

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

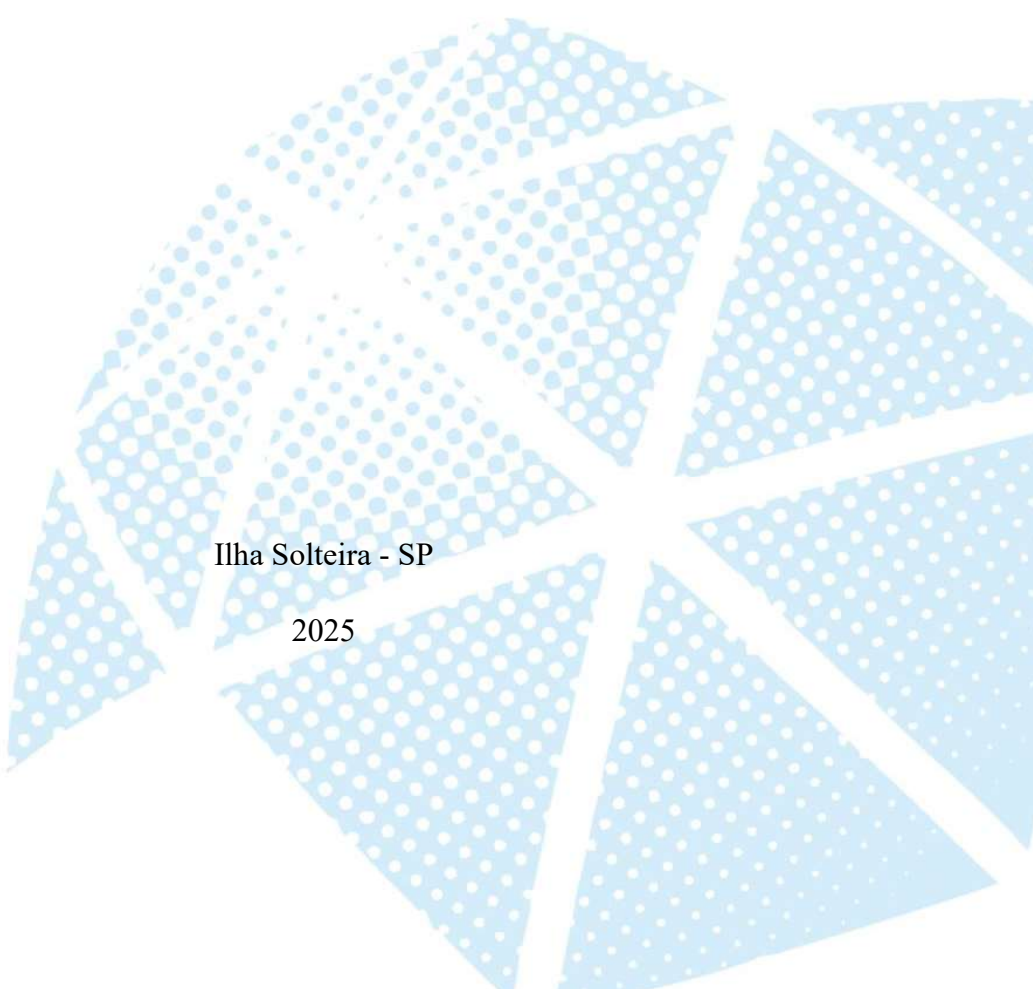
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA

LARISSA QUINTILIANO LIEIRA

**ANÁLISE ENTRE O MÉTODO DE DIMENSIONAMENTO TRADICIONAL E
O NOVO MÉTODO MEDINA, UTILIZANDO FRESADO NA CAMADA DE CAUQ:
UM ESTUDO DE CASO**

Ilha Solteira - SP

2025



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA - CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

LARISSA QUINTILIANO LIEIRA

**ANÁLISE ENTRE O MÉTODO DE DIMENSIONAMENTO TRADICIONAL E O
MÉTODO MEDINA, UTILIZANDO FRESADO NA CAMADA DE CAUQ: UM
ESTUDO DE CASO**

Orientador: Prof. Dr. Jairo Salim Pinheiro de Lima

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Faculdade de Engenharia do Campus de Ilha
Solteira – UNESP, como parte dos requisitos
para obtenção do grau de Engenheiro Civil.

ILHA SOLTEIRA – SP
JUNHO DE 2025

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

- L719a Lieira, Larissa Quintiliano.
Análise entre o método de dimensionamento tradicional e o novo método MeDiNa, utilizando fresado na camada de CAUQ: um estudo de caso / Larissa Quintiliano Lieira Lieira. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2025
69 f. : il.
- Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil) -
Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia, Ilha Solteira,
2025
- Orientador: Jairo Salim Pinheiro de Lima
- Inclui bibliografia
1. MeDiNa. 2. Dimensionamento. 3. Pavimento. 4. Fresado. 5. RAP.

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**CURSO:** ENGENHARIA CIVIL**ÁREA DE CONCENTRAÇÃO:** TRANSPORTES**REALIZADA EM:** 17-06-2025**DISCENTE:** Larissa Quintiliano Lieira**COMISSÃO EXAMINADORA**

1. Prof. Dr. Jairo Salim Pinheiro de Lima – UNESP/FE Ilha Solteira (Orientador).
2. Prof^a. Dra. Camila Gabriela Alexandre Geromel Costa – UNESP/FE Ilha Solteira (Examinadora).
3. Prof^a. Dra. Cláudia Sconton Antônio Marques – UNESP/FE Ilha Solteira (Examinadora).

Título do trabalho: Análise entre o método de dimensionamento tradicional e o novo método MeDiNa, utilizando fresado na camada de CAUQ: um estudo de caso.

Local: Unesp, Departamento de Engenharia Civil.

Horário de início: 10:00h.

Em sessão pública, após exposição em torno de 30 (trinta minutos), a discente foi arguida oralmente, e no final da exposição foi "**APROVADA**" pelos membros componentes da Comissão Examinadora. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ATA, a qual é assinada pelos membros da Comissão Examinadora e pelo discente.

Ilha Solteira, 17 de junho de 2025.

Prof. Dr. Jairo Salim Pinheiro de Lima
UNESP/FE Ilha Solteira (Orientador)

Prof^a. Dra. Camila Gabriela Alexandre Geromel Costa
UNESP/FE Ilha Solteira

Prof^a. Dra. Cláudia Sconton Antônio Marques
UNESP/FE Ilha Solteira

Ciente:
Discente: Larissa Quintiliano Lieira

Dedico este trabalho à minha família.

Agradecimentos

Agradeço a Deus por me dar forças e me guiar todos os dias para concluir essa etapa importante em minha vida.

Agradeço aos meus pais, Júlio e Roseli, por me proporcionarem todo o apoio e condições possíveis para o meu desenvolvimento profissional e pessoal.

Agradeço ao professor Dr. Jairo Salim Pinheiro de Lima por todo o tempo, paciência e orientação ao longo dos meses que me proporcionaram realizar esse estudo.

Agradeço ao João Victor G. Rodrigues pelo incentivo e apoio em todos os momentos ao longo dessa jornada.

Agradeço à empresa Eixo SP por contribuir com o projeto base para análise e estudo de caso.

“As dificuldades fortalecem a mente, assim como o trabalho fortalece o corpo” (Sêneca, Carta a Lucílio, Carta 78).

RESUMO

No Brasil, o transporte rodoviário é o principal meio de deslocamento de cargas e pessoas, sendo assim, é preciso que este ofereça conforto e segurança ao usuário, mantendo sua qualidade ao longo de sua vida útil. Desse modo é necessário dimensionar os pavimentos com a maior suporte ao tráfego e ao intemperismo. Sendo assim, essa pesquisa tem como objetivo principal analisar o dimensionamento de um pavimento flexível para um trecho de rodovia empregando dois métodos o tradicional e o mecanístico-empírico MeDiNa. E avaliar a utilização de materiais fresados na camada de rolamento. O programa analisou a estrutura dimensionada tradicionalmente da duplicação da SP-294, classificando-a como inadequada à deflexão da sub-base. Gerou-se então uma nova estrutura com mais cal, mais segura e aceitável. Isso proporcionou redução na espessura da camada de rolamento e, conseqüentemente, redução do custo da estrutura final. Entretanto, para a utilização do software precisam-se inserir as propriedades de cada material, além da caracterização. Nesse contexto, avaliou-se a utilização de fresado para minimizar o custo e aplicá-lo nesses ensaios, o que apresentou resultados satisfatórios. Concluiu-se que esse novo método apresentou uma nova forma de dimensionar o pavimento desde que seja possível realizar os ensaios e adequar os modelos matemáticos.

Palavras-chave: MeDiNa; Dimensionamento; Pavimento; Fresado; RAP.

ABSTRACT

In Brazil, road transport is the main means of transporting cargo and people, and therefore it must offer comfort and safety to the user, maintaining its quality throughout its useful life. Therefore, it is necessary to design pavements with the greatest support for traffic and weathering. Therefore, the main objective of this research is to analyze the design of a flexible pavement for a stretch of highway using two methods: the traditional and the mechanistic-empirical MeDiNa. And to evaluate the use of milled materials in the bearing layer. The program analyzed the traditionally designed structure of the SP-294 duplication, classifying it as inadequate for the deflection of the sub-base. A new structure with more lime was then generated, which was safer and more acceptable. This provided a reduction in the thickness of the bearing layer and, consequently, a reduction in the cost of the final structure. However, to use the software, it is necessary to enter the properties of each material, in addition to the characterization. In this context, the use of milling was evaluated to minimize costs and apply it in these tests, which presented satisfactory results. It was concluded that this new method presented a new way of dimensioning the pavement as long as it is possible to carry out the tests and adapt the mathematical models.

Keywords: MeDiNa; Sizing; Pavement; Milling; RAP.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Distribuição das cargas aplicadas em Pavimento Rígido e Flexível.....	3
Figura 2 – Estrutura do pavimento asfáltico flexível	5
Figura 3 – Determinação de espessura de pavimento.....	10
Figura 4 – Simbologia do dimensionamento de pavimento flexível.....	10
Figura 5 – Eixo-padrão rodoviário	13
Figura 6 – Comportamento dos materiais de pavimentação sujeitos a um ciclo de carregamento	14
Figura 7 – Equipamento de ensaio de compressão diametral de cargas repetidas	15
Figura 8 – Aparelhagem para determinação do MR dos Solos – Esquema do equipamento triaxial de carga repetida.....	19
Figura 9 – Exemplo do comportamento do Modulo de Resiliência de material estabilizado	20
Figura 10 – Fadiga do revestimento do pavimento asfáltico.....	21
Figura 11 – Esquema para quantificar a área trincada no pavimento.....	22
Figura 12 – Curva de fadiga de mistura asfáltica	23
Figura 13 – Curva sigmoide	24
Figura 14 – Função de Transferência Proposta por Fritzen (2016).....	25
Figura 15 – Esquema de deformação permanente	27
Figura 16 – Esquema de montagem do ensaio de Flow Number (FN)	28
Figura 17 – Curva típica do ensaio uniaxial de carga repetida: deformação plástica vertical uniaxial acumulada versus número de ciclos	28
Figura 18 – Pontos de análise da deformação permanente no interior do pavimento	30
Figura 19 – Parâmetros do Modelo de Previsão da Deformação Permanente	31
Figura 20 – Máquina fresadora.....	33
Figura 21 – Trecho de estudo	36
Figura 22 – Durante e pós obra	36
Figura 23 – Propriedades da camada de rolamento	39
Figura 24 – Propriedades da camada de base	39
Figura 25 – Propriedades da camada de sub-base	39
Figura 26 – Propriedades da camada do subleito	40
Figura 27 – Resultado do software MeDiNa	40
Figura 28 – Resultado do software MeDiNa referente à evolução do trincamento	41

Figura 29 – Novas propriedades da camada de sub-base	41
Figura 30 – Novo resultado do software MeDiNa	42
Figura 31 – Novo resultado do software MeDiNa referente à evolução do trincamento	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Índice de Grupo e o CBR_{IG}	6
Tabela 2 – Características Geotécnicas	6
Tabela 3 – Faixa Granulométrica E e F	7
Tabela 4 – Espessura mínima do revestimento betuminoso em função no número “N”	8
Tabela 5 – Coeficiente de equivalência estrutural (K)	9
Tabela 6 – Estimativas de MR para diversos materiais.....	17
Tabela 7 – Valores típicos de coeficiente de Poisson.....	17
Tabela 8 – Flow Number para cada condição de operação do eixo padrão	29
Tabela 9 – Critérios de dimensionamento do MeDiNa	31
Tabela 10 – Demonstrativo de produção em toneladas de fresado a quente e morno.....	32
Tabela 11 – Estrutura do pavimento.....	38
Tabela 12 – Estrutura dimensionada pelo MeDiNa.....	43
Tabela 13 – Custo do dimensionamento do DNIT	43
Tabela 14 – Custo do dimensionamento do MeDiNa	44
Tabela 15 – Custo dos dimensionamentos para todo o trecho	44
Tabela 16 – Custo dos ensaios para estudo do solo local.....	44
Tabela 17 – Custo dos novos ensaios	45
Tabela 18 – Custo do investimento	45
Tabela 19 – Custo aproximado utilizando fresado	46

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CAUQ	Concreto Asfáltico Usinado a Quente
CBR	California Bearing Ratio
COPPE	Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-graduação e Pesquisa de Engenharia
CNT	Confederação Nacional do Transporte
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes
FN	Flow Number
IG	Índice de Grupo
IPR	Instituto de Pesquisas Rodoviárias
IS	Índice de Suporte
MeDiNa	Método de Dimensionamento Nacional
RAP	Reclaimed Asphalt Pavements

LISTA DE SÍMBOLOS

A_T	Área trincada
K	Coefficiente de equivalência estrutural
K_B	Coefficiente de equivalência estrutural da base
K_R	Coefficiente de equivalência estrutural do revestimento
K_{Ref}	Coefficiente de equivalência estrutural do reforço do subleito
K_S	Coefficiente de equivalência estrutural da sub-base
μ	Coefficiente de Poisson
ε_r	Deformação específica axial resiliente
ε_p	Deformação permanente específica
ε_t	Deformação resiliente de tração
B	Espessura da base
R	Espessura do revestimento
h_n	Espessura do reforço do subleito
h_{20}	Espessura da sub-base
FC	Fator de carga
f_s	Fator de deslocamento atribuído
FE	Fator de eixo
FN	Flow Number
MR	Módulo de Resiliência
N_f	Número de aplicações de carga
N	Número de repetições de eixos-padrão
Ψ_n	Parâmetros de regressão
t	Taxa de crescimento anual de tráfego
σ_3	Tensão confinante
σ_d	Tensão desvio
θ	Tensão octaédrica
σ_1	Tensão vertical
N_{fad}	Vida de fadiga
V_m	Volume médio diário de veículos
V_t	Volume total de tráfego

Sumário

1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVO	2
2.1. Objetivo Geral.....	2
2.2. Objetivos Específicos	2
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
3.1. Pavimento	3
3.2. Método Empírico DNIT.....	5
3.3. Método MeDiNa	11
3.3.1 Aspectos Gerais	11
3.3.2 Carregamento da Estrutura	13
3.3.3 Propriedades dos Materiais.....	14
3.3.3.1 <i>Consideração Inicial</i>	14
3.3.3.2 <i>Materiais Asfálticos</i>	14
3.3.3.3 <i>Materiais de Solos</i>	18
3.3.3.4 <i>Materiais Estabilizados</i>	20
3.3.4 Fadiga	21
3.3.4.1 <i>Princípios</i>	21
3.3.4.2 <i>Calibração e validação</i>	23
3.3.4.3 <i>Camadas Estabilizadas</i>	25
3.3.5 Deformação Permanente.....	26
3.3.5.1 <i>Análise Inicial</i>	26
3.3.5.2 <i>Camada Asfáltica</i>	27
3.3.5.3 <i>Camada de Solos</i>	29
3.3.6 Limites de Danos e Confiabilidade.....	31
3.4. Fresado.....	32
4. METODOLOGIA	35

4.1. Materiais	35
4.2. Métodos	35
4.2.1 Caso de Estudo	35
4.2.2 Materiais de Pavimentação	37
4.2.3 Estrutura do Pavimento.....	38
4.2.4 Análise do Projeto de Pavimentação pelo programa MeDiNa	38
5. RESULTADOS.....	40
5.1. Análise das estruturas	40
5.2. Análise de custos	43
5.3. Análise do uso de fresado	46
6. DISCUSSÃO.....	46
7. CONCLUSÃO	49
REFERÊNCIAS	50

1. INTRODUÇÃO

No Brasil, o transporte rodoviário apresenta maioridade na movimentação de cargas (65%) e passageiros (95%), validando a preocupação com a qualidade da infraestrutura oferecida nas mais diferentes regiões (CNT, 2023). Isso ocorre tanto por fatores históricos, por exemplo o alto investimento durante o governo de Juscelino Kubitschek; quanto pela falta de incentivo para outros modos de transportes, como o ferroviário, o hidroviário e o aéreo. Devido ao aumento do número de veículos a cada ano (SENATRAN, 2022), faz-se necessário dimensionar pavimentos com capacidade de circulação maior e mais resistente para garantir a boa qualidade, segurança e conforto para os usuários durante a vida útil estabelecida.

Os resultados da 27ª edição da Pesquisa CNT de Rodovias (CNT, 2024), revelam que o Estado Geral das rodovias brasileiras é 67% em estado Regular, Ruim e Péssimo; 33%, Ótimo e Bom. Além disso, a edição também mostrou que essa condição levou a um desperdício de 1,184 bilhão de litros de diesel por caminhões e ônibus, com custo adicional estimado de R\$ 6,81 bilhões para o setor de transporte. Com isso, é importante desenvolver pavimentos mais duradouros e que gerem custo menor de manutenção.

De acordo com CNT (2017), as possíveis causas da deterioração do pavimento seriam o método antigo de dimensionamento dos pavimentos, a diversidade climática no país, deficiência no controle tecnológico dos materiais e das técnicas empregadas durante a execução das obras, a falta de manutenção preventivas adequadas e o sobrepeso no transporte de cargas. Compreender as causas que provocam o processo de deterioração, possibilita diagnósticos que geram soluções compatíveis, eficientes e confiáveis para a sua restauração, além de criar meios que impeçam que ela ocorra antes do previsto.

Nesse sentido, a fim de obter solução mais eficiente, a análise do método de dimensionamento dos pavimentos torna-se um foco do estudo importante. O professor Murilo Lopes de Souza do Instituto Militar de Engenharia, desenvolveu o atual método de dimensionamento conhecido como método do Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER). Este método é utilizado pelo Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes (DNIT) (DNIT, 2006) e está vigente no Brasil desde 1966, e atualizado no ano de 1981 (SOUZA, 1981). O método do DNIT adota metodologia semi-empírica, isto é, uma base empírica que parte da teoria de Boussinesq, a qual considera como limitantes do projeto não só a resistência de suporte do solo empregado no subleito da estrutura, mas também os coeficientes estruturais dos materiais (BIEDACHA, 2020).

Tendo em vista a atual situação, estudos realizados pelo Instituto de Pesquisas Rodoviárias – IPR do DNIT desde 2015 visam desenvolver o método mecanístico-empírico de dimensionamento de pavimentos asfálticos, denominado Método de Dimensionamento Nacional de Pavimentos (MEDINA, 2018). Este método propõe análise empírico-mecanística de uma estrutura pré-dimensionada empiricamente, para a qual, com o auxílio de recursos computacionais, são determinadas as respostas estruturais e, por meio delas, calculados os danos acumulados durante a vida útil da via. Isso permite estimar e comparar o comportamento do pavimento com os critérios de desempenho estabelecidos para o projeto. Caso estas variáveis não sejam satisfeitas, faz-se a variação dos parâmetros de projeto definidos, como as espessuras das camadas e as propriedades dos materiais até que a condição ideal seja alcançada (FERNANDES JÚNIOR, PAIS E PEREIRA, 2007; FONTENELE, 2011).

Além disso, a preocupação com a matéria-prima para a produção da massa asfáltica e a poluição do meio ambiente no descarte dos materiais para a restauração dos pavimentos, tornaram-se pauta de estudos para buscar alternativas mais sustentáveis. Pois, para a manutenção e reabilitação dos pavimentos asfálticos geram-se enormes quantidades de materiais conhecidos como Reclaimed Asphalt Pavements (RAPs). Essa solução consiste na reciclagem do pavimento asfáltico, em que parte da antiga camada do pavimento é retirada por meio de fresagem e transformada em materiais granulares utilizados em nova mistura asfáltica. O uso de RAP como parte da matéria-prima da produção permite preservar o agregado não renovável, como também reduz a quantidade de espaço necessária para o descarte de milhões de toneladas de RAP geradas a cada ano (DANTAS et al., 2007).

2. OBJETIVO

2.1. Objetivo Geral

Este trabalho visa analisar o dimensionamento de um pavimento flexível para um trecho de rodovia empregando dois métodos: o tradicional do DNIT e o mecanístico-empírico MeDiNa, baseado num estudo de caso. Além disso, avaliar a utilização de materiais fresados na camada de rolamento e a sua influência no dimensionamento.

2.2. Objetivos Específicos

Revisar a bibliografia sobre os métodos de dimensionamentos do DNIT e MeDiNa, além do uso de materiais fresados na massa asfáltica.

Definir as espessuras das camadas do pavimento pelos métodos empírico (DNIT) e mecanístico-empírico (MeDiNa).

Verificar a possibilidade da utilização de RAP na camada de C.A.U.Q. e a sua influência no dimensionamento.

Analisar o custo-benefício dos métodos de dimensionamento considerados no estudo.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

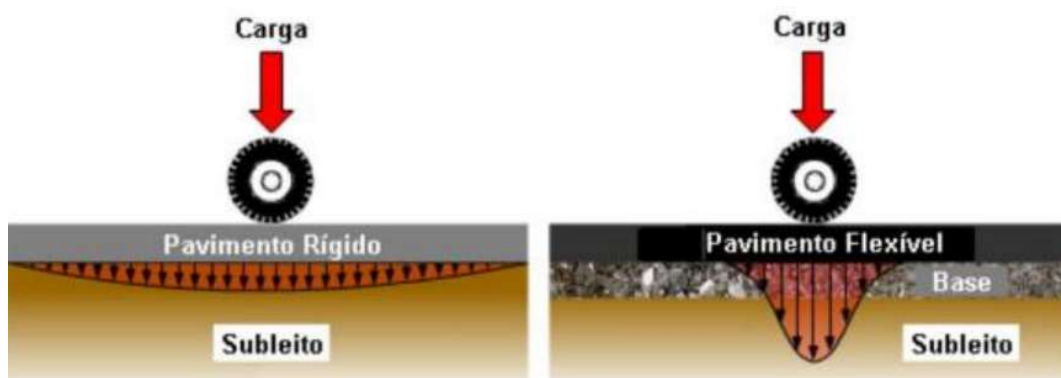
3.1. Pavimento

Nesse capítulo serão tratados os principais tópicos para o desenvolvimento desse trabalho. Primeiro, o conceito de pavimento e, depois, os métodos de dimensionamento de pavimentos flexíveis e o uso de material fresado na composição de massa asfáltica.

Para BERNUCCI et al (2006, p. 09), a estrutura do pavimento é descrita como aquela composta por várias camadas de espessuras finitas, construída sobre a superfície final de terraplenagem, o subleito. Estas camadas possuem a finalidade técnica e econômica de suportar os esforços provenientes do tráfego de veículos e das condições climáticas, de forma a proporcionar aos usuários condições de melhoramento no rolamento com conforto, economia e segurança.

De acordo com os autores acima citados, a classificação do pavimento rodoviário pode ser dividida entre pavimentos: rígidos e flexíveis. A Figura 1 demonstra como é a distribuição das cargas aplicadas em estruturas de pavimentos rígido e flexível.

Figura 1 – Distribuição das cargas aplicadas em Pavimento Rígido e Flexível.



Fonte: BALBO, 2007.

Por outro lado, o Manual de Pavimentação do DNIT (2006) conceitua pavimento como a superestrutura composta por um conjunto de camadas de espessuras finitas, apoiadas sobre um semi-espaço teoricamente infinito, a infraestrutura ou terreno de fundação chamado de subleito.

Em ambas as definições, pavimento é a estrutura responsável por receber e distribuir as cargas aplicadas pelos veículos que passam sobre ele, de forma segura e confortável. Sendo assim, o sistema de pavimentação é dividido em quatro camadas principais: subleito, sub-base, base e revestimento.

Para o DNIT (2006), entretanto, os tipos de pavimento são:

- a) rígido: em que a camada de rolamento absorve praticamente todo o carregamento aplicado sobre a estrutura, pois possui elevada rigidez em relação às camadas inferiores;
- b) semirrígido: ocorre quando o revestimento é formado por uma base cimentada, coberta por capa asfáltica; e
- c) flexível: é o pavimento que permite deformação elástica proporcional em todas as camadas em resposta ao carregamento aplicado, o que transmite os esforços de forma equivalente entre as camadas.

De modo geral, dividem-se os pavimentos asfálticos flexíveis em camadas de revestimento, de base, de sub-base e de reforço do subleito, como mostra a Figura 2. Sendo assim, tem-se como subleito o terreno de fundação do pavimento e a infraestrutura implantada, acabada em termos de movimento de terra (limpeza, cortes e aterros) e de seu aspecto superficial como pavimento.

Figura 2 – Estrutura do pavimento asfáltico flexível.



Fonte: Adada, DER/PR, 2008.

BALDO (2007) propõe as seguintes definições para as camadas do pavimento flexível:

- subleito: é a camada de terreno natural em que a estrutura do pavimento é apoiada e que absorve toda a carga vertical aplicada pelo tráfego que chega até ela. Normalmente essa profundidade é de um metro e por isso essa camada é compactada;
- reforço do subleito: é uma camada com melhor qualidade que a do subleito, justamente para suportar mais esforços e tornar a camada de sub-base e base menores, consequentemente diminuindo o custo da estrutura;
- sub-base: camada auxiliar à base, para diminuir a sua espessura e/ou custos, e capaz de resistir e distribuir os esforços verticais que chegam até ela;
- base: é a camada que deve receber os esforços aplicados e minorados pelo revestimento e, de modo igual, resistir, minorá-los e transmiti-los às camadas subsequentes; e
- revestimento asfáltico: é a camada que resiste ao impacto inicial das cargas verticais do tráfego. O qual irá minorá-lo para transmitir às outras camadas. Ela deve ser impermeável e confortável para resistir também as intempéries e fornecer segurança aos usuários.

3.2. Método Empírico DNIT

O atual método aprovado pelo DNIT para o dimensionamento de pavimentos flexíveis é conhecido como método do Engenheiro Murilo Lopes de Souza (DNIT, 2006). Esse método visa proteger o subleito, relacionando o seu CBR, determinado por ensaios padronizados com corpos-de-prova indeformado ou moldados em laboratório nas condições ótimas de massa

específica aparente seca e teor de umidade, com o equivalente de carga em função do número de repetições do eixo-padrão rodoviário (80 kN) durante o período de projeto (Baldo, 2007).

Nesse método é realizada a correção do CBR (Equação 1) para obter o Índice de Suporte (IS) e gerar maior segurança no dimensionamento (DNIT, 2006), desde que $IS \leq CBR$. A Tabela 1 relaciona o Índice de Grupo e o CBR_{IG} .

$$IS = \frac{CBR + CBR_{IG}}{2} \quad (\text{Equação 1})$$

Tabela 1 - Índice de Grupo e o CBR_{IG} .

Índice de Grupo (IG)	CBR_{IG}
0	20
1	18
2	15
3	13
4	12
5	10
6	9
7	8
8	7
9 a 10	6
11 a 12	5
13 a 14	4
15 a 17	3
18 a 20	2

Fonte: DNER, 1981.

Devem-se considerar algumas características geotécnicas dos materiais granulares, de acordo com cada camada, de acordo com o Manual de Pavimentação (DNIT, 2006), apresentadas na Tabela 2 a seguir.

Tabela 2 – Características Geotécnicas.

	Subleito	Reforço do Subleito	Sub-base	Base
CBR	$\geq 2\%$	$> CBR_{\text{SUBLEITO}}$	$\geq 20\%$	$\geq 80\%$
Expansão	$\leq 2\%$	$\leq 1\%$	$\leq 1\%$	$\leq 0,5\%$
IG	-	-	= 0	-
Limite de Liquidez	-	-	-	$\leq 25\%$
Índice de Plasticidade	-	-	-	$\leq 6\%$

Fonte: DNIT, 2006.

O DNIT (2006) ressalva que o limite de liquidez $> 25\%$ e/o índice de plasticidade > 6 , o material da base além de atender as condições anteriores deve apresentar equivalente de areia > 30 . Em caso de um número de repetições do eixo-padrão ($N \leq 5 \times 10^6$) para o período de projeto, podem ser empregados materiais para a base com $\text{CBR} \geq 60\%$ e as faixas granulométricas E e F apresentadas no Manual de Pavimentação (DNIT, 2006) e na Tabela 3 a seguir.

Tabela 3 – Faixa Granulométrica E e F.

Tipos Peneiras	Para $N > 5 \times 10^6$		Tolerância da Faixa de Projeto
	E	F	
	% em peso passando		
2"	-	-	± 7
1'	100	100	± 7
3/8"	-	-	± 7
Nº4	55-100	10-100	± 5
Nº10	40-100	55-100	± 5
Nº40	20-50	30-70	± 2
Nº200	6-20	8-25	± 2

Fonte: DNIT, 2006.

Esse método leva em consideração outro fator importante, que é o estudo de tráfego para calcular o número “N” de repetições de carga do eixo-padrão de 80kN durante o período de projeto escolhido. Esse eixo-padrão é simples e tem rodas duplas (DNIT, 2006). Para tanto, inicia-se o cálculo pela Equação 2 para determinar o volume médio diário de tráfego após determinado período, considerando a taxa (t) de crescimento anual.

$$Vm = \frac{V_1 [2 + (P - 1) * t/100]}{2} \quad (\text{Equação 2})$$

- Vm é o volume médio diário de veículos;
- V_1 é o volume médio diário de veículos no ano de abertura da via;
- P é o período (tempo de vida útil do pavimento) em anos;
- t é a taxa de crescimento anual o tráfego.

Calcula-se, então, o volume total de tráfego (Vt) (Equação 3).

$$Vt = 365 * P * Vm \quad (\text{Equação 3})$$

A Equação 4 permite calcular Vt com taxa de crescimento (t) em progressão geométrica.

$$Vt = \frac{365 * V_1 \left[\left(1 + \frac{t}{100} \right)^P - 1 \right]}{t/100} \quad (\text{Equação 4})$$

Por fim, encontra-se o valor de “N” conforme a Equação 5.

$$N = Vt * FE * FC * FR \quad (\text{Equação 5})$$

- N é o número de repetição de eixos-padrão que passam pela via;
- Vt é o volume total de veículos;
- FE é o fator de eixo;
- FC é o fator de carga;
- FR é o fator de clima regional.

O número “N” também precisa ser multiplicado pelo fator climático regional (FR), o qual representa a variação do teor de umidade dos materiais nas diferentes estações do ano. No Brasil, segundo estudos do IPR/DNER (2006) deve-se considerar o valor de 1,0. Entretanto, para Wlastermiler de Senço (2007), sugere-se utilizar fatores climáticos regionais em função da altura média anual de chuva em mm.

- Até 800 mm de altura média anual: fator climático de 0,7.
- De 800 a 1.500 mm de altura média: fator climático de 1,4.
- Mais de 1.500 mm de altura média: fator climático de 1,8.

É possível adotar valores médios referente a cada região no caso de falta de dados.

A espessura do revestimento asfálticos é definida em conformidade com o número de operações do eixo padrão (N). A Tabela 4 (DNIT, 2006) indica o tipo e a espessura do revestimento betuminoso para valores de N calculados.

Tabela 4 - Espessura mínima do revestimento betuminoso em função no número “N”.

“N” DE PROJETO	ESPESSURA MÍNIMA DO REVESTIMENTO BETUMINOSO
$N \leq 10^6$	Tratamento superficial betuminoso
$10^6 < N \leq 5 \times 10^6$	Revestimento betuminoso 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 módulo de elasticidade reflete a capacidade do material distribuir pressões sobre as camadas inferiores. Quanto maior o módulo de elasticidade, maior é a capacidade de distribuição de pressão às camadas adjacentes (Baldo, 2007). O método do DNIT proposto por Murilo Lopes emprega o coeficiente de equivalência estrutural conforme indicado na Tabela 5.

Tabela 5 – Coeficiente de equivalência estrutural (K).

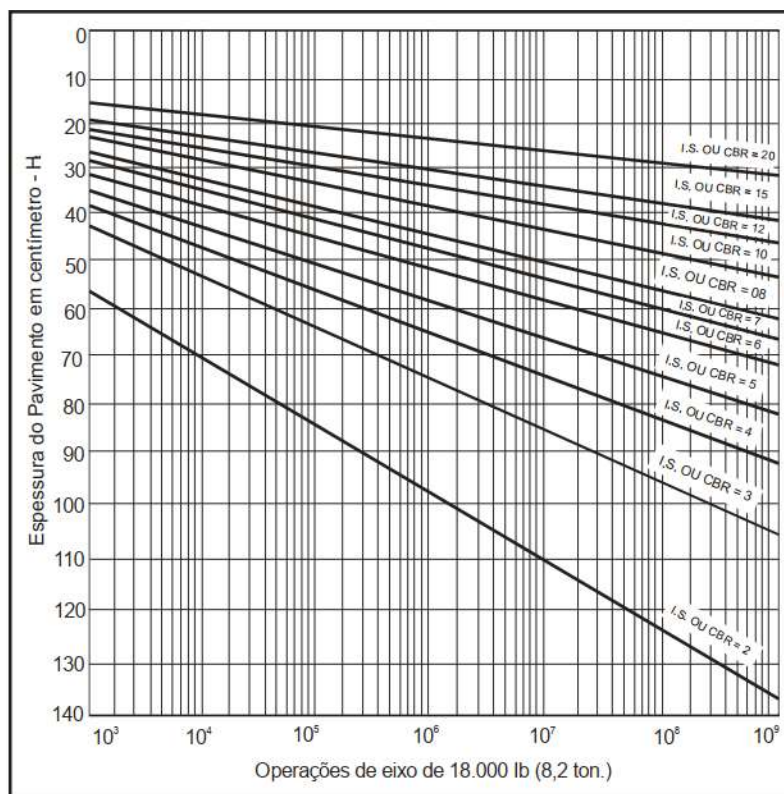
Camadas componentes do pavimento	Coeficiente K
Base ou revestimento de concreto betuminoso	2,00
Base ou revestimento pré-misturado a quente, de graduação densa	1,70
Base ou revestimento pré-misturado a frio, de graduação densa	1,40
Base ou revestimento betuminoso por penetração	1,20
Camadas granulares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

Fonte: DNIT, 2006.

Cada camada recebe um coeficiente: K_R para o revestimento; K_B para a base; K_S para sub-base e K_{Ref} para o reforço do subleito.

Com o número “N” e o valor de CBR ou IS do material, calcula-se a espessura do pavimento sobre aquela camada. Pela Equação 6 ou pelo ábaco (Figura 3), que relaciona o valor de “N” (Souza, 1981).

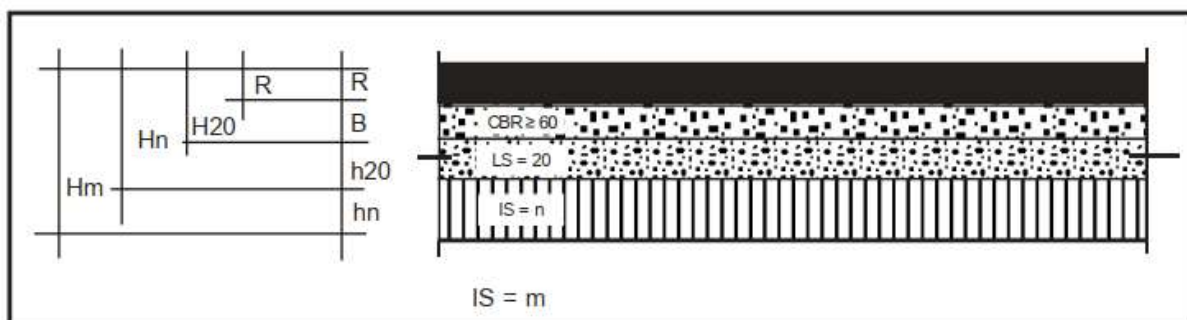
$$Hn = 77,67 * N^{0,0482} * CBR^{-0,598} \quad (\text{Equação 6})$$

Figura 3 – Determinação de espessura de pavimento.

Fonte: DNIT, 2006.

Com a espessura total do pavimento (Figura 3), calculam-se as espessuras necessárias para proteger as camadas que compõem o pavimento. Essa determinação é realizada por meio dos Índice de Suporte ou CBR e do número N.

Segundo o Manual de Pavimentação (2006), as espessuras mínima e máxima de compactação para camadas granulares são de 10 cm e 20 cm, respectivamente. A espessura construtiva mínima para estas camadas é de 15 cm. Ademais, em caso de a camada da sub-base com valor de CBR superior a 20, calcula-se utilizando esse valor com o intuito de protegê-la. A Figura 4 representa a simbologia adotada no dimensionamento do pavimento flexível.

Figura 4 - Simbologia do dimensionamento de pavimento flexível.

Fonte: DNIT, 2006.

Com os valores de H_m , H_n , H_{20} e R , adotam-se as Inequações 1, 2, e 3 para calcular as espessuras da base (B), sub-base (h_{20}) e reforço do subleito (h_n).

$$RK_R + BK_B \geq H_{20} \quad (\text{Inequação 1})$$

$$RK_R + BK_B + h_{20}K_S \geq H_n \quad (\text{Inequação 2})$$

$$RK_R + BK_B + h_{20}K_S + h_nK_{ref} \geq H_m \quad (\text{Inequação 3})$$

- K_R é coeficiente de equivalência estrutural do revestimento;
- K_B é coeficiente de equivalência estrutural da base;
- K_S é coeficiente de equivalência estrutural da sub-base;
- K_{ref} é coeficiente de equivalência estrutural do reforço do subleito;
- B é espessura da base (cm);
- R é espessura do revestimento (cm);
- h_{20} é espessura da sub-base (cm);
- h_n é espessura do reforço do subleito (cm).

3.3. Método MeDiNa

3.3.1 Aspectos Gerais

A fim de auxiliar e modernizar, por meio da análise mecanística, o dimensionamento dos pavimentos rodoviários asfálticos, o Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR) e o Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-graduação e Pesquisa de Engenharia, da Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE), desenvolveram o Método MeDiNa (DNIT, 2020).

O autor responsável por iniciar e desenvolver boa parte dos estudos do método mecanístico no Brasil, Jacques de Medina, publicou em 2018 a primeira versão de sua experiência adquirida em seu projeto de mestrado realizado nos Estados Unidos na década de 1950. Em sua homenagem, o novo método recebeu o nome de MeDiNa e também por conter as iniciais do nome “Método de Dimensionamento Nacional” (DNIT, 2020).

Uma teoria mecanística-empírica analisa analiticamente as diferentes solicitações, resistências e materiais. Com isso, a avaliação estrutural do pavimento é realizada não apenas por meio das tensões e deformações aplicadas à estrutura pela repetição de cargas do tráfego, mas também pela capacidade dos materiais constituintes em resistirem a estes esforços. Desse modo, a parte mecanística é realizada por modelos matemáticos que são adquiridos por meio de dados obtidos em ensaios laboratoriais, os quais traduzem as deformações, tensões e

deslocamentos para um determinado tempo de vida útil de projeto. Enquanto o modelo empírico ocorre por meio dos fatores de calibração campo-laboratório sobre os modelos desenvolvidos em laboratório (FRANCO, 2007).

A Teoria da Elasticidade e as pesquisas realizadas por Boussinesq e Burmister, foram a base para o desenvolvimento das soluções de como determinar as tensões e deformações nos pavimentos do novo método (PITANGUI, 2019).

O software MeDiNa realiza a verificação e dimensionamento mecanístico-empírico de estruturas de pavimentos, empregando a rotina AEMC, “Análise Elástica de Múltiplas Camadas” (Manual MeDiNa, 2020). Esta rotina calcula tensões e deformações aplicadas pelo carregamento das rodas-tipo do eixo-padrão rodoviário e, por meio de modelos de fadiga e deformação permanente, ajusta as espessuras das camadas (FRANCO, 2018).

De acordo com o Manual de Utilização do programa MeDiNaA (2020), as hipóteses fundamentais da solução computacional baseiam-se em princípios, como:

- materiais: elásticos lineares, isotrópicos e homogêneos;
- a Lei de Hooke é válida e o módulo de compressão é semelhante ao módulo de tração;
- camadas ilimitadas na direção horizontal;
- todas as camadas possuem espessura finita, à exceção da camada inferior que é considerada semi-infinita;
- a superfície da primeira camada não está submetida a tensões fora da área carregada;
- na área carregada ocorrem apenas tensões normais;
- carga aplicada: estática e uniformemente distribuída em toda a área circular de contato;
- tensões e deformações nulas em grandes profundidades;
- as condições de aderência na interface das camadas podem variar de totalmente aderida até lisa ou sem aderência.

O programa pode ser utilizado no modo de projeto de reforço de um pavimento ou de dimensionamento de um novo pavimento. Para o dimensionamento, o programa necessita que sejam fornecidos: a estrutura que o pavimento terá; as características dos materiais constituintes de cada camada e suas espessuras; e o tráfego informando o número “N” (PITANGUI, 2019).

Depois, o software permite que o usuário utilize a função dimensionar ou analisar. Na primeira, com os materiais definidos, o programa realiza diversas análises, alterando as espessuras das camadas com o objetivo de atender os critérios de área trincada e deformação

permanente. No segundo, com a estrutura definida, o MeDiNa verifica as espessuras das camadas sem alterá-las e mostra como elas se comportarão sob as cargas do tráfego.

O dimensionamento pelo software MeDiNa, leva em consideração as ressalvas de Medina e Motta (2015) acerca da previsão dos principais efeitos mecanismos de degradação do pavimento, para evitá-los antes que o número “N” de projeto seja alcançado. Sendo eles: a fadiga das camadas de maior rigidez; o afundamento de trilha de roda e a ruptura plástica (área trincada). Com isso, esse método considera fatores relacionados a seguir.

3.3.2 Carregamento da Estrutura

O Eixo-Padrão Rodoviário também é utilizado no Método de Dimensionamento Nacional de Pavimentos na configuração das rodas para analisar a solicitação do tráfego. Ele foi adotado, pois o modelo de desempenho de fadiga interpreta as solicitações de tráfego em termos desse padrão. Sendo assim, todos os veículos têm as suas configurações de carga, eixo e repetições transformadas em Número Equivalente de Passagens do Eixo-padrão Rodoviário. Além disso, o procedimento para obter o número N preserva o roteiro do Método Empírico.

Vale lembrar que a carga da roda é tomada como uniformemente distribuída na área de contato circular entre o pneu e a superfície do pavimento. E a tensão solicitante de contato é adotada como a pressão de inflação dos pneus do eixo padrão, 0,56 MPa. A configuração do eixo padrão rodoviário é representada na Figura 5.

Dados do eixo-padrão:

- carga de eixo: 8,2 tf;
- pressão de pneus: 0,56 Mpa;
- raio da área de contato: 10,79 cm;
- distância entre rodas: 32,4cm.

Figura 5 – Eixo-padrão rodoviário.



Fonte: Manual MeDiNa, 2020.

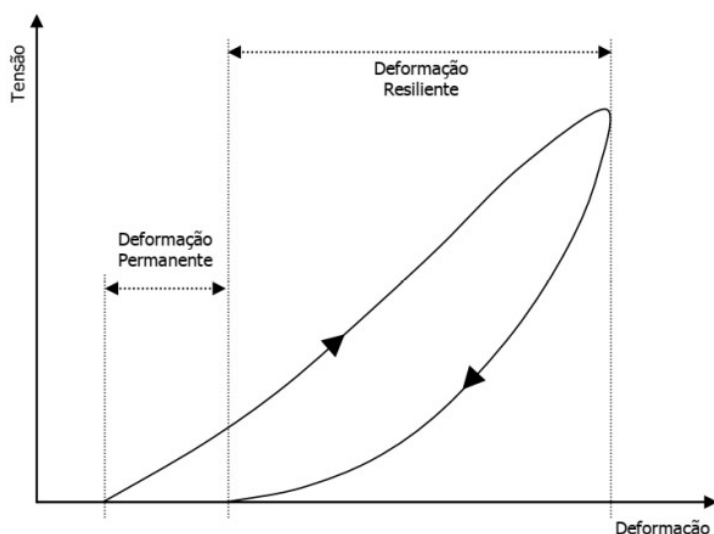
3.3.3 Propriedades dos Materiais

3.3.3.1 Consideração Inicial

Para a análise da resistência da estrutura global do pavimento precisa que seja realizada a caracterização das capacidades de cada material. E elas são obtidas por meio de ensaios que buscam reproduzir o estado de tensões e as condições ambientais a que os pavimentos serão submetidos (MOTTA, 1991 apud FRANCO, 2007).

A Lei de Hooke dificilmente é válida para representar o comportamento dos materiais da pavimentação, pois a aplicação das cargas gera uma parcela de deformação permanente. Carregamentos repetitivos promovem uma parte de deformação elástica na estrutura, ou seja, recuperável (resiliente), assim como, uma parte de deformação permanente (plástica). A Figura 6 representa esse estado. Dado a dificuldade em prever esse comportamento, é comum utilizar a simplificação de elasticidade linear dos materiais.

Figura 6 - Comportamento dos materiais de pavimentação sujeitos a um ciclo de carregamento.



Fonte: LEKARP et al.,2000.

Devido aos materiais constituintes do pavimento serem de difícil modelagem do comportamento mecânico, foi necessário dividi-los em misturas asfálticas e materiais de solo.

3.3.3.2 Materiais Asfálticos

Ao saber a deformabilidade elástica, isto é, o módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson da camada asfáltica, pode-se analisar o seu comportamento mecânico para um dimensionamento analítico. Para Franco (2007), os principais parâmetros para a caracterização

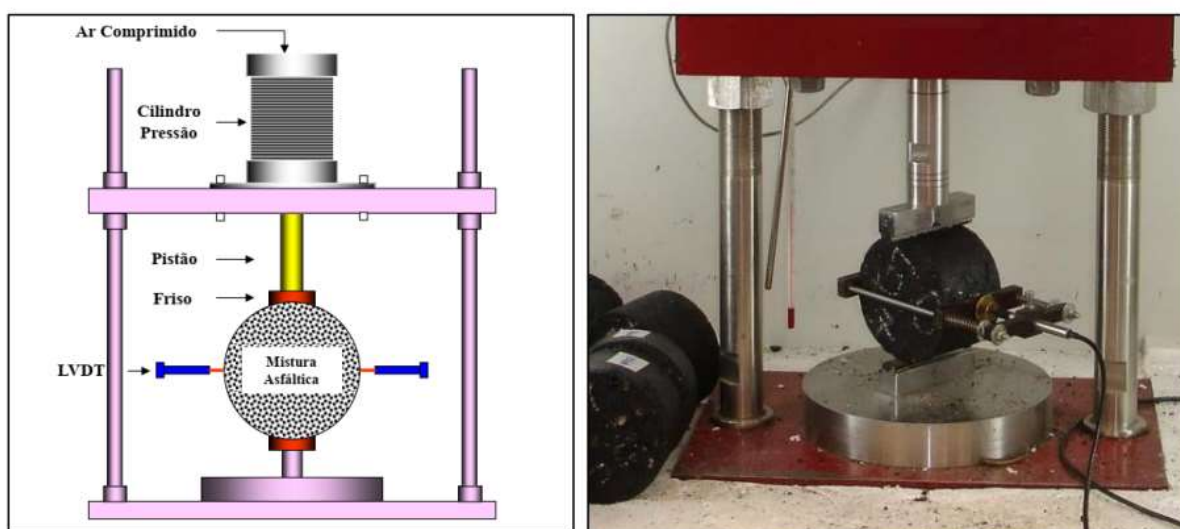
da capacidade dos materiais da pavimentação são o Módulo de Resiliência e Coeficiente de Poisson.

A deformabilidade das misturas asfálticas está relacionada à carga aplicada, ao tempo de aplicação da carga e à temperatura do revestimento. Por isso, estes materiais são classificados como de comportamento visco-termo-elástico. Dada a dificuldade de entendimento e previsão desse comportamento, é feita a sua simplificação para um comportamento elástico linear, Módulo de Resiliência constante (MOTTA,1991).

O Módulo de Resiliência (MR) pode ser definido (COUTINHO, 2011) como o “módulo de elasticidade” que relaciona a tensão-deformação dos materiais. O coeficiente de Poisson relaciona a deformação vertical aplicada com a deformação horizontal sofrida no corpo-de-prova durante o ensaio de compressão uniaxial.

O ensaio para determinar o Módulo de Resiliência e o Coeficiente de Poisson está previsto na norma DNIT 135/2018 - Pavimentação asfáltica - Misturas asfálticas. Determinação do módulo de resiliência - Método de ensaio. Esse ensaio utiliza a compressão diametral (tração indireta) de carga repetida que gera deformação horizontal e vertical, onde ambas são registradas. São aplicados verticalmente ao corpo-de-prova ciclos de carga com 5% a 25% da resistência à tração por compressão diametral. A Figura 7 esquematiza o ensaio. O Coeficiente de Poisson é dado pela Equação 7.

Figura 7 - Equipamento de ensaio de compressão diametral de cargas repetidas.



Fonte: DNIT, 2018.

$$\mu = \frac{-0,23 + 1,07 * |\frac{\Delta H_t}{\Delta V_t}|}{0,78 - 0,31 * |\frac{\Delta H_t}{\Delta V_t}|} \quad (\text{Equação 7})$$

- μ : coeficiente de Poisson;
- ΔH_t : deslocamento horizontal medido no meio do diâmetro do corpo-de-prova;
- ΔV_t : deslocamento vertical medido no meio no diâmetro do corpo-de-prova.

Como se assume o comportamento do material como linear, a Equação 8 passa a relacionar a tensão horizontal (tração) resultante da carga cíclica, com a correspondente deformação horizontal resultante do deslocamento horizontal recuperável (resiliente) para obter o modulo de resiliência.

$$MR = \frac{P}{|\Delta H| * t} * (0,2692 + 0,9976) * \mu \quad (\text{Equação 8})$$

- MR: módulo de resiliência, expresso em MPa;
- P: carga cíclica, expressa em N;
- ΔH : deslocamento horizontal (elástico ou resiliente) mm;
- T: espessura (altura) do corpo de prova, expressa em mm;
- μ : coeficiente de Poisson.

Vale ressaltar que, segundo Fonseca (1995, *apud* Franco, 2007), devido a não homogeneidade dos materiais de pavimentação, o modulo de resiliência pode variar pontualmente dentro de um material específico.

De forma geral, o modulo de resiliência pode variar o seu comportamento de acordo com as características da mistura asfáltica (MOTTA *et al.*, 2002):

- varia com a granulometria da mistura, sendo maior quanto mais grossa é a faixa adotada;
- varia com o ligante asfáltico, sendo maior quanto menor é a penetração do asfalto ou maior a sua viscosidade;
- não é muito sensível ao teor de asfalto, dentro da faixa normal de dosagem;
- é influenciado pela relação asfalto/ filler e a própria natureza do filler.

BALBO (2007) realizou algumas formulações que relacionam parâmetros do material de pavimentação com o seu MR, conforme a Tabela 6.

Tabela 6 - Estimativas de MR para diversos materiais.

Camada	Material	Valores sugeridos para estudos e projetos (MPa)
Subleito	Laterítico (LA' e LG)	$MR = 22 * CBR^{0,8}$
	Não laterítico (NS' NG')	$MR = 18 * CBR^{0,64}$
	Arenoso pouco ou não coesivo (LA, NA e NA')	$MR = 14 * CBR^{0,7}$
Reforço	Laterítico (NA e NG)	$MR = 22 * CBR^{0,8}$
	Não laterítico (NS e NG')	$MR = 18 * (CBR_{REF})^{0,64} * \sqrt[3]{\frac{3 * CBR_{SL}}{3 * CBR_{SL}}}$
Sub-base	Granular	$MR = 18 * (CBR_{REF})^{0,64} * \sqrt[3]{\frac{3 * CBR_{SL}}{3 * CBR_{SL}}}$
Base	Granular	$100 \leq MR \leq 500$
	Asfáltica	$800 \leq MR \leq 1.000$
	Cimentada-BGTC	$5.000 \leq MR \leq 15.000$
Revestimentos asfálticos	Concreto Asfáltico CAUQ	$3.000 \leq MR \leq 5.000$
	Pré-misturado à quente -PMQ Binder	$2.000 \leq MR \leq 2.500$
	Pré-misturado à frio-PMF ou macadame betuminoso	$1.400 \leq MR \leq 1.800$
	Selado-MB	$1.000 \leq MR \leq 1.400$

Fonte: BALBO, 2007.

A Tabela 7 resume os valores típicos de Coeficiente de Poisson adotados em pavimentação.

Tabela 7 - Valores típicos de coeficiente de Poisson.

Material	Faixa de variação
Concretos asfálticos	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: BALBO, 2007.

3.3.3.3 Materiais de Solos

As características do material solo usado nas camadas do pavimento dependem das propriedades das suas partículas constituintes, como a geologia da rocha-mãe, composição mineral e dureza. A presença de materiais contaminantes pode afetar as suas características (pois interferem no atrito entre os agregados) e a sua durabilidade.

A resiliência desse material é afetada por diversos fatores como granulometria, qualidade dos finos, tamanho das partículas, teor de umidade, densidade de compactação, histórico de tensões e frequência de carregamento. Contudo, Franco (2007) ressalta o efeito do estado de tensões como o mais significativo para o seu comportamento. Com isso, é relevante modelar da melhor forma a relação tensão versus deformação.

A aplicação da carga do veículo em movimento gera um comportamento elasto-plástico complexo dos materiais de solos, isto é, respostas caracterizadas por deformações recuperáveis ou resilientes e pelas deformações residuais ou permanentes. Para Medina e Motta, (2005), em casos de camadas espessas no pavimento deve-se considerar a não-linearidade da camada. A sub-rotina EAMC de cálculo de estado de tensões presente no programa, permite ao projetista simular os materiais granulares e solos finos com o seu módulo de resiliência constante ou variável.

Ao assumir a hipótese da aplicação da lei de Hooke obtêm-se os valores do módulo de resiliência do material por ensaio triaxial cíclico, de acordo com a norma DNIT 134/2018 - Pavimentação – Solos - Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio. Esses valores são o resultado da relação entre a tensão-desvio aplicada repetidamente na amostra de solo e a correspondente deformação específica vertical recuperável, segundo a Equação 9 e 10. A aparelhagem para o ensaio triaxial é mostrada na Figura 8.

$$MR = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_r} \quad (\text{Equação 9})$$

$$\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3 \quad (\text{Equação 10})$$

- MR: módulo de resiliência ou relação tensão-deformação do material;
- σ_d : tensão desvio;
- ε_r : deformação específica axial resiliente;
- σ_3 : tensão confinante;
- σ_1 : tensão vertical.

Entretanto, no caso do material solo ser analisado com mais rigor e considerado elástico não-linear, ou plástico, ou viscoso, ou ainda a combinação destes fatores, o seu comportamento será diferenciado, obrigando a busca de modelos empíricos específicos que descrevam as tensões e deformações em função do módulo de resiliência (COUTINHO, 2011).

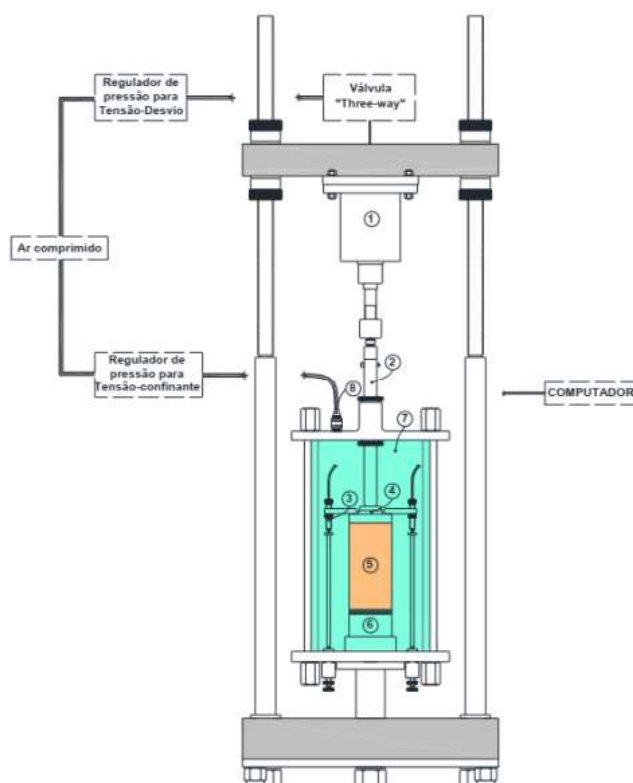
O programa MeDiNa usa a modelagem clássica desse comportamento elástico não-linear, expressa pela Equação 11. Esta equação é caracterizada por relacionar as tensões e deformações desvio e de confinamento (FRANCO, 2007).

$$MR = K_1 * \sigma_3^{K_2} * \sigma_d^{K_3} * \theta^{K_4} \quad (\text{Equação 11})$$

Na expressão, K_1 , K_2 , K_3 e K_4 são constantes obtidas pelo ensaio triaxial, em que o corpo-de-prova é submetido a deformações plásticas.

- θ : tensão octaédrica (igual à soma das tensões principais $\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$);
- σ_d : tensão desvio;
- σ_3 : tensão de confinamento;
- MR: módulo de resiliência em MPa.

Figura 8 - Aparentagem para determinação do MR dos Solos – Esquema do equipamento triaxial de carga repetida.



3.3.3.4 Materiais Estabilizados

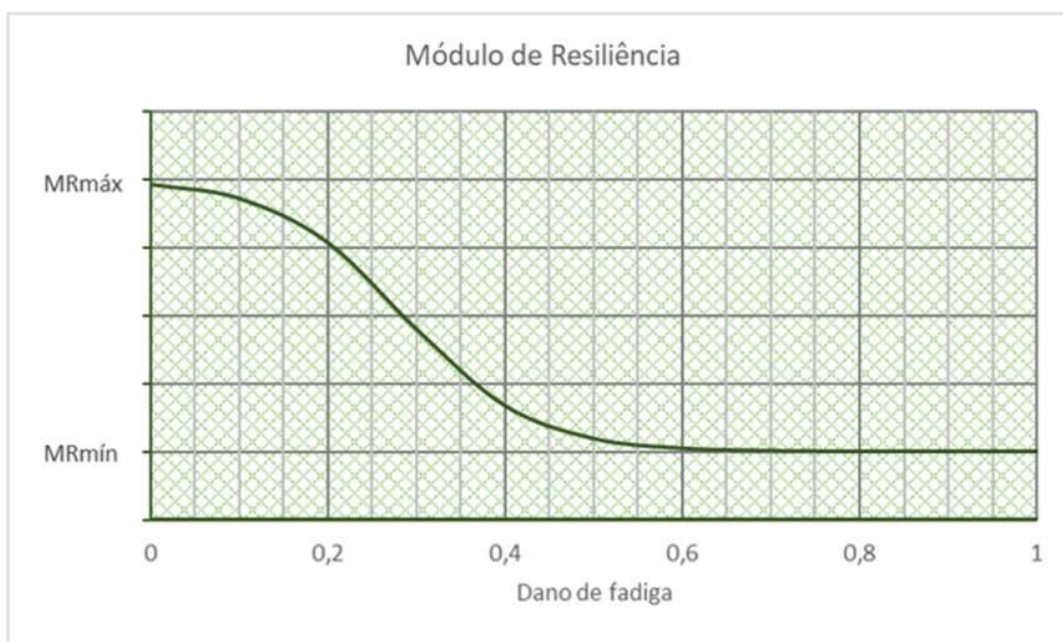
O software analisa as propriedades dos materiais estabilizados como elásticas variáveis ao longo da vida de serviço. Por isso, o programa avalia mensalmente a estrutura e considera que o Módulo de Resiliência decai a cada mês, com comportamento do tipo sigmoidal, variando entre dois limites. Sendo o Limite Superior a camada nova, que não sofreu danos de fadiga; e o Limite Inferior, quando a camada atingiu a sua vida de fadiga, estando totalmente trincada e com comportamento semelhante à camada granular.

O módulo inicial ou o limite superior é obtido pelo ensaio triaxial de cargas repetidas. O Módulo final ou o limite Inferior é inserido pelo projetista e, por segurança, aconselha-se utilizar um valor semelhante ao do material sem o estabilizante.

Sendo assim, para os casos da Brita Graduada Tratada com Cimento, do Concreto Compactado a Rolo e do Solo Cimento, o MR da camada diminui com o acúmulo e aumento do dano de fadiga. A Equação 12 representa a função sigmoidal usado no programa e a Figura 9 é um exemplo de gráfico.

$$MR = MR_{\min} + \frac{MR_{\max} - MR_{\min}}{1 + e^{-4+14 \cdot Di}} \quad (\text{Equação 12})$$

Figura 9 - Exemplo do comportamento do Módulo de Resiliência de material estabilizado.



Fonte: Manual MeDiNa, 2020.

3.3.4 Fadiga

3.3.4.1 Princípios

Quando uma sollicitação de intensidade inferior à tensão de ruptura do material asfáltico é aplicada repetidas vezes ou oscilando, podem acontecer trincas ou efetiva ruptura após um número suficiente de repetições, provocando assim a degradação estrutural chamada de fadiga. No pavimento, ela ocorre pela repetição das operações dos veículos que, por meio de microfissuras acumuladas, acometem a estrutura do revestimento (FRANCO, 2007). No Brasil, essa é uma das principais patologias observados nas rodovias e pode ser causada por diversos fatores como: escolha dos materiais, efeitos climáticos, características do tráfego e da estrutura do pavimento (FRITZEN, 2016). Essa patologia gera trincas que se espalham por toda a espessura da camada, permitindo a passagem de água da superfície para a estrutura, como mostrado na Figura 10. Consequentemente, o pavimento enfraquece e reduz o seu desempenho global, levando a um dos principais processos de ruptura (FRANCO, 2007).

Figura 10 - Fadiga do revestimento do pavimento asfáltico.



Fonte: IPR, 2017.

No método MeDiNa, o revestimento asfáltico é dimensionado com base na área trincada pela fadiga. A área trincada é determinada por meio da Equação 13, baseada no trabalho de Fritzen (2016) que utiliza o esquema da Figura 11 para esse cálculo.

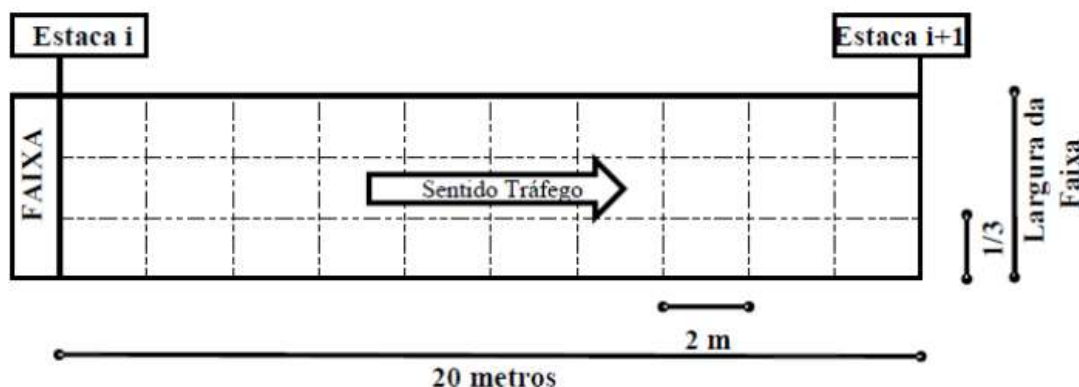
$$AT(\%) = \frac{N_{trincado}}{N_{Total}} * 100 \quad (\text{Equação 13})$$

Onde:

- AT(%): área trincada (%);
- $N_{trincado}$: número de células trincada;

- N_{total} : número total de células do segmento experimental.

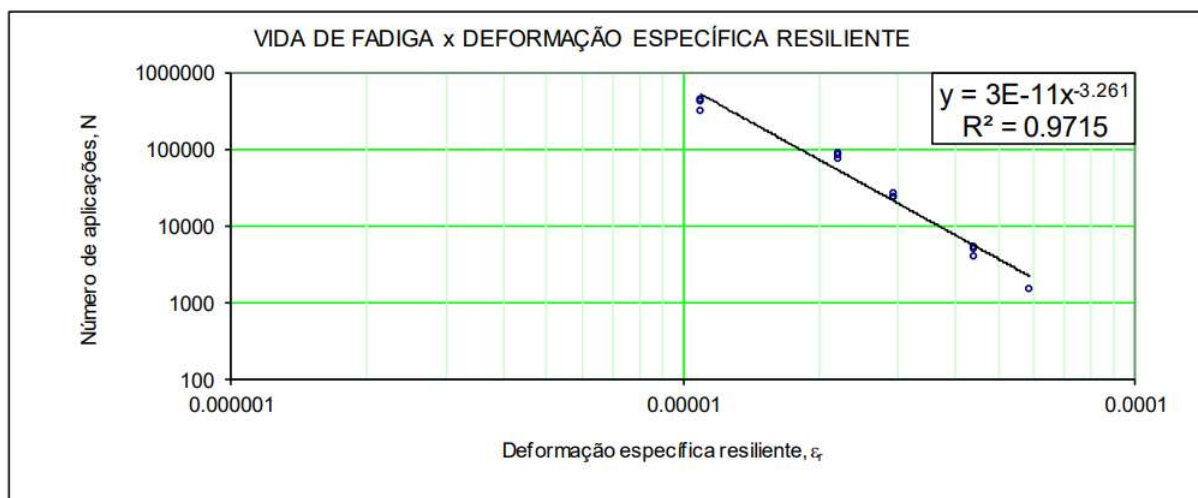
Figura 11 - Esquema para quantificar a área trincada no pavimento.



Fonte: FRITZEN, 2016.

A vida de fadiga em um revestimento asfáltico é definida como a quantidade de veículos expressa por número do Eixo Padrão Rodoviário (N) que o pavimento suporta antes de ser observada uma porcentagem de área trincada acima do valor admissível para a estrutura do pavimento.

A curva de fadiga de misturas asfálticas é obtida por meio do ensaio DNIT 183/2018 – Pavimentação Asfáltica – Ensaio de fadiga por compressão diametral à tensão controlada - Método de ensaio. Este ensaio deve ser feito aplicando-se todas as tensões previstas, sobretudo as mais baixas, pois elas definem melhor a inclinação da curva. O ensaio submete a amostra a aplicação de carga vertical diametral pulsante que gera uma tensão de tração perpendicular à direção da carga aplicada, até provocar a sua ruptura ao longo da parte central do plano diametral vertical. Sendo assim, a vida de fadiga se dá pelo número total de aplicações de carga necessário para a sua ruptura a cada nível de tensão. A Figura 12 mostra uma curva de fadiga típica de material asfáltico.

Figura 12 - Curva de fadiga de mistura asfáltica.

Fonte: DNIT, 2018.

Vale ressaltar que a Equação 14 é a utilizada no programa MeDiNa. Desse modo, ela permite apenas as relações de números de ciclos com a deformação específica resiliente de tração.

$$N_f = K_1 * \epsilon_t^{K_2} \quad (\text{Equação 14})$$

- N_f : número de aplicações de carga;
- K_1 e K_2 : fatores críticos relacionados a qualidade dos materiais asfálticos;
- ϵ_t : deformação resiliente de tração.

O software avalia a fadiga no estado de tensões gerados em 10 pontos da superfície do pavimento, espaçados de 3,65cm, e em mais 10 pontos na fibra inferior da última camada asfáltica. Com isso, obtém-se a média dos 20 pontos calculados, que permitem gerar a área trincada com base na função de transferência (Manual MeDiNa, 2020).

3.3.4.2 Calibração e validação

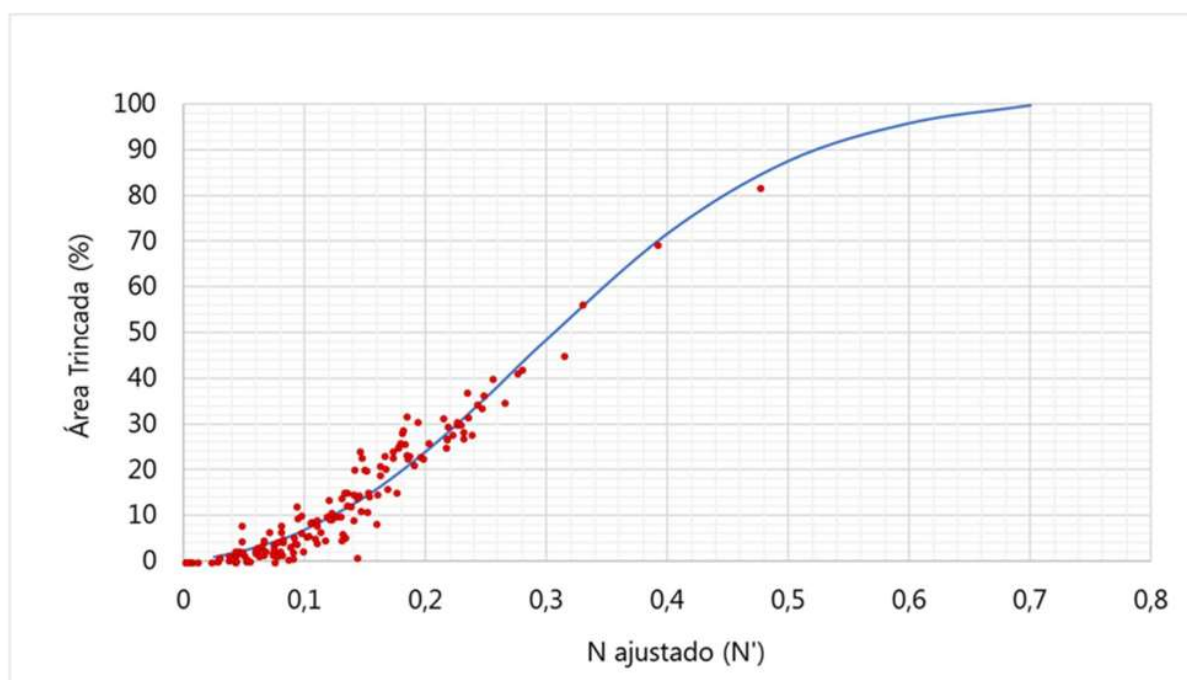
O trabalho de Fritzen (2016) foi adaptado para ser utilizado no software MeDiNa a fim de realizar a calibração dos danos por fadiga em termos de área trincada (Manual MeDiNa, 2020). A sua metodologia propunha prever danos de fadiga em pavimentos asfálticos com base em uma análise elástica-linear, obtendo-se as evoluções dos danos por meio de ensaios laboratoriais de materiais asfálticos (PITANGUI, 2019). Essa tese mostrou que realizando-se uma calibração, ajuste-se a função de transferência, possibilitando obter os danos sofridos pelo pavimento. Essa calibração ocorre por meio da curva sigmoidal, isto é, identificar e definir a curva que melhor se adapta ao comportamento evolutivo do dano sofrido pelo pavimento.

Para isso, multiplicaram-se os fatores de deslocamento aos valores de número N de todas as seções avaliadas, onde havia uma leitura de área trincada de forma aleatória, visando minimizar o erro entre a curva sigmoide e a evolução de área trincada. A Equação 15 mostra um valor N ajustado pelo fator de deslocamento (Manual MeDiNa, 2020). Com isso, FRITZEN (2016) ajustou e obteve a curva sigmoide observada na Figura 13.

$$N' = (N * f_s) * 10^{-1} \quad (\text{Equação 15})$$

- N' é número N ajustado;
- N é número de repetições do eixo padrão quando foi realizada a medição de área trincada;
- f_s é fator de deslocamento atribuído.

Figura 13 – Curva sigmoide.



Fonte: Manual MeDiNa, 2020.

Em sequência, correlaciona-se a estrutura que o pavimento terá e os dados obtidos de área trincada. O software segue a calibração de Fritzen, correlacionando os fatores de deslocamentos de cada seção com o dano médio de fadiga.

Durante os estudos, percebeu-se que com uma malha de 20 pontos distribuídos na camada de revestimento asfáltico estimava-se o dano médio. Desse modo, o software calcula o dano distribuído nessa malha de 20 pontos, que se dará pela divisão de uma aplicação do eixo de carga-padrão rodoviário pelo número permissível de aplicações de eixos de carga (N), expresso pela Equação 16 (Manual MeDiNa, 2020).

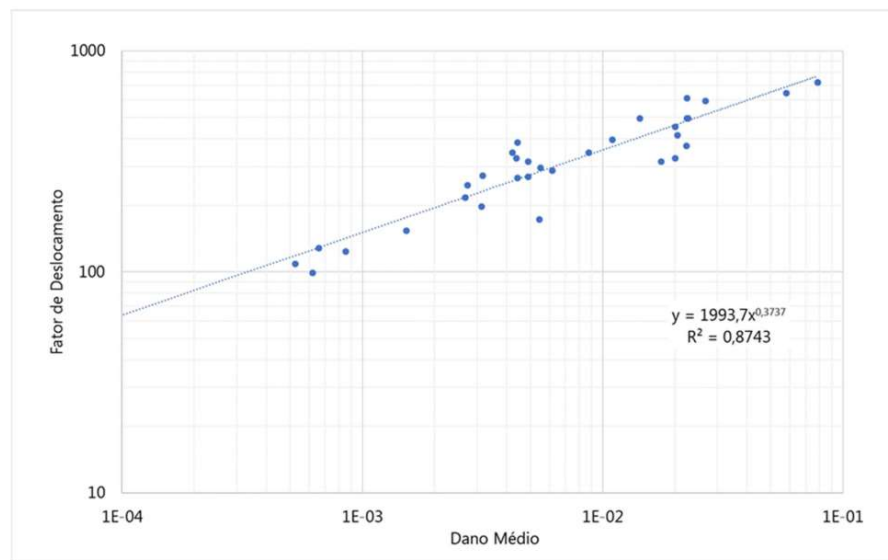
$$D_{\text{médio}} = \frac{1}{20} \sum \left(\frac{1}{N}\right)_{t,c} \quad (\text{Equação 16})$$

A função de transferência (Equação 17) utiliza o valor obtido do dano médio dos 20 pontos em uma previsão de área trincada.

$$F_S = C_1 * (D_{\text{méd}})^{C_2} \quad (\text{Equação 17})$$

O melhor valor para as constantes C_1 e C_2 , obtidas neste processo de calibração, foram de 1993,7 e 0,3737, respectivamente, como observado na Figura 14.

Figura 14 - Função de Transferência Proposta por Fritzen (2016).



Fonte: Manual MeDiNa, 2020.

Logo, tem-se a Equação 18.

$$F_S = 1993,7 * (D_{\text{méd}})^{0,3737} \quad (\text{Equação 18})$$

Com esses parâmetros cadastrados, o software calcula a área trincada para prever a ruptura do pavimento proposto, sendo esse um dos critérios utilizados para definir a vida útil da estrutura (Manual MeDiNa, 2020).

3.3.4.3 Camadas Estabilizadas

No caso das camadas estabilizadas quimicamente, o software utiliza o modelo de dano por fadiga obtido por meio de ensaio de flexão em vigotas, baseado na relação (%RF) entre a tensão de tração na fibra inferior da camada e a resistência à tração na flexão do material aos 28 dias. A Equação 19 desse modelo é apresentada abaixo.

$$N_{fad} = 10^{(k_1 + k_2 * \%RF)} \quad (\text{Equação 19})$$

- N_{fad} : é o número de repetições de carga necessárias à ruptura do corpo de prova (vida de fadiga);
- k_1 e k_2 : são parâmetros experimentais;
- $\%RF$: é a razão entre a tensão de tração aplicada (σ_t) e a resistência à tração à ruptura estática do material (σ_r), ambas em MPa.

A norma indicada para determinar os critérios de ensaio é a DNIT 434/2021 – ME Pavimentação – Ensaio de fadiga por compressão diametral à tensão controlada em camadas estabilizadas quimicamente. De forma similar ao ensaio DNIT 183/2018, são aplicadas cargas verticais diametraais pulsantes que geram tensões de tração perpendicular à direção da carga aplicada até provocar a sua ruptura ao longo da parte central do plano diametral vertical. Desse modo, tem-se também a vida de fadiga como o número total de aplicações de carga necessário para a sua ruptura a cada nível de tensão.

Além disso, para camadas cimentadas, o programa faz duas checagens. A primeira avalia se o dano de fadiga for muito elevado, a ponto de diminuir o módulo mais de 25% do valor em pelo menos um dos períodos de análise consecutivos. No caso de o programa analisar um pavimento, é emitido um Alerta informando que o Módulo decaiu rapidamente. Quando ele está dimensionando, automaticamente a espessura da camada marcada é aumentada até o critério ser atendido. Caso não seja possível, o Alerta da análise é emitido.

A segunda checagem avalia a deflexão da camada que apoia a camada cimentada. Quando ela possuir deflexão medida por fwd teórica superior a 70, ou seja, 0,01mm, o programa emite um Alerta para revisar a estrutura.

3.3.5 Deformação Permanente

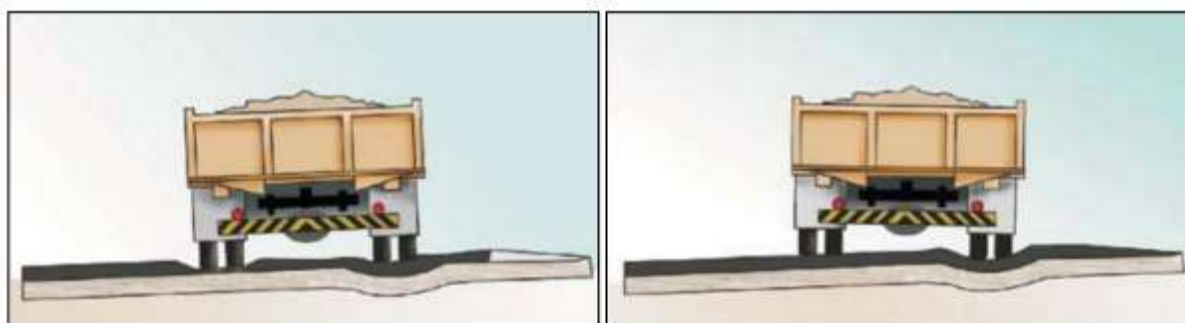
3.3.5.1 *Análise Inicial*

Como resultado das ações das cargas dos veículos, ocorrem as deformações na estrutura do pavimento. Estas deformações podem ser elásticas (reversíveis, resilientes) ou plásticas. As deformações plásticas irreversíveis, acumulam-se a cada operação dos veículos e causam o afundamento de trilha de roda. Cada camada do pavimento possui uma parcela de deformação permanente total da estrutura. Com isso, a fim de estimar os afundamentos totais na trilha de

roda, é necessário determinar o mecanismo de deformação de cada um dos materiais componentes de cada camada do pavimento.

Para Balbo (2007), a deformação permanente pode gerar perda de qualidade do pavimento em relação ao rolamento. Isso normalmente acontece onde há baixa capacidade de resistência das camadas inferiores, o fluxo de veículos pesados é maior e a faixa de tráfego é estreita ou canalizada, como representado na Figura 15. Além disso, essa patologia dificulta o escoamento de água, aumentando o risco de aquaplanagem e diminuindo a segurança e conforto da pista.

Figura 15 - Esquema de deformação permanente.



Fonte: BERNUCCI et al, 2006.

3.3.5.2 Camada Asfáltica

Na camada asfáltica, a deformação permanente possui ação relevante. Entretanto, o programa MeDiNa a considera de forma simplificada pelo parâmetro Flow Number (FN), isto é, um parâmetro balizador do comportamento de misturas asfálticas.

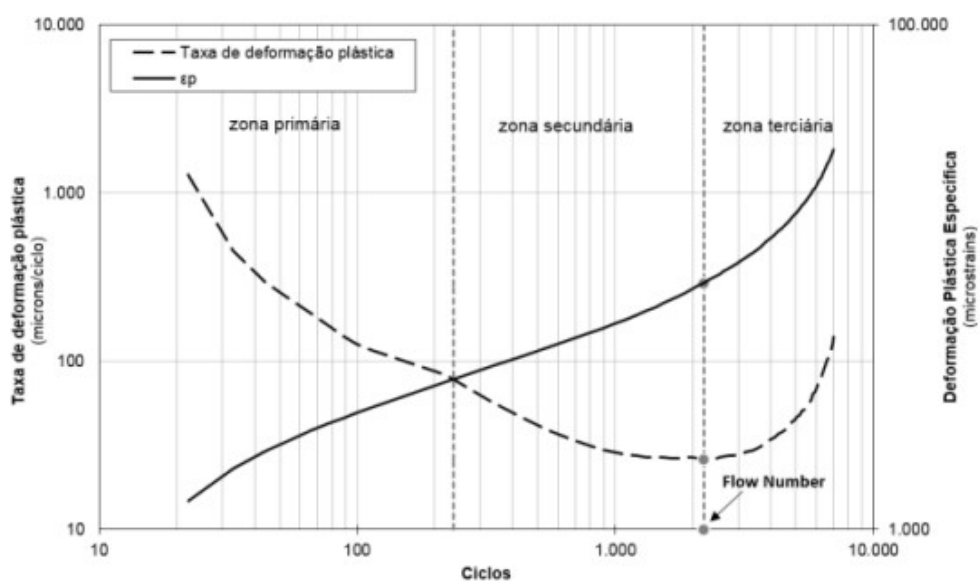
O Flow Number é obtido por meio do ensaio DNIT 184/2018 – ME Pavimentação - Misturas asfálticas - Ensaio uniaxial de carga repetida para determinação da resistência à deformação permanente. Este ensaio propõe que o corpo-de-prova cilíndrico deve ser submetido a um carregamento de compressão vertical repetidamente. A aparelhagem utilizada é mostrada na Figura 16. O ensaio gera um gráfico que relaciona a deformação permanente vertical uniaxial e taxa de deformação plástica vertical versus números de ciclos de aplicação da carga, como o exemplo da Figura 17.

Figura 16 - Esquema de montagem do ensaio de Flow Number (FN).



Fonte: DNIT, 2018.

Figura 17 - Curva típica do ensaio uniaxial de carga repetida: deformação plástica vertical uniaxial acumulada versus número de ciclos.



Fonte: DNIT (2018)

Por essa norma (DNIT – 184/2018), o Flow Number corresponde ao ciclo da curva de deformação plástica vertical acumulada por número de ciclos, que dá início à zona terciária, definido o ponto de taxa mínima de deformação durante o ensaio. A passagem da zona secundária para a zona terciária caracteriza a ruptura do corpo-de-prova pelo início do cisalhamento a volume constante.

O Manual do MeDiNa (2020) adota os limites das classes de desempenho das misturas asfálticas de acordo com o FN, como mostrado na Tabela 8.

Tabela 8 – Flow Number para cada condição de operação do eixo padrão.

CLASSE	Flow Number (FN)	N Recomendado condições normais	N Recomendado condições severas
1	$FN \geq 100$ ciclos	$N < 10^6$	Não recomendado
2	$100 \text{ Ciclos} \leq FN < 300$ ciclos	$10^6 \leq N < 10^7$	$N < 10^6$
3	$300 \text{ Ciclos} \leq FN < 750$ ciclos	$10^7 \leq N < 10^8$	$10^6 \leq N < 10^7$
4	$750 \text{ Ciclos} \leq FN < 2000$ ciclos	$N \geq 10^8$	$10^7 \leq N < 10^8$
5	$FN \geq 2000$ ciclos	-	$N \geq 10^8$

Fonte: MeDiNa, 2018.

Sendo as condições normais de tráfego e via:

- velocidades acima 60 km/h;
- via sem intersecções;
- sem terceira faixa;
- e/ou temperatura máxima do revestimento asfáltico moderada.

Para as condições severas, as condições são:

- tráfego lento (velocidade menor do que 60 km/h);
- intersecções;
- terceira faixa;
- praças de pedágio;
- tráfego canalizado;
- paradas de ônibus;
- e/ou temperatura máxima do revestimento elevada.

Obs: temperatura máxima moderada do revestimento asfáltico é a temperatura máxima média de sete dias consecutivos, a 20 mm de profundidade $\leq 64^\circ\text{C}$. Caso ela seja $> 64^\circ\text{C}$, então considera-se elevada.

O software MeDiNa apresenta o valor do Flow Number como propriedade da camada asfáltica, o qual deve ser exigido no controle de qualidade durante a obra seguindo as condições normal ou severa do local.

3.3.5.3 Camada de Solos

Guimarães (2009) admite que a deformação nas camadas do pavimento pode ser obtida pela modelagem da Equação 20, adaptada para o software MeDiNa. Esse modelo de desempenho segue a premissa dos ensaios triaxiais e avalia a relação entre a deformação

permanente, o estado de tensões e as repetições de aplicação da tensão desviadora. A obtenção dos parâmetros que determinam esse modelo observa a norma DNIT 179/2018 – IE – Pavimentação – Solos – Determinação da deformação permanente, que determina aplicar uma série de repetidos carregamentos, variando os valores de tensão confinante e tensão desviadora, e registrado as deformações plásticas que o corpo de prova assume.

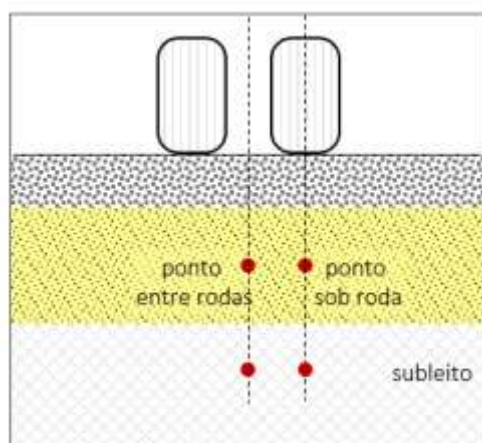
$$\varepsilon_p(\%) = \Psi_1 * (\sigma_3)^{\Psi_2} * (\sigma_d)^{\Psi_3} * N^{\Psi_4} \quad (\text{Equação 20})$$

Onde:

- $\varepsilon_p(\%)$: deformação permanente específica;
- Ψ_1, Ψ_2, Ψ_3 e Ψ_4 : parâmetros de regressão do modelo obtido por ensaio;
- σ_3 : tensão confinante em kgf/cm²;
- σ_d : tensão-desvio, em kgf/cm²;
- N: número de ciclos de aplicação de carga.

O programa MeDiNa calcula a deformação permanente por meio do estado de tensões nos pontos sob a roda e entre as rodas, no centro das camadas conforme mostrado na Figura 18 (Manual MeDiNa, 2020). Com isso, a deformação total é obtida pela somatória das deformações permanentes de cada camada.

Figura 18 - Pontos de análise da deformação permanente no interior do pavimento.



Fonte: MeDiNa, 2018.

A Figura 19 mostra os valores obtidos pelos estudos de GUIMARÃES (2009) para diversos materiais e que foram cadastrados no programa.

Figura 19 – Parâmetros do Modelo de Previsão da Deformação Permanente.

Item	Material	Classificação	$\varepsilon_p^{esp}(\%) = \psi_1(\sigma_3)^{\psi_2} \cdot (\sigma_d)^{\psi_3} \cdot (N)^{\psi_4}$				R ²
			ψ_1	ψ_2	ψ_3	ψ_4	
1	Laterita Acre	Pedregulho	0,105	0,839	-0,014	0,041	0,939
2	Brita Graduada Chapecó	Pedregulho	0,079	-0,598	1,243	0,081	0,951
3	Cascalho Corumbaíba	Pedregulho	0,180	-0,212	0,840	0,443	0,898
4	Laterita de Porto Velho	Pedregulho	0,180	0,470	0,336	0,047	0,809
5	Argila de Ribeirão Preto	LG'	0,206	-0,24	1,34	0,038	0,986
6	Areia Argilosa do ES	LG'	0,643	0,093	1,579	0,055	0,909
7	Solo Papucaia	NS'/NA'	0,244	0,419	1,309	0,069	0,946
8	Areia Fina de Campo Azul/MG	NA	0,050	-1,579	1,875	0,064	0,868
9	Tabatinga Acre	NG'	Não recomendado				

Fonte: Guimarães, 2009.

Vale ressaltar que o programa desconsidera esse fator de camadas estabilizadas, pois essas camadas, se bem construídas e realizadas as devidas manutenções, não contribuem de forma significativa para a formação da trilha de roda total.

3.3.6 Limites de Danos e Confiabilidade

A nova metodologia estabelece limites máximos de tolerância aos danos na área trincada e de deformação permanente. Essa tolerância está relacionada ao tipo de rodovia analisada, como mostra a Tabela 9.

Tabela 9 – Critérios de dimensionamento do MeDiNa.

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

Fonte: Manual MeDiNa, 2020.

Diante do exposto, fica claro que para a realização de um projeto de pavimentação as muitas variáveis são complexas e difícil quantificar. Assim, assumem-se simplificações e

valores médios além do empirismo. Na análise determinística, o software usa os parâmetros médios para prever os principais tipos de danos que podem ocorrer ao longo da vida de serviço do pavimento. Essa previsão, por estar condicionada em valores médios das variáveis de entrada, representa um dano estimado com confiabilidade de 50%. Isto é, há uma probabilidade de 50% do dano ser maior ou menor que o calculado (FRANCO,2007).

Desse modo, é necessário realizar um tratamento estatístico acerca da assertividade do dimensionamento. Nesse contexto, tem-se a confiabilidade como a medida da probabilidade da serventia do pavimento permanecer em um nível adequado durante a sua vida de serviço, ou seja, a probabilidade de acerto no projeto do pavimento. A Tabela 7 também mostra os valores de confiabilidades de acordo com cada tipo de rodovia, os quais são usados pelo MeDiNa.

Para o projeto, temos os seguintes critérios:

- deformações permanentes específicas por camada não maiores que 5%;
- espessura da camada de revestimento asfáltico com valores entre 5,0 cm e 15,0 cm;
- espessura das camadas de solos com valores entre 10,0 cm e 40,0 cm.

3.4. Fresado

A norma DNIT (2021) sugere que a fresagem do material asfáltico consiste no desbastamento ou corte de uma ou mais camadas do revestimento do pavimento por processo mecânico a quente ou a frio. O material resultante da fresagem é chamado de RAP, sigla do inglês “*Reclaimed Asphalt Pavement*”, cuja tradução é: Pavimento Asfáltico Recuperado.

Essa técnica teve início em 1970 nos Estados Unidos, pela necessidade de soluções mais econômicas e sustentáveis para a manutenção de rodovias. No Brasil, ela foi iniciada na década de 1980 (BONFIM, 2011). A Tabela 10 mostra a quantidade de fresado asfáltico disponível e o percentual utilizado nas reciclagens a quente e mornas em alguns países no ano de 2020.

Tabela 10 – Demonstrativo de produção em toneladas de fresado a quente e morno.

PAÍS	Alemanha	França	Itália	EUA
Produção de reciclado a quente e a morno (milhões de toneladas)	38,0	31,9	30,1	370,0
RAP disponível (milhões de toneladas)	11.600.000,0	6.042.000,0	9.500.000,0	85.000.000,0
% de RAP disponível utilizado nas reciclagens quente e morna	84	76	25	93
% de RAP disponível utilizado nas reciclagens a frio	0	Sem dados	75	0,4

Fonte: EAPA – ASPHALT IN FIGURES, 2020.

West *et al.* (2009) confirmam a existência de três fontes para obter material fresado: demolição profunda do pavimento asfáltico; usina de asfalto e fresagem a frio (mais comum). O desbastamento da camada de revestimento asfáltico é realizado por máquinas fresadoras, como na Figura 20.

Figura 20 – Máquina fresadora.



Fonte: Asfalto de qualidade, 2012.

O RAP não pode ser imediatamente utilizado após a fresagem, sendo necessário avaliá-lo antes de misturá-lo aos materiais virgens. Um fator a considerar é a origem do material. Pois, em uma mesma pilha de fresado asfáltico, pode haver material fresado de trechos de uma mesma via, e também de vias distintas. Com isso, a estocagem e a caracterização corretas das pilhas de fresado asfáltico são importantes para evitar misturas muito heterogêneas. Lopes (2010) propõe possíveis motivos para essa heterogeneidade.

- A heterogeneidade do próprio fresado. O material pode apresentar variações em composição, teor de ligante envelhecido e granulometria que causarão dificuldade na padronização da mistura. Os agregados que o compõem podem ter quantidades diferentes de ligante envelhecido aderidos a eles, gerando distorção na curva granulométrica.
- O nível de mistura entre o fresado e os materiais virgens, dado a presença de CAP envelhecido, requer que a usina seja capaz de aquecer o material e misturá-lo adequadamente.
- O nível entre o ligante envelhecido do RAP e o novo ligante, pois o ligante envelhecido (oxidado) apresenta maior viscosidade e rigidez, fazendo com que seja necessário ajustar o teor de CAP virgem ou até mesmo usar reativadores ou rejuvenescedores para que a mistura consiga ser homogeneizada. O ligante oxidado também pode afetar a trabalhabilidade da mistura, ao torná-la mais rígida e de difícil compactação.

Além disso, pode-se considerar também como possíveis fatores causadores da variabilidade do fresado asfáltico, a presença de outros materiais na pilha de armazenamento, como madeira, lixo; a profundidade do corte que pode ser muito profundo e misturar mais de uma camada do pavimento antigo e o trecho fresado incluir qualquer obra de manutenção ali realizada, como lama asfáltica usada para selagem. Esses fatores dificultam a dosagem e padronização da mistura por interferirem na granulometria, na resistência e qualidade do material, caso não sejam bem refinados e caracterizados.

Embora a produção de misturas asfálticas utilizando material fresado apresente esses fatores que dificultam a sua dosagem e padronização, podem-se observar várias vantagens a serem consideradas. A questão ambiental, por exemplo. O reaproveitamento de material contribui para menor extração de agregados naturais e consumo de ligantes asfálticos virgens, de acordo com o relatório da Federal Highway Administration (FHWA, 2011) dos Estados Unidos. No contexto brasileiro, a pesquisa publicada na Revista Transportes avaliou misturas recicladas com diferentes proporções de RAP e constatou economia de aproximados 17% no uso de CAP virgem, além de ganhos ambientais e técnicos (SANTOS; PEREIRA; MINETE, 2021). Dessa forma, contribui para a economia circular na construção civil.

Ademais, o reaproveitamento também proporciona economia operacional ao reduzir a necessidade de transporte e disposição final em aterros. De acordo com a Revista Matéria, “a reutilização desse material, além de atender as especificações técnicas, também surge como solução para evitar deposição inadequada do mesmo, reduzindo o passivo ambiental” (MATÉRIA, 2018).

Apesar das dificuldades apontadas, quando bem dosada e processada, a mistura pode apresentar ganhos de resistência mecânica, por exemplo na deformação permanente. O aumento na rigidez pode ser benéfico também no caso de aplicações em regiões quentes com tráfego pesado.

Ademais, dados do Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo (DER-SP, 2021) indicam que o uso de até 30% de RAP reduz de 15% a 30% no custo final da mistura asfáltica, variando conforme os preços regionais e as condições logísticas. Segundo Centofante et al. (2018), foi analisado obras no Paraná e Santa Catarina e constatou que, com 20% de RAP houve economia de 22% no consumo de CAP e 18% nos agregados, gerando uma economia média de 17% no custo final da mistura.

A adoção do RAP em misturas asfálticas, portanto, configura-se como prática recomendada para a pavimentação sustentável, unindo benefícios técnicos, econômicos e ambientais.

4. METODOLOGIA

4.1. Materiais

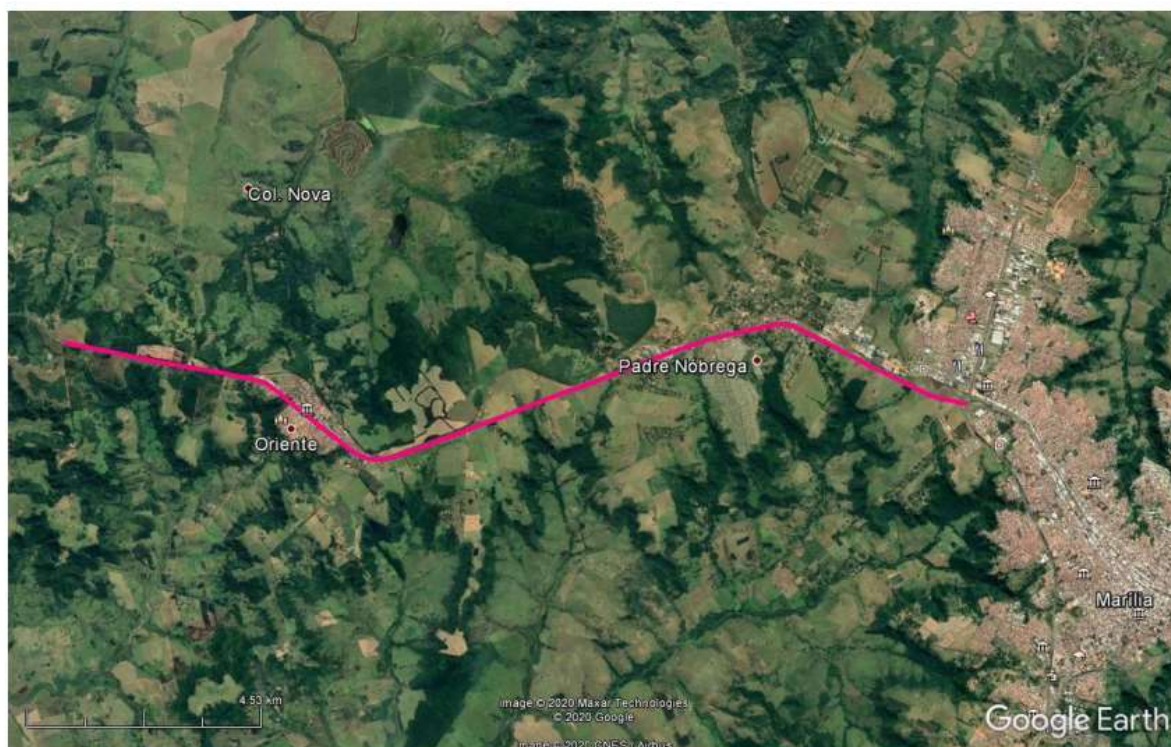
- Computador e Softwares: MeDiNa versão 1.1.9 – atualização de 2023 e Excel – Microsoft Office 365.
- Normas para revisão bibliográfica e dimensionamento:
 - DNER 667/22 – Método de Projeto de Pavimentos Flexíveis;
 - DNIT-IPR-719/2006 - Manual de Pavimentação;
 - DNIT-IPR-2020 - Manual de Utilização do programa MeDiNa;
 - DNIT 135/2018 - Pavimentação asfáltica - Misturas asfálticas Determinação do módulo de resiliência -Método de ensaio;
 - DNIT 134/2018 - Pavimentação – Solos - Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio;
 - DNIT 183/2018 – ME: Pavimentação Asfáltica – Ensaio de fadiga por compressão diametral à tensão controlada – Método de ensaio;
 - DNIT 184/2018 – ME Pavimentação - Misturas asfálticas - Ensaio uniaxial de carga repetida para determinação da resistência à deformação permanente – Método de ensaio;
 - DNIT 179/2018 – IE – Pavimentação – Solos – Determinação da deformação permanente – Instrução de ensaio;
 - DNIT 449/2024 – PRO - Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas –Parâmetros volumétricos para dosagem de misturas asfálticas – Procedimento;
 - DNIT 033/2021 – ES - Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico reciclado em usina a quente – Especificação de serviço;
 - DNIT 034/2005 – ES - Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico reciclado a quente no local;
 - Projeto Executivo de Duplicação – Memorial Descritivo e de Cálculo do Projeto de Pavimentação -SP 294.

4.2. Métodos

4.2.1 Caso de Estudo

Para o estudo de caso, foi analisada a obra de duplicação da Rodovia Comandante João Ribeiro de Barros – SP 294, do trecho de Marília a Pompéia (km 458 ao km 477), ilustrado na Figura 21. A obra de melhoramento aproveitou todo o traçado existente, realizando os devidos alargamentos para a duplicação da via. A Figura 22 mostra a obra durante e pós a sua construção.

Figura 21 – Trecho de estudo.



Fonte: Projeto Executivo de Duplicação, 2022.

Figura 22 – Durante e pós obra.



Fonte: Próprio autor, 2025.

Este projeto foi admitido tecnicamente como uma Rodovia Classe IA. Dentre as suas características, constam: pista dupla com duas faixas de rolamento, cada faixa com 3,50 m de largura; canteiro central variando de 1,00 m a 4,00 m de largura; e passeio público lateral com largura de 1,50 m para cada lado. O projeto seguiu as normas do DNIT (1999) para o dimensionamento de pavimentos vigentes à época, ou seja, por meio do Método Empírico, cujas características iniciais eram:

- Classe da rodovia: IA;
- Extensão: 19,0 km;
- Tempo de projeto: 10 anos;

- Ano de inauguração: 2022.
- Taxa de crescimento: 2,50%;
- Eixo simples padrão: 82t;
- $N_{USACE} = 4,06 \times 10^7$ solicitações do eixo simples padrão;
- $N_{AASHTO} = 1,19 \times 10^7$ solicitações do eixo padrão.

Do projeto base Projeto Executivo de Duplicação – Memorial Descritivo e de Cálculo do Projeto de Pavimentação, a estrutura projetada foi avaliada adotando-se o Método Nacional de Dimensionamento de Pavimentos - MeDiNa.

4.2.2 Materiais de Pavimentação

- Subleito

Para a caracterização do subleito foi realizada investigação geotécnica que consistiu em coletar e ensaiar os solos ocorrentes na cota de implantação do subleito do pavimento para estabelecer critérios de escolha de materiais para camadas de pavimento e índices de capacidade de suporte dos materiais de fundação das estruturas a serem implantadas.

Segundo dados obtidos do Projeto Executivo de Duplicação – Memorial Descritivo e de Cálculo do Projeto de Pavimentação -SP 294, foram realizadas 195 sondagens para obter a caracterização do material e o CBR médio que permitiu calcular o CBR de projeto pela aplicação da distribuição de Student com 90% de segurança, segundo o documento “Instrução de Projeto de Pavimentação” do DER/SP (Jan/2006). Sendo encontrado o valor de $CBR_{proj}=8,00\%$. Além disso, consta neste projeto executivo, que a amostra apresentou classificação TRB A-2-4 (areia siltosa) e LA' (solo laterítico arenoso) para a classificação MCT. A média dos ensaios também permitiu calcular a expansão média de 0,25%; índice de plasticidade de 5,95% e composição com 9,02% de silte.

- Base

Para a base, produziram-se dosagens de misturas de solo-areia-cimento com proporções de 50%-43%-7%. Embora a dosagem sugerida pelas normas “ABNT NBR 12253” e “ET-DE-P00/004-B” indique a utilização de 5% de cimento para solos do tipo A-2-4, para garantir o requisito de resistência à compressão simples de 2,1MPa aos 7 dias de cura, também exigido por elas, foi adotado 7% de cimento. O módulo de elasticidade adotado foi de 50.000 kgf/cm².

- Sub-base

Para a sub-base foi realizada a coleta e iteração com diversos teores de cal, chegando à dosagem de 3% de cal. Sendo o módulo de elasticidade utilizado de 3.000 kgf/cm².

- CAUQ

Foi empregado o cimento asfáltico de petróleo de penetração 30-45 (CAP 30/45). O agregado graúdo foi a pedra britada de diâmetro máximo igual a 1/2" e pedrisco 3/8"; para o miúdo foi o pó de pedra. O material de enchimento (filler) foi a Cal CH I. A mistura seca se enquadrava na curva granulométrica faixa "B" do DNIT.

4.2.3 Estrutura do Pavimento

Seguindo o procedimento descrito no item 3.2, o projeto base adotou a estrutura do pavimento descrita na Tabela 11 com a modificação da camada de concreto betuminoso, a qual foi dividida em três partes para ser possível aplicar uma camada de tratamento superficial dupla, uma de binder e reduzir a camada de CAUQ com polímero.

Tabela 11 - Estrutura do pavimento.

Pista Expressa	Espessura (cm)
CAUQ com polímero	4,0
Binder	4,0
Tratamento superficial duplo	2,0
Solo-areia-cimento	20,0
Solo-cal	20,0
Subleito	∞

Fonte: Projeto Executivo de Duplicação, 2022.

4.2.4 Análise do Projeto de Pavimentação pelo programa MeDiNa

Para que o software analise a estrutura calculada pelo método do DNIT, algumas características da via, do tráfego e dos materiais devem ser admitidos e inseridos no sistema. De acordo com o Manual de Projeto Geométrico do DNIT (1999), a rodovia estudada é classificada como sistema arterial primário. Com isso, o nível de confiabilidade do programa é de 85% e apresenta limite de vida de serviço: 30% de área trincada admissível; e 13mm de deformação permanente total. Para o tráfego, o cálculo de N segue a metodologia do DNIT (2006). Sendo assim, utiliza-se o valor do projeto base de $1,19 \times 10^7$ operações do eixo-padrão.

No caso dos materiais, para simplificar a análise, os seus comportamentos foram assumidos como elasto-lineares, ou seja, módulos de resiliência constantes. Além disso, para a simulação no programa, foi necessário inserir o módulo de resiliência, o coeficiente de Poisson, a curva de fadiga e os coeficientes de deformações permanentes de cada material obtidos por

ensaios em laboratórios. Entretanto, devido a incapacidade de realizar os ensaios, foi utilizado o banco de dados do próprio MeDiNa.

As Figuras de 23 a 26 mostram os materiais escolhidos e as suas propriedades respectivas e que mais se assemelham às do projeto base.

Figura 23 – Propriedades da camada de rolamento.

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

Propriedades	Modelos
Tipo de CAP = CAP 30/45 - PG 70-16	Ensaio de Fadiga
Massa específica (g/cm ³) = 2,4	-Modelo: $k_1 \cdot (et \wedge k_2)$
Resistência à tração CD (MPa) = 2,08	-Coeficiente de Regressão (k1): $\geq 5,0e-14$
Teor de asfalto (%) = 6,0	-Coeficiente de Regressão (k2): $\geq -3,992$
Volume de vazios (%) = 5,0	-Classe de Fadiga: ≥ 2
Faixa Granulométrica = #12,5mm	-FFM (100 μ a 250 μ): $\geq 0,75$
Abrasão Los Angeles (%) = 40,0	Flow Number Mínimo
Norma ou Especificação = DNIT ES 31	- Condição de Tráfego Normal: ≥ 306 ciclos
	- Condição de Tráfego Severa: ≥ 825 ciclos

Fonte: Autora, 2025.

Figura 24 – Propriedades da camada de base.

2 - SOLO CIMENTO: Ceratti, 1991 (mistura 5 CD)

Propriedades
Descrição do Material = Arenoso fino de cor vermelha (SP)
Grupo MCT = LA'
Teor ótimo de cimento = 8%
Resistência à tração CD (MPa) = 0,92
Massa específica (g/cm ³) = 1,812
Umidade Ótima (%) = 14,5
Energia Compactação = ...
Norma ou Especificação = DNIT ES 143 / DNIT 434-2021-ME

Fonte: Autora, 2025.

Figura 25 – Propriedades da camada de sub-base.

3 - SOLO-CAL: Mistura NS'+3% Cal (Teixeira, 2019)

Propriedades
Descrição do Material = Solo siltoso NS' + 3% de Cal CH-III
Grupo MCT = NS'
MCT - Coeficiente $c' = 0,88$
MCT - Índice $e' = 1,62$
Massa específica (g/cm ³) = 1,641
Umidade Ótima (%) = 16,60
Teor ótimo de cal (%) = 3
Tipo de Cal = Cal hidratada dolomítica do tipo CH-III
Energia Compactação = Modificada
Norma ou Especificação = DNIT ES 420 / 421 / 422
Comentários = Ensaio de módulo realizado com 90 dias de cura.

Fonte: Autora, 2025.

Figura 26 – Propriedades da camada do subleito.

4 - SUBLEITO: Solo Siltoso NS'

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

Fonte: Autora, 2025.

5. RESULTADOS

5.1. Análise das estruturas

Com os dados dos materiais anteriormente mencionados, foram especificadas as espessuras das camadas e os dados do tráfego, de modo a oferecer ao programa condições para realizar a análise da estrutura. O resultado encontrado está representado nas Figuras 27 e 28. O programa alerta que a sub-base apresenta deflexão acima do limite 70 (0,01mm).

Figura 27 – Resultado do software MeDiNa.

ESTRUTURA		MODELAGEM		RESULTADOS	
RESPONSÁVEL:	Larissa Lieira	EMPRESA:	Unesp - Feis		
PROJETO:	Duplicação SP 294 - km 458 ao km 477	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	SOLO CIMENTO	Ceratti, 1991 (mistura 5 CD)	20,0	Sigmoidal	0,25
3	SOLO-CAL	Mistura NS'+3% Cal (Teixeira, 2019)	20,0	252	0,25
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): 7512 FV: 1.000 N anual (1º ano): 2.74e+06 % Veículos na faixa de projeto: 39 N Anual da faixa: 1.07e+06 Taxa de crescimento (%): 2,5 Período de projeto (anos): 10 N Total: 1,20e+07 N Total: Número Equivalente total de passagens do eixo padrão na faixa de projeto					
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: 4,1% >>Atenção: o programa não calcula a Área Trincada proveniente da reflexão de trincas da base estabilizada. Afundamento de Trilha de Roda: 0,5mm ALERTAS Deflexão acima do limite 70 (0,01mm) da camada de suporte do material estabilizado.					

Fonte: Autora, 2025.

Figura 28 – Resultado do software MeDiNa referente à evolução do trincamento.

Evolução dos danos no pavimento

Mês	N Equiv	Área Trincada	ATR (mm)
1	8,811e+04	0,59%	0,4
6	5,314e+05	1,09%	0,4
12	1,069e+06	1,40%	0,5
18	1,614e+06	1,64%	0,5
24	2,165e+06	1,83%	0,5
30	2,724e+06	2,01%	0,5
36	3,289e+06	2,17%	0,5
42	3,861e+06	2,32%	0,5
48	4,440e+06	2,47%	0,5
54	5,027e+06	2,61%	0,5
60	5,621e+06	2,75%	0,5
66	6,222e+06	2,88%	0,5
72	6,831e+06	3,01%	0,5
78	7,447e+06	3,14%	0,5
84	8,071e+06	3,27%	0,5
90	8,702e+06	3,40%	0,5
96	9,342e+06	3,53%	0,5
102	9,989e+06	3,66%	0,5
108	1,064e+07	3,79%	0,5
114	1,131e+07	3,92%	0,5
120	1,198e+07	4,06%	0,5

Fonte: Autora, 2025.

Ao tentar dimensionar o pavimento com esses materiais, o programa continua alertando que a estrutura não atende o requisito da deflexão. Assim, fez-se o teste com a mistura de solo + 5% de cal, também disponível no software. A Figura 29 indica as características deste novo material e as Figuras 30 e 31 mostram o resultado e a evolução dos danos com o passar dos meses, respectivamente.

Figura 29 – Novas propriedades da camada de sub-base.

3 - SOLO-CAL: Mistura NS'+5% Cal (Teixeira, 2019)

Propriedades

Descrição do Material = Solo siltoso NS' + 5% de Cal CH-III
 Grupo MCT = NS'
 MCT - Coeficiente $c' = 0,88$
 MCT - Índice $e' = 1,62$
 Massa específica (g/cm^3) = 1,651
 Umidade Ótima (%) = 16,70
 Teor ótimo de cal (%) = 5
 Tipo de Cal = Cal hidratada dolomítica do tipo CH-III
 Energia Compactação = Modificada
 Norma ou Especificação = DNIT ES 420 / 421 / 422
 Comentários = Ensaio de módulo realizado com 90 dias de cura.

Fonte: Autora, 2025.

Figura 30 – Novo resultado do software MeDiNa.

ESTRUTURA		MODELAGEM		RESULTADOS	
RESPONSÁVEL:	Larissa Lieira		EMPRESA:	Unesp - Feis	
PROJETO:	Duplicação SP 294 - km 458 ao km 477			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	5,0	9000	0,30
2	SOLO CIMENTO	Ceratti, 1991 (mistura 5 CD)	20,0	Sigmoidal	0,25
3	SOLO-CAL	Mistura NS'+5% Cal (Teixeira, 2019)	20,0	558	0,25
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): **7512**

FV: 1,000

N anual (1º ano): **2,74e+06**

% Veículos na faixa de projeto: **39**

N Anual da faixa: 1,07e+06

Taxa de crescimento (%): **2,5**

Período de projeto (anos): 10

N Total: 1,20e+07

N Total:

Número Equivalente total de passagens do eixo padrão na faixa de projeto

--- DIMENSIONAMENTO DO PAVIMENTO NOVO ---

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

Nível de confiabilidade da análise: 85%

Área Trincada Estimada do pavimento no fim do período: 2,6%

Análise encerrou por haver atingido a espessura mínima da camada.

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

Afundamento de Trilha de Roda: 0,6mm

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

Fonte: Autora, 2025.

Figura 31 – Novo resultado do software MeDiNa referente à evolução do trincamento.

Evolução dos danos no pavimento

Mês	N Equiv	Área Trincada	ATR (mm)
1	8,811e+04	0,43%	0,4
6	5,314e+05	0,79%	0,5
12	1,069e+06	1,02%	0,5
18	1,614e+06	1,18%	0,5
24	2,165e+06	1,31%	0,5
30	2,724e+06	1,42%	0,6
36	3,289e+06	1,52%	0,6
42	3,861e+06	1,62%	0,6
48	4,440e+06	1,71%	0,6
54	5,027e+06	1,80%	0,6
60	5,621e+06	1,88%	0,6
66	6,222e+06	1,96%	0,6
72	6,831e+06	2,03%	0,6
78	7,447e+06	2,11%	0,6
84	8,071e+06	2,18%	0,6
90	8,702e+06	2,25%	0,6
96	9,342e+06	2,32%	0,6
102	9,989e+06	2,39%	0,6
108	1,064e+07	2,46%	0,6
114	1,131e+07	2,53%	0,6
120	1,198e+07	2,60%	0,6

Fonte: Autora, 2025.

Neste caso, como as camadas de base e sub-base são estabilizadas, o programa não calcula a sua área trincada pela reflexão. Então, os valores indicados na Figura 30 são da evolução tanto da área trincada quanto do afundamento de trilha de roda, somente à camada do subleito ao longo do período de projeto. Por essa análise, o pavimento teria a estrutura determinada na Tabela 12.

Tabela 12 - Estrutura dimensionada pelo MeDiNa.

CAMADA	ESPESSURA (cm)
Concreto Asfáltico 30/45	5,00
Solo Cimento	20,00
Solo-cal 5%	20,00
Subleito	∞

Fonte: Autora, 2025.

5.2. Análise de custos

Com base na Tabela de Preços Unitários do DER (DER, 2023), calculou-se o valor do custo da estrutura projetada pelo método do DNIT e pelo MeDiNa. As Tabelas 13 e 14 apresentam os valores encontrados.

Tabela 13 - Custo do dimensionamento do DNIT.

CÓDIGO DER	SERVIÇO	ESPESSURA	R\$/UNIDADE	R\$/M²
23.08.05	CAUQ com polímero	0,08	1275,50	102,04
23.04.01.16.01	Solo-cimento	0,20	209,07	41,81
23.04.01.11.01	Solo-cal 3%	0,20	140,58	28,12
23.06.02	Tratamento superficial duplo	0,02	1062,39	21,25
23.05.04	Pintura de ligação	-	4,58	9,16
23.05.01	Imprimadura impermeabilizante	-	12,97	12,97
TOTAL	-	-	-	215,35

Fonte: Autora, 2025.

Tabela 14 - Custo do dimensionamento do MeDiNa.

CÓDIGO DER	SERVIÇO	ESPESSURA	R\$/UNIDADE	R\$/M²
23.08.05	CAUQ com polímero	0,05	1275,50	63,78
23.04.01.16.01	Solo-cimento	0,20	209,07	41,81
23.04.01.13.01	Solo-cal 5%	0,20	177,29	35,46
23.06.02	Tratamento superficial duplo	0,02	1062,39	21,25
23.05.04	Pintura de ligação	-	4,58	9,16
23.05.01	Imprimadura impermeabilizante	-	12,97	12,97
TOTAL	-	-	-	184,43

Fonte: Autora, 2025.

Admitindo a construção de duas faixas (além daquelas existentes) com 7 m de largura e extensão de 19 km, encontram-se os valores aproximados de custo resumidos na Tabela 15.

Tabela 15 - Custo dos dimensionamentos para todo o trecho.

DIMENSIONAMENTO	R\$/M²	LARGURA (M)	EXTENSÃO (M)	TOTAL (R\$)
DNIT	215,35	7	19000	28.641.550,00
MEDINA	184,43	7	19000	24.529.190,00

Fonte: Autora, 2025.

Ademais, cabe a análise dos custos dos ensaios para determinar corretamente as características do solo local para o dimensionamento do pavimento. Dentre eles, citam-se os ensaios usuais de caracterização mostrados na Tabela 16, que também adotam os preços da Tabela de Preços Unitários do DER (DER, 2023).

Tabela 16 - Custo dos ensaios para estudo do solo local.

CÓDIGO DER	SERVIÇO	QUANT.	R\$/UNIDADE	VALOR (R\$)
21.01.29	Sondagem a trado profundidade até 5m	155	152,16	23.584,80
21.01.01	Sondagem a percussão até 15m	20	205,97	4.119,40
21.07.01	Abertura de poço de inspeção até 1,5m de profundidade	41	1.072,93	43.990,13
21.07.04	Análise granulométrica por peneiramento e sedimentação	216	278,97	60.257,52
21.07.06	Ensaio de CBR 5 pontos	216	429,16	92.698,56
21.07.07	Classificação MCT (perda por imersão e mini-mcv)	216	543,61	117.419,80
21.07.14	Ensaio de compactação - Proctor	216	185,95	40.165,20
TOTAL	-	-	-	382.235,37

Fonte: Autora, 2025.

Entretanto, a Tabela de Preços Unitários do DER não cota os estudos de dosagens para o solo-cal e para o solo-cimento nas camadas do pavimento. Além disso, também não apresenta os preços-bases dos novos ensaios necessários para obter os parâmetros exigidos pelo programa MeDiNa. Com isso, solicitaram-se orçamentos para estes novos ensaios em dois laboratórios. Neste caso, pretendia-se dimensionar o investimento-extra para o pavimento utilizando o software MeDiNa. Os valores dos novos ensaios constam na Tabela 17.

Tabela 17 - Custo dos novos ensaios.

Laboratório 1		Laboratório 2	
Ensaio	Valor R\$ por CP	Ensaio	Valor R\$ por CP
Modulo de resiliência - DNIT 134/20218	2.400,00	Modulo de resiliência - DNIT 134/20218	2.430,00
Deformação Permanente - DNIT 179/2028	2.500,00	Deformação Permanente - DNIT 179/2028	1.680,00
Modulo de resiliência - DNIT 135/20218	2.600,00	Modulo de resiliência - DNIT 135/20218	1.510,00

Fonte: Autora, 2025.

Com esses valores, realizou-se uma média para calcular o custo do investimento desses ensaios para a utilização do programa, considerando-se apenas necessário realizá-los para o subleito. Os resultados constam na Tabela 18.

Tabela 18 - Custo do investimento.

ENSAIO	MÉDIA R\$	QUANTIDADE	TOTAL
MODULO DE RESILIÊNCIA - DNIT 134/20218	2.415,00	3	7.245,00
DEFORMAÇÃO PERMANENTE - DNIT 179/2028	2.090,00	9	18.810,00
MODULO DE RESILIÊNCIA - DNIT 135/20218	2.055,00	3	6.165,00
TOTAL	-	-	32.220,00

Fonte: Autora, 2025.

5.3. Análise do uso de fresado

Como alternativa para diminuir os custos gerados somente no dimensionamento do pavimento, analisou-se a possibilidade de utilizar material fresado na massa asfáltica. Para isso, realizou-se estudo para adequar a mistura aos critérios estabelecidos pelo programa.

- Condição de tráfego normal: $300 \text{ CICLOS} \leq \text{FN} < 750 \text{ CICLOS}$.
- Condição de tráfego severa: $750 \text{ CICLOS} \leq \text{FN} < 2000 \text{ CICLOS}$.

Os parâmetros foram avaliados pelo programa por meio dos dados das suas propriedades resultantes dos ensaios citados antes, na revisão bibliográfica.

Admitindo-se a hipótese de que seja possível realizar dosagens que atendam os valores exigidos pelo programa, avaliou-se empregar 10% e 30% de RAP para calcular a possível economia.

Considerando a menor quantidade de RAP (10%) a fim de obter 15% de economia no custo final, o valor de R\$ 1.275,50 passaria a ser de R\$ 1.084,18. Levando o valor final da estrutura do pavimento a R\$ 174,86 por metro quadrado.

No caso de 30% de RAP, para obter 30% de economia, o valor de R\$ 1.275,50 passaria para R\$ 892,85. O valor final da estrutura do pavimento seria R\$ 165,30 por metro quadrado.

O impacto econômico que essas adoções poderiam gerar ao longo de toda a extensão da obra está demonstrado na Tabela 19.

Tabela 19 - Custo aproximado utilizando fresado.

QUANTIDADE DE RAP	R\$/M ²	LARGURA (M)	EXTENSÃO (M)	TOTAL (R\$)	ECONOMIA (R\$)	ECONOMIA (%)
10%	174,86	7	19000	23.256.380,00	1.272.810,00	
30%	165,30	7	19000	21.984.900,00	2.544.290,00	10,37

Fonte: Autora, 2025.

6. DISCUSSÃO

O método empírico de dimensionamento do DNIT analisa apenas os ensaios de CBR das camadas, isto é, a capacidade de suporte dos materiais granulares. Este modelo simplifica as considerações para a análise do desempenho do pavimento, sobretudo referente aos danos causados pela deformação permanente. Dessa forma, o método não permite prever danos relacionados à fadiga capazes de ocorrer durante a vida útil da estrutura (MELO, 2021)

Em comparação com o método mecanístico-empírico, o método Murilo Lopes não foi criado de forma a acompanhar o desenvolvimento e a evolução das tecnologias dos materiais asfálticos. O que, no contexto atual de inovações, pode resultar dimensionamentos imprecisos ou que levem o pavimento ao limite antes do tempo projetado e consequente falência precoce (MELO, 2021).

Em contrapartida, o desenvolvimento do modelo mecanístico-empírico proposto no método MeDiNa, baseia-se nos principais defeitos dos pavimentos brasileiros: a deformação permanente e a fadiga (MELO, 2021). Para o método MeDiNa, a análise dessas patologias norteia o dimensionamento, uma vez que ele tenta prever as suas evoluções durante a vida útil do projeto a fim de gerar uma estrutura que resista adequadamente e detenha, de forma controlada e minimizada, as suas ocorrências.

Entretanto, a implantação do novo método requer mudanças no comportamento da forma de dimensionar pavimentos. O software precisa ser alimentado com informações completas acerca dos materiais utilizados na estrutura. Atualmente, a base de dados dos materiais disponíveis no software é reduzida, o que limita a sua utilização.

Como apresentado antes, além da caracterização do solo, é preciso informar ao programa o módulo de resiliência, o coeficiente de Poisson, o módulo de deformação permanente e o flow number, no caso da mistura asfáltica. Dado a incapacidade de obter tais informações da obra no caso estudado, usaram-se os materiais mais parecidos disponíveis na base de dados do programa.

Com isso, a análise feita pelo programa apontou que a estrutura dimensionada pelo método do DNIT apresenta deflexão acima do permitido, 70 (0,01mm), na sub-base. E ao tentar dimensionar o pavimento mantendo-se os materiais, o problema persistiu. Portanto, optou-se em utilizar material com maior resistência e que mantivesse características de material estabilizado. Então, o dimensionamento foi realizado com o solo melhorado com +5% de cal. Neste caso, o material atendeu as exigências e gerou redução na espessura da camada de rolamento, o que implicou em redução do custo final do pavimento, embora tenha sido utilizado um material mais caro na sub-base. Assim como em estudos realizados por Silva (2018), o qual obteve uma redução de 2,2% no preço global da obra.

Esse resultado mostra como a simulação do MeDiNa pode gerar estruturas com melhor desempenho e menor custo de produção. Além disso, o método ainda fornece uma análise não apenas da área trincada acumulada das camadas, mas também do afundamento acumulado nas

trilhas de rodas. Como a estrutura apresentava a camada de base e sub-base estabilizadas quimicamente, o programa apenas realizou a previsão desses aspectos para o subleito, com o valor de 2,60% de área trincada e 0,6mm de afundamento de trilha de roda no final da vida útil de projeto.

Essa possibilidade de simulação com diferentes materiais e espessuras permite ao projetista avaliar de forma criteriosa e embasada maior quantidade de alternativas estruturais, até definir aquela que melhor atenda aos requisitos do projeto (SILVA, 2018).

O caso poderia apresentar resultados distintos se o programa tivesse os seus modelos matemáticos gerados com os dados reais dos materiais utilizados na obra. Porém, os ensaios para a obtenção dos dados ainda não estão consolidados no mercado. Alguns dos argumentos para justificar este cenário são o custo dos equipamentos, o tempo de realização e a atual baixa demanda do mercado.

Por outro lado, o método do CBR requer apenas ensaios costumeiros e disponíveis em vários laboratórios. Estes ensaios são regularmente previstos em estudos do solo local e desenvolvimento de projetos de pavimentação, terraplenagem e de possíveis adaptações de obras de artes. Isso torna o valor de R\$ 382.235,37 um investimento admissível. Entretanto, no caso do software MeDiNa, a sua correta utilização requer um acréscimo de no mínimo R\$ 32.220,00 referente aos ensaios para determinar corretamente as propriedades dos materiais (e não adotar parâmetros do próprio sistema). Além disso, considerar também os ensaios ainda não disponíveis comercialmente pelos laboratórios. Esse conjunto de fatores dificulta a utilização do método MeDiNa, com implicações no dimensionamento e no custo dos estudos.

A fim de produzir alternativas para o investimento adicional, foi avaliada a implantação de RAP na mistura asfáltica. Ambos os casos (10% e 30% de RAP na mistura asfáltica) resultaram economias aproximadas de 5,19% e 10,37%, respectivamente, no custo final do pavimento (CENTOFANTE et al., 2018). Esses valores seriam de forma superficial, isto é, sem analisar os custos necessários de adaptação da usina para a produção da mistura nessa condição, suficientes para cobrir os gastos com os novos ensaios realizados para o dimensionamento pelo programa.

Além do impacto no custo de produção da camada de rolamento, a utilização de material fresado também proporciona maior sustentabilidade à obra, uma vez que a reciclagem do material implica em redução de materiais virgens, como CAP e agregados. Além disso,

contribui para diminuir o volume de material fresado descartado em aterros e reduz a poluição atmosférica pelo (menor) transporte destes materiais aos aterros.

7. CONCLUSÃO

O método DNIT é amplamente utilizado no Brasil desde 1981, com base empírica e parâmetros como CBR, IS e o número de repetições de cargas (N). O MeDiNa combina análises mecánísticas (tensões, deformações e fadiga) com dados empíricos, oferecendo resultados mais precisos, embora exija caracterizações detalhadas dos materiais.

A análise no software MeDiNa indicou que a estrutura projetada inicialmente pelo DNIT apresentava deflexão excessiva na sub-base. Com a substituição da sub-base granular por solo com adição de 5% de cal, a estrutura passou a atender os critérios de desempenho do software e apresentou redução significativa da espessura da camada de rolamento. A redução da espessura do revestimento gerou economia no custo da estrutura final do pavimento.

Embora o mercado ainda não esteja adaptado aos ensaios laboratoriais dos quais o método MeDiNa dependa, o dimensionamento gerado por este método apresenta maior precisão e eficiente frente às patologias mais agressivas nos pavimentos brasileiros.

Referente à utilização de RAP em mistura asfáltica com a intenção de minimizar os custos da estrutura final e cobrir os gastos dos ensaios adicionais necessários para o dimensionamento no programa MeDiNa, os valores obtidos foram satisfatórios partindo da hipótese de que a dosagem atenderia os critérios de projeto e do software. Além disso, outra vantagem relacionada é o impacto positivo na sustentabilidade e proteção ao meio ambiente.

Desse modo, fica claro que o método MeDiNa é mais eficiente na previsão do comportamento estrutural do pavimento, especialmente quando há possibilidade de calibração dos modelos com dados reais. E o uso de RAP reforça a viabilidade de soluções sustentáveis e economicamente vantajosas no setor de infraestrutura viária.

REFERÊNCIAS

AASHTO. R 35: **Standard Practice for Superpave Volumetric Design for Hot-Mix Asphalt (HMA)**. Washington, DC: American Association of State Highway and Transportation Officials, 2019.

ABEDA – **Associação Brasileira das Empresas de Pavimentação**. Uso de materiais reciclados em pavimentação asfáltica. Boletim Técnico, São Paulo, 2019. Disponível em: <https://www.abeda.org.br>. Acesso em: 20 maio 2025.

ARAÚJO, J. L. G. M **Avaliação do uso de fresado em misturas asfálticas usadas a quente no Rio Grande do Norte**. Disponível em: <<https://repositorio.ufersa.edu.br/items/7b94c446-4b18-44a1-a083-2ef049eec060>>. Acesso em: 16 maio. 2025.

AUSTROADS. **Guide to Pavement Technology: Part 4B – Asphalt**. Sydney: Austroads, 2013. (AP-G82/13).

BALBO, J. T. **Pavimentação asfáltica: materiais, projeto e restauração**. São Paulo: Ed. Oficina de textos, 2007.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G. da; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação asfáltica: Formação básica para engenheiros**. Rio de Janeiro: Petrobrás: ABEDA, 2006.

BONFIM, V. **Estudo da granulometria resultante da fresagem de revestimentos asfálticos com vistas à reciclagem “in situ” a frio**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica de Campinas, São Paulo, 1999.

BRASIL. Departamento Nacional de Estradas e Rodagens-DNIT. **Manual de Projeto Geométrico de Rodovias Rurais**. Publicação IPR 706. Ministério dos Transportes. Rio de Janeiro, 1999.

CANCHANYA, J. P. **AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO E REOLÓGICO DE MISTURA ASFÁLTICA COM ADIÇÃO DE 20% DE MATERIAL FRESADO -RAP**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós Graduação de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017.

CENTOFANTE, R. et al. **Avaliação do comportamento de misturas asfálticas recicladas a quente com inserção de material fresado**. Matéria (Rio de Janeiro), v. 23, n. 3, 18 out. 2018.

CENTOFANTE, R.; SPECHT, L. P.; ALMEIDA JÚNIOR, P. O. B.; PINHEIRO, R. J. B.; PEREIRA, D. S. **Estudo do comportamento de misturas asfálticas recicladas a quente com diferentes teores de RAP**. Matéria, Rio de Janeiro, v. 23, n. 4, p. 1-10, 2018. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rmat/a/Zw9WDCGwwJqh5yQZvD5JV3r>. Acesso em: 20 maio 2025.

CNT - **Pesquisa CNT de Rodovias 2023 reforça a importância de maior investimento na malha rodoviária**. Disponível em: <<https://www.cnt.org.br/agencia-cnt/pesquisa-cnt-de-rodovias-2023-refora-a-importancia-de-maior-investimento-na-malha-rodoviria>>. Acesso em: 10 mar. 2025.

CNT. **Brasil tem método antigo para dimensionar o pavimento.** Disponível em: <<https://cnt.org.br/agencia-cnt/brasil-tem-metodo-antigo-para-dimensionar-o-pavimento>>. Acesso em: 10 mar. 2025.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DOS TRANSPORTES - CNT **Pesquisa de Rodovias: Principais Dados**,. (2017). Disponível em: <http://pesquisarodovias.cnt.org.br/Paginas/resumo-para-imprensa>. Acessado em: 10 mar. 2025.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT. **Manual de pavimentação.** 3ª edição. Rio de Janeiro, 2006. Disponível: <http://www1.dnit.gov.br/arquivos_internet/ipr/ipr_new/manuais/Manual%20de%20Pavimentacao%20E7%E3o_05.12.06.pdf> Acessado em: 10 mar. 2025.

DER-SP – Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo. **Especificações Técnicas para Aplicação de Misturas Asfálticas com RAP.** São Paulo: DER-SP, 2021.

DER-SP – Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo. **Tabela de Preços Unitários.** Disponível em: <<http://200.144.30.103/tpu-internet/Default.asp>>. Acesso em: 26 mar. 2025.

DNIT. Norma DNIT 005/2003 – TER. **Defeitos nos pavimentos flexíveis e semi-rígidos.** Rio de Janeiro, RJ, 2003. Disponível: <http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/terminologia-ter/dnit005_2003_ter.pdf> Acessado em: 10 mar. 2025.

DNIT - **Pavimentação asfáltica -Misturas asfálticas Determinação do módulo de resiliência - Método de ensaio.** [s.l: s.n.]. Disponível em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/metodo-de-ensaio-me/dnit_135_2018_me-2.pdf>. Acesso em: 6 maio. 2025.

DNIT - **Pavimentação -Ensaio de fadiga por compressão diametral à tensão controlada em camadas estabilizadas quimicamente -Método de ensaio.** [s.l: s.n.]. Disponível em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/metodo-de-ensaio-me/dnit_434_2021_me.pdf>. Acesso em: 6 maio. 2025.

DNIT - **Pavimentação -Solos -Determinação do módulo de resiliência -Método de ensaio.** [s.l: s.n.]. Disponível em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/metodo-de-ensaio-me/dnit_134_2018_com_incorporacao_da_errata_1.pdf>. Acesso em: 6 maio. 2025.

EAPA_ADMIN. **Asphalt in Figures 2020 - View - EAPA.** Disponível em: <<https://eapa.org/asphalt-in-figures-2020-view/>>. Acesso em: 22 maio. 2025.

FELTRIN, A. **Má conservação das rodovias gera custo adicional de R\$ 6,81 bilhões ao setor de transporte.** Disponível em: <<https://transportemoderno.com.br/2024/11/19/ma-conservacao-das-rodovias-gera-custo-adicional-de-r-681-bilhoes-ao-setor-de-transporte/>>. Acesso em: 10 mar. 2025.

FHWA – **Federal Highway Administration.** Reclaimed Asphalt Pavement in Asphalt Mixtures: State of the Practice. Washington, DC: FHWA, 2011. (Report No. FHWA-HRT-11-021). Disponível em: <https://trid.trb.org/View/1104401>. Acesso em: 20 maio 2025.

FROTA, T. M. **CONSIDERAÇÕES MECÂNICAS E AMBIENTAIS SOBRE MISTURAS ASFÁLTICAS RECICLADAS A QUENTE PARA O SUPORTE À**

TOMADA DE DECISÃO. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2023.

GUIMARÃES, A. C. R. **Um Método Mecanístico Empírico para a Previsão da Deformação Permanente em Solos Tropicais Constituintes de Pavimentos.** Disponível em: <<http://www.coc.ufjf.br/pt/teses-de-doutorado/153-2009/1199-antonio-carlos-rodrigues-guimaraes>>. Acesso em: 26 mar. 2025.

INSTITUTO DE PESQUISAS RODOVIÁRIAS, DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Execução de estudos e pesquisa para elaboração de método mecanístico - empírico de dimensionamento de pavimentos asfálticos. Convênio UFRJ/DNIT.** Disponível em <<http://ipr.dnit.gov.br/pesquisa>>. Acesso em: 15 setembro de 2018.

LIMA FILHO, A. R. **ANÁLISE DA VARIABILIDADE DO FRESADO ASFÁLTICO E SEU IMPACTO NA PAVIMENTAÇÃO.** Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.

MEDINA, J. MOTTA, L. M. G. **Mecânica dos pavimentos.** Rio de Janeiro: UFRJ, 2005.

MELO, M. R. S. **ANÁLISE COMPARATIVA DE DIMENSIONAMENTOS DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS – MÉTODO MEDINA E MURILO LOPES.** Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2021.

Ministério dos Transportes, Portos e Aviação Civil – **Manual de Utilização do programa MeDiNa.** 2020. [s.l: s.n.]. 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: 29 mai. 2025.

Pavimentação asfáltica -**Ensaio de fadiga por compressão diametral à tensão controlada - Método de ensaio.** [s.l: s.n.]. Disponível em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/metodo-de-ensaio-me/dnit183_2018_me.pdf>.

Pavimentos flexíveis -**Concreto asfáltico reciclado em usina a quente -Especificação de serviço.** [s.l: s.n.]. Disponível em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/especificacao-de-servico-es/dnit_033_2021_es.pdf>.

Pavimentação -Misturas asfálticas -**Ensaio uniaxial de carga repetida para determinação da resistência à deformação permanente -Método de ensaio.** [s.l: s.n.]. Disponível em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/metodo-de-ensaio-me/dnit_184_2018_me-1.pdf>. Acesso em: 6 maio. 2025.

Pavimentação -**Solos -Determinação da deformação permanente -Instrução de ensaio.** [s.l: s.n.]. Disponível em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/instrucao-de-ensaio-ie/dnit_179_2018_ie_com_incorporacao_da_errata_1.pdf>. Acesso em: 6 maio. 2025.

SANTOS, J. C.; PEREIRA, P. A. A.; MINETE, R. M. **Avaliação do uso de fresado asfáltico em misturas recicladas a quente.** Transportes, Rio de Janeiro, v. 28, n. 1, p. 45–54, 2020.

SANTOS, J. C.; PEREIRA, P. A. A.; MINETE, R. M. **Avaliação do uso de fresado asfáltico em misturas recicladas a quente.** Transportes, Rio de Janeiro, v. 28, n. 1, p. 45–54, 2021.

Disponível em: <https://seer.atitus.edu.br/index.php/revistaec/article/view/3327>. Acesso em: 20 maio 2025.

SANTOS, S. F.; OLIVEIRA, L. M. **Análise do desempenho mecânico de misturas asfálticas com adição de RAP e rejuvenecedor**. Construction and Building Materials, [s.l.], v. 223, p. 224–233, 2019.

SENÇO, W. **Manual de técnicas de pavimentação Volume I Wlastermiler**. Disponível em: <https://www.academia.edu/44496021/Manual_de_t%C3%A9cnicas_de_pavimenta%C3%A7%C3%A3o_Volume_I_Wlastermiler>. Acesso em: 1 jun. 2025.

SILVA, J. E. G. **MÉTODO NACIONAL DE DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS -MEDINA, AVALIAÇÃO DA DUPLICAÇÃO DA AL-145**. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Federal de Alagoas, Delmiro Gouveia, 2018.