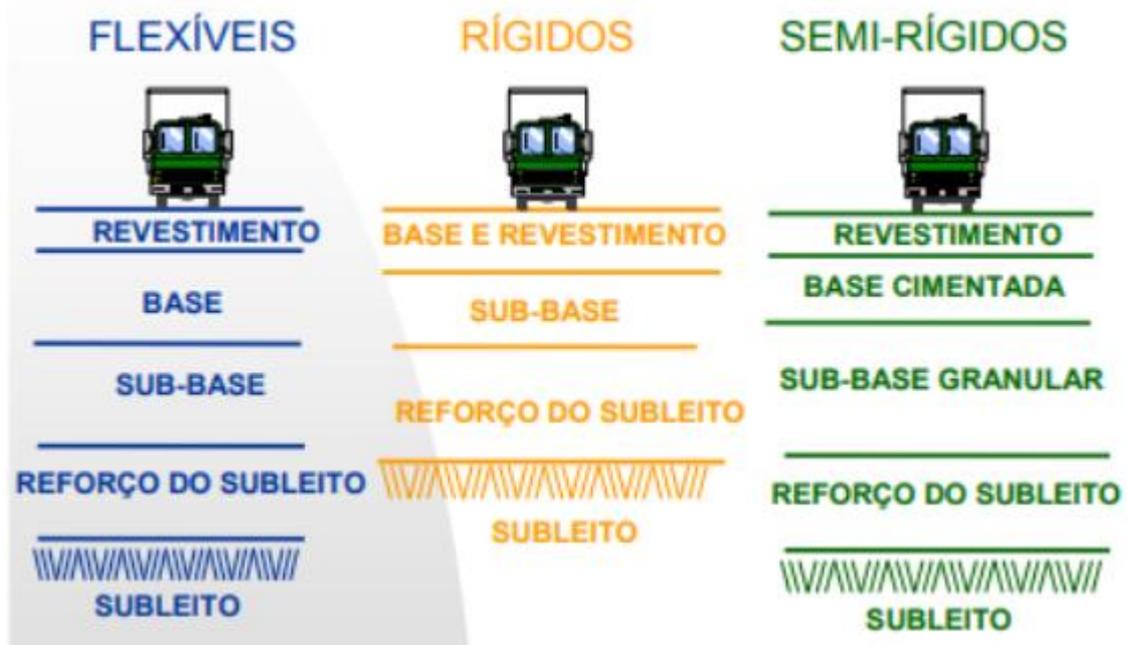
2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Pavimento

Segundo Bernucci et al. (2008), o pavimento é definido como uma estrutura composta por camadas de finitas alturas, com o intuito de resistir aos esforços advindos da movimentação de veículos e das ações intempéries às quais o pavimento pode estar sujeito ao longo de determinado período.

De modo geral, o Manual de Dimensionamento do DNIT (2006) classifica o pavimento em três grupos: flexível, semirrígido e rígido, ilustrados na Figura 1. O pavimento flexível é caracterizado por camadas geralmente granulares e que sofrem maior deformabilidade, dessa forma os esforços são distribuídos em parcelas aproximadamente equivalentes entre as camadas. O pavimento rígido caracteriza-se pelo uso de placas de concreto, em que o revestimento absorve uma grande parcela das tensões provenientes do carregamento aplicado. Por fim, o pavimento semirrígido é o intermediário entre os dois outros grupos anteriores, em que seu revestimento é constituído por materiais betuminosos e suas camadas inferiores são uma mistura de solo com ligantes hidráulicos, deixando o conjunto com uma menor deformabilidade (MAIA, 2012). O material de estudo deste trabalho, será o pavimento flexível.

Figura 1 - Representação dos Pavimentos.

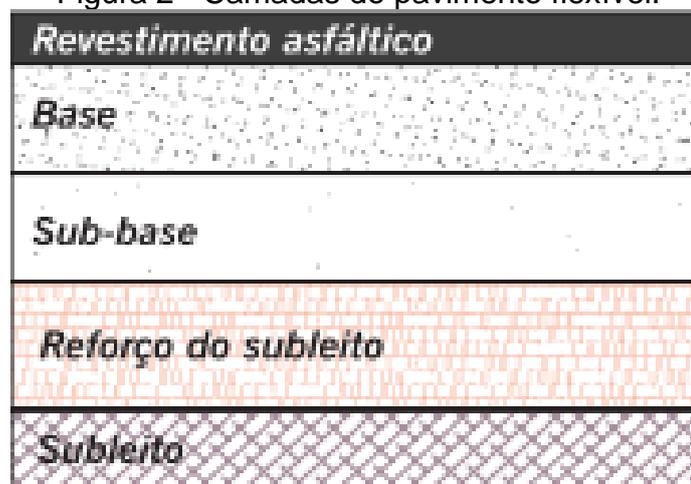


Fonte: Pavimento flexível, rígido e semi-rígido. Masterplate.

2.2 Camadas do Pavimento Flexível

A estrutura de um pavimento flexível é, geralmente, dividida em cinco camadas: subleito, reforço do subleito, sub-base, base e revestimento. Conforme Balbo (2007), cada uma delas possuem funções específicas, que em seu conjunto proporcionam ao tráfego as condições necessárias de conforto e segurança, em quaisquer condições climáticas. Além disso, Senço (2007) pondera a necessidade de garantir uma maior qualidade das camadas superiores em relação às demais, com base na diminuição da pressão em razão da profundidade. A Figura 2 representa o pavimento flexível e sua divisão de camadas.

Figura 2 - Camadas do pavimento flexível.



Fonte: Bernucci (2008)

Os conceitos de cada uma das camadas que compõem os pavimentos flexíveis são:

- **Revestimento asfáltico:** responsável por receber o primeiro contato entre os veículos e o pavimento, estando sua qualidade relacionada ao conforto e segurança dos usuários, além de garantir a proteção contra os agentes climáticos. Os esforços são aplicados diretamente no revestimento, sendo ele responsável por transmitir as tensões para as camadas inferiores.
- **Base:** É a camada construída logo abaixo do revestimento. Tem a função de receber uma maior tensão e distribuir para as seguintes camadas, por isso, necessita de materiais de maior resistência e qualidade.
- **Sub-base:** É a camada intermediária e que tem a função de complementar a base. Sua utilização é geralmente baseada em razões econômicas, a fim de diminuir a espessura da base, por utilizar materiais mais baratos, ou por

razões técnicas, quando há necessidade de correção do reforço do subleito ou do próprio subleito.

- Reforço do subleito: Com funções semelhantes às da sub-base, é uma camada adicional ao subleito, trazendo o primeiro reforço ao solo. É caracterizado por ter uma importância econômica e de suporte.
- Subleito: É o solo propriamente dito. A camada deve ser moldada de acordo com o projeto geométrico e preparada para receber as camadas superiores.

2.3 Métodos de dimensionamento

Os métodos de dimensionamento dos pavimentos flexíveis podem ser caracterizados de duas formas: método empírico e mecanístico-empírico.

Como a definição da palavra empírico indica, o método empírico é baseado na experiência e na observação. Desta forma, ele é feito com base na experiência acumulada do profissional e observação do desempenho dos pavimentos de acordo com os materiais empregados. O método DNIT é o principal e mais adotado método empírico no Brasil, ele foi elaborado segundo observações de deformação do subleito, suas principais vantagens são a facilidade de emprego e não necessidade de ensaio laboratorial complexo, utilizado apenas o ensaio CBR (*California Bearing Ratio*) ou ensaio ISC (Índice de suporte Califórnia), sendo assim, rápido de desenvolver e com baixo custo.

Já o método mecanístico-empírico, segundo Bernucci (1995), é aquele que analisa o pavimento como uma estrutura de múltiplas camadas, que ao ser solicitada por uma carga, sofre deslocamento. Desta forma, o método analítico foi feito para poder calcular a tensão e deformação em qualquer ponto da estrutura, através das características dos materiais que compõem o pavimento. O método MeDiNa possibilita que, a partir dos resultados de tensão e deformação, sejam feitas alterações nas alturas das camadas ou na escolha do material, garantindo maior confiabilidade e resistência para a estrutura.

2.3.1 Método do DNER/DNIT

Concebido pelo professor Murilo Lopes de Souza, do Instituto Militar de Engenharia e amplamente utilizado no Brasil, o método do DNER/DNIT (1981) trabalha com a simulação do número de repetições de um eixo padrão de 80kN e CBR

ou ensaio ISC (Índice de suporte Califórnia), obtido em laboratório, das camadas do pavimento a ser dimensionado.

O ensaio do Índice de Suporte Califórnia, mais conhecido como Ensaio CBR, é usado para determinar a resistência do solo; muito usado na pavimentação, uma vez que o dimensionamento dos pavimentos pelo método DNER/DNIT é calculado diretamente com o valor do CBR do solo de cada camada. O desenvolvimento do ensaio foi realizado no fim da década de 1920 devido estudos sobre rupturas em pavimentos flexíveis. O engenheiro Porter (1942), criador do ensaio CBR, observou que o deslocamento do solo do subleito e a composição diferencial das camadas seria o principal motivo da ruptura.

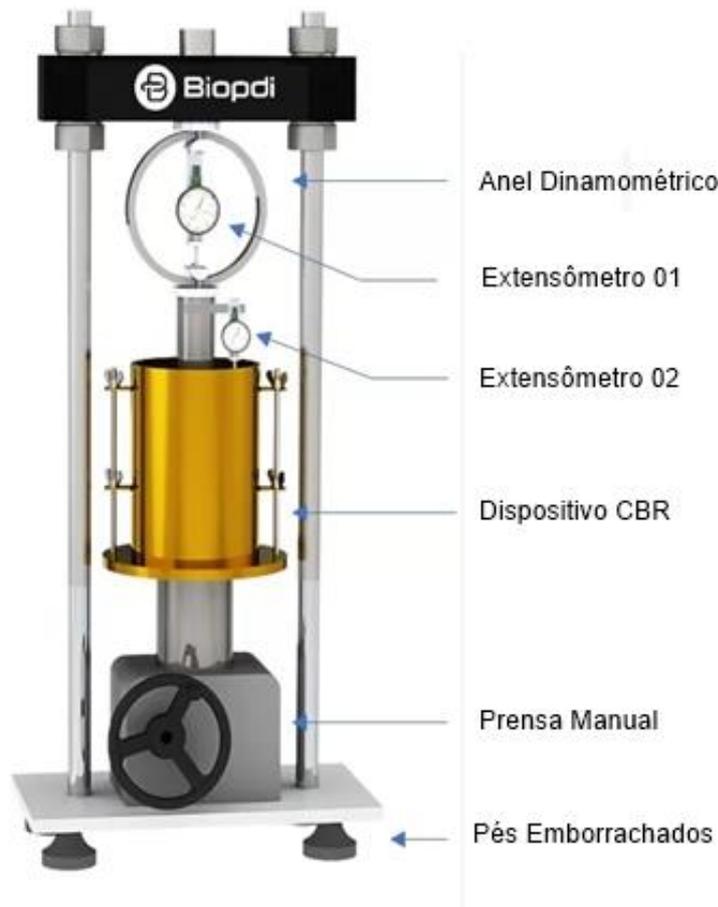
O ensaio CBR é realizado com a aplicação de força em um corpo de prova do solo a ser estudado e na brita graduada, através de um pistão padronizado com área de 20 cm². O resultado é obtido através da relação entre as duas pressões necessárias para penetração do cilindro. Por exemplo, quando o solo possui CBR = 15% significa que o solo em estudo apresenta 15% da resistência à penetração da brita graduada.

Atualmente o ensaio é realizado em três etapas: compactação do corpo de prova, expansão e resistência à penetração. A primeira etapa é feita a compactação através do golpeamento do corpo de prova, geralmente são utilizados no mínimo 5 corpos de prova com diferentes teores de umidade. Através da compactação é possível determinar o gráfico de Densidade x Umidade (%) do solo.

Após a compactação, o ensaio também permite conhecer a expansibilidade do solo. Uma de suas etapas contempla a imersão do solo em água por, no mínimo, 4 dias. A absorção da água permite ver o deslocamento do solo, realizando leituras a cada 24 horas.

Por fim, a resistência do solo é medida, como dito anteriormente, pela relação entre a penetração de um pistão padronizado no solo de estudo e na brita graduada. Com a ajuda de um anel dinamométrico na prensa, pode-se estimar os valores das pressões de penetração. A Figura 3 ilustra o aparelho utilizado para a execução do Ensaio CBR.

Figura 3 - Ilustração do Ensaio CBR.



Fonte: Ensaio CBR ou Índice de Suporte Califórnia. Biopdi.

Para a seleção dos materiais constituintes das camadas, algumas considerações devem ser analisadas a fim de garantir uma maior qualidade do pavimento a ser dimensionado. Com relação ao ensaio de CBR, deve-se observar algumas exigências para atendimento do Método do DNIT/DNER exigidas pelo DNIT (2006):

Para o subleito: expansão menor ou igual a 2% e um CBR. maior ou igual a 2%.

Para o reforço do subleito: expansão menor ou igual a 1% e um CBR. maior que o do subleito.

Para a sub-base: Expansão menor ou igual a 1%, CBR. maior ou igual a 20% e I.G = 0. Sendo I.G. o Índice de Grupo que define a capacidade de suporte do terro.

Para a base: expansão menor ou igual a 0,5%, CBR. maior ou igual a 80%, Limite de liquidez (LL) menor ou igual a 25% e índice de plasticidade (IP) menor ou

igual a 6%. Materiais que extrapolam os valores de LL e IP deve-se garantir que o equivalente de areia seja superior a 30.

Os materiais para base granular devem estar entre os limites das faixas granulométricas, conforme a Tabela 1:

Tabela 1 - Granulometria para base granular.

Tipos	Para $N > 5 \times 10^6$			Para $N < 5 \times 10^6$			Tolerâncias da faixa de projeto
	A	B	C	D	E	F	
	% em peso passando						
2"	100	100	-	-	-	-	±7
1"	-	75-90	100	100	100	100	±7
3/8"	30-65	40-75	50-85	60-100	-	-	±7
Nº 4	25-55	30-60	35-65	50-85	55-100	10-100	±5
Nº 10	15-40	20-45	25-50	40-70	40-100	55-100	±5
Nº 40	8-20	15-30	15-30	25-45	20-50	30-70	±2
Nº 200	2-8	5-15	5-15	10-25	6-20	8-25	±2

Fonte: DNIT (2006).

Para a identificação da altura mínima da camada de revestimento do pavimento, o elemento a ser analisado é o número N, que representa o número de repetições do eixo-padrão de 8,2tf ou 80kN, conforme a Tabela 2:

Tabela 2 - Espessura mínima com base no N.

N	Espessura Mínima de Revestimento Betuminoso
$N \leq 10^6$	Tratamentos superficiais betuminosos
$10^6 < N \leq 10^7$	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: DNIT (2006).

O dimensionamento do pavimento flexível é realizado pela resolução de três inequações, sendo elas:

$$R \times K_R + B \times K_B \geq H_{20}$$

$$R \times K_R + B \times K_B + h_{20} \times K_S \geq H_n$$

$$R \times K_R + B \times K_B + h_{20} \times K_S + h_n \times K_{Ref} \geq H_m$$

Sendo que,

$K_R =$ Coeficiente estrutural do revestimento;

K_B = Coeficiente estrutural da base;

K_S = Coeficiente estrutural da sub – base;

K_{Ref} = Coeficiente estrutural do reforço do subleito;

R = Altura do revestimento;

B = Altura da Base;

h_{20} = Altura da sub – base;

h_n = Altura do reforço do subleito;

H_{20} = soma da espessura da camada de revestimento e de base

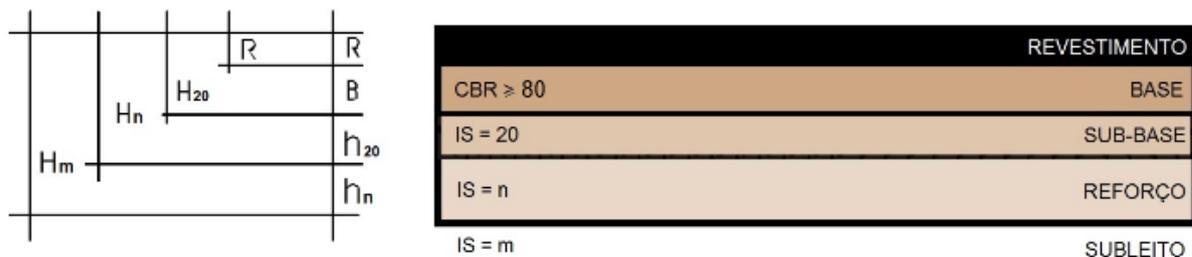
H_n = soma da espessura da camada de revestimento, base e sub – base;

H_m = espessura total do pavimento;

O DNER (1981) sugere que para valores de $N > 10^7$ o valor de H_{20} seja majorado em 1,2 na primeira inequação.

A Figura 4 é uma representação gráfica dos conceitos adotados anteriormente.

Figura 4 - Representação gráfica das espessuras mínimas e alturas.

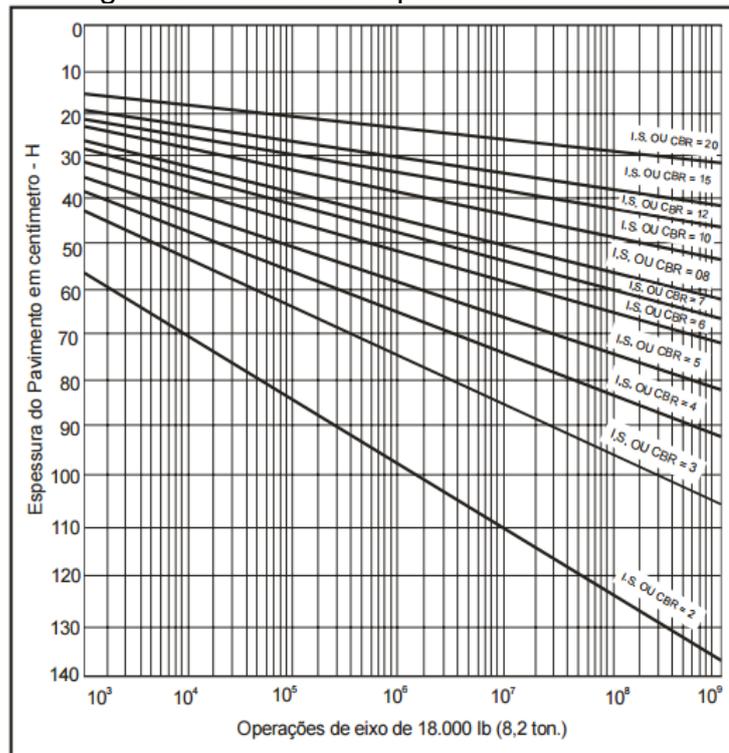


Fonte: Adaptado de Guia da engenharia (2019).

Além disso, deve-se levar em consideração que a espessura mínima exigido pelo método das camadas granulares compactadas é de 15 cm, segundo o DNIT (2006).

Para a resolução das inequações, devem ser considerados como H_{20} , H_n e H_m , os valores extraídos utilizando o ábaco, representado na Figura 5, com base no valor do CBR da camada anterior.

Figura 5 - Ábaco de espessuras mínimas.



Fonte: DNIT (2006).

Para identificar o valor a ser utilizado para o coeficiente estrutural (K) de cada camada, conforme a Tabela 3:

Tabela 3 - Coeficiente de equivalência estrutural.

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

Fonte: DNIT (2006).

2.3.2 Método MeDiNa

Desenvolvido entre os anos de 2015 e 2018, o *Software MeDiNa* é uma ferramenta que possibilita o dimensionamento mecanístico-empírico e a verificação de uma estrutura de pavimento asfáltico. Sua criação foi fruto de diversos estudos com o intuito de possibilitar uma análise mais completa sobre a durabilidade de pavimentos.

O programa passa por atualizações periodicamente com o intuito de realizar correções.

Atualmente, o método ainda não é amplamente utilizado, uma vez que para garantir um projeto confiável, é necessário que todos os dados inseridos no programa sejam determinados por meio dos ensaios, no entanto, os ensaios que envolvem módulo de resiliência e deformação permanente, dois parâmetros necessários no dimensionamento, são caros e inviabilizam a utilização. Para os materiais produzidos em usinas, como as misturas asfálticas, o programa oferece uma base com dados.

Segundo matéria do site Suporte Solos (2021), o Módulo de Resiliência é a relação entre a tensão aplicada e a deformação sofrida pelo corpo de prova. Desta forma, o Ensaio Triaxial do tipo Módulo de Resiliência procura aproximar os corpos de prova às condições de tráfego encontradas em uma rodovia, de maneira que ele reproduza os estados de tensão atuantes causados pela passagem e movimentação dos veículos.

O ensaio é dividido em duas fases, a primeira condiciona e caracteriza o solo de forma que ele não vá sofrer deformação plástica, a partir da aplicação de forças com o auxílio de um cilindro. A segunda fase consiste na aplicação de cargas no corpo de prova de 0,1 segundos, tendo 0,9 segundos de repouso posteriormente. Segundo o DNIT 134/2018, a frequência de aplicação de carga deve ser de 1 Hz, correspondente a 60 ciclos por minuto. Portanto, o Módulo de Resiliência é definido através da aplicação de 18 pares de tensões, onde cada par deve ter no mínimo 10 ciclos de tensão. Ao fim desta fase, o corpo de prova é pesado e levado a uma estufa por 48 horas. A Figura 6 ilustra o aparelho utilizado para a execução do Ensaio de Módulo de Resiliência.

Figura 6 - Ilustração do Ensaio Triaxial do tipo Módulo de Resiliência.



Fonte: Ensaio Triaxial - Modulo de Resiliência. Owntec.

Além dos valores de módulo de resiliência e os coeficientes da deformação permanente, dados como Coeficiente de Poisson, massa específica, umidade ótima, energia de compactação, entre outros, também são necessários serem apontados em casos de utilização de um novo solo.

A instrução para projetos de pavimentação do DER/SP (2006) faz a recomendação de alguns valores para o coeficiente de Poisson podem ser visualizados na Tabela 4:

Tabela 4 - Valores recomendados de coeficiente de Poisson.

Material	Intervalo de Valores de Coeficiente de Poisson	Valor Recomendado de Coeficiente de Poisson
Concreto de cimento Portland	0,10 – 0,20	0,15
Materiais estabilizados com cimento	0,15 – 0,30	0,20
Materiais asfálticos	0,15 – 0,45	0,30
Materiais granulares	0,30 – 0,40	0,35
Solos do subleito	0,30 – 0,50	0,40

Fonte: DER/SP (2006).

A Figura 7 ilustra a página de colocação dos dados do *Software* e os parâmetros necessários, encontrados em laboratório, para o cadastro de um solo e para garantir um bom dimensionamento:

Figura 7 - Representação dos parâmetros e caracterização do solo no Software.

Propriedades da Camada 2	
BASE DE DADOS	
Projeto	
Brita Graduada - Gnaisse C1	
Brita Graduada - Gnaisse C2	
Brita Graduada - Gnaisse C3	
Brita Graduada - Gnaisse C4	
Brita Graduada - Gnaisse C5	
Brita Graduada - Gnaisse C6	
Brita Graduada - Gnaisse C7	
Solo Brita - M3 (LG' s:1521)	
Solo Brita - M4 (NG' s:1494)	
Solo Brita - M5 (LG' s:1521)	
teste	
Solo brita (30%)	
Solo Natural	
Sub-base 1	
Base 1	
Sub-base 2	
Base 2	
MATERIAL GRANULAR	
Material	Brita Graduada - Gnaisse C5
Parâmetros	
Espessura (cm)	20,0
Coefficiente de Poisson	0,35
Contato	Não Aderido
Módulo (MPa)	
Modelo Constituinte	Resiliente Linear
Módulo (MPa)	381
Características	
Descrição do Material	Brita Graduada
Massa específica (g/cm³)	2,223
Umidade Ótima (%)	5,0
Energia Compactação	Modificada
Abrasão Los Angeles (%)	43,0
Norma ou Especificação	DNIT ES 141
Deformação Permanente	
Modelo:	$ep = psi1.(s3^{psi2}).(sd^{psi3}).(N^{psi4})$
Coefficiente de Regressão (k1 ou psi1):	0,0868
Coefficiente de Regressão (k2 ou psi2):	-0,2801
Coefficiente de Regressão (k3 ou psi3):	0,8929
Coefficiente de Regressão (k4 ou psi4):	0,0961

Fonte: Dos autores (2023).

Para a entrada dos dados, na Figura 8 é apresentado um resumo das unidades de grandezas que devem ser adotadas:

Figura 8 - Grandezas e suas respectivas unidades.

Grandeza	Unidade
Espessura e distâncias	cm
Raio do carregamento	cm
Deslocamentos	µm
Deformações específicas	m/m
Área de contato	cm²
Pressão de inflação e tensões	MPa
Carga de eixo ou de roda	ton

Fonte: DNIT (2020).

Outro parâmetro utilizado no dimensionamento é o número de repetições do eixo padrão, número N, sendo um valor trabalhado a fim de garantir a performance do pavimento ao longo dos anos de projeto.

Tipo de Via, volume médio diário (VDM), Fator de Veículos, porcentagem de veículos na faixa de projeto, taxa de crescimento e período de projeto também são parâmetros que devem ser adicionados ao projeto.

A Figura 9 ilustra os dados que devem ser inseridos para essa etapa do dimensionamento:

Figura 9 - Representação dos Dados do Tráfego no *Software* MeDiNa.

DADOS DO TRÁFEGO	
Tipo de Via:	Sistema Arterial Primário
VMD (1º ano):	1400
FV:	1,000
N anual (1º ano):	5,11e+05
% Veículos na faixa de projeto:	100
N Anual da faixa:	5,11e+05
Taxa de crescimento (%):	2,0
Período de projeto (anos):	10
N Total:	5,60e+06

Fonte: Dos autores (2023).

Segundo as considerações e hipóteses fundamentais pontuadas no Manual do MeDiNa, relacionada a solução de problemas de elasticidade linear em sistemas computacionais de multicamadas e contínuos, tem-se:

- 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.

O Software MeDiNa traz em seus resultados dois tipos de patologias importantes a serem analisados durante a vida útil dos pavimentos, realizando uma projeção da evolução dos danos no pavimento conforme os meses, sendo elas: as trincas e o afundamento de trilha de roda (ATR).

As trincas são fendas que se abrem no revestimento e podem se apresentar de quatro maneiras, como trincas transversais, trincas longitudinais, trincas em malha tipo “couro de jacaré” e trincas em malha tipo “bloco”. As trincas transversais e longitudinais são trincas isoladas que variam a direção e tamanho. Já as trincas em malha são interligadas, o tipo “couro de jacaré” tem tal denominação uma vez que as trincas não possuem sentido definido, lembrando o couro de animal; o tipo “bloco”, como o próprio nome indica, gera trincas em formatos de blocos, com direções definidas.

A falha do revestimento e criação das trincas estão diretamente ligadas à repetição dos movimentos do tráfego, além de ocorrerem devido ao subdimensionamento, má qualidade da estrutura ou de suas camadas.

O ATR é ocasionado pela deformação devido a pressão gerada pelo tráfego em uma rodovia, podendo estar diretamente relacionada com a qualidade dos materiais escolhidos para as camadas dos pavimentos e também a qualidade do subleito do local. Esse tipo de defeito reduz consideravelmente o conforto ao rolamento, a segurança dos usuários e aumenta os custos de recuperação das estradas, sendo um fator importante ao ser considerado para a aplicação das estruturas.

3 MATERIAL E MÉTODOS

Com o intuito de garantir resultados fiéis para o dimensionamento e a posterior análise pelo *Software*, buscou-se trabalhar com estudos que continham resultados dos dois ensaios principais, ensaio de CBR e módulo de resiliência, utilizados como base para o Método do DNER/DNIT e para o lançamento no *Software* MeDiNa, os quais foram apresentados anteriormente e serão detalhados seus cálculos e execuções a seguir. Os materiais de subleito, reforço do subleito e sub-base foram retirados de um relatório final da ANTT (Agência Nacional de Transportes Terrestres) realizado no ano de 2016 sobre o solo de diversos pontos da Rodovia Régis Bittencourt, enquanto as bases foram extraídas de um estudo em uma rodovia experimental apresentado em uma dissertação de mestrado de Camila Lima Maia em 2016.

Para a primeira etapa do trabalho, a montagem das camadas das estruturas foi baseada em garantir materiais que respeitassem os limites de CBR exigidos pelo método do DNER/DNIT e sendo escolhidos materiais para constituir quatro estruturas. Após as validações, todas as camadas granulares foram selecionadas e as tabelas 5, 6, 7 e 8 a seguir, resumem os dados das formações.

A Tabela 5 resume as características dos materiais da estrutura 1:

Tabela 5 - Características da estrutura 1.

Estrutura 1				
Propriedades	Subleito	Reforço do Subleito	Sub-base	Base 1
Material	Silte Argiloso Amarela	Cascalho Variegado	Não especificado	Não especificado
Descrição	km 482	km 405	km 431	-
Coeficiente de Poisson	0,40	0,35	0,35	0,35
Contato	Não Aderido	Não Aderido	Não Aderido	Não Aderido
Módulo de resiliência (MPa)	50,10	102,30	111,30	252,00
Massa específica (g/cm ³)	1,64	2,04	2,08	2,27
Umidade ótima (%)	18,10	10,50	7,90	8,50
Energia de compactação	Intermediária	Normal	Intermediária	-
Norma ou especificação	DNIT ES 139	DNIT ES 139	DNIT ES 139	DNIT ES 139
k1	48,00	589,00	864,00	630,50
k2	-0,01	0,41	0,48	0,39
k3	41,00	323,00	461,00	-0,30
k4	-0,08	0,35	0,33	0,00
CBR	2,00	7,00	32,00	82,00

Fonte: Dos autores (2023).

A Tabela 6 resume as características dos materiais da estrutura 2:

Tabela 6 - Características da estrutura 2.

Estrutura 2			
Propriedades	Subleito	Sub-base	Base 2
Material	Silte Argiloso Variegado	Não especificado	Não especificado
Descrição	km 456	km 402	-
Coeficiente de Poisson	0,40	0,35	0,35
Contato	Não Aderido	Não Aderido	Não Aderido
Módulo de resiliência (MPa)	60,60	109,40	382,00
Massa específica (g/cm ³)	1,63	2,11	2,13
Umidade ótima (%)	18,50	5,00	10,10
Energia de compactação	Normal	Intermediária	-
Norma ou especificação	DNIT ES 139	DNIT ES 139	DNIT ES 139
k1	75,00	1194,00	798,50
k2	0,05	0,56	0,48
k3	56,00	609,00	-0,42
k4	-0,06	0,41	0,00
CBR	5,00	47,00	81,00

Fonte: Dos autores (2023).

A Tabela 7 resume as características dos materiais da estrutura 3:

Tabela 7 - Características da estrutura 3.

Estrutura 3				
Propriedades	Subleito	Reforço do Subleito	Sub-base	Base 2
Material	Argila Siltosa Rosa	Argila Amarela	Cascalho	Não especificado
Descrição	km 434	km 460	km 414	-
Coeficiente de Poisson	0,40	0,35	0,35	0,35
Contato	Não Aderido	Não Aderido	Não Aderido	Não Aderido
Módulo de resiliência (MPa)	105,20	401,50	402,40	382,00
Massa específica (g/cm ³)	1,63	1,53	2,21	2,13
Umidade ótima (%)	20,50	23,80	6,20	10,10
Energia de compactação	Normal	Normal	Normal	-
Norma ou especificação	DNIT ES 139	DNIT ES 139	DNIT ES 139	DNIT ES 139
k1	28,00	54,00	596,00	798,50
k2	-0,31	-0,47	0,09	0,48
k3	31,00	68,00	535,00	-0,42
k4	-0,35	-0,49	0,05	0,00
CBR	3,00	7,00	58,00	82,00

Fonte: Dos autores (2023).

A Tabela 8 resume as características dos materiais da estrutura 4:

Tabela 8 - Características da estrutura 4.

Estrutura 4				
Propriedades	Subleito	Reforço do Subleito	Sub-base	Base 2
Material	Silte Argiloso	Cascalho Variiegado	“Subleito”	Não especificado
Descrição	km 456	km 413	km 405	-
Coeficiente de Poisson	0,40	0,35	0,35	0,35
Contato	Não Aderido	Não Aderido	Não Aderido	Não Aderido
Módulo de resiliência (MPa)	60,60	123,80	102,30	252,00
Massa específica (g/cm ³)	1,63	2,02	2,02	2,27
Umidade ótima (%)	18,50	10,60	7,00	8,50
Energia de compactação	Normal	Intermediária	Normal	-
Norma ou especificação	DNIT ES 139	DNIT ES 139	DNIT ES 139	DNIT ES 139
k1	75,00	427,00	589,00	630,50
k2	0,05	0,29	0,41	0,39
k3	56,00	250,00	323,00	-0,30
k4	-0,06	0,14	0,63	0,00
CBR	5,00	9,00	35,00	81,00

Fonte: Dos autores (2023).

Em relação ao número N, número de repetições de um eixo-padro de 8,2ft ou 80KN, foi considerado uma rodovia de alto fluxo de tráfego, sendo ele no valor 5×10^7 .

Os valores de k1, k2, k3 e k4 são os valores dos coeficientes de regressão associados às deformações permanentes e também foram retirados dos trabalhos consultados.

3.1 Método do DNER/DNIT

O Método do DNER/DNIT tem como principal parâmetro o número do CBR de cada material utilizado na camada. Tomando como exemplificação a Camada 1, tem-se os seguintes valores para o ensaio:

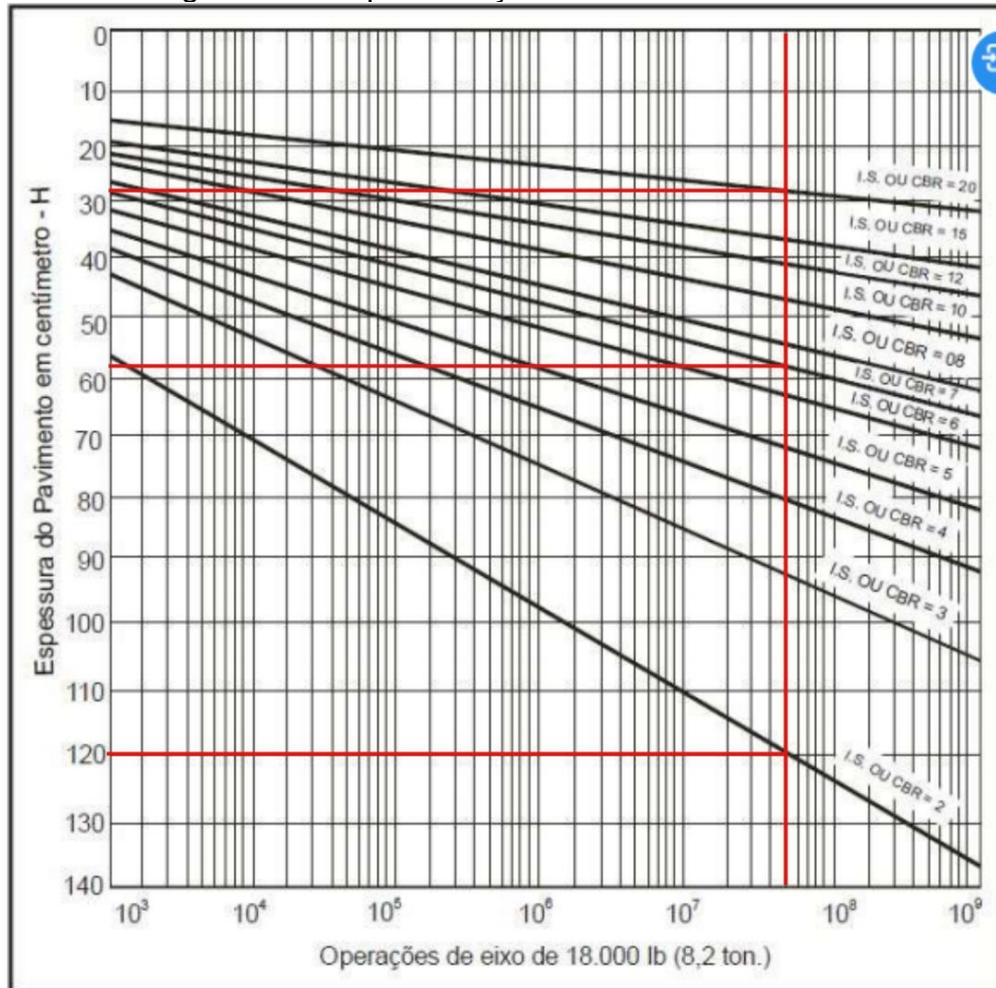
Tabela 9 – Valores de CBR da estrutura 1.

Estrutura 1				
Propriedades	Subleito	Reforço do subleito	Sub-base	Base 1
Material	Silte Argiloso Amarela	Cascalho Variiegado	Não especificado	Não especificado
Descrição	km 482	km 405	km 431	-
CBR	2,00	7,00	32,00	82,00

Fonte: Dos autores (2023).

Com os valores de referência em mãos, o primeiro passo foi a utilização do ábaco para identificar as alturas de H_{20} , H_n e H_m , que serão utilizadas nas inequações, sendo representado na Figura 10.

Figura 10 – Representação das alturas no ábaco.



Fonte: Características da estrutura 1.

Os valores lidos pelo ábaco para as alturas foram:

$$H_m = 120 \text{ cm}$$

$$H_n = 58 \text{ cm}$$

$$H_{20} = 28 \text{ cm}$$

Para os coeficientes de equivalência estrutural, foram escolhidos os seguintes valores, com base na Tabela 3, listada anteriormente:

$$K_R = 2,0 \text{ (base ou revestimento de concreto betuminoso)}$$

$$K_B = 1,0 \text{ (material granular)}$$

$$K_S = 1,0 \text{ (material granular)}$$

$$K_{Ref} = 1,0 \text{ (material granular)}$$

Para a altura do revestimento, como o N adotado foi de 5×10^7 , a norma recomenda um valor mínimo de 10cm. No entanto, a favor da segurança, para as nossas estruturas consideramos o valor de 12,5cm.

Partiu-se para encontrar o valor das espessuras das camadas com base nas inequações apresentadas anteriormente. Considerando o fator de majoração de 1,2 para H_{20} .

$$R \times K_R + B \times K_B \geq H_{20}$$

$$12,5 \times 2,0 + B \times 1,0 \geq 28 \times 1,2$$

$$B \geq 33,6 - 25$$

$$B \geq 8,6 \text{ cm}$$

Como o valor encontrado é inferior a 15 cm, adota-se 15 como o mínimo para a espessura da base.

Para encontrar a espessura da camada de sub-base:

$$R \times K_R + B \times K_B + h_{20} \times K_S \geq H_n$$

$$12,5 \times 2,0 + 15,0 \times 1,0 + h_{20} \times 1,0 \geq 58$$

$$h_{20} \geq 58 - 25 - 15$$

$$h_{20} \geq 18 \text{ cm}$$

Como o valor encontrado é superior a 15 cm, adota-se 18 como o mínimo para a espessura da sub-base.

Para encontrar a espessura da camada do reforço do subleito:

$$R \times K_R + B \times K_B + h_{20} \times K_S + h_n \times K_{Ref} \geq H_m$$

$$12,5 \times 2,0 + 15,0 \times 1,0 + 18 \times 1,0 + h_n \times 1,0 \geq 120$$

$$h_n \geq 120 - 25 - 15 - 18$$

$$h_n \geq 62 \text{ cm}$$

Como o valor encontrado é superior a 15 cm, adota-se 62 como o mínimo para a espessura do reforço do subleito.

Os mesmos procedimentos foram realizados para as demais estruturas e os resultados dos dimensionamentos serão representados através de ilustrações no tópico 5 de Resultados e discussões.

3.2 Software MeDiNa

A entrada de dados no *Software MeDiNa* é intuitiva e os parâmetros de solo devem ser inseridos de forma correta a fim de garantirem resultados mais precisos.

Tomando como exemplo a estrutura 1, pode-se observar como foram realizadas as entradas dos dados conforme os valores de referência apresentados anteriormente para cada um dos materiais:

A Figura 11 apresenta o material de base 1:

Figura 11 - Descrição do material da base 1.

MATERIAL GRANULAR	
Material	Base 1
Parâmetros	
Espessura (cm)	15,0
Coefficiente de Poisson	0,35
Contato	Não Aderido
Módulo (MPa)	
Modelo Constituinte	Resiliente Linear
Módulo (MPa)	252
Características	
Descrição do Material	Base exemplo
Massa específica (g/cm³)	2,27
Umidade Ótima (%)	8,5
Energia Compactação	Normal
Abrasão Los Angeles (%)	100
Faixa Granulométrica	...
Norma ou Especificação	DNIT ES 141
Deformação Permanente	
Modelo:	$ep = \psi_1 \cdot (s_3^{\psi_2}) \cdot (sd^{\psi_3}) \cdot (N^{\psi_4})$
Coefficiente de Regressão (k1 ou ψ_1):	630,5
Coefficiente de Regressão (k2 ou ψ_2):	0,3908
Coefficiente de Regressão (k3 ou ψ_3):	-0,304
Coefficiente de Regressão (k4 ou ψ_4):	0

Fonte: Dos autores (2023).

A Figura 12 apresenta o material de sub-base 1:

Figura 12 - Descrição do material da sub-base 1.

MATERIAL GRANULAR	
Material	Sub-base 1
Parâmetros	
Espessura (cm)	15,0
Coeficiente de Poisson	0,35
Contato	Não Aderido
Módulo (MPa)	
Modelo Constituinte	Resiliente Linear
Módulo (MPa)	111
Características	
Descrição do Material	km 431
Massa específica (g/cm ³)	2,08
Umidade Ótima (%)	7,9
Energia Compactação	I
Abrasão Los Angeles (%)	...
Faixa Granulométrica	...
Norma ou Especificação	DNIT ES 141
Deformação Permanente	
Modelo:	$ep = \psi_1 \cdot (s^3 \psi_2) \cdot (sd \psi_3) \cdot (N \psi_4)$
Coeficiente de Regressão (k1 ou psi1):	864
Coeficiente de Regressão (k2 ou psi2):	0,48
Coeficiente de Regressão (k3 ou psi3):	461
Coeficiente de Regressão (k4 ou psi4):	0,33

Fonte: Dos autores (2023).

A Figura 13 apresenta o material de reforço do sub-leito 1:

Figura 13 - Descrição do material do reforço do sub-leito 1.

MATERIAL GRANULAR	
Material	Cascalho variegado (Reforço 1)
Parâmetros	
Espessura (cm)	40,0
Coeficiente de Poisson	0,35
Contato	Não Aderido
Módulo (MPa)	
Modelo Constituinte	Resiliente Linear
Módulo (MPa)	102
Características	
Descrição do Material	km 405
Massa específica (g/cm ³)	2,035
Umidade Ótima (%)	10,5
Energia Compactação	N
Abrasão Los Angeles (%)	...
Faixa Granulométrica	...
Norma ou Especificação	DNIT ES 141
Deformação Permanente	
Modelo:	$ep = \psi_1 \cdot (s^3 \psi_2) \cdot (sd \psi_3) \cdot (N \psi_4)$
Coeficiente de Regressão (k1 ou psi1):	589
Coeficiente de Regressão (k2 ou psi2):	0,41
Coeficiente de Regressão (k3 ou psi3):	323
Coeficiente de Regressão (k4 ou psi4):	0,25

Fonte: Dos autores (2023).

A Figura 14 apresenta o material de sub-leito 1:

Figura 14 - Descrição do material do sub-leito 1.

SUBLEITO	
Material	Silte Argiloso Amarelo
Parâmetros	
Espessura (cm)	0,0
Coefficiente de Poisson	0,40
Contato	-
Módulo (MPa)	
Modelo Constituinte	Resiliente Linear
Módulo (MPa)	50
Características	
Descrição do Material	km 482
Grupo MCT	...
MCT - Coeficiente c'	NS'/NA'
MCT - Índice e'	NS'/NA'
Massa específica (g/cm³)	1,641
Umidade Ótima (%)	18,1
Energia Compactação	I
Norma ou Especificação	DNIT ES 137
Deformação Permanente	
Modelo:	$ep = psi1.(s3^{psi2}).(sd^{psi3}).(N^{psi4})$
Coefficiente de Regressão (k1 ou psi1):	48
Coefficiente de Regressão (k2 ou psi2):	-0,01
Coefficiente de Regressão (k3 ou psi3):	41
Coefficiente de Regressão (k4 ou psi4):	-0,08

Fonte: Dos autores (2023).

Além disso, outros dois campos são importantes para a análise do *Software*, o do Eixo padrão rodoviário e os dados de Tráfego, sendo esse último associado ao Tipo de Via, Número N, Taxa de crescimento e Período de Projeto.

A Figura 15 representa os dados adotados para o eixo padrão rodoviário:

Figura 15 - Descrição do eixo padrão rodoviário.

EIXO PADRÃO RODOVIÁRIO	
Carga de eixo (ton):	8,20
Pressão de pneus (MPa):	0,56
Sx (cm):	32,40
Área (cm²):	366,07
Raio (cm):	10,79

Fonte: Dos autores (2023).

A Figura 16 representa os dados adotados para os dados do Tráfego:

Figura 16 - Dados do tráfego.

DADOS DO TRÁFEGO	
Tipo de Via:	Sistema Arterial Primário
VMD (1º ano):	136986
FV:	1,000
N anual (1º ano):	5,00e+07
% Veículos na faixa de projeto:	100
N Anual da faixa:	5,00e+07
Taxa de crescimento (%):	0,0
Período de projeto (anos):	10
N Total:	5,00e+08

Fonte: Dos autores (2023).

Para o revestimento asfáltico, foi escolhido um revestimento padrão existente no *Software* MeDi|Na e utilizado para a composição de todas as outras estruturas, com as características descritas na Figura 17:

Figura 17 - Descrição do material do revestimento asfáltico.

CONCRETO ASFÁLTICO	
Material	Classe 3
Parâmetros	
Espessura (cm)	10,0
Coefficiente de Poisson	0,30
Contato	Não Aderido
Módulo (MPa)	
Modelo Constituinte	Resiliente Linear
Módulo (MPa)	8000
Características	
Tipo de CAP	...
Massa específica (g/cm³)	2,4
Norma ou Especificação	DNIT ES 31
Comentários	Este material deve ser obtido em laboratório ...
Curva de Fadiga	
Modelo:	$k_1 \cdot (t \wedge k_2)$
Coefficiente de Regressão (k1):	1e-12
Coefficiente de Regressão (k2):	-3,75
Classe de Fadiga:	3
FFM (100µ a 250µ):	0,90

Fonte: Dos autores (2023).

A escolha da altura das camadas foi baseada nos resultados obtidos pelo Método do DNER/DNIT.

A Figura 18 ilustra os dados finais que foram adotados para a verificação da estrutura 1:

Figura 18 - Dados finais da estrutura 1 no Software MeDiNa.

CAMADA	DESCRIÇÃO DO MATERIAL	TIPO	ESPESSURA (cm)	MÓDULO (MPa)	COEFICIENTE DE POISSON
>> 1 <<	CONCRETO ASFÁLTICO	Classe 3	12,5	8000	0,30
2	MATERIAL GRANULAR	Base 1	15,0	252	0,35
3	MATERIAL GRANULAR	Sub-base 1	18,0	111	0,35
4	MATERIAL GRANULAR	Cascalho variegado (Reforço 1)	40,0	102	0,35
5	MATERIAL GRANULAR	Cascalho variegado (Reforço 1)	22,0	102	0,35
SL	SUBLEITO	Silte Argiloso Amarelo	0,0	50	0,40

Fonte: Dos autores (2023).

Os mesmos procedimentos foram realizados para as demais estruturas.

A Figura 19 ilustra os dados finais que foram adotados para a verificação da estrutura 2:

Figura 19 - Dados finais da estrutura 2 no Software MeDiNa.

CAMADA	DESCRIÇÃO DO MATERIAL	TIPO	ESPESSURA (cm)	MÓDULO (MPa)	COEFICIENTE DE POISSON
>> 1 <<	CONCRETO ASFÁLTICO	Classe 3	12,5	8000	0,30
2	MATERIAL GRANULAR	Base 2	15,0	382	0,35
3	MATERIAL GRANULAR	Sub-base 4	32,0	102	0,35
SL	SUBLEITO	Argila siltosa rosa	0,0	105	0,40

Fonte: Dos autores (2023).

A Figura 20 ilustra os dados finais que foram adotados para a verificação da estrutura 3:

Figura 20 - Dados finais da estrutura 3 no Software MeDiNa.

CAMADA	DESCRIÇÃO DO MATERIAL	TIPO	ESPESSURA (cm)	MÓDULO (MPa)	COEFICIENTE DE POISSON
>> 1 <<	CONCRETO ASFÁLTICO	Classe 3	12,5	8000	0,30
2	MATERIAL GRANULAR	Base 1	15,0	252	0,35
3	MATERIAL GRANULAR	Cascalho (Sub-base 3)	18,0	402	0,35
4	MATERIAL GRANULAR	Argila Amarela (Reforço 3)	35,0	402	0,35
SL	SUBLEITO	Silte Argiloso Amarelo	0,0	50	0,40

Fonte: Dos autores (2023).

A Figura 21 ilustra os dados finais que foram adotados para a verificação da estrutura 4:

Figura 21 - Dados finais da estrutura 4 no Software MeDiNa.

CAMADA	DESCRIÇÃO DO MATERIAL	TIPO	ESPESSURA (cm)	MÓDULO (MPa)	COEFICIENTE DE POISSON
1	CONCRETO ASFÁLTICO	Classe 3	12,5	8000	0,30
2	MATERIAL GRANULAR	Base 2	15,0	382	0,35
3	MATERIAL GRANULAR	Sub-base 4	15,0	102	0,35
>> 4 <<	MATERIAL GRANULAR	Cascalho Variegado (Reforço 4)	17,0	124	0,35
SL	SUBLEITO	Silte Argiloso Variegado	0,0	61	0,40

Fonte: Dos autores (2023).

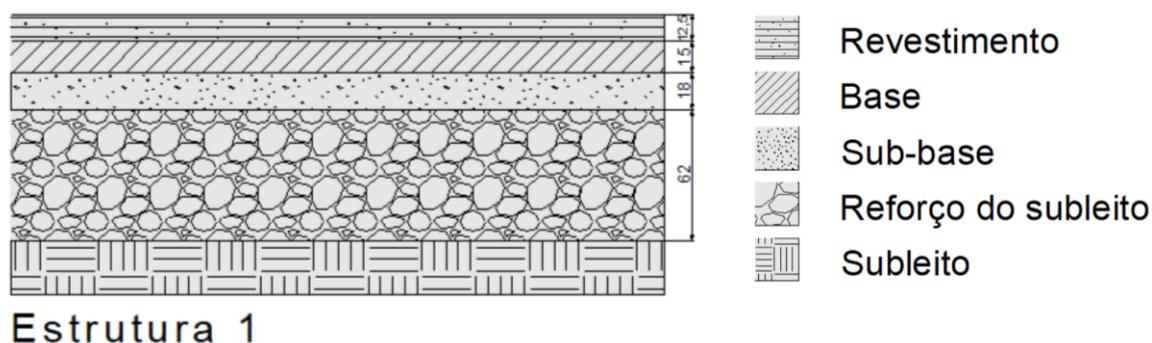
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste tópico, apresenta-se os cálculos detalhados e resultados obtidos utilizando as metodologias apresentadas anteriormente para cada uma das estruturas, desde o dimensionamento pelo método do DNER/DNIT até a inserção dos dados no Software MeDiNa. Além disso, serão apresentadas discussões dos resultados.

4.1 Estrutura 1

A Estrutura 1 foi demonstrada anteriormente, assim, o dimensionamento pelo Método do DNER/DNIT pode ser representado pela Figura 22:

Figura 22 - Esboço da estrutura 1.



Fonte: Dos autores (2023).

Para a verificação no *Software* MeDiNa, foram inseridos os dados conforme a Figura 23, além das propriedades características dos materiais de cada uma das camadas:

Figura 23 - Dados de cálculo da estrutura 1 no *Software*.

MeDiNa - v.1.1.5.0 - dezembro/2020

Projeto Editar Análise Ajuda

ESTRUTURA MODELAGEM RESULTADOS

RESPONSÁVEL: Gustavo e Lara EMPRESA: Universidade Federal de Lavras

PROJETO: Estrutura 1 MODO: Pavimento Novo (Nível A)

Alterar Estrutura >>

CAMADA	DESCRIÇÃO DO MATERIAL	TIPO	ESPESSURA (cm)	MÓDULO (MPa)	COEFICIENTE DE POISSON
>> 1 <<	CONCRETO ASFÁLTICO	Classe 3	12,5	8000	0,30
2	MATERIAL GRANULAR	Base 1	15,0	252	0,35
3	MATERIAL GRANULAR	Sub-base 1	18,0	111	0,35
4	MATERIAL GRANULAR	Cascalho variegado (Reforço 1)	40,0	102	0,35
5	MATERIAL GRANULAR	Cascalho variegado (Reforço 1)	22,0	102	0,35
SL	SUBLEITO	Silte Argiloso Amarelo	0,0	50	0,40

EIXO PADRÃO RODOVIÁRIO

DADOS DO TRÁFEGO

Tipo de Via:	Sistema Arterial Primário
VMD (1º ano):	136986
FV:	1,000
N anual (1º ano):	5,00e+07
% Veículos na faixa de projeto:	100
N Anual da faixa:	5,00e+07
Taxa de crescimento (%):	0,0
Período de projeto (anos):	10
N Total:	5,00e+08

Fonte: Dos autores (2023).

Após a inserção dos dados de projeto, o programa realizou a análise da estrutura anteriormente dimensionada e os resultados para a estrutura 1 serão demonstrados a seguir nas figuras 24, 25 e 26.

A primeira parte do relatório possibilita conferir alguns dados importantes que foram considerados e também traz alguns alertas que devem ser levados em consideração diante da análise realizada, além disso, o *Software* pondera a necessidade da qualidade dos dados e importância deles com relação aos materiais utilizados. Essas informações podem ser verificadas pela Figura 24:

Figura 24 - Resumo das análises do *Software* da estrutura 1.

Análise do pavimento

Empresa: **Universidade Federal de Lavras**
 Nome do Projeto: **Estrutura 1**
 Responsável pelo projeto: **Gustavo e Lara**

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 **03/06/2023 às 14:32:15** no modo: **Pavimento Novo (Nível A)**
 Área trincada prevista no pavimento no fim do período: **99,0%**.
 Afundamento de Trilha de Roda previsto no pavimento no fim do período: **803,6mm**.

ALERTAS

- *Esta análise não constitui o dimensionamento da estrutura do pavimento!*
- *Tráfego elevado para a estrutura proposta.*
- *A camada 2 apresentou Afundamento de Trilha de Roda acima do limite de 5%.*
- *A estrutura ultrapassou o limite de Afundamento de Trilha de Roda para o tipo de via.*

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.

Fonte: Dos autores (2023).

O relatório ainda faz um resumo aos materiais que foram utilizados no dimensionamento, trazendo todos os parâmetros.

Como resultado, uma tabela é formada a fim de demonstrar os resultados importantes acerca do dimensionamento, a área trincada e também o afundamento da trilha de roda (ATR). Pode-se analisar que a estrutura apresentou valores da área trincada de 99% ao sexto mês e o ATR já era de 803,6 mm logo no primeiro mês de tráfego. Essas informações podem ser visualizadas na Figura 25:

Figura 25 - Evolução dos danos ao decorrer dos meses da estrutura 1.

Evolução dos danos no pavimento			
Mês	N Equív	Área Trincada	ATR (mm)
1	4,167e+06	15,01%	803,6
6	2,500e+07	99,00%	803,6
12	5,000e+07	99,00%	803,6
18	7,500e+07	99,00%	803,6
24	1,000e+08	99,00%	803,6
30	1,250e+08	99,00%	803,6
36	1,500e+08	99,00%	803,6
42	1,750e+08	99,00%	803,6
48	2,000e+08	99,00%	803,6
54	2,250e+08	99,00%	803,6
60	2,500e+08	99,00%	803,6
66	2,750e+08	99,00%	803,6
72	3,000e+08	99,00%	803,6
78	3,250e+08	99,00%	803,6
84	3,500e+08	99,00%	803,6
90	3,750e+08	99,00%	803,6
96	4,000e+08	99,00%	803,6
102	4,250e+08	99,00%	803,6
108	4,500e+08	99,00%	803,6
114	4,750e+08	99,00%	803,6
120	5,000e+08	99,00%	803,6

Fonte: Dos autores (2023).

Nesse caso, o afundamento da trilha de roda foi muito acima do limite, que é de 5% da espessura da camada ou 5 mm de profundidade do subleito, acusado pelo Software para o tipo de via escolhido. Uma outra tabela foi gerada pelo *Software* e demonstra que o afundamento aconteceu na camada de base, que foi dimensionada em 15 cm, superando mais de 400% do seu valor de espessura. A Figura 26 demonstra os resultados obtidos:

Figura 26 - Análise de ATR da estrutura 4.

Análise de Afundamento de Trilha de Roda		
Cam	Material	Afundamento de Trilha de Roda (mm)
1	CONCRETO ASFÁLTICO	0,00
2	MATERIAL GRANULAR	803,64 *
3	MATERIAL GRANULAR	0,00
4	MATERIAL GRANULAR	0,00
5	MATERIAL GRANULAR	0,00
6	SUBLEITO	0,00
Afundamento de Trilha de Roda (mm)		803,6

* O Afundamento de Trilha de Roda ultrapassou o limites de 5% da espessura da camada ou 5mm de profundidade do subleito

Fonte: Dos autores (2023).

4.2 Estrutura 2

Seguindo a mesma metodologia de cálculo apresentada anteriormente, adotando os seguintes valores para as alturas e coeficientes:

$$H_m = 72 \text{ cm}$$

$$H_n = 0 \text{ cm}$$

$$H_{20} = 28 \text{ cm}$$

Para os coeficientes de equivalência estrutural, foram adotados os seguintes valores, com base na Tabela 3, mostrada anteriormente:

$$K_R = 2,0 \text{ (base ou revestimento de concreto betuminoso)}$$

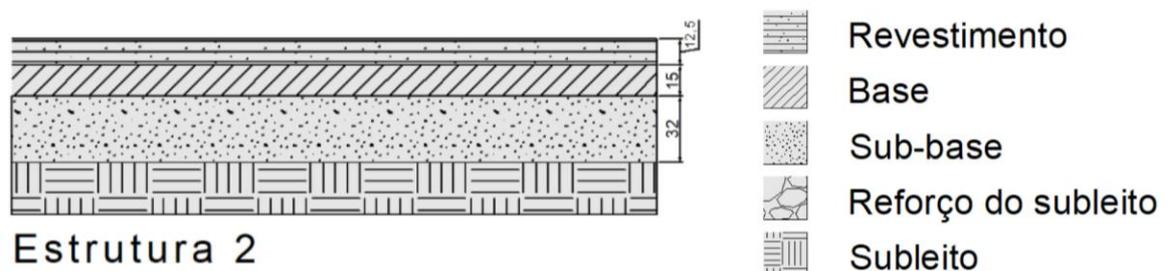
$$K_B = 1,0 \text{ (material granular)}$$

$$K_S = 1,0 \text{ (material granular)}$$

$$K_{Ref} = 1,0 \text{ (material granular)}$$

A representação gráfica do dimensionamento da estrutura 2 pode ser visualizada pela Figura 27:

Figura 27 - Esboço da estrutura 2.



Fonte: Dos autores (2023).

Para a verificação no Software MeDiNa, foram inseridos os dados conforme a Figura 28, além das propriedades características dos materiais de cada uma das camadas:

Figura 28 - Dados de cálculo da estrutura 2 no Software.

MeDiNa - v.1.1.5.0 - dezembro/2020

Projeto Editar Análise Ajuda

ESTRUTURA MODELAGEM RESULTADOS

RESPONSÁVEL: Gustavo e Lara EMPRESA: Universidade Federal de Lavras

PROJETO: Estrutura 2 MODO: Pavimento Novo (Nível A)

Alterar Estrutura >>

CAMADA	DESCRIÇÃO DO MATERIAL	TIPO	ESPESSURA (cm)	MÓDULO (MPa)	COEFICIENTE DE POISSON
>> 1 <<	CONCRETO ASFÁLTICO	Classe 3	12,5	8000	0,30
2	MATERIAL GRANULAR	Base 2	15,0	382	0,35
3	MATERIAL GRANULAR	Sub-base 4	32,0	102	0,35
SL	SUBLEITO	Argila siltosa rosa	0,0	105	0,40

EIXO PADRÃO RODOVIÁRIO

Carga de eixo (ton): 8,20
 Pressão de pneus (MPa): 0,56
 Sx (cm): 32,40
 Área (cm²): 366,07
 Raio (cm): 10,79

DADOS DO TRÁFEGO

Tipo de Via: Sistema Arterial Primário
 VMD (1º ano): 136986
 FV: 1,000
 N anual (1º ano): 5,00e+07
 % Veículos na faixa de projeto: 100
 N Anual da faixa: 5,00e+07
 Taxa de crescimento (%): 0,0
 Período de projeto (anos): 10
 N Total: 5,00e+08

Fonte: Dos autores (2023).

A estrutura 2 após ter sido lançada no Software teve como primeira parte do relatório as seguintes informações, apresentadas na Figura 29:

Figura 29 - Resumo das análises do Software da estrutura 2.

Análise do pavimento

Empresa: Universidade Federal de Lavras
 Nome do Projeto: Estrutura 2
 Responsável pelo projeto: Gustavo e Lara

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 03/06/2023 às 15:06:05 no modo: Pavimento Novo (Nível A)
 Área trincada prevista no pavimento no fim do período: 99,0%.
 Afundamento de Trilha de Roda previsto no pavimento no fim do período: 913,6mm.

ALERTAS

- Esta análise não constitui o dimensionamento da estrutura do pavimento!
- Tráfego elevado para a estrutura proposta.
- A camada 2 apresentou Afundamento de Trilha de Roda acima do limite de 5%.
- A estrutura ultrapassou o limite de Afundamento de Trilha de Roda para o tipo de via.

Fonte: Dos autores (2023).

Em relação à evolução dos danos ao decorrer dos meses, a estrutura 2 apresentou um afundamento de trilha de roda de 913,6 mm já no primeiro mês, superando muito os limites e a área trincada de 99% no sexto mês. Os resultados podem ser vistos na Figura 30:

Figura 30 - Evolução dos danos ao decorrer dos meses da estrutura 2.

Evolução dos danos no pavimento			
Mês	N Equiv	Área Trincada	ATR (mm)
1	4,167e+06	12,01%	913,6
6	2,500e+07	99,00%	913,6
12	5,000e+07	99,00%	913,6
18	7,500e+07	99,00%	913,6
24	1,000e+08	99,00%	913,6
30	1,250e+08	99,00%	913,6
36	1,500e+08	99,00%	913,6
42	1,750e+08	99,00%	913,6
48	2,000e+08	99,00%	913,6
54	2,250e+08	99,00%	913,6
60	2,500e+08	99,00%	913,6
66	2,750e+08	99,00%	913,6
72	3,000e+08	99,00%	913,6
78	3,250e+08	99,00%	913,6
84	3,500e+08	99,00%	913,6
90	3,750e+08	99,00%	913,6
96	4,000e+08	99,00%	913,6
102	4,250e+08	99,00%	913,6
108	4,500e+08	99,00%	913,6
114	4,750e+08	99,00%	913,6
120	5,000e+08	99,00%	913,6

Fonte: Dos autores (2023).

Assim como a estrutura 1, a estrutura 2 teve seu AFT na camada da base, podendo ser visto na figura 31:

Figura 31- Análise de ATR da estrutura 2.

Análise de Afundamento de Trilha de Roda		
Cam	Material	Afundamento de Trilha de Roda (mm)
1	CONCRETO ASFÁLTICO	0,00
2	MATERIAL GRANULAR	913,60 *
3	MATERIAL GRANULAR	0,00
4	SUBLEITO	0,00
Afundamento de Trilha de Roda (mm)		913,6

* O Afundamento de Trilha de Roda ultrapassou o limites de 5% da espessura da camada ou 5mm de profundidade do subleito

Fonte: Dos autores (2023).

4.3 Estrutura 3

Seguindo a mesma metodologia de cálculo apresentada anteriormente, adotando os seguintes valores para as alturas e coeficientes:

$$H_m = 93 \text{ cm}$$

$$H_n = 58 \text{ cm}$$

$$H_{20} = 28 \text{ cm}$$

Para os coeficientes de equivalência estrutural, foram adotados os seguintes valores, com base na Tabela 3, mostrada anteriormente:

$$K_R = 2,0 \text{ (base ou revestimento de concreto betuminoso)}$$

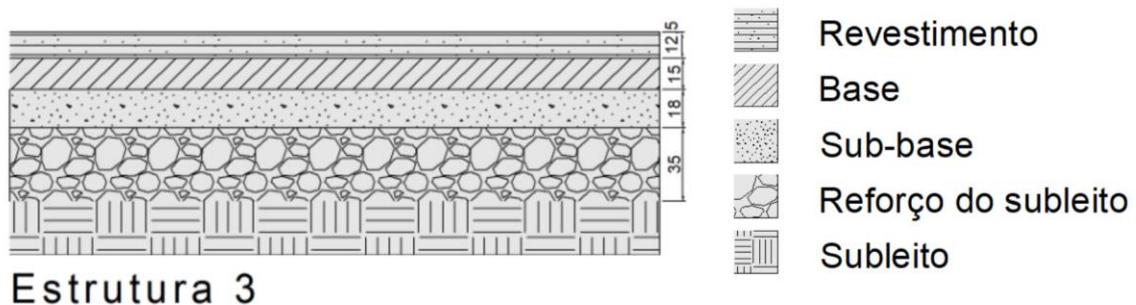
$$K_B = 1,0 \text{ (material granular)}$$

$$K_S = 1,0 \text{ (material granular)}$$

$$K_{Ref} = 1,0 \text{ (material granular)}$$

A representação gráfica do dimensionamento da estrutura 3 pode ser visualizada pela Figura 32:

Figura 32 - Esboço da estrutura 3.



Fonte: Dos autores (2023).

Para a verificação no *Software* MeDiNa, foram inseridos os dados conforme a Figura 33, além das propriedades características dos materiais de cada uma das camadas:

Figura 33 - Dados de cálculo da estrutura 3 no Software.

MeDiNa - v.1.1.5.0 - dezembro/2020

Projeto Editar Análise Ajuda

ESTRUTURA MODELAGEM RESULTADOS

RESPONSÁVEL: Gustavo e Lara EMPRESA: Universidade Federal de Lavras

PROJETO: Estrutura 3 MODO: Pavimento Novo (Nível A)

Alterar Estrutura >>

CAMADA	DESCRIÇÃO DO MATERIAL	TIPO	ESPESSURA (cm)	MÓDULO (MPa)	COEFICIENTE DE POISSON
>> 1 <<	CONCRETO ASFÁLTICO	Classe 3	12,5	8000	0,30
2	MATERIAL GRANULAR	Base 1	15,0	252	0,35
3	MATERIAL GRANULAR	Cascalho (Sub-base 3)	18,0	402	0,35
4	MATERIAL GRANULAR	Argila Amarela (Reforço 3)	35,0	402	0,35
SL	SUBLEITO	Silte Argiloso Amarelo	0,0	50	0,40

EIXO PADRÃO RODOVIÁRIO

Carga de eixo (ton): 8,20
 Pressão de pneus (MPa): 0,56
 Sx (cm): 32,40
 Área (cm²): 366,07
 Raio (cm): 10,79

DADOS DO TRÁFEGO

Tipo de Via: Sistema Arterial Primário
 VMD (1º ano): 136986
 FV: 1,000
 N anual (1º ano): 5,00e+07
 % Veículos na faixa de projeto: 100
 N Anual da faixa: 5,00e+07
 Taxa de crescimento (%): 0,0
 Período de projeto (anos): 10
 N Total: 5,00e+08

Fonte: Dos autores (2023).

A estrutura 3 após ter sido lançada no Software teve como primeira parte do relatório as seguintes informações, apresentadas na Figura 34:

Figura 34 - Resumo das análises do Software da estrutura 3.

Análise do pavimento

Empresa: Universidade Federal de Lavras
 Nome do Projeto: Estrutura 3
 Responsável pelo projeto: Gustavo e Lara

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 03/06/2023 às 15:16:33 no modo: Pavimento Novo (Nível A)
 Área trincada prevista no pavimento no fim do período: 99,0%.
 Afundamento de Trilha de Roda previsto no pavimento no fim do período: 782,8mm.

ALERTAS

- Esta análise não constitui o dimensionamento da estrutura do pavimento!
- Tráfego elevado para a estrutura proposta.
- A camada 2 apresentou Afundamento de Trilha de Roda acima do limite de 5%.
- A estrutura ultrapassou o limite de Afundamento de Trilha de Roda para o tipo de via.

Fonte: Dos autores (2023).

A estrutura 3 apresentou uma área trincada de 99% no sexto mês, além de apresentar um afundamento de trilha de roda de 782,8 mm já no primeiro mês, superando os limites. Os resultados podem ser vistos na Figura 35:

Figura 35 - Evolução dos danos ao decorrer dos meses da estrutura 3.

Evolução dos danos no pavimento			
Mês	N Equív	Área Trincada	ATR (mm)
1	4,167e+06	11,25%	782,8
6	2,500e+07	99,00%	782,8
12	5,000e+07	99,00%	782,8
18	7,500e+07	99,00%	782,8
24	1,000e+08	99,00%	782,8
30	1,250e+08	99,00%	782,8
36	1,500e+08	99,00%	782,8
42	1,750e+08	99,00%	782,8
48	2,000e+08	99,00%	782,8
54	2,250e+08	99,00%	782,8
60	2,500e+08	99,00%	782,8
66	2,750e+08	99,00%	782,8
72	3,000e+08	99,00%	782,8
78	3,250e+08	99,00%	782,8
84	3,500e+08	99,00%	782,8
90	3,750e+08	99,00%	782,8
96	4,000e+08	99,00%	782,8
102	4,250e+08	99,00%	782,8
108	4,500e+08	99,00%	782,8
114	4,750e+08	99,00%	782,8
120	5,000e+08	99,00%	782,8

Fonte: Dos autores (2023).

Assim como as estruturas anteriores, a estrutura 3 teve seu AFT na camada da base, podendo ser visto na Figura 36:

Figura 36 - Análise de ATR da estrutura 3.

Análise de Afundamento de Trilha de Roda		
Cam	Material	Afundamento de Trilha de Roda (mm)
1	CONCRETO ASFÁLTICO	0,00
2	MATERIAL GRANULAR	782,79 *
3	MATERIAL GRANULAR	0,00
4	MATERIAL GRANULAR	0,00
5	SUBLEITO	0,00
Afundamento de Trilha de Roda (mm)		782,8

* O Afundamento de Trilha de Roda ultrapassou o limites de 5% da espessura da camada ou 5mm de profundidade do subleito

Fonte: Dos autores (2023).

4.4 Estrutura 4

Seguindo a mesma metodologia de cálculo apresentada anteriormente, adotando os seguintes valores para as alturas e coeficientes:

$$H_m = 72 \text{ cm}$$

$$H_n = 51 \text{ cm}$$

$$H_{20} = 28 \text{ cm}$$

Para os coeficientes de equivalência estrutural, foram adotados os seguintes valores, com base na Tabela 3, mostrada anteriormente:

$$K_R = 2,0 \text{ (base ou revestimento de concreto betuminoso)}$$

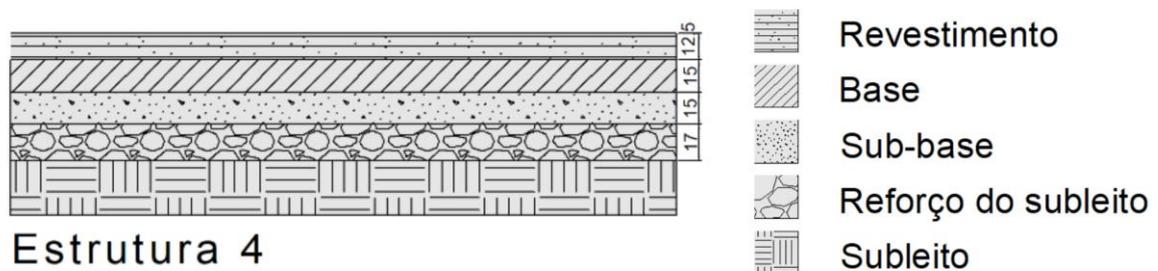
$$K_B = 1,0 \text{ (material granular)}$$

$$K_S = 1,0 \text{ (material granular)}$$

$$K_{Ref} = 1,0 \text{ (material granular)}$$

A representação gráfica do dimensionamento da estrutura 4 pode ser visualizada pela Figura 37:

Figura 37 - Esboço da estrutura 4.



Fonte: Dos autores (2023).

Para a verificação no *Software* MeDiNa, foram inseridos os dados conforme a Figura 38, além das propriedades características dos materiais de cada uma das camadas:

Figura 38 - Dados de cálculo da estrutura 4 no Software.

MeDiNa - v.1.1.5.0 - dezembro/2020

Projeto Editar Análise Ajuda

ESTRUTURA MODELAGEM RESULTADOS

RESPONSÁVEL: Gustavo e Lara EMPRESA: Universidade Federal de Lavras

PROJETO: Estrutura 4 MODO: Pavimento Novo (Nível A)

Alterar Estrutura >>

CAMADA	DESCRIÇÃO DO MATERIAL	TIPO	ESPESSURA (cm)	MÓDULO (MPa)	COEFICIENTE DE POISSON
1	CONCRETO ASFÁLTICO	Classe 3	12,5	8000	0,30
2	MATERIAL GRANULAR	Base 2	15,0	382	0,35
3	MATERIAL GRANULAR	Sub-base 4	15,0	102	0,35
>> 4 <<	MATERIAL GRANULAR	Cascalho Variiegado (Reforço 4)	17,0	124	0,35
SL	SUBLEITO	Silte Argiloso Variiegado	0,0	61	0,40

EIXO PADRÃO RODOVIÁRIO

Carga de eixo (ton): 8,20
 Pressão de pneus (MPa): 0,56
 Sx (cm): 32,40
 Área (cm²): 366,07
 Raio (cm): 10,79

DADOS DO TRÁFEGO

Tipo de Via: Sistema Arterial Primário
 VMD (1º ano): 136986
 FV: 1,000
 N anual (1º ano): **5,00e+07**
 % Veículos na faixa de projeto: 100
 N Anual da faixa: 5,00e+07
 Taxa de crescimento (%): 0,0
 Período de projeto (anos): 10
 N Total: 5,00e+08

Fonte: Dos autores (2023).

A estrutura 4 após ter sido lançada no Software teve como primeira parte do relatório as seguintes informações, apresentadas na Figura 39:

Figura 39 - Resumo das análises do Software da estrutura 4.

Análise do pavimento

Empresa: **Universidade Federal de Lavras**
 Nome do Projeto: **Estrutura 4**
 Responsável pelo projeto: **Gustavo e Lara**

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 **03/06/2023 às 15:19:13** no modo: **Pavimento Novo (Nível A)**
 Área trincada prevista no pavimento no fim do período: **99,0%**.
 Afundamento de Trilha de Roda previsto no pavimento no fim do período: **934,1mm**.

ALERTAS

- Esta análise não constitui o dimensionamento da estrutura do pavimento!
- Tráfego elevado para a estrutura proposta.
- A camada 2 apresentou Afundamento de Trilha de Roda acima do limite de 5%.
- A estrutura ultrapassou o limite de Afundamento de Trilha de Roda para o tipo de via.

Fonte: Dos autores (2023).

A estrutura 4 apresentou uma área trincada de 99% no sexto mês, além de apresentar um afundamento de trilha de roda de 934,1 mm já no primeiro mês, superando muito os limites. Os resultados podem ser vistos na Figura 40:

Figura 40 - Evolução dos danos ao decorrer dos meses da estrutura 4.

Evolução dos danos no pavimento			
Mês	N Equív	Área Trincada	ATR (mm)
1	4,167e+06	14,03%	934,1
6	2,500e+07	99,00%	934,1
12	5,000e+07	99,00%	934,1
18	7,500e+07	99,00%	934,1
24	1,000e+08	99,00%	934,1
30	1,250e+08	99,00%	934,1
36	1,500e+08	99,00%	934,1
42	1,750e+08	99,00%	934,1
48	2,000e+08	99,00%	934,1
54	2,250e+08	99,00%	934,1
60	2,500e+08	99,00%	934,1
66	2,750e+08	99,00%	934,1
72	3,000e+08	99,00%	934,1
78	3,250e+08	99,00%	934,1
84	3,500e+08	99,00%	934,1
90	3,750e+08	99,00%	934,1
96	4,000e+08	99,00%	934,1
102	4,250e+08	99,00%	934,1
108	4,500e+08	99,00%	934,1
114	4,750e+08	99,00%	934,1
120	5,000e+08	99,00%	934,1

Fonte: Dos autores (2023).

Assim como as estruturas anteriores, a estrutura 4 teve seu AFT na camada da base, podendo ser visto na Figura 41:

Figura 41 - Análise de ATR da estrutura 4.

Análise de Afundamento de Trilha de Roda		
Cam	Material	Afundamento de Trilha de Roda (mm)
1	CONCRETO ASFÁLTICO	0,00
2	MATERIAL GRANULAR	934,09 *
3	MATERIAL GRANULAR	0,00
4	MATERIAL GRANULAR	0,00
5	SUBLEITO	0,00
Afundamento de Trilha de Roda (mm)		934,1

* O Afundamento de Trilha de Roda ultrapassou o limites de 5% da espessura da camada ou 5mm de profundidade do subleito

Fonte: Dos autores (2023).

5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Quando analisadas as estruturas pelo Método DNER/DNIT, foi possível observar bons resultados quanto às alturas das camadas de solo, uma vez que os materiais possuíam valores satisfatórios no ensaio do CBR, atendendo ao mínimo definido pelo método. Em contrapartida, os valores de módulo de resiliência dos mesmos materiais eram baixos, ocasionando resultados insuficientes para suportar a carga do tráfego adotado quando analisadas as estruturas pelo Método MeDiNa. Os resultados indicam uma baixa eficiência e durabilidade das estruturas.

A Tabela 10, faz um resumo das alturas encontradas pelo Método DNER/DNIT e dos resultados obtidos pelas análises no *Software* MeDiNa:

Tabela 10 – Resumo das análises.

Estrutura	Dimensionamento DNER/DNIT		Análise no <i>Software</i> MeDiNa para um período de 10 anos
Estrutura 1	Revestimento	12,5 cm	Área trincada prevista de 99% e Afundamento de Trilha de Roda de 803,6 mm.
	Base	15 cm	
	Sub-base	18 cm	
	Reforço do subleito	62 cm	
Estrutura 2	Revestimento	12,5 cm	Área trincada prevista de 99% e Afundamento de Trilha de Roda de 913,6 mm.
	Base	15 cm	
	Sub-base	32 cm	
Estrutura 3	Revestimento	12,5 cm	Área trincada prevista de 99% e Afundamento de Trilha de Roda de 782,8 mm.
	Base	15 cm	
	Sub-base	18 cm	
	Reforço do subleito	35 cm	
Estrutura 4	Revestimento	12,5 cm	Área trincada prevista de 99% e Afundamento de Trilha de Roda de 934,1 mm.
	Base	15 cm	
	Sub-base	15 cm	
	Reforço do subleito	17 cm	

Fonte: Dos autores (2023).

A área trincada e o Afundamento de trilha de roda são parâmetros importantes para serem levados em consideração, uma vez que mostram o comportamento do pavimento durante sua vida útil, e, em todas as estruturas, pode-se observar números insuficientes para garantirem uma boa saúde dos pavimentos.

Foi possível detectar que a área trincada de todas as estruturas chegou em níveis críticos, já nos primeiros seis meses de tráfego apresentou valores próximos a 99%. Foi observado também que o Afundamento de Trilha de Roda atingiu índices altos para a segunda camada, alcançando valores superiores a 75 cm. Com o dimensionamento mostrado das estruturas, as patologias citadas dificilmente seriam evitadas. Optar por combinações de materiais com um módulo de resiliência mais elevado, garantiriam melhores resultados e maior viabilidade de implementação.

6 CONCLUSÃO

Com base nos estudos realizados neste trabalho, foi possível observar as limitações do Método Empírico desenvolvido pelo DNER/DNIT em relação aos relatórios apresentados pelo *Software* MeDiNa, que possui uma base mecanístico-empírico, trazendo resultados das patologias possíveis de ocorrer durante a vida útil do pavimento, tais como afundamento de trilha de roda e área trincada.

As estruturas dimensionadas pelo tradicional método do DNER/DNIT, quando analisadas no programa não obtiveram resultados satisfatórios, uma vez que, apesar das características dos solos escolhidos atenderem as especificações técnicas quanto aos limites de CBR, as alturas das camadas das estruturas, relacionadas com os valores do módulo de resiliência e das deformações permanentes de cada material, não foi suficiente para suportar o tráfego adotado, de acordo com as análises do *Software*. Vale ressaltar que tal tráfego foi pensado para uma rodovia com grande fluxo de veículos, no entanto poderiam ser desenvolvidos estudos com as mesmas estruturas e com um fluxo menor, reavaliando seus índices de suporte.

Pensando de maneira geral, para o dimensionamento de qualquer pavimento, é de extrema importância investir nas investigações geotécnicas e ensaios laboratoriais dos solos a fim de garantir os reais parâmetros que serão levados em consideração. Cada um dos métodos possui suas próprias particularidades e a utilização de ambos poderia garantir um dimensionamento mais assertivo e influenciando diretamente na qualidade e prevenindo futuras intervenções de manutenções. O Método DNER/DNIT é muito empregado uma vez que seu desenvolvimento é rápido e de baixo custo, além de não precisar de ensaios laboratoriais complexos, por outro lado o dimensionamento não prevê consequências da fadiga. Em comparação, o Método MeDiNa avalia com maior precisão os solos utilizados na composição das estruturas, exigindo ensaios de maior complexibilidade e custo para caracterizar o material.

REFERÊNCIA

ANTT. RELATÓRIO FINAL – **Estudo da relação entre o módulo de resiliência e o cbr de solos como parâmetro de projeto de pavimentos**. 2016.

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

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P. & SOARES, J. B. **Pavimentação Asfáltica - Formação Básica para Engenheiros**. 1º. Edição, Rio de Janeiro: Petrobrás, 2008.

BERNUCCI, L. B. **Considerações sobre o dimensionamento de pavimentos utilizando solos lateríticos para rodovias de baixo volume de tráfego**. Tese de Doutorado. Departamento de Engenharia de Transportes da Escola Politécnica da USP. 1995. São Paulo, SP.

BIOPDI. **Ensaio de CBR ou Índice de Suporte California**. Disponível em <<https://biopdi.com.br/artigos/ensaio-cbr-indice-suporte-california/>>. Acesso em: 05.mai.2023.

BRASIL. DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. (org.). **NOVO MÉTODO DE DIMENSIONAMENTO MECANÍSTICO EMPÍRICO DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS**. 2020. ELABORADO PELO IPR. 22 Disponível em: <<https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/pesquisas/novo-metodo-de-dimensionamento-mecanistico-empirico-depavimentos-asfalticos>>. Acesso em: 27 fev. 2023.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. **Rodovias brasileiras apresentam piora de qualidade**, 2022. Disponível em <<https://cnt.org.br/agencia-cnt/rodovias-brasileiras-apresentam-piora-de-qualidade>>. Acesso em 13 fev. 2023.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Execução de estudos e pesquisa para elaboração de método mecanístico-empírico de dimensionamento de pavimento asfáltico. Manual de Utilização do programa MeDiNa**. COPPE/UFRJ. Agosto 2020. Disponível em <<https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/medina/medina-1-1-4-manual-de-utilizacao.pdf>>. Acesso em: 27 fev. 2023.

DER-SP. **Instruções de Projeto**. Diretoria de Engenharia. Departamento de Estradas de Rodagem – São Paulo. 2006.

DNER. **Método de projeto de pavimentos flexíveis**. Ministério dos Transportes. Dep. Nacional de Estradas de Rodagem. 1981.

DNIT. **Manual de pavimentação**. Publicação IPR-697. Ministério dos Transportes. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. 2006.

DNIT. ME 134/2018. **Pavimentação - Solos - Determinação do módulo de resiliência - Método de ensaio**. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT). Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil. Disponível em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/metodo-de-ensaio-me/dnit134_2018_me.pdf>. Acesso em 07 abr. 2023.

GUIA DA ENGENHARIA. **Pavimento Flexível exemplo**, 2019. Disponível em <<https://www.guiadaengenharia.com/pavimento-flexivel-exemplo/>>. Acesso em: 04 jun. 2023.

MAIA, Camila Lima. **Análise comparativa de módulos de resiliência obtidos com o geogauge para o controle de qualidade de camadas granulares dos pavimentos**. 2016. 149 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.

MAIA, Iva Marlene Cardoso. **Caracterização de Patologias em Pavimentos Rodoviários**. Dissertação de Mestrado (Mestre em Engenharia Civil) - Universidade do Porto. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2012.

MASTERPLATE. **O que é o pavimento semi-rígido**. Disponível em: <<https://masterplate.com.br/o-que-e-pavimento-semi-rigido/>>. Acesso em 05. mai. 2023.

OWNTEC. **Triaxial dinâmico – Módulo de Resiliência**. Disponível em: <<https://www.owntec.com.br/produto/ms-151-triaxial-dinamico-modulo-de-resiliencia/>>. Acesso em: 05 mai. 2023.

PORTER, O.J. (1942). **Foundations for Flexible Pavements**. HRB 22.

SENÇO, Wlastermiller. **Manual de Técnicas de Pavimentação**. 2º edição. São Paulo: editora PINI, 2007.

SOUZA, Murillo Lopes de. **Método de projeto de pavimentos flexíveis**. 3 ed. revisada e atualizada. Rio de Janeiro: IPR, 1981. 34 p.

SUPORTE SOLOS. **Ensaio Dinâmico – Módulo de Resiliência – Conheça mais detalhes sobre este ensaio - Norma DNIT 134/2018-ME**, 2021. Disponível em <<https://www.suportesolos.com.br/blog/ensaio-dinamico-modulo-de-resiliencia-conheca-mais-detalhes-sobre-este-ensaio-norma-dnit-134-2018-me/228/>>. Acesso em 15 mar. de 2023.