



UEPB

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA
CAMPUS VIII – ARARUNA
CENTRO DE CIÊNCIAS, TECNOLOGIA E SAÚDE
COORDENAÇÃO DE ENGENHARIA CIVIL
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

JOSE LUIS MEDEIROS DA SILVA

**ANÁLISE COMPARATIVA DO DIMENSIONAMENTO PELO MÉTODO DNIT E
MEDINA EM MISTURAS ASFÁLTICAS COM ADITIVOS VARIADOS**

**ARARUNA – PB
2023**

JOSE LUIS MEDEIROS DA SILVA

**ANÁLISE COMPARATIVA DO DIMENSIONAMENTO PELO MÉTODO DNIT E
MEDINA EM MISTURAS ASFÁLTICAS COM ADITIVOS VARIADOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Coordenação do Curso de Graduação em
Engenharia Civil da Universidade Estadual da
Paraíba, como requisito parcial à obtenção do
título de Bacharel em Engenharia Civil.

Área de concentração: Pavimentação.

Orientador: Profa. Dra. Albaniza Maria da Silva Lopes

Coorientador: Prof. Me. Osires de Medeiros Melo Neto

É expressamente proibido a comercialização deste documento, tanto na forma impressa como eletrônica. Sua reprodução total ou parcial é permitida exclusivamente para fins acadêmicos e científicos, desde que na reprodução figure a identificação do autor, título, instituição e ano do trabalho.

S586A Silva, Jose Luis Medeiros da.
Análise comparativa do dimensionamento pelo método DNIT e Medina em misturas asfálticas com aditivos variados [manuscrito] / Jose Luis Medeiros da Silva. - 2023.
68 p. : il. colorido.

Digitado.
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Estadual da Paraíba, Centro de Ciências, Tecnologia e Saúde, 2023.
"Orientação : Profa. Dra. Albaniza Maria da Silva Lopes, Coordenação do Curso de Engenharia Civil - CCTS. "
"Coorientação: Prof. Me. Osires de Medeiros Melo Neto , UFCG - Universidade Federal de Campina Grande"

1. Asfalto. 2. Aditivos. 3. Pavimentação. I. Título
21. ed. CDD 625.85

JOSE LUIS MEDEIROS DA SILVA

INFLUÊNCIA DO USO DE ADITIVOS EM MISTURAS ASFÁLTICAS NO
DIMENSIONAMENTO DA CAMADA DE ROLAMENTO PELO MEDINA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Coordenação do Curso de Graduação em
Engenharia Civil da Universidade Estadual da
Paraíba, como requisito parcial à obtenção do
título de Bacharel em Engenharia Civil.

Área de concentração: Pavimentação.

Aprovada em: 07/12/2023.

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente

gov.br

ALBANIZA MARIA DA SILVA LOPES

Data: 11/12/2023 16:57:21-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Albaniza Maria da Silva Lopes (Orientador)
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)

Osires de Medeiros Melo Neto

Prof. Me. Osires de Medeiros Melo Neto (Coorientador)
Universidade Federal de Campina Grande (UFCG)

Emanuella Silva Pereira de Macêdo

Profa. Emanuella Silva Pereira de Macêdo
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)

Maria Adriana de Freitas Mágero Ribeiro

Profa. Dra. Maria Adriana de Freitas Mágero Ribeiro
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)

Aos meus pais, Luzielita e Luis. Meu eterno orgulho por vocês, meus exemplos de seres humanos.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Luzielita e Luis, que desde meu ensino médio fizeram o possível e impossível para que eu pudesse me dedicar aos estudos sem outras preocupações, a eles todo amor e agradecimento.

As minhas irmãs Lenilda, Lenilma e Laizy, por me apoiarem incondicionalmente em toda a minha jornada acadêmica, pelas palavras de oração, pela preocupação e cuidado durante toda minha vida. Sem vocês essa conquista não seria possível.

Aos demais familiares, pela torcida e pelo apoio.

Aos meus amigos do grupo POTA, Ana, Gustavo, Joyce, Nallyson, Cláudia, Heloisy, Julia e Marcos, vocês estiveram presentes na minha vida desde a infância, obrigado pela torcida até aqui, vocês são incríveis, não poderia ter outros melhores amigos.

As minhas amigas, Camila, Natália, Emília, Iandra e Tati, que me adotaram no grupo das meninas, obrigado por compartilharem comigo o lado bom da vida.

A minha amiga e eterna parceira de curso Malu, obrigado por ser uma pessoa incrível, que tirou várias risadas minha durante esses cinco anos de graduação, saiba que com você este fardo se tornou mais leve. Espero ter sua amizade pelo resto da minha vida.

A meu amigo e companheiro de apartamento Ewerton, que esteve comigo toda a graduação, obrigado por todas as risadas e momentos compartilhados, com certeza morar contigo deixou esses anos mais fáceis.

Aos amigos que fiz durante a graduação, Pedro, Thales, Ingrid, Paloma, Elisângela, Adson, Johan e Fernanda, obrigado por estarem comigo todos esses momentos, por trocarmos fofocas e risadas, vocês são especiais para mim e sempre os levarei no meu coração.

A Feliciano, que me apoiou nessa reta final da graduação. Obrigado pela pessoa incrível que você é, amigo e companheiro, que não mede esforços para me ajudar, a você gratidão.

A Pilares Consultoria Júnior de Engenharia Civil por me proporcionar os melhores aprendizados e experiências que pude ter durante a graduação, por me formar como líder e profissional.

A PEX, que me aceitou como estagiário, obrigado pelas experiências e aprendizados até aqui.

A minha orientadora, Professora Albaniza, que me ajudou com a finalização deste trabalho.

Ao meu coorientador, Professor Osires, pela paciência, disponibilidade e pelas palavras de incentivo. Você foi mais que um orientador, foi um amigo. Obrigado por me apoiar e ajudar a conquistar esse título. Não há palavras que eu possa usar para agradecer toda sua ajuda.

A Professora Adriana, que me ofereceu oportunidades de crescimento durante a graduação, obrigado pelo carinho e aprendizado.

As professoras Maria Adriana de Freitas Mágero Ribeiro e Emanuella Silva Pereira de Macêdo, pelas participações e contribuições na banca examinadora.

A UEPB, prezada instituição que me promoveu a formação de Engenheiro Civil.

E, finalmente, a todos aqueles que de alguma forma contribuíram para a conclusão deste ciclo. Muito obrigado!

*“Toda pessoa deveria ser aplaudida de pé
pelo menos uma vez na vida, porque todos nós
vencemos o mundo.”*

August Pullman (Extraordinário)

RESUMO

A ascensão da busca por aditivos alternativos na composição de misturas asfálticas representa uma opção, que busca aprimorar as propriedades físicas e mecânicas dos pavimentos asfálticos. A utilização de misturas asfálticas com agentes rejuvenescedores encapsulados, redutores de viscosidade do ligante asfáltico, RAP (*Reclaimed Asphalt Pavement*) e fibras naturais tem sido aplicada à pavimentação devido aos resultados positivos evidenciados em pesquisas. Entretanto, alguns materiais alternativos apresentam características restritivas que condicionam resultados desfavoráveis no desempenho à fadiga e a deformações permanentes em pavimentos. O dimensionamento de pavimentos flexíveis no Brasil pode ser realizado por meio de duas metodologias: a adotada pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) e o Método de Dimensionamento Nacional (MeDiNa). Este trabalho avaliou a influência dos aditivos constituintes em misturas asfálticas no dimensionamento da camada de rolamento pela metodologia empírica do DNIT e mecanístico-empírico do MeDiNa. Na primeira etapa foi realizada a análise bibliográfica conduzida no banco de dados do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental (PPGECA), abrangendo dissertações desde 2014 e teses desde 2020. O foco foi em trabalhos que investigaram o emprego de aditivos em misturas asfálticas, realizando ensaios de módulo de resiliência (MR) e vida de fadiga por compressão diametral. A segunda etapa correspondeu ao dimensionamento das camadas de rolamento, base e sub-base pelo método do DNIT e MeDiNa das misturas asfálticas avaliadas; na terceira etapa foi realizada uma avaliação comparativa em termos de dimensionamento de espessuras das camadas e das misturas asfálticas investigadas. Os resultados apontaram que a espessura da camada de rolamento, conforme determinada pela metodologia do DNIT, é significativamente menor em comparação ao dimensionamento pela metodologia MeDiNa. As misturas asfálticas *Stone Matrix Asphalt* (SMA) exibiram desempenho notável em termos de espessura da camada de rolamento, fator de fadiga e classe de fadiga. Os outros agentes alternativos analisados, com exceção do RAP, não apresentaram resultados satisfatórios quando comparados à fibra. Portanto, as misturas do tipo SMA se apresentaram mais viáveis, entretanto, a mistura com 70%RAP + WARMGRIP apresentou a menor espessura da camada de rolamento dentre todas analisadas, destacando-se pelo excelente desempenho em todos os parâmetros avaliados.

Palavras-chave: Misturas asfálticas; Aditivos; Dimensionamento de pavimentos.

ABSTRACT

The rise of the search for alternative agents in the composition of asphalt mixtures represents an option aimed at enhancing the physical and mechanical properties of asphalt pavements. The use of asphalt mixtures with encapsulated rejuvenating agents, viscosity reducers for asphalt binder, Reclaimed Asphalt Pavement (RAP), and natural fibers has been applied in pavement construction due to the positive results evidenced in research. However, some alternative materials exhibit restrictive characteristics that lead to unfavorable outcomes in fatigue performance and permanent deformations in pavements. Pavement design in Brazil can be carried out through two methodologies: the one adopted by the Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) and the Método de Dimensionamento Nacional (MeDiNa). This study evaluated the influence of constituent additives in asphalt mixtures on the design of the wearing course using the empirical methodology of DNIT and the mechanistic-empirical method of MeDiNa. The first step involved a bibliographic analysis conducted in the database of the Postgraduate Program in Civil and Environmental Engineering, encompassing dissertations since 2014 and theses since 2020. The focus was on works that investigated the use of additives in asphalt mixtures, conducting resilience modulus and fatigue life tests by diametral compression. The second step corresponded to the design of the wearing course, base, and sub-base layers using the DNIT and MeDiNa methods for the evaluated asphalt mixtures. In the third step, a comparative evaluation was conducted in terms of layer thickness design and the investigated asphalt mixtures. The results indicated that the thickness of the wearing course layer, as determined by the DNIT methodology, is significantly smaller compared to the design by the MeDiNa methodology. Stone Matrix Asphalt (SMA) mixtures exhibited remarkable performance in terms of wearing course thickness, fatigue factor, and fatigue class. The other alternative agents analyzed, except for RAP, did not show satisfactory results compared to fibers. Therefore, SMA-type mixtures appeared more viable; however, the mixture with 70% RAP + WARMGRIP presented the smallest wearing course layer thickness among all analyzed, standing out for excellent performance in all evaluated parameters.

Keywords: Asphalt mixtures; Additives; Pavement design.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 –	Camadas do pavimento asfáltico.....	18
Figura 2 –	Estado Geral da malha rodoviária pavimentada do Brasil.....	23
Figura 3 –	Estado do pavimento da malha rodoviária pavimentada do Brasil.....	23
Figura 4 –	a) Estado geral da malha rodoviária pavimentada do Nordeste; b) Estado do pavimento da malha rodoviária pavimentada do Nordeste.....	24
Figura 5 –	a) Estado geral da malha rodoviária pavimentada da Paraíba; b) Estado do pavimento da malha rodoviária pavimentada da Paraíba.....	24
Figura 6 –	Etapas da pesquisa.....	26
Figura 7 –	Agregados e Fíler usados nos estudos: a) Brita 19,0 mm; b) Brita 12,5 mm; c) Brita 9,5 mm; d) Pó de Pedra; e) Areia; f) Cal Hidratada.....	27
Figura 8 –	CAP 50/70.....	27
Figura 9 –	Gráfico utilizado para o dimensionamento das camadas do pavimento (subjacentes à camada de material betuminoso).....	34
Figura 10 –	Esquema comumente empregado para o dimensionamento de pavimentos flexíveis rodoviários.....	35
Figura 11 –	Estrutura do Pavimento.....	37
Figura 12 –	Procedimento metodológico do Método MeDiNa.....	37
Figura 13 –	Dimensionamento do H_{20} pelo gráfico.....	45
Figura 14 –	Dimensionamento do H_n pelo gráfico.....	46
Figura 15 –	Espessuras das camadas do pavimento pela metodologia do DNIT.....	56
Figura 16 –	Espessuras das camadas do pavimento pela metodologia do MeDiNa.....	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Recomendações do DNIT (2006b) quanto aos materiais aplicados nas camadas do pavimento.....	21
Tabela 2 –	Espessuras mínimas da camada de revestimento asfáltico em função de N (Recomendados pelo DNER).....	33
Tabela 3 –	Coefficientes de equivalência estrutural usados no dimensionamento das camadas do pavimento.....	33
Tabela 4 –	Parâmetros das misturas asfálticas puras e com agentes rejuvenescedores.....	38
Tabela 5 –	Parâmetros das misturas asfálticas puras e com agentes redutores de viscosidade.....	38
Tabela 6 –	Parâmetros das misturas asfálticas puras e recicladas.....	39
Tabela 7 –	Parâmetros das misturas asfálticas do tipo Stone Matrix Asphalt (SMA) com fibras de bananeira.....	40
Tabela 8 –	Composição dos agregados das misturas asfálticas puras e com agentes rejuvenescedores.....	41
Tabela 9 –	Composição dos agregados das misturas asfálticas puras e com agentes redutores de viscosidade.....	42
Tabela 10 –	Composição dos agregados das misturas asfálticas puras e recicladas.....	42
Tabela 11 –	Composição dos agregados das misturas asfálticas do tipo Stone Matrix Asphalt (SMA) com fibras de bananeira.....	43
Tabela 12 –	Resultados do dimensionamento pela metodologia MeDiNa das misturas asfálticas puras e com agentes rejuvenescedores.....	47
Tabela 13 –	Resultados do dimensionamento pela metodologia MeDiNa das misturas asfálticas puras e com agentes redutores de viscosidade.....	48
Tabela 14 –	Resultados do dimensionamento pela metodologia MeDiNa das misturas asfálticas puras e recicladas.....	50
Tabela 15 –	Resultados do dimensionamento pela metodologia MeDiNa das misturas asfálticas puras e do tipo SMA.....	54
Tabela 16 –	Resultados do dimensionamento pela metodologia MeDiNa das misturas do estudo de Guabiroba <i>et al.</i> (2023).....	57

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
AEMC	Análise Elástica de Múltiplas Camadas
AGS	Ácido Graxo
BS	Borra do Óleo de Soja
CA	Concreto Asfáltico
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CBR	<i>California Bearing Ratio</i>
CBUQ	Concreto Betuminoso Usinado à Quente
CNT	Confederação Nacional de Transporte
COPPE	Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia da Universidade do Rio de Janeiro
DNER	Departamento de Estradas Nacionais
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
FFM	Fator de Fadiga da Mistura
FN	<i>Flow Number</i>
GB	Ganisse Bailey
IPR	Instituto de Pesquisas Rodoviárias
ISC	Índice de Suporte Califórnia
MAMs	Misturas Asfálticas Mornas
MB	Micaxisto Bailey
MeDiNa	Método de Dimensionamento Nacional
MR	Módulo de Resiliência
PPGECA	Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental
RAP	<i>Reclaimed Asphalt Pavement</i>
RT	Resistência à Tração
SMA	<i>Stone Matrix Asphalt</i>
TU	Temperatura de Usinagem
USACE	<i>United States Army Corps of Engineers</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

$^{\circ}\text{C}$	Grau celsius
g	Gramas
%	Porcentagem
N	Eixo padrão na faixa de projeto
R	Espessura mínima do revestimento
B	Espessura da base
K	Coefficiente estrutural
K_R	Coefficiente estrutural do revestimento
K_B	Coefficiente estrutural da base
K_R	Coefficiente estrutural da sub-base
K_F	Coefficiente estrutural do reforço do subleito
k1	Coefficiente de Regressão 1
k2	Coefficiente de Regressão 2
H_m	Espessura total do pavimento necessária para proteger o subleito
H_n	Espessura total do pavimento necessária para proteger o reforço do subleito
H_{20}	Espessura total do pavimento necessária para proteger a sub-base
h_{20}	Espessura da sub-base
h_n	Espessura do reforço do subleito

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Objetivos	17
<i>1.1.1</i>	<i>Objetivo Geral</i>	17
<i>1.1.2</i>	<i>Objetivos Específicos</i>	17
2	REFERENCIAL TEÓRICO	18
2.1	Revestimento Asfáltico	18
2.2	Misturas Asfálticas	19
2.3	Materiais Alternativos em Misturas Asfálticas	19
2.4	Dimensionamento de Pavimento Flexível	20
2.5	MeDiNa	22
2.6	Panorama da Malha Rodoviária Brasileira	23
3	METODOLOGIA	26
3.1	Descrição das Misturas Avaliadas	26
<i>3.1.2</i>	<i>Misturas Asfálticas com Redutores de Viscosidade do Ligante Asfáltico</i>	28
<i>3.1.3</i>	<i>Misturas Asfálticas Recicladas</i>	29
<i>3.1.4</i>	<i>Misturas Asfálticas com Agentes Rejuvenescedores Encapsulados</i>	30
<i>3.1.5</i>	<i>Misturas Asfálticas do tipo Stone Matrix Asphalt (SMA)</i>	31
3.2	Método de Dimensionamento	32
<i>3.2.1</i>	<i>DNIT</i>	32
<i>3.2.2</i>	<i>MeDiNa</i>	35
<i>3.2.2.1</i>	<i>Dados de Entrada</i>	38
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	41
4.1	Composição das Misturas Asfálticas Avaliadas	41
4.2	Dimensionamento pelo Método DNIT	44
4.3	Dimensionamento pelo Método MeDiNa	47
<i>4.3.1</i>	<i>Misturas Asfálticas com Agentes Rejuvenescedores Encapsulados</i>	47
<i>4.3.2</i>	<i>Misturas Asfálticas com Redutores de Viscosidade do Ligante Asfáltico</i>	48
<i>4.3.3</i>	<i>Misturas Asfálticas Recicladas</i>	50
<i>4.3.4</i>	<i>Misturas Asfálticas do tipo Stone Matrix Asphalt (SMA) com Fibras de Bananeira</i>	54
4.4	Comparação entre os Métodos de Dimensionamento na Camada de	

	Rolamento.....	55
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES.....	60
5.1	Considerações Finais.....	60
5.2	Sugestões para Pesquisas Futuras.....	61
	REFERÊNCIAS.....	62

1 INTRODUÇÃO

O Brasil detém cerca de 12,4% de rodovias pavimentadas, o que corresponde a exatos 213.500,0 quilômetros de extensão dos 1.720.909,0 quilômetros de malha rodoviária no país (Confederação Nacional de Transporte, 2022). A pavimentação das estradas no Brasil ainda é um problema, visto que o transporte de cargas e passageiros são realizados majoritariamente pelo modal rodoviário (Laube et al., 2021). Esperava-se um desenvolvimento diferente do que se tem nos dias atuais pelo fato desse modal ser o principal meio de movimentação de produtos e pessoas no Brasil, apresentando influência significativa na economia. Presumia-se um maior investimento na malha viária pavimentada e não pavimentada do país.

Silva e Oliveira (2021) apontam que o pavimento flexível é o tipo de pavimento mais comum e utilizado nas estradas brasileiras, devido sua melhor aderência das demarcações, seu custo ser inferior em comparação com o pavimento rígido, além de ser uma alternativa mais ecológica, gerando menos impactos ambientais, devido a diminuição parcial ou substituição total dos constituintes da mistura tradicional. Entretanto, as variações climáticas são fatores que influenciam na degradação dos pavimentos flexíveis, sendo a temperatura um dos aspectos que estão relacionados diretamente ao desempenho da camada de revestimento. Killpp (2004) aponta que as misturas asfálticas usadas como camada de revestimento são termo sensíveis, ou seja, seu processo de deformação está ligado diretamente com as intempéries do clima tropical e elevadas temperaturas.

As principais patologias nos pavimentos brasileiros estão relacionadas à fatores como, tráfego intenso, condições climáticas, falta de manutenção adequada e principalmente erros de projeto e execução, estas se manifestam nos pavimentos como: defeitos na superfície, degradações e deformações (Ferreira *et al.*, 2021).

Guabiroba *et al.* (2023), aponta que deteriorações mecânicas como deformação permanente e trincamento por fadiga são um dos problemas mais visualizados nas rodovias de todo o Brasil. A deformação permanente é caracterizada pelo afundamento longitudinal do pavimento asfáltico, enquanto que o trincamento por fadiga se manifesta a partir do estresse repetido causado pelo tráfego dos veículos, ocasionando a formação de trincas ou fissuras superficiais nas camadas do asfalto. Esses defeitos também são parcialmente resultado da imprecisão dos valores encontrados no atual método de dimensionamento do Departamento de Estradas Nacionais (DNER), atualmente conhecido como método de projetos de pavimentos flexíveis do DNIT, cuja técnica é a mais utilizada para o dimensionamento de pavimentos no Brasil.

O dimensionamento de pavimentos é uma etapa do projeto de estradas e rodovias, que visa a segurança e durabilidade das vias. O principal procedimento de dimensionamento utilizado em projetos rodoviários no país está vigente desde 1966, com última atualização no ano de 1981 (SOUZA, 1981). Este método leva em consideração alguns fatores para a determinação das espessuras e as especificações das camadas do pavimento, apresentando uma abordagem empírica. Lopes e Soares (2022) consideram como restrições no dimensionamento de pavimentos a resistência de apoio do solo e o coeficiente estrutural do material utilizado no subleito, assim caracterizando o método do DNIT, como sendo eficaz apenas na camada de subleito, protegendo a camada somente de esforços cisalhantes.

Embora o método utilizado pelo Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes (DNIT) supra as demandas em projeto de pavimentos flexíveis no Brasil, há um interesse em desenvolver técnicas e metodologias mais precisas para cumprir adequadamente os esforços solicitantes pelo tráfego e as condições climáticas desfavoráveis.

O Método de Dimensionamento Nacional de Pavimentos (MeDiNa), desenvolvido a partir de uma colaboração entre o Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR) e o Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia da Universidade do Rio de Janeiro (COPPE), é um programa computacional que realiza a verificação do dimensionamento, considerando análises mecanístico-empíricas.

Desta forma, há uma tendência de substituição dos métodos empíricos de dimensionamento de pavimentos por bases mecanístico-empíricas, devido às limitações quanto à falta de precisão na previsão vida útil do pavimento asfáltico e o seu desempenho. Portanto, esse estudo buscou avaliar, comparativamente, os efeitos do uso de aditivos variados em misturas asfálticas na espessura da camada de rolamento de pavimentos flexíveis por meio do MeDiNa.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Avaliar a influência dos aditivos constituintes em misturas asfálticas no dimensionamento da camada de rolamento pela metodologia empírica do DNIT e mecanístico-empírico do MeDiNa.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Obter a espessura das camadas de concreto asfáltico a partir do método de dimensionamento nacional (MeDiNa) em misturas asfálticas com à adição de agentes rejuvenescedores, redutores de viscosidade, cápsulas de alginato, RAP e fibras naturais;
- Determinar a espessura das camadas de concreto asfáltico a partir do método de dimensionamento do DNIT em misturas asfálticas;
- Comparar as espessuras das camadas de rolamento dimensionadas pelo método de dimensionamento do DNIT e o MeDiNa.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Este tópico reúne informações, coletadas em publicações correntes, a respeito dos assuntos abordados. Inicialmente, será feita uma análise sobre os revestimentos asfálticos e misturas asfálticas alternativas, e a atual forma de dimensionamento de pavimentos asfálticos no Brasil, em seguida serão exploradas as principais metodologias, sendo elas a verificação e dimensionamento pelo DNIT e pela metodologia mecanístico-empírico do software MeDiNa.

2.1 Revestimentos Asfálticos

O modal rodoviário é o principal e mais importante sistema de transportes de cargas do Brasil, devido à sua vasta extensão territorial, tendo uma forte influência sobre o desempenho econômico do país. Logo, os pavimentos asfálticos devem ser dimensionados e projetados para atender as piores solicitações de tráfego e clima e ao mesmo tempo oferecer segurança na movimentação de cargas e conforto aos seus usuários (Rodrigues, 2019).

Bandeira e Siguin (2021) apontam que o pavimento asfáltico é uma estrutura de múltiplas camadas, construídas sobre uma superfície obtida pelos serviços de terraplanagem, com função de conforto e segurança para seus usuários, oferecendo uma superfície de rolamento lisa e resistente para o tráfego de veículos e suportar a distribuição das cargas dos veículos ao longo da sua vida útil.

O revestimento asfáltico é uma das várias camadas que compõem o pavimento asfáltico. Além disso, o pavimento é composto pelas camadas de subleito, reforço do subleito, sub-base e base (Carvalho, 2021). A Figura 1 ilustra as principais camadas do pavimento asfáltico.

Figura 1: Camadas do pavimento asfáltico



Fonte: Ferreira, 2018.

O revestimento asfáltico é utilizado na construção e manutenção da camada superior do pavimento asfáltico, responsável por resistir diretamente aos esforços oriundo do tráfego e

transmiti-los para as camadas inferiores. Segundo Sabino e Dias (2018), a camada de revestimento em função da sua aplicabilidade é considerada “nobre” devido a sua composição usar como ligante dos agregados derivados de petróleo, que também contribuem no desempenho das propriedades de impermeabilização e adesivação da camada. A maioria dos países do mundo utilizam o cimento asfáltico de petróleo (CAP) como ligante asfáltico em revestimentos, onde no Brasil aproximadamente 95% das estradas pavimentadas são revestidas com concreto asfáltico (Bernucci *et al.*, 2022).

2.2 Misturas Asfálticas

O ligante asfáltico é um composto químico constituídos por átomos de carbono e hidrogênio, denominando-se quimicamente um hidrocarboneto. No contexto da pavimentação, o ligante asfáltico é responsável pela ação aglutinante e impermeabilizante dos pavimentos, assumindo assim uma posição de destaque entre os materiais empregados nos pavimentos flexíveis (SOUSA, 2020).

Pode-se classificar as misturas asfálticas com base na sua temperatura de usinagem, sendo estas: misturas frias, semimornas, mornas e quentes, esses tipos de mistura são amplamente utilizados na construção e manutenção das estradas e rodovias de todo o mundo. No Brasil, dentre os citados o tipo de mistura mais utilizado é o concreto asfáltico (CA) também conhecido como concreto betuminoso usinado à quente (CBUQ) (GUERA, 2019).

A composição das misturas asfálticas normalmente se dá pela compactação de agregados minerais com o próprio ligante asfáltico, além desta combinação se faz necessário a escolha criteriosa dos materiais, devido as influências do desempenho mecânico das camadas de revestimento asfáltico. Guabiroba *et al.* (2023), relata que a escolha dos agregados minerais para misturas asfálticas no Brasil é feita de forma empírica, previamente definidas na norma DNIT ES 031 (2006). Todavia, fatores como a dosagem destes materiais representa uma variável fundamental para o desenvolvimento mecânico das misturas asfálticas, especialmente em termos de resistência à ação deletéria da água, à deformação permanente e quanto à facilidade de compactação. (Andrade *et al.*, 2020).

2.3 Materiais Alternativos em Misturas Asfálticas

O uso de materiais alternativos em misturas asfálticas pode proporcionar diversas melhorias nas camadas de pavimento, entre estas pode-se citar redução de custos no processo de fabricação e melhoramento das propriedades específicas, podendo também contribuir com a redução de impactos ambientais quando utilizados agentes reciclados e/ou naturais. Melo

Neto *et al.* (2020) apontam que o uso de material reciclado em misturas asfálticas tem um aumento exponencial nos últimos anos, devido aos resultados favoráveis obtidos em análises. A reciclagem de pavimentos teve início por volta da década de 1970 devido ao aumento substancial nos preços do asfalto (Gungat, *et al.*, 2019). Logo, pode-se observar o aumento excessivo do uso de materiais ditos alternativos, visando a maximização na reciclagem de resíduos e minimização de gastos no custo de produção dos pavimentos flexíveis (Melo Neto, *et al.*, 2020).

Entretanto, os materiais alternativos tem características que limitam o seu uso, uma delas é a heterogeneidade. Em misturas asfálticas com substituição do agregado tradicional por material reciclado é necessário fazer a verificação quanto à homogeneidade, visto que os aditivos residuais podem atuar na substituição total ou parcial do agregado, ou seja, as propriedades mecânicas e reológicas são modificadas. Essas mudanças limitam alguns aspectos técnicos das misturas asfálticas tradicionais, sendo necessário ensaios laboratoriais para a caracterização, classificação e conseqüentemente o processo de viabilização para o seu uso.

2.4 Dimensionamento de Pavimento Flexível

Para Fernandes (2016), dimensionar um pavimento consiste em determinar a espessura das camadas e os materiais que compõem a estrutura de um pavimento rodoviário, de modo que ela seja capaz de suportar as cargas impostas pelo tráfego ao longo da sua vida útil e das intempéries climáticas do meio, visando a segurança, durabilidade e a funcionalidade da infraestrutura viária.

Cardozo *et al.* (2023) afirmam que cada camada do pavimento desempenha uma função específica na estrutura, sendo compostas por vários tipos particulares de materiais. Logo, é essencial levar em consideração a rigidez elástica e espessura da camada, para que os esforços oriundos do tráfego e as deformações sejam distribuídos adequadamente.

O método de projeto de pavimentos flexíveis utilizado no Brasil foi desenvolvido pelo engenheiro Murillo Lopes de Sousa, é disseminado como método do Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER), onde faz-se o uso das curvas de dimensionamento do Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos (USACE), da metodologia da Associação Americana de Rodovias do Estado e Funcionários de Transporte (AASHTO), dos resultados do ensaio do Índice de suporte Califórnia (CBR) e do volume de tráfego (DNIT, 2006). Este procedimento foi criado com o propósito de preservar o subleito, podendo ser

considerado como uma medida de segurança em termos do acúmulo de deformações permanentes.

Fernandes (2016) classifica a abordagem do DNER como um método empírico, ou seja, é baseado em observações, experiência prática e evidências coletadas, referentes as condições climáticas e de solos. Normalmente é estabelecido correlações entre o desempenho obtido do pavimento e as propriedades dos materiais que integram a estrutura do mesmo.

Para o dimensionamento do pavimento flexível pelo DNER, é necessário determinar a espessura do revestimento betuminoso, em função da análise dos dados de tráfego e dos parâmetros do ensaio de CBR. O Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) faz uma recomendação aos materiais aplicados nas estruturas das camadas de revestimento do pavimento, na Tabela 1, pode se observar as recomendações do DNIT (2006b).

Tabela 1: Recomendações do DNIT (2006b) quanto aos materiais aplicados nas camadas do pavimento.

Camadas	Recomendações do DNIT (2006b)
Material de subleito	CBR \geq 2% Expansão menor que 2%
Material para reforço do subleito	CBR maior que o do subleito Expansão menor que 1%
Material para sub-base	CBR \geq 20% Expansão menor que 1% Índice de Grupo (IG) igual a zero
Material para base	CBR \geq 80% Expansão menor que 0,5% Limite de Liquidez (LL) \leq 25% Índice de Plasticidade (IP) \leq 6%

Fonte: DNIT (2006b)

Silva (2018) afirma que o método pode ainda definir critérios mais detalhados em relação às características dos materiais utilizados, incluindo especificações sobre

granulometria dos agregados, tipos de solos e valores de CBR inferiores aos apresentados na Tabela 1.

2.5 MeDiNa

O Método de Dimensionamento Nacional (MeDiNa) é um software computacional que realiza a verificação e dimensionamento mecanístico-empírico das camadas do pavimento asfáltico, por meio da rotina de Análise Elástica de Múltiplas Camadas (AEMC) (DNIT, 2020). Guabiroba *et al.* (2023) afirmam que a forma de dimensionamento mecanístico-empírico se deu a partir da ferramenta MeDiNa, sendo permitido realizar o dimensionamento de pavimentos asfálticos a partir da incorporação de fatores ambientais, resultados de ensaios mecânicos e relações empíricas laboratoriais e de campo na ferramenta.

Vendrusculo *et al.* (2018) mostram que a metodologia mecanístico-empírica do MeDiNa para o dimensionamento de pavimentos leva em considerações propriedades mecânicas como módulo de resiliência (MR) e o coeficiente de Poisson. Os resultados de MR irá interpretar a rigidez das camadas e o coeficiente de Poisson para a modelagem matemática dos parâmetros de fadiga e deformação permanente. Em contraste, o método do DNER usa de uma metodologia estritamente empírica, levando em consideração apenas os valores do ensaio de CBR.

Além das propriedades mecânicas o MeDiNa avalia também a influência da temperatura e da velocidade de tráfego. Guabiroba *et al.* (2023) apontam estudos onde foram realizadas simulações computacionais utilizando o software, e constataram que um determinado pavimento bem projetado para uma determinada localidade pode não apresentar o mesmo desempenho em outra área, devido as condições de temperatura e velocidade do tráfego. Logo, pode-se afirmar que além das propriedades mecânicas, condições de temperatura e tráfego influenciam de maneira significativa no dimensionamento mecanístico-empírico de pavimentos flexíveis pelo software MeDiNa.

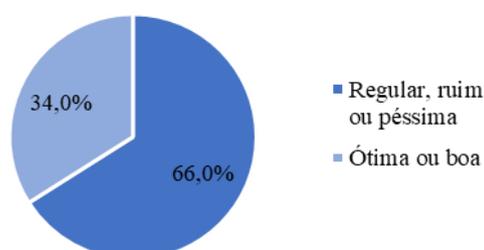
Vendrusculo *et al.* (2018) comparam pavimentos flexíveis dimensionado pelo método DNER (1981), por meio dos resultados do dimensionamento utilizando a metodologia MeDiNa, e os dados mostraram que o método DNER não é suficientemente adequado para prevenir quanto ao trincamento por fadiga, um dos principais problemas enfrentados pela pavimentação de estradas no Brasil.

2.6 Panorama DA Malha Rodoviária Brasileira

Conforme a pesquisa rodoviária conduzida pela Confederação Nacional de Transportes (CNT) em 2022, foi possível realizar uma avaliação abrangente de toda a extensão pavimentada das rodovias federais, incluindo os principais trechos estaduais no Brasil. O estudo expõe o estado geral das rodovias brasileiras em relação ao pavimento, sinalização e geometria da via.

A Figura 2 mostra a porcentagem da malha rodoviária pavimentada avaliada do país.

Figura 2: Estado Geral da malha rodoviária pavimentada do Brasil

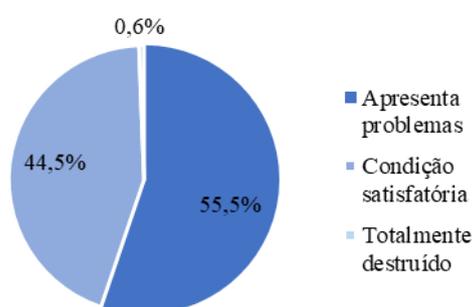


Fonte: Elaborado pelo autor, 2023

66,0% da malha rodoviária pavimentada do Brasil apresenta algum tipo de problema, sendo considerada regular, ruim ou péssima, 34,0% da malha é considerada ótima ou boa.

Em termos de pavimento, a pesquisa da CNT apresenta as condições do pavimento no Brasil. A Figura 3 mostra a porcentagem de pavimento avaliada no país.

Figura 3: Estado do pavimento da malha rodoviária pavimentada do Brasil

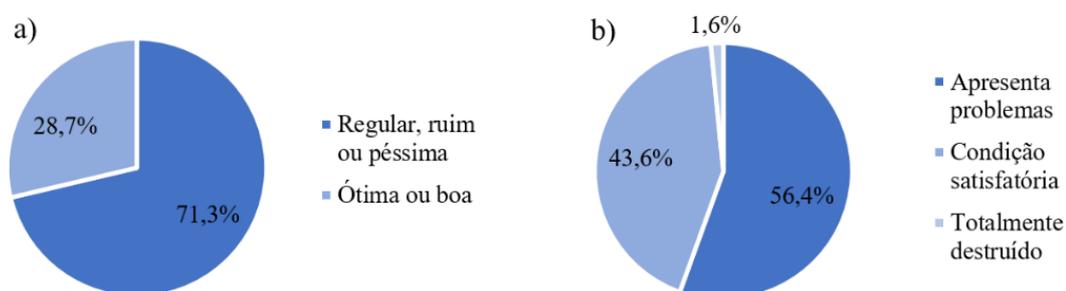


Fonte: Elaborado pelo autor, 2023

55,5% extensão da malha rodoviária pavimentada do Brasil apresenta problemas, 44,5% da malha estão em condições satisfatórias e 0,6% está com o pavimento totalmente destruído.

Ao analisar minuciosamente os resultados da pesquisa CNT de rodovias 2022, os gráficos da Figura 4 mostram dados referentes ao estado geral da malha rodoviária pavimentada na região Nordeste.

Figura 4: a) Estado geral da malha rodoviária pavimentada do Nordeste; b) Estado do pavimento da malha rodoviária pavimentada do Nordeste



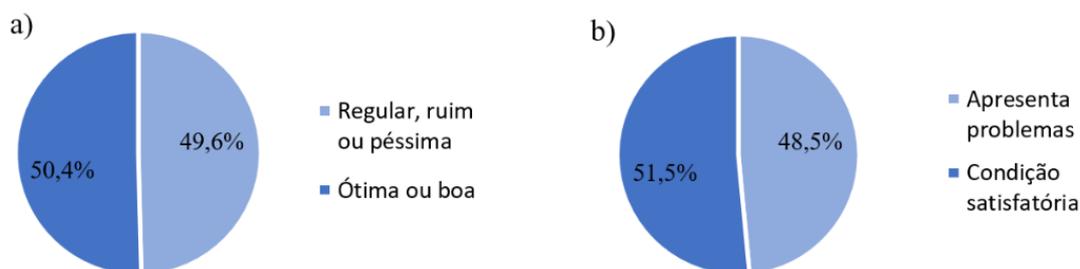
Fonte: Elaborado pelo autor, 2023

71,3% da malha rodoviária pavimentada do Nordeste apresenta algum tipo de problema, sendo considerada regular, ruim ou péssima, 28,7% da malha é considerada ótima ou boa.

56,4% extensão da malha rodoviária pavimentada do Nordeste apresenta problemas, 43,6% da malha estão em condições satisfatórias e 1,6% está com o pavimento totalmente destruído.

A Figura 5 mostra dados referentes ao estado geral da malha rodoviária pavimentada no estado da Paraíba.

Figura 5: a) Estado geral da malha rodoviária pavimentada da Paraíba; b) Estado do pavimento da malha rodoviária pavimentada da Paraíba



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023

Com base nas análises realizadas anteriormente, é possível concluir que mais de 50% da malha rodoviária pavimentada em questão apresenta deficiências, sendo classificada nos estados de regular, ruim ou péssimo. Pode-se afirmar que as rodovias não estão adequadamente dimensionadas, e esses problemas e condições do pavimento podem ser atribuídos ao subdimensionamento causado pelo método de dimensionamento de pavimento flexível do DNIT.

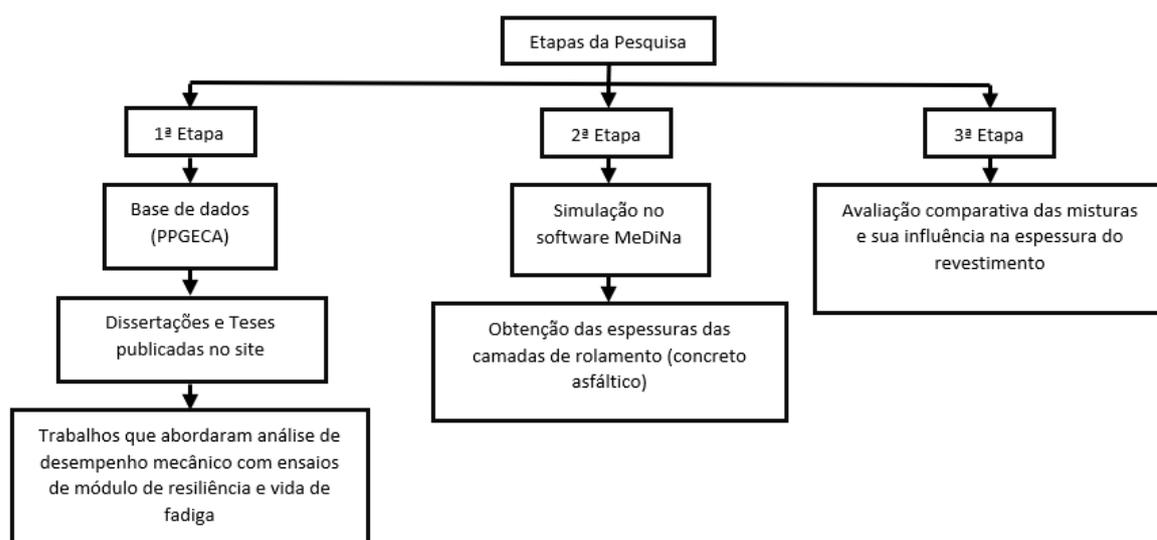
3 METODOLOGIA

Este tópico descreve a abordagem e metodologia adotadas para o desenvolvimento crítico e sistemático desta pesquisa, em que foi apresentado uma revisão literária do banco de dados do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental (PPGECA), em que foram analisadas dissertações publicadas desde o ano de 2014 e teses desde o ano de 2020, que abordaram o uso de misturas asfálticas com aditivos e realizaram os ensaios de módulo de resiliência (MR) e vida de fadiga por compressão diametral.

Para isso, realizou-se o dimensionamento utilizando a metodologia mecanística-empírica presente no MeDiNa, simulando a influência dos aditivos e o tipo de mistura na espessura da camada de rolamento considerando as camadas subjacentes (base, sub-base e subleito) iguais. Por meio desta análise foi feita uma avaliação comparativa em termos de dimensionamento de espessuras das camadas e das misturas asfálticas investigadas.

A metodologia adotada nesta pesquisa foi dividida em três etapas conforme demonstra o fluxograma da Figura 6. As duas primeiras etapas tiveram como objetivo selecionar as dissertações e teses que estavam aptas para a análise no software MeDiNa. Na terceira etapa, foi realizada a comparação das misturas e a influência do tipo de mistura asfáltica na espessura do revestimento da camada de rolamento.

Figura 6: Etapas da pesquisa



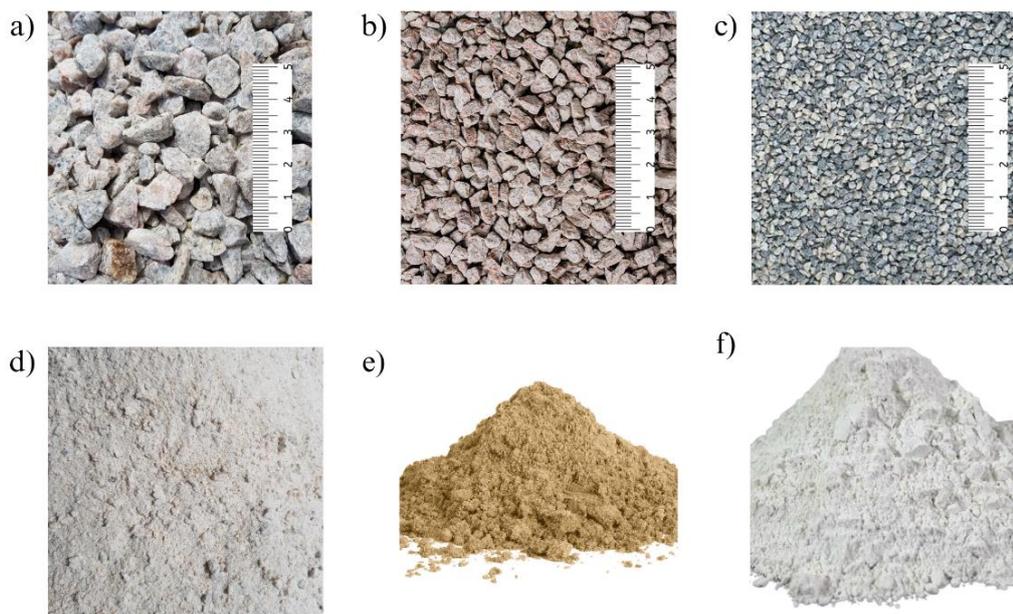
Fonte: Elaborado pelo autor, 2023

3.1 Descrição das Misturas Avaliadas

As misturas asfálticas avaliadas são constituídas de agregados graúdos e miúdos, fíler e aditivos.

Os agregados graúdos utilizados foram as britas graníticas de diâmetro nominal máximo de 19,0 mm e mínimo de 12,5 mm e 9,5 mm a depender do estudo. Os agregados miúdos foram o pó de pedra, também de natureza granítica e a areia. A cal hidratada foi utilizada como fíler em todos os estudos. A Figura 7 representa os agregados e o fíler utilizados nos estudos.

Figura 7: Agregados e Fíler usados nos estudos: a) Brita 19,0 mm; b) Brita 12,5 mm; c) Brita 9,5 mm; d) Pó de Pedra; e) Areia; f) Cal Hidratada.



Fonte: Adaptado de Melo Neto, 2022.

O cimento asfáltico de petróleo (CAP) utilizado nos estudos abordados classificou-se com penetração 50/70, devido este tipo de ligante ser o mais utilizado na região Nordeste do Brasil. A Figura 8 representa ligante asfáltico utilizado nos estudos.

Figura 8: CAP 50/70



Fonte: Adaptado de Melo Neto, 2022.

3.1.2 Misturas Asfálticas com Redutores de Viscosidade do Ligante Asfáltico

O uso de óleos e ceras vegetais em misturas asfálticas é uma alternativa sustentável e ecológica. Lucena *et al.* (2019) apontam que estes usos em misturas asfálticas proporciona uma ação sustentável, melhorando o meio ambiente, devido ao seu descarte adequado, evitando o despejo na natureza, além de também poder influenciar nas propriedades físicas e reológicas dos ligantes asfálticas.

Carvalho (2018) observou o comportamento da mistura asfáltica modificada após a adição de teores de 1%, 2% e 3% do óleo de girassol no ligante asfáltico. Para avaliar e caracterizar as propriedades mecânicas foram realizados os ensaios de Flow Number, Lottman Modificado, Módulo de Resiliência, Resistência à Tração e Vida de Fadiga. Os resultados dos ensaios mostram que as misturas produzidas com o óleo de girassol como agente modificador demonstraram um aumento na resistência ao dano causado pela umidade, o que implicou em uma maior adesividade e coesão para a mistura asfáltica, além de apresentarem um maior limite de resistência à fadiga, porém não tiveram resultados satisfatórios quanto à resistência à tração direta e módulo de resiliência, comparados com a mistura de referência. De modo geral, o óleo de girassol tem um alto potencial como aditivo orgânico.

Guerra (2019) observou a redução das temperaturas de usinagem e compactação após a adição de teores de 1%, 2% e 3% de óleo de canola em misturas asfálticas. Para o processo de caracterização mecânica das misturas asfálticas, realizou-se os ensaios de: Flow Number, Lottman Modificado, Módulo de Resiliência, Módulo Dinâmico, Resistência à Tração e Vida de Fadiga. A partir desta análise dos ensaios pode-se concluir a redução das temperaturas de usinagem e compactação em até 6 °C, entretanto, houve diminuição da vida de fadiga e a redução do Flow Number em relação à mistura asfáltica com o ligante puro, sendo assim, não o uso do óleo de canola no ligante asfáltico se torna limitado a depender do nível de tráfego da rodovia. Logo, o óleo de canola é um aditivo orgânico, e sua adição em misturas asfálticas atua na redução da viscosidade, diminuindo a consistência do ligante asfáltico.

Moraes (2018) utiliza da cera de Carnaúba como aditivo redutor de temperaturas de usinagem e compactação em misturas asfálticas, analisou-se a cera de carnaúba do tipo 1, nos teores de 1%, 2% e 3% para modificar o ligante utilizado. A partir dos ensaios empíricos de penetração, ponto de amolecimento e o ensaio no viscosímetro rotacional foram observados os efeitos do aditivo incorporado. Para verificar a influência da redução das temperaturas de usinagem e compactação no desempenho mecânico das misturas asfálticas, realizou-se ensaios de Resistência à Tração (RT), Módulo de Resiliência (MR), Dano por umidade (Lottman), Vida de Fadiga, Flow Number, Cântabro e Módulo Dinâmico. Os ligantes

incorporados com 2% e 3% de cera de Carnaúba apresentaram uma diminuição de 9°C na temperatura de usinagem (TU), em relação aos ensaios mecânicos obteve-se melhores resultados no Lottman e Vida de Fadiga, mostrado por meio do aumento significativo em comparação com a mistura de referência. Entretanto, o ensaio de Flow Number apresentou valores baixos para todos os teores analisados. Os demais ensaios mantiveram-se similares quando comparados com a mistura asfáltica com o ligante puro.

Sousa (2020) estuda o potencial uso da cera de abelha como aditivo natural na produção de misturas asfálticas mornas. Foram realizados ensaios reológicos e mecânicos em misturas asfálticas com adição da cera de abelha nos teores de 1%, 3% e 5%, na massa do ligante asfáltico, os seguintes ensaios mecânicos realizados foram: Resistência à Tração, Módulo de Resiliência, Dano por Umidade (Lottman), Flow Number, Módulo Dinâmico e Vida de Fadiga. Os parâmetros de vida de fadiga e Flow Number não obtiveram um bom desempenho em comparação com a mistura de referência, entretanto a resistência à tração da mistura com 1% de cera de abelha apresentou aspectos positivos, mesmo os outros teores, embora tenham demonstrado resultados inferiores em comparação com a mistura de referência, os valores obtidos ainda estão em conformidade com o limite mínimo estabelecido pelas normas. Por fim, observou que o ligante modificado com 5% do aditivo natural apresentou diminuição na temperatura de usinagem de 9°C, e 12°C na de compactação, destacando-se como o teor mais eficaz para ser utilizado como aditivo redutor de viscosidade.

3.1.3 Misturas Asfálticas Recicladas

Recycled Asphalt Pavement (RAP) refere-se ao asfalto reciclado proveniente de pavimentos antigos, normalmente é utilizado em misturas asfálticas, visando alternativas sustentáveis. Chaves (2023) mostra que a adição de teores elevados de RAP em misturas asfálticas pode diminuir de forma considerável a resistência as trincas e o desempenho à fadiga.

Segundo Costa (2023) a utilização de ligantes produzidos por uma fonte alternativa ou renovável, mitigam o impacto ambiental e podem atuar como uma agente de reciclagem em misturas com alto teor de RAP, ou seja, a utilização de aditivos bioligantes em misturas asfálticas com alto teor de RAP podem melhorar as propriedades físicas do ligante, pois este material apresenta potencial para alterar a rigidez do ligante e consequentemente da mistura.

Costa (2023) mostra em sua pesquisa misturas asfálticas recicladas a quente contendo a adição de zeólita e aditivos bioligantes, os teores de RAP adotados foram de 15%, 25% e 33% e respectivamente de 6%, 4% e 10% de bioligantes de óleo de algodão.

Melo Neto (2022) avalia misturas asfálticas recicladas com o ácido graxo da borra do óleo de soja, os teores de ácido graxo adicionados às misturas asfálticas com 40% de RAP foram de 0%, 3% e 5%. A adição de RAP na mistura asfáltica melhorou a resistência à deformação permanente, enquanto o ácido graxo da borra do óleo de soja melhorou o desempenho à fadiga dessa mistura devido ao seu efeito amolecedor.

Carvalho (2022) avaliou três tecnologias para misturas asfálticas mornas (MAMs) com os teores de 0%, 30% e 70% de material fresado. Os ligantes modificados pelos aditivos das tecnologias MAMs foram o óleo de girassol, o WarmGrip® e a zeólita natural. O aumento do teor de RAP nas misturas asfálticas proporcionou o crescimento da resistência a deformação permanente, no entanto, a adição dos aditivos apresentou propriedades rejuvenescedoras e uma diminuição na rigidez das misturas.

Arruda (2021) avaliou o desempenho mecânico e a capacidade de autorregeneração de misturas asfálticas recicladas com teores de 10%, 30% e 50% de material fresado. Para avaliar as propriedades mecânicas e de autorregeneração foram realizados os ensaios de Resistência à Tração (RT), Módulo de Resiliência, Resistência à Deformação Permanente (Flow Number) e Vida de Fadiga. Os respectivos ensaios realizados indicaram aumento de rigidez, diminuição de deformabilidade e resistência à fadiga à medida que os teores de RAP são aumentados na composição da mistura.

3.1.4 Misturas Asfálticas com Agentes Rejuvenescedores Encapsulados

Misturas asfálticas com agentes encapsulados são misturas que contêm aditivos ou agentes encapsulados ou incorporados em partículas microscópicas. Al-Mansoori *et al.* (2018) apontam que rejuvenescedores encapsulados são partículas esféricas, ou cápsulas, que contêm aproximadamente 70% de óleo ou bio-óleo como aditivo.

Barros (2020) utilizou como agentes rejuvenescedores encapsulados o óleo de soja e o óleo de cozinha residual, foram produzidas cápsulas contendo diferentes teores de óleo, denominou-se cápsulas tipo 1, tipo 1 residual e tipo 2, nos dois primeiros tipos, o teor de óleo é o mesmo, porém compostas por o óleo de soja e o residual de cozinha, já o tipo 2 contém um maior teor de óleo de soja. Realizou-se ensaios mecânicos para avaliação da capacidade de autorregeneração das misturas. O parâmetro de vida de fadiga nas misturas asfálticas com as cápsulas tipo 2 e tipo 1 residual apresentaram maior resistência à fadiga, entretanto os parâmetros de resistência ao dano por umidade induzida, módulo de resiliência e resistência a deformação permanente diminuíram com a adição de qualquer tipo de cápsula. Observou que a adição das cápsulas reduziu algumas propriedades mecânicas estudadas, porém, espera-se

que com ajustes no teor de óleo nas cápsulas de alginato, essas propriedades sejam superadas, demonstrando desta forma o seu uso e viabilidade em misturas asfálticas.

Silva (2022) avaliou o uso do ácido graxo (AGS) e da borra (BS) do óleo de soja como agentes rejuvenescedores encapsulados. Foram produzidas cápsulas compostas por borra do óleo de soja e ácido graxo de alginato com um teor de 0,6% do peso total da mistura, avaliando este teor sobre o volume de vazios, a resistência à tração indireta, ao dano por umidade induzida, rigidez, deformação permanente e vida de fadiga. A adição das cápsulas não afetou consideravelmente o volume de vazios, em contra-partida, o módulo de resiliência, a vida de fadiga e o dano por umidade apresentaram parâmetros satisfatórios. Logo, a adição do ácido graxo e da borra do óleo de soja possuem aplicabilidade na utilização de agentes rejuvenescedores em misturas asfálticas.

3.1.5 Misturas Asfálticas do tipo Stone Matrix Asphalt (SMA)

O uso de fibras incorporadas em misturas asfálticas SMA tem como principal propriedade a capacidade de reter o ligante sem causa escorrimento e sem comprometer a integridade da mistura asfáltica (Costa, 2017).

São diversos os tipos de fibras que são utilizados como aditivos estabilizadores, os principais tipos são a fibra de celulose, mineral e vidro. Martin et al. (2009) apontam que o uso de fibras naturais possui diversas vantagens em comparação às fibras sintéticas, principalmente por serem biodegradáveis, não tóxicas, provenientes de fontes renováveis e terem um custo reduzido.

Costa (2017) realizou estudos com o uso das fibras do pseudocaule da bananeira do tipo Pacovan em misturas asfálticas do tipo SMA. A partir do comprimento das fibras pode-se avaliar a influência enquanto ao desempenho da mistura; adotou-se os comprimentos de 5, 10, 15 e 20 mm para as avaliações. A caracterização mecânica foi realizada abrangendo diversos parâmetros, como estabilidade Marshall, método Lottman modificado, resistência à tração, ensaio de cântabro, módulo de resiliência, fadiga à tensão controlada, módulo dinâmico e flow number, variando os diferentes comprimentos de fibras. Houve um aumento da resistência tanto a solicitações de cargas estáticas quanto a dinâmicas, bem como uma maior capacidade de resistência às deformações permanentes, ao desgaste e aos danos causados pela umidade. Já nos ensaios de módulo dinâmico, assim como no ensaio de módulo de resiliência, foi evidenciada uma sensibilidade dos resultados quanto à variação de temperatura, com a rigidez das misturas diminuindo à medida que a temperatura aumentava. Os demais parâmetros apresentaram valores acima dos mínimos estabelecidos pelas normas. Sendo

possível concluir que o pseudocaule da bananeira do tipo Pacovan é uma alternativa viável de aditivo estabilizador para o SMA.

3.2 Método de Dimensionamento

3.2.1 DNIT

O dimensionamento de pavimentos flexíveis pelo método do DNIT foi desenvolvido pelo Engenheiro Murillo Lopes de Souza na década de 50 e oficializado em 1961 pelo extinto Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER), sua última revisão aconteceu em 1981.

O método de projeto de pavimento flexíveis do DNER (1981) consiste em uma abordagem empírica, com base nos parâmetros do Índice de Suporte Califórnia (ISC), originado do inglês *California Bearing Ratio* (CBR), e o volume de tráfego, que é caracterizado por um número de equivalência do tráfego real, o qual é dado pelo valor do número de solicitações (N) no pavimento do eixo de 8,2 tf (DNIT, 2006).

Laube *et al.* (2021) afirmam que para o dimensionamento total da estrutura de pavimento é preciso considerar os materiais utilizados na construção das camadas do pavimento, em termos de granulometria, dados geotécnicos e as próprias características do tráfego solicitadas.

A Capacidade de Suporte das camadas do pavimento é determinado pelo CBR. Para a camada de subleito, os parâmetros de projeto para o dimensionamento deverão apresentar uma expansão, medida pelo ensaio de CBR, menor ou igual a 2% e um CBR maior ou igual a 2%. Com base nos valores deste ensaio surge a classificação dos materiais empregados no pavimento, conforme o DNIT (2006):

- a) Materiais para reforço do subleito: CBR maior do que o CBR do subleito; e expansão $\leq 1\%$;
- b) Materiais para sub-base: CBR $\geq 20\%$; e expansão $\leq 1\%$;
- c) Materiais para base: CBR $\geq 80\%$; e expansão $\leq 0,5\%$.

A sequência de cálculos desse método foi extraída do manual de pavimentação do DNIT (2006). O primeiro passo envolve a definição das espessuras das camadas. A Tabela 2 apresenta as espessuras de revestimento asfáltico recomendadas.

Tabela 2: Espessuras mínimas da camada de revestimento asfáltico em função de N (Recomendados pelo DNER)

N	Espessura Mínima do Revestimento Betuminoso ou Asfáltico
$N \leq 10^6$	Utilizar tratamentos superficiais betuminosos. De acordo ao DER-MG, pode-se utilizar 2,5 cm de tratamento superficial betuminoso.
$10^6 < N \leq 5 \times 10^6$	Utilizar revestimentos betuminosos com 5,0 cm
$5 \times 10^6 < N \leq 10^7$	Concreto asfáltico usinado a quente com 7,5 cm
$10^7 < N \leq 5 \times 10^7$	Concreto asfáltico usinado a quente com 10,0 cm
$N > 5 \times 10^7$	Concreto asfáltico usinado a quente com 12,5 cm

Fonte: DNIT (2006)

O passo seguinte é determinar os coeficientes de equivalência estrutural, que variam conforme o tipo de material utilizado no projeto do pavimento flexível. A Tabela 3 mostra os valores dos coeficientes estruturais para vários tipos de materiais.

Tabela 3: Coeficientes de equivalência estrutural usados no dimensionamento das camadas do pavimento

Componente do Pavimento	Coefficiente K
Base ou revestimento de concreto betuminoso (ou asfáltico)	2,00
Base ou revestimento de pré-misturado a quente de graduação densa	1,70
Base ou revestimento de pré-misturado a frio de graduação densa	1,40
Base ou revestimento betuminoso por penetração direta ou invertida (tratamentos superficiais)	1,20
Camadas granulares	1,00
Solo cimento com resistência à compressão a 7 dias superior a 45 kg/cm ²	1,70
Solo cimento com resistência à compressão a 7 dias entre 45 e 28 kg/cm ²	1,40

Solo cimento com resistência à compressão a 7 dias entre 28 e 21 kg/cm ²	1,20
Bases de Solo-Cal	1,20

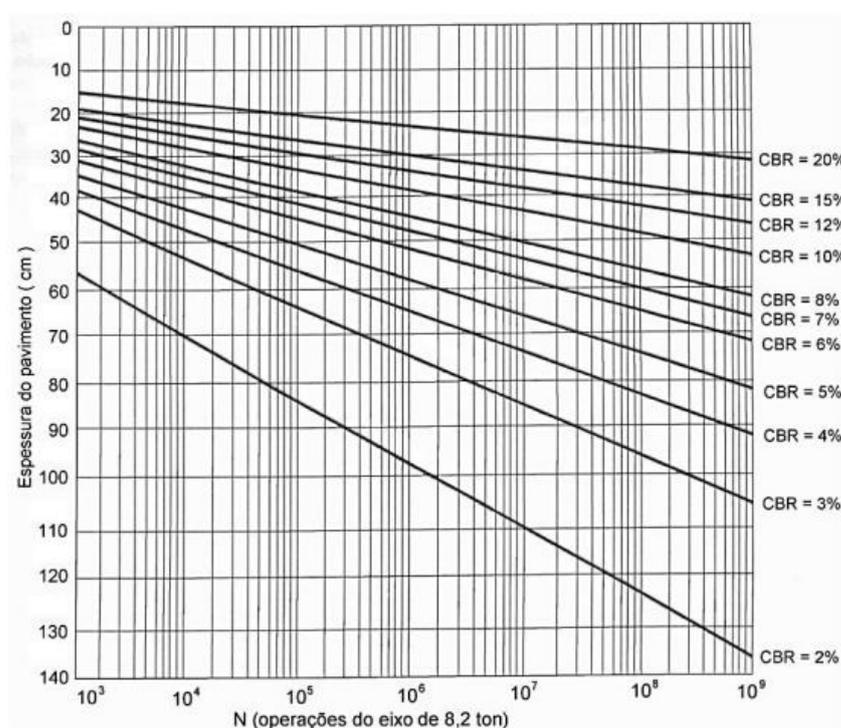
Fonte: DNIT (2006)

Os coeficientes de equivalência estrutural são designados por:

- K_R = Coeficiente estrutural do revestimento;
- K_B = Coeficiente estrutural da base;
- K_R = Coeficiente estrutural da sub-base; e
- K_F = Coeficiente estrutural do reforço do subleito.

A espessura do pavimento fornecida pelo gráfico da Figura 9 é em termos de material com coeficiente estrutural (K) igual a 1, isto é, materiais granulares.

Figura 9: Gráfico utilizado para o dimensionamento das camadas do pavimento (subjacentes à camada de material betuminoso)



Fonte: DNIT (2006)

As equações para o dimensionamento do pavimento flexível são:

- I. $R \cdot K_R + B \cdot K_B \geq H_{20}$
- II. $R \cdot K_R + B \cdot K_B + h_{20} \cdot K_S \geq H_n$
- III. $R \cdot K_R + B \cdot K_B + h_{20} \cdot K_S + h_n \cdot K_{REF} \geq H_m$

Onde:

H_m = Espessura total do pavimento necessária para proteger o subleito (cm);

H_n = Espessura total do pavimento necessária para proteger o reforço do subleito (cm);

H_{20} = Espessura total do pavimento necessária para proteger a sub-base (cm);

R = Espessura do revestimento (cm);

h_{20} = Espessura da sub-base (cm);

h_n = Espessura do reforço do subleito (cm); e

K_R , K_B , K_S e K_{REF} = respectivamente, são os coeficientes estruturais do revestimento, da base, da sub-base e do reforço do subleito.

A Figura 10 auxilia o entendimento das equações apresentadas anteriormente.

Figura 10: Esquema comumente empregado para o dimensionamento de pavimentos flexíveis rodoviários



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023

3.2.2 MeDiNa

O método de dimensionamento mecanístico-empírico de pavimentos flexíveis consiste em coletar dados referentes ao tráfego, às condições ambientais e os materiais que constituem a estrutura do pavimento. A partir desta coleta, estabelecem-se correlações entre os dados de resistência dos materiais que constituem as camadas asfálticas do pavimento e as informações de tráfego para uma determinada localização, levando em consideração as tensões, deformações e os danos resultantes da repetição das cargas. Vendrusculo *et al.* (2018) afirmam que para o dimensionamento e a definição das espessuras das camadas se dá a partir

da análise e coleta destas informações, afim de que as espessuras satisfaçam as condições previstas no dimensionamento.

Franco (2007) introduziu uma ferramenta responsável por calcular o estado de tensões em estruturas e analisar o desempenho dos materiais, está ferramenta era conhecida como SisPav e passou por várias interações até alcançar a sua versão mais atual denominada de Método de Dimensionamento Nacional de Pavimentos (MeDiNa).

De acordo com Guabiroba *et al.* (2023) o MeDiNa é uma ferramenta de dimensionamento mecanístico-empírico de pavimentos flexíveis, responsável por considerar fatores ambientais e resultados de ensaios mecânicos para o dimensionamento do pavimento asfáltico. Para que os resultados das espessuras das camadas do pavimento, vida útil e área trincada, sejam confiáveis é essencial que o conjunto de dados sobre o tráfego e as propriedades do concreto asfáltico inseridas no software sejam precisas.

Lopes e Soares (2022) afirmam que no processo de planejamento da estrutura de pavimento flexível em uma determinada via, é crucial a etapa de definição das espessuras das camadas de revestimento, base, sub-base e reforço do subleito, sendo estas camadas responsáveis por desempenharem a distribuição das cargas impostas pelos veículos, enquanto também garantem que a superfície não sofra deformações excessivas com os esforços impostos pelo tráfego.

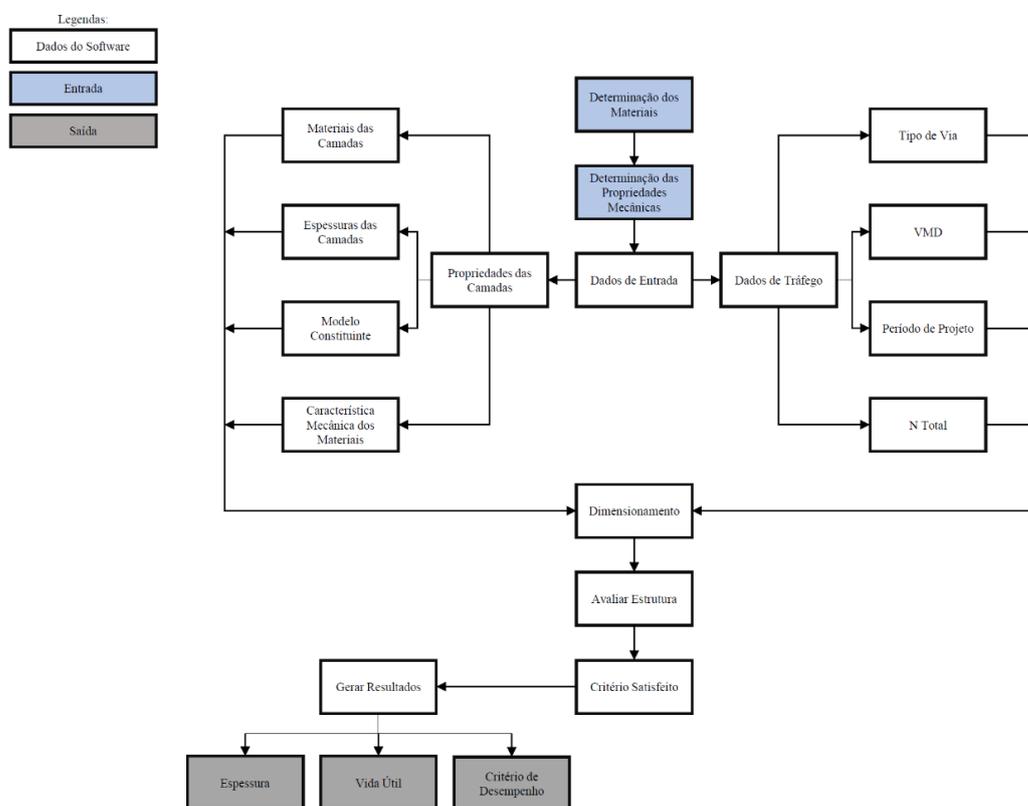
Conforme os resultados das propriedades mecânicas das misturas asfálticas apresentados pelos autores estudados, foram considerados para o dimensionamento de pavimentos pelo software os seguintes dados de entrada: período de projeto igual a 10 anos, número total de passagens do eixo padrão (N) igual a 5,00E+06 e sistema arterial primário, devido ao volume médio diário ser classificado como via do tipo V-6. Esse (N) determinado também se enquadra dentro dos limites de valores (N) do dimensionamento pelo método do DNIT que viabiliza a espessura mínima de concreto asfáltico (5 cm).

Nesta etapa, o subleito, as camadas de sub-base e base permaneceram inalterados, enquanto os materiais das camadas asfálticas foram substituídos pelas misturas avaliadas neste estudo. Em seguida, conduziram-se duas análises: a primeira para determinar as espessuras ideais das camadas asfálticas (ligante e camada de rolamento) necessárias para atender aos critérios do MeDiNa, e a segunda, mantendo todas as espessuras constantes, avaliando o desempenho de cada mistura em termos de fissuras e afundamentos na trilha de rodas ao longo do tempo. A Figura 11, representa a estrutura do pavimento com as respectivas camadas que a compõem.

Figura 11: Estrutura do Pavimento

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023

Para proporcionar uma compreensão mais clara do método de dimensionamento MeDiNa, dividiu-se a metodologia em quatro partes: determinação das camadas do pavimento, determinação das propriedades mecânicas, dimensionamento mecanístico-empírico dos pavimentos e critérios de desempenho, espessura e vida útil. A Figura 12 ilustra o procedimento metodológico do dimensionamento MeDiNa.

Figura 12: Procedimento metodológico do Método MeDiNa.

FONTE: Adaptado de Lopes e Soares 2022.

3.2.2.1 Dados de Entrada

As Tabelas 4, 5, 6 e 7 apresentam os dados necessários para o dimensionamento do pelo método MeDiNa.

Tabela 4: Parâmetros das misturas asfálticas puras e com agentes rejuvenescedores

Misturas	Coefficiente de Poisson	Módulo de Resiliência (MPa)	Massa Específica (g/cm ³)	Resistência à Tração (MPa)	Flow Number (Ciclos)	Volume de Vazios (%)	Coefficiente de Regressão (k1)	Coefficiente de Regressão (k2)
Barros (2020) - Ref	0,30	7080,00	2,40	1,08	205	3,88	3,00E-07	-2,310
Barros (2020) - Cápsulas T1	0,30	5000,00	2,40	0,98	155	3,93	1,00E-10	-3,219
Barros (2020) - Cápsulas T1R	0,30	5200,00	2,40	0,92	179	3,73	9,00E-44	-11,08
Barros (2020) - Cápsulas T2R	0,30	4500,00	2,40	0,90	130	3,71	3,00E-30	-7,908
Silva (2022) - Ref	0,30	5500,00	2,40	1,13	304	4,05	4,00E-11	-3,185
Silva (2022) - Cápsulas C/BS0,1	0,30	6300,00	2,40	0,91	280	3,90	2,00E-35	-9,022
Silva (2022) - Cápsulas C/BS0,2	0,30	6700,00	2,40	0,98	289	3,84	2,00E-25	-6,631
Silva (2022) - Cápsulas C/AGS0,1	0,30	5950,00	2,40	0,92	285	4,10	9,00E-38	-9,711
Silva (2022) - Cápsulas C/AGS0,2	0,30	6180,00	2,40	0,85	270	4,33	2,00E-38	-9,714

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023

Tabela 5: Parâmetros das misturas asfálticas puras e com agentes redutores de viscosidade

Misturas	Coefficiente de Poisson	Módulo de Resiliência (MPa)	Massa Específica (g/cm ³)	Resistência à Tração (MPa)	Flow Number (Ciclos)	Volume de Vazios (%)	Coefficiente de Regressão (k1)	Coefficiente de Regressão (k2)
Carvalho (2018) - Ref	0,30	5517,00	2,40	1,21	125	4,00	4,00E-37	-9,603
Carvalho (2018) - 1% Óleo de Girassol	0,30	5335,00	2,40	1,07	101	4,00	1,00E-15	-4,392
Carvalho (2018) - 2% Óleo de Girassol	0,30	4824,00	2,40	0,84	117	4,00	2,00E-16	-4,416
Carvalho (2018) - 3% Óleo de Girassol	0,30	3083,00	2,40	0,69	70	4,00	1,00E-08	-2,71
Moraes (2018) - Ref	0,30	5517,00	2,40	1,20	125	3,93	4,00E-37	-8,54
Moraes (2018) - 1% Cera de Carnaúba	0,30	5276,00	2,40	1,02	121	3,93	7,00E-16	-4,36
Moraes (2018) - 2% Cera de Carnaúba	0,30	4723,00	2,40	0,95	55	3,93	4,00E-04	-1,67
Moraes (2018) - 3% Cera de Carnaúba	0,30	5508,00	2,40	0,87	41	3,93	4,00E-22	-5,87
Guerra (2019) - Ref	0,30	5359,00	2,40	1,11	108	4,00	1,00E-45	-11,68
Guerra (2019) - 1% Óleo de Canola	0,30	3388,00	2,40	0,76	51	4,00	9,00E-28	-7,315

Guerra (2019) - 2% Óleo de Canola	0,30	3346,00	2,40	0,73	48	4,00	3,00E-25	-6,680
Guerra (2019) - 3% Óleo de Canola	0,30	3118,00	2,40	0,70	56	4,00	1,00E-20	-5,499
Sousa (2020) - Ref	0,30	6685,00	2,40	0,83	153,5	4,00	2,00E-33	-8,496
Sousa (2020) - 1% Cera de Abelha	0,30	4627,00	2,40	0,93	120,5	4,00	12,5	-0,659
Sousa (2020) - 3% Cera de Abelha	0,30	6829,00	2,40	0,69	115	4,00	9,00E-32	-8,027
Sousa (2020) - 5% Cera de Abelha	0,30	6015,00	2,40	0,69	88	4,00	2,00E-18	-5,072

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023

Tabela 6: Parâmetros das misturas asfálticas puras e recicladas

Misturas	Coefficiente de Poisson	Módulo de Resiliência (MPa)	Massa Específica (g/cm ³)	Resistência à Tração (MPa)	Flow Number (Ciclos)	Volume de Vazios (%)	Coefficiente de Regressão (k1)	Coefficiente de Regressão (k2)
Melo Neto (2022) - Ref	0,30	5518,00	2,40	1,14	302	4,00	0,2437	-0,882
Melo Neto (2022) - 40%RAP + 0% Ácido Graxo	0,30	6005,00	2,40	1,20	1990	4,00	0,0483	-1,187
Melo Neto (2022) - 40%RAP + 3% Ácido Graxo	0,30	6004,00	2,40	1,10	1544	4,00	2,00E-06	-2,245
Melo Neto (2022) - 40%RAP + 5% Ácido Graxo	0,30	6001,00	2,40	1,09	1464	4,00	0,0006	-1,723
Carvalho (2022) - Ref	0,30	6249,00	2,40	0,96	70	4,00	3,00E-04	-1,701
Carvalho (2022) - 30%RAP	0,30	8540,00	2,40	1,25	494	4,10	2,00E-09	-2,997
Carvalho (2022) - 30%RAP + Óleo de Girassol	0,30	5729,00	2,40	0,97	395	4,10	3,00E-04	-1,772
Carvalho (2022) - 30%RAP + Zeólita	0,30	6571,00	2,40	1,12	898	4,10	5,00E-13	-3,775
Carvalho (2022) - 30%RAP + WARMGRIP	0,30	8813,00	2,40	1,51	1400	4,10	6,00E-08	-2,583
Carvalho (2022) - 70%RAP	0,30	16470,00	2,40	2,04	6037	4,20	0,0182	-1,219
Carvalho (2022) - 70%RAP + Óleo de Girassol	0,30	10276,00	2,40	1,57	4676	4,20	0,047	-1,185
Carvalho (2022) - 70%RAP + Zeólita	0,30	8621,00	2,40	1,26	5112	4,20	0,0168	-1,294
Carvalho (2022) - 70%RAP + WARMGRIP	0,30	14124,00	2,40	1,97	6145	4,20	5,9966	-0,775
Costa (2023) - Ref	0,30	7151,00	2,40	0,96	185	4,00	1,00E-20	-5,334
Costa (2023) - 15%RAP + 4% Óleo de Algodão	0,30	6202,00	2,40	0,70	211	4,00	9,00E-23	-5,717
Costa (2023) - 25%RAP + 6% Óleo de Algodão	0,30	6193,00	2,40	0,66	269	4,20	2,00E-23	-5,824
Costa (2023) - 33%RAP + 10% Óleo de Algodão	0,30	8221,00	2,40	0,97	347	4,00	2,00E-16	-4,342
Costa (2023) - 15%RAP + 0,3% Zeólita	0,30	9179,00	2,40	1,21	26	4,00	3,00E-13	-3,779

Costa (2023) - 25%RAP + 0,3%Zeólita	0,30	15147,00	2,40	1,22	364	4,00	5,00E-13	-3,506
Costa (2023) - 33%RAP + 0,3%Zeólita	0,30	15993,00	2,40	1,25	383	4,00	2,00E-22	-5,423
Arruda (2021) - Ref	0,30	6295,00	2,40	1,15	95	3,90	2,00E-12	-3,904
Arruda (2021) - 10%RAP	0,30	7326,00	2,40	1,40	162	4,10	0,0512	-1,139
Arruda (2021) - 30%RAP	0,30	9692,00	2,40	1,48	443	4,20	0,0614	-1,137
Arruda (2021) - 50%RAP	0,30	11287,00	2,40	1,93	744	4,10	0,0241	-1,23

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023

Tabela 7: Parâmetros das misturas asfálticas do tipo *Stone Matrix Asphalt* (SMA) com fibras de bananeira

Misturas	Coefficiente de Poisson	Módulo de Resiliência (MPa)	Massa Específica (g/cm ³)	Resistência à Tração (MPa)	Flow Number (Ciclos)	Volume de Vazios (%)	Coefficiente de Regressão (k1)	Coefficiente de Regressão (k2)
Costa (2017) - Ref	0,30	13700,00	2,40	0,62	180	3,94	2,00E-22	-6,044
Costa (2017) - Fibra 5mm	0,30	12050,00	2,40	0,68	120	3,94	2,00E-20	-5,672
Costa (2017) - Fibra 10mm	0,30	11920,00	2,40	0,70	140	3,94	1,00E-16	-4,805
Costa (2017) - Fibra 15mm	0,30	11200,00	2,40	0,73	195	3,94	7,00E-06	-2,204
Costa (2017) - Fibra 20mm	0,30	11100,00	2,40	0,86	225	3,94	1,00E-14	-4,396

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023

A obtenção precisa dos parâmetros fundamentais, tais como Módulo de Resiliência (MR), Resistência à Tração (RT), Flow Number, Volume de Vazios e os Coeficientes de Regressão (k1 e k2), é necessária para permitir que o software realize com precisão o dimensionamento da espessura da camada de rolamento e a caracterização do pavimento. Esses dados, essenciais para o processo, foram meticulosamente adquiridos nos estudos submetidos à avaliação. Registra-se, contudo, a ausência de informações relativas ao Coeficiente de Poisson e Massa Específica nos estudos avaliados. Nesse contexto, adotou-se respectivamente, os valores de 0,30 e 2,40 g/cm³, que corresponde a parâmetros característicos do concreto asfáltico denso.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste tópico são apresentados e discutidos os resultados do dimensionamento de pavimentos flexíveis pelas metodologias do DNIT e do MeDiNa. Neste são apresentados os resultados das espessuras da camada de rolamento do pavimento, o fator de fadiga e a classe de fadiga das misturas, a porcentagem da área trincada e o afundamento de trilha de roda, em 10 anos, além da porcentagem dos materiais que foram utilizados na composição das misturas asfálticas estudadas.

Com o intuito de comparar as espessuras das camadas de revestimento asfáltico, os materiais e espessuras da base e sub-base foram mantidas no dimensionamento pelo método MeDiNa. Enquanto pelo método DNIT apenas uma configuração de estrutura foi obtida, pois a metodologia empregada para determinar a espessura da camada de revestimento não leva em consideração os tipos de materiais contidos na mistura asfáltica. Em ambas metodologias foi adotado o número de passagens anual do eixo padrão na faixa de projeto de 10 anos de (N) de 5×10^6 .

4.1 Composição das Misturas Asfálticas Avaliadas

As Tabelas 8, 9, 10 e 11 apresentam a composição das misturas asfálticas avaliadas nesse estudo.

Tabela 8: Composição dos agregados das misturas asfálticas puras e com agentes rejuvenescedores

Misturas	Brita 19,0 mm	Brita 12,5 mm	Pó de pedra	Areia	Cal	CAP 50/70	Cápsulas de alginato
Barros (2020) - Ref	19,95%	26,60%	38,00%	9,50%	0,95%	5,0000%	0,0000%
Barros (2020) - Cápsulas T1	19,95%	26,60%	38,00%	9,50%	0,95%	5,0000%	0,6000%
Barros (2020) - Cápsulas T1R	19,95%	26,60%	38,00%	9,50%	0,95%	5,0000%	0,6000%
Barros (2020) - Cápsulas T2R	19,95%	26,60%	38,00%	9,50%	0,95%	5,0000%	0,6000%
Silva (2022) - Ref	19,00%	25,34%	36,20%	9,05%	0,90%	4,7500%	0,0000%
Silva (2022) - Cápsulas C/BS0,1	19,95%	26,60%	38,00%	9,50%	0,95%	5,0000%	0,6000%
Silva (2022) - Cápsulas C/BS0,2	19,95%	26,60%	38,00%	9,50%	0,95%	5,0000%	0,6000%
Silva (2022) - Cápsulas C/AGS0,2	19,95%	26,60%	38,00%	9,50%	0,95%	5,0000%	0,6000%
Silva (2022) - Cápsulas C/AGS0,2	19,95%	26,60%	38,00%	9,50%	0,95%	5,0000%	0,6000%

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023

Tabela 9: Composição dos agregados das misturas asfálticas puras e com agentes redutores de viscosidade

Misturas	Brita 19,0 mm	Brita 12,5 mm	Pó de pedra	Areia	Cal	CAP 50/70	Óleo de Girassol	Cera de Abelha	Cera de Carnaúba	Óleo de Canola
Carvalho (2018) - Ref	19,95%	26,60%	38,00%	9,50%	0,95%	5,1000%	0,0000%	NA	NA	NA
Carvalho (2018) - 1% Óleo de Girassol	19,95%	26,60%	38,00%	9,50%	0,95%	5,0490%	0,0510%	NA	NA	NA
Carvalho (2018) - 2% Óleo de Girassol	19,95%	26,60%	38,00%	9,50%	0,95%	4,9980%	0,1020%	NA	NA	NA
Carvalho (2018) - 3% Óleo de Girassol	19,95%	26,60%	38,00%	9,50%	0,95%	4,9470%	0,1530%	NA	NA	NA
Moraes (2018) - Ref	33,22%	28,47%	33,22%	0,00%	0,00%	5,1000%	NA	NA	0,0000%	NA
Moraes (2018) - 1% Cera de Carnaúba	19,95%	26,60%	38,00%	9,50%	0,95%	5,0490%	NA	NA	0,0510%	NA
Moraes (2018) - 2% Cera de Carnaúba	19,95%	26,60%	38,00%	9,50%	0,95%	4,9980%	NA	NA	0,1020%	NA
Moraes (2018) - 3% Cera de Carnaúba	19,95%	26,60%	38,00%	9,50%	0,95%	4,9470%	NA	NA	0,1530%	NA
Guerra (2019) - Ref	18,93%	25,24%	36,06%	9,02%	0,90%	5,1000%	NA	NA	NA	0,0000%
Guerra (2019) - 1% Óleo de Canola	17,97%	23,96%	34,22%	8,56%	0,86%	5,0490%	NA	NA	NA	0,0510%
Guerra (2019) - 2% Óleo de Canola	17,05%	22,73%	32,48%	8,12%	0,81%	4,9980%	NA	NA	NA	0,1020%
Guerra (2019) - 3% Óleo de Canola	16,18%	21,57%	30,82%	7,71%	0,77%	4,9470%	NA	NA	NA	0,1530%
Sousa (2020) - Ref	23,75%	42,75%	23,75%	2,85%	1,90%	5,0000%	NA	0,0000%	NA	NA
Sousa (2020) - 1% Cera de Abelha	23,75%	42,75%	23,75%	2,85%	1,90%	4,9500%	NA	0,0500%	NA	NA
Sousa (2020) - 3% Cera de Abelha	23,75%	42,75%	23,75%	2,85%	1,90%	4,8500%	NA	0,1500%	NA	NA
Sousa (2020) - 5% Cera de Abelha	23,75%	42,75%	23,75%	2,85%	1,90%	4,7500%	NA	0,2500%	NA	NA

Obs.: NA = Não aplicável.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023

Tabela 10: Composição dos agregados das misturas asfálticas puras e recicladas

Misturas	Brita 19,0 mm	Brita 12,5 mm	Pó de pedra	Areia	Cal	RAP	CAP 50/70	Ácido Graxo de Soja	Óleo de Girassol	Zeólita	WARMGRIP	Óleo de Algodão
Melo Neto (2022) Ref	19,00%	25,34%	36,20%	9,05%	0,90%	0,00%	4,7500%	0,0000%	NA	NA	NA	NA
Melo Neto (2022) 40%RAP + 0%Ácido Graxo	14,48%	17,37%	24,13%	0,97%	0,97%	38,60%	3,5000%	0,0000%	NA	NA	NA	NA
Melo Neto (2022) 40%RAP + 3%Ácido Graxo	14,48%	17,37%	24,13%	0,97%	0,97%	38,60%	3,3950%	0,1050%	NA	NA	NA	NA
Melo Neto (2022) 40%RAP + 5%Ácido Graxo	14,48%	17,37%	24,13%	0,97%	0,97%	38,60%	3,3250%	0,1750%	NA	NA	NA	NA
Carvalho (2022) Ref	14,22%	33,18%	39,82%	5,69%	1,90%	0,00%	5,2000%	NA	NA	NA	NA	NA
Carvalho (2022) 30%RAP	13,48%	25,03%	2,89%	24,07%	1,93%	28,88%	3,7200%	NA	NA	NA	NA	NA
Carvalho (2022) 30%RAP + Óleo de Girassol	13,48%	25,03%	2,89%	24,07%	1,93%	28,88%	3,6456%	NA	0,0744%	NA	NA	NA

Carvalho (2022) 30%RAP + Zeólita	13,48%	25,03%	2,89%	24,07%	1,93%	28,88%	3,7088%	NA	NA	0,0112%	NA	NA
Carvalho (2022) 30%RAP + WARMGRIP	13,48%	25,03%	2,89%	24,07%	1,93%	28,88%	3,7051%	NA	NA	NA	0,0149%	NA
Carvalho (2022) 70%RAP	6,84%	15,64%	1,95%	2,93%	1,95%	68,40%	2,2800%	NA	NA	NA	NA	NA
Carvalho (2022) 70%RAP + Óleo de Girassol	6,84%	15,64%	1,95%	2,93%	1,95%	68,40%	2,2344%	NA	0,0456%	NA	NA	NA
Carvalho (2022) 70%RAP + Zeólita	6,84%	15,64%	1,95%	2,93%	1,95%	68,40%	2,2732%	NA	NA	0,0068%	NA	NA
Carvalho (2022) 70%RAP + WARMGRIP	6,84%	15,64%	1,95%	2,93%	1,95%	68,40%	2,2709%	NA	NA	NA	0,00912%	NA
Costa (2023) Ref	22,00%	41,00%	26,80%	4,00%	1,00%	0,00%	5,2000%	NA	NA	NA	NA	0,0000%
Costa (2023) 15%RAP + 4% Óleo de Algodão	24,00%	34,60%	16,00%	5,00%	1,00%	15,00%	4,2240%	NA	NA	NA	NA	0,1760%
Costa (2023) 25%RAP + 6% Óleo de Algodão	22,80%	31,80%	10,80%	5,00%	1,00%	25,00%	3,3840%	NA	NA	NA	NA	0,2160%
Costa (2023) 33%RAP + 10% Óleo de Algodão	24,00%	28,00%	7,70%	3,00%	1,00%	33,00%	2,9700%	NA	NA	NA	NA	0,3300%
Costa (2023) 15%RAP + 0,3% Zeólita	24,00%	34,60%	16,00%	5,00%	0,70%	15,00%	4,4000%	NA	NA	0,3000%	NA	NA
Costa (2023) 25%RAP + 0,3% Zeólita	22,80%	31,80%	10,80%	5,00%	0,70%	25,00%	3,6000%	NA	NA	0,3000%	NA	NA
Costa (2023) 33%RAP + 0,3% Zeólita	24,00%	28,00%	7,70%	3,00%	0,70%	33,00%	3,3000%	NA	NA	0,3000%	NA	NA
Arruda (2021) Ref	15,00%	17,00%	49,00%	11,30%	1,90%	0,00%	5,80%	NA	NA	NA	NA	NA
Arruda (2021) 10%RAP	14,2%	17,00%	42,60%	9,50%	1,90%	10,00%	4,90%	NA	NA	NA	NA	NA
Arruda (2021) 30%RAP	13,20%	13,20%	28,30%	9,40%	1,90%	30,00%	4,00%	NA	NA	NA	NA	NA
Arruda (2021) 50%RAP	11,30%	11,30%	14,10%	9,40%	9,00%	50,00%	3,10%	NA	NA	NA	NA	NA

Obs.: NA = Não aplicável.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023

Tabela 11: Composição dos agregados das misturas asfálticas do tipo *Stone Matrix Asphalt* (SMA) com fibras de bananeira

Misturas	Brita 19,0 mm	Brita 12,5 mm	Pó de pedra	Areia	Cal	CAP 50/70	Fibra 5mm	Fibra 10mm	Fibra 15mm	Fibra 20 mm
Costa (2017) - Ref	67,40%	9,30%	11,30%	0,00%	5,80%	6,20%	NA	NA	NA	NA
Costa (2017) - Fibra 5mm	67,40%	9,30%	11,30%	0,00%	5,80%	6,20%	0,30%	NA	NA	NA
Costa (2017) - Fibra 10mm	67,40%	9,30%	11,30%	0,00%	5,80%	6,20%	NA	0,30%	NA	NA
Costa (2017) - Fibra 15mm	67,40%	9,30%	11,30%	0,00%	5,80%	6,20%	NA	NA	0,30%	NA

Obs.: NA = Não aplicável.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023

Nas misturas asfálticas analisadas, é evidente que o tamanho máximo nominal dos agregados em todas elas é de 19 mm. Os agregados graúdos são de origem granítica, comumente utilizados na região do Brasil. Além disso, os constituintes fundamentais dessas misturas são notavelmente similares, sendo estas compostas por areia e pó de pedra como agregado miúdo e cal como fíler, além do ligante asfáltico CAP 50/70, que desempenha um papel significativo no desempenho da mistura.

O que justifica a comparação entre as misturas, dado que elas compartilham uma semelhança substancial tanto no esqueleto pétreo quanto no tipo de ligante asfáltico. Assim, os aditivos incorporados nelas, implicam em variações relevantes em suas propriedades físicas e mecânicas. Nas misturas asfálticas analisadas os aditivos utilizados foram rejuvenescedores encapsulados, RAP, redutores de viscosidade e fibras de bananeira em mistura tipo *Stone Matrix Asphalt* (SMA).

4.2 Dimensionamento pelo Método DNIT

A espessura mínima do revestimento betuminoso ou asfáltico obtida foi de $R = 5 \text{ cm}$, considerando a Tabela 2 do item 3.2.1 deste estudo.

Os coeficientes de equivalência estrutural foram adotados com base no material utilizado para o projeto dos pavimentos, conforme a Tabela 3 do item 3.2.1. O coeficiente estrutural do revestimento (K_R) considerado foi de 2,00 e para as camadas de base e sub-base, os coeficientes estruturais adotados foram respectivamente de 1,00 e 1,00.

Considerou-se o CBR mínimo, conforme especificado em norma para cada camada subjacente a de rolamento. Logo, para a camada de base o CBR mínimo é de 80%, sub-base o CBR mínimo é de 20% e para a camada de subleito o CBR mínimo de 2%.

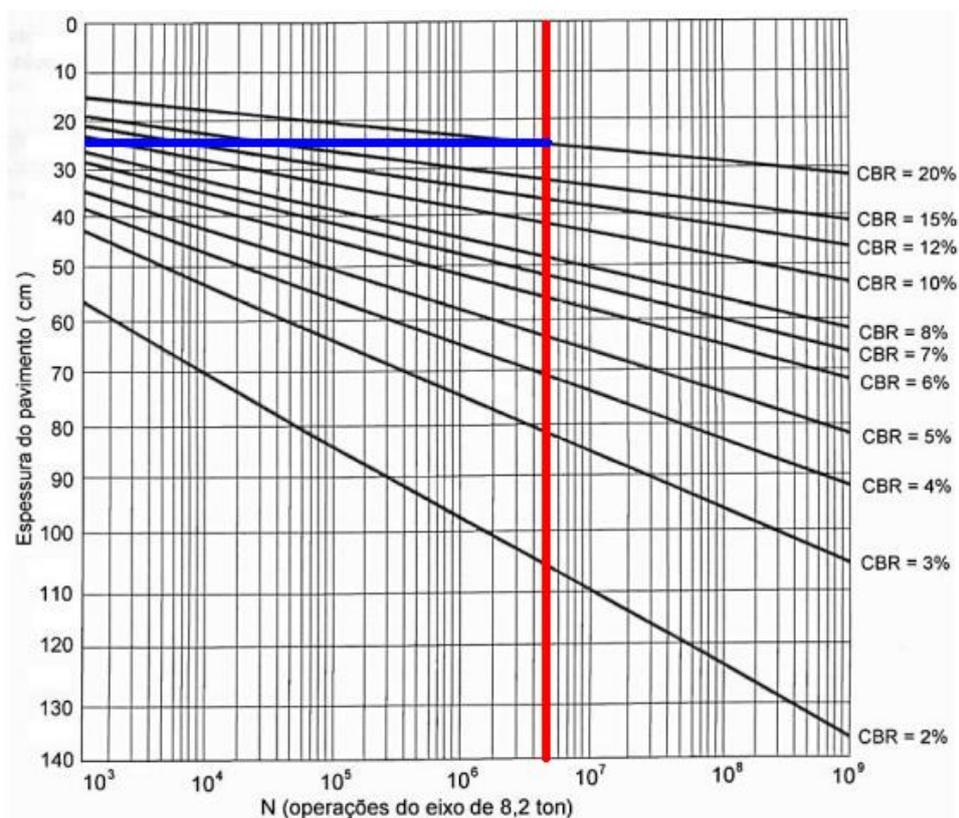
Por meio do ábaco do Figura 9 do item 3.2.1 das considerações feitas do CBR das camadas subjacentes em conjuntos com o dado no nível de tráfego, pode-se então, dimensionar as espessuras da base e sub-base.

Toma-se como CBR os valores mínimos de 20% e 2%, assim traça-se a vertical pelo valor adotado de N anteriormente, e no cruzamento com o CBR, obtêm-se o valor do H_{20} e H_n , que são respectivamente, a espessura total do pavimento necessária para proteger a sub-base e a espessura total do pavimento necessária para proteger o reforço do subleito (DNIT, 2006).

Cálculo da Espessura da Base (B)

Com $N = 5 \times 10^6$ e $CBR = 20\%$, tem-se:

Figura 13: Dimensionamento do H_{20} pelo gráfico.



Fonte: DNIT (2006)

Logo,

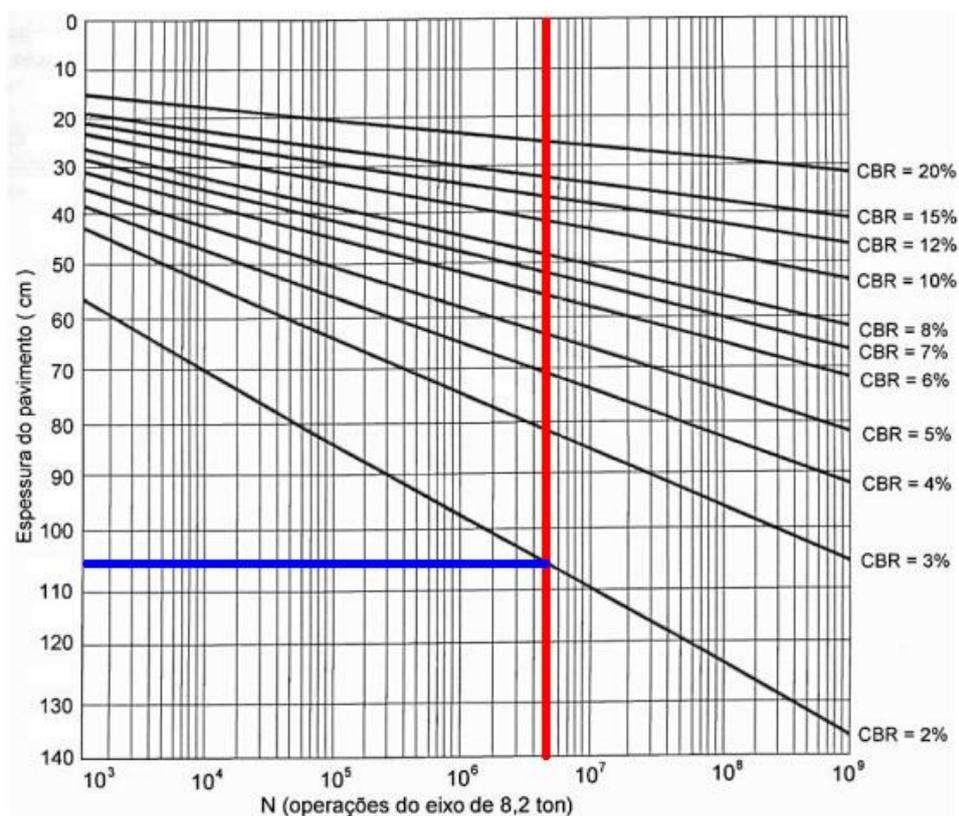
$$\begin{aligned}
 R \times K_R + B \times K_B &\geq H_{20} \\
 5,00 \times 2,00 + B \times 1,00 &\geq 25 \\
 B &\geq 15 \text{ cm}
 \end{aligned}$$

De acordo com o Manual de Pavimentos Flexíveis do DNIT (2006, p. 147), a espessura mínima para materiais granulares é 15 cm, satisfazendo essa condição. Porém, na obtenção da espessura da camada de sub-base, o valor se limitou a 20 cm que é a espessura máxima para compactação de camada granular em campo. A fim de suprir essa espessura e reforçar a estrutura do pavimento, adotou-se 20 cm para a camada de base.

Cálculo da Espessura da Sub-Base (h_{20})

Com $N = 5 \times 10^6$ e $CBR = 2\%$, tem-se:

Figura 14: Dimensionamento do H_n pelo gráfico.



Fonte: DNIT (2006)

Logo,

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

$$5,00 \times 2,00 + 20 \times 1,00 + h_{20} \times 1,00 \geq 106$$

$$h_{20} \geq 106 - 30 \text{ cm}$$

$$h_{20} \geq 76 \text{ cm}$$

$$h_{20} \geq 20 \text{ cm (espessura máxima para camada de sub - base)}$$

De acordo com o Manual de Pavimentos Flexíveis do DNIT (2006, p. 147), a espessura mínima para materiais granulares é 15 cm e a espessura máxima da camada granular para compactação em campo é de 20 cm. Portanto, devido à essa limitação, sendo adotou-se 20 cm.

4.3 Dimensionamento pelo Método MeDiNa

4.3.1 Misturas Asfálticas com Agentes Rejuvenescedores Encapsulados

A Tabela 12 apresenta os resultados do dimensionamento das misturas asfálticas com agentes rejuvenescedores encapsulados.

Tabela 12: Resultados do dimensionamento pela metodologia MeDiNa das misturas asfálticas puras e com agentes rejuvenescedores

Misturas	Espessura (cm)	Fator de Fadiga da Mistura (FFM)	Classe de Fadiga da Mistura	Porcentagem de área trincada em 10 anos (%)	Afundamento de trilha de roda em 10 anos (mm)
Barros (2020) - Ref	26,6	0,90	2	29,97	1,40
Barros (2020) - Cápsulas T1	26,2	0,89	1	29,39	1,80
Barros (2020) - Cápsulas T1R	28,0	0,00	0	28,33	1,60
Barros (2020) - Cápsulas T2R	28,6	0,21	0	28,43	1,70
Silva (2022) - Ref	32,3	0,68	0	29,66	1,20
Silva (2022) - Cápsulas C/BS0,1	26,4	0,00	0	28,09	1,60
Silva (2022) - Cápsulas C/BS0,2	25,8	0,20	0	29,62	1,60
Silva (2022) - Cápsulas C/AGS0,1	24,9	0,00	0	28,52	1,80
Silva (2022) - Cápsulas C/AGS0,2	27,0	0,00	0	29,42	1,50

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023

No estudo de Barros (2020) a mistura que apresentou a menor espessura para o pavimento foi a mistura com cápsula do Tipo 1 (T1), onde a espessura foi de 26,2 cm, entretanto, esta demonstrou uma proximidade significativa com a espessura obtida na mistura de referência. Cabe ressaltar que a mistura de referência está classificada na categoria de fadiga 2, indicando uma resistência e desempenho superiores à fadiga. No entanto, ao serem comparadas em termos da porcentagem de área trincada ao longo de 10 anos, a mistura contendo as cápsulas T1 exibiu um desempenho ligeiramente superior, com um percentual um pouco menor de área trincada.

No estudo de Silva (2022) a mistura que apresentou a menor espessura para o pavimento foi a mistura com cápsulas C/AGS0,1, onde a espessura foi de 24,9 cm, no entanto, é pertinente observar que seu fator de fadiga foi zero, indicando um desempenho inferior quando comparado à mistura contendo cápsulas C/BS0,2, que apresentou um fator de fadiga mais elevado, sendo o segundo tipo de mistura com menor espessura. Ambas as misturas são categorizadas como pertencentes à classe zero de fadiga; contudo, a mistura C/AGS0,1 exibe uma melhoria na porcentagem de área trincada ao longo de 10 anos, indicando essa mistura como a mais viável dentre as testadas.

Ao analisar ambos os estudos que empregam agentes rejuvenescedores encapsulados, é possível observar que as misturas que apresentaram menor dimensões na espessura do pavimento foram aquelas contendo cápsulas do Tipo 1 (T1), C/AGS0,1 e C/AGS0,2. Importante notar que, mesmo considerando que as classes de fadiga nas misturas de Silva (2022) são zero, a avaliação por meio da porcentagem de área trincada ao longo de 10 anos indica que a mistura com cápsula C/AGS0,1 exibe uma das menores espessuras entre as analisadas, bem como uma das taxas mais baixas de trincamento durante 10 anos.

4.3.2 Misturas Asfálticas com Redutores de Viscosidade do Ligante Asfáltico

A Tabela 13 apresenta os resultados do dimensionamento das misturas asfálticas com agentes redutores de viscosidade do ligante asfáltico.

Tabela 13: Resultados do dimensionamento pela metodologia MeDiNa das misturas asfálticas puras e com agentes redutores de viscosidade

Misturas	Espessura (cm)	Fator de Fadiga da Mistura (FFM)	Classe de Fadiga da Mistura	Porcentagem de área trincada em 10 anos (%)	Afundamento de trilha de roda em 10 anos (mm)
Carvalho (2018) - Ref	25,1	0,04	0	28,22	1,80
Carvalho (2018) - 1% Óleo de Girassol	26,6	0,67	0	29,94	1,70
Carvalho (2018) - 2% Óleo de Girassol	34,4	0,43	0	29,96	1,20
Carvalho (2018) - 3% Óleo de Girassol	35,8	0,92	0	29,63	1,40
Moraes (2018) - Ref	36,8	0,00	0	29,24	1,00
Moraes (2018) - 1% Cera de Carnaúba	29,7	0,56	0	29,27	1,40
Moraes (2018) - 2% Cera de Carnaúba	22,9	1,17	3	29,73	2,30
Moraes (2018) - 3% Cera de Carnaúba	27,9	0,36	0	29,96	1,50
Guerra (2019) - Ref	25,6	0,00	0	28,96	1,80
Guerra (2019) - 1% Óleo de Canola	32,9	0,30	0	29,17	1,60
Guerra (2019) - 2% Óleo de Canola	33,9	0,35	0	29,30	1,50
Guerra (2019) - 3% Óleo de Canola	38,9	0,36	0	29,88	1,20
Sousa (2020) - Ref	26,5	0,00	0	29,82	1,50
Sousa (2020) - 1% Cera de Abelha	7,3	1,43	4	29,98	6,90
Sousa (2020) - 3% Cera de Abelha	27,9	0,00	0	29,77	1,40
Sousa (2020) - 5% Cera de Abelha	24,0	0,63	0	28,94	1,90

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023

No estudo de Carvalho (2018) a mistura que apresentou a menor espessura para o pavimento foi a mistura de referência, onde a espessura foi de 25,1 cm. É evidente que o incremento de óleo de girassol na mistura asfáltica não exibiu resultados satisfatórios,

conforme evidenciado pela classificação zero na categoria de fadiga e no aumento da espessura da camada do pavimento. No entanto, é notório neste estudo que o fator de fadiga da mistura contendo 3% de óleo de girassol é significativamente superior ao da mistura de referência e das demais misturas. Em contrapartida, em termos de porcentagem de área trincada ao longo de 10 anos, a mistura de referência se destaca em comparação com as outras três analisadas. Portanto, pode-se afirmar que devido à espessura da camada de revestimento da mistura de referência ser a mais reduzida dentre todas, ela demonstra um desempenho superior.

No estudo de Moraes (2018) a mistura que apresentou a menor espessura para o pavimento foi a mistura com 2% de cera de carnaúba, onde a espessura foi de 22,9 cm. Observa-se que esta mistura se destacou tanto no fator de fadiga quanto na classificação de fadiga, respectivamente com resultados de 1,17 e pertencendo à classe 3, indicando um desempenho satisfatório em relação à fadiga. Analisando os resultados da porcentagem de área trincada ao longo de 10 anos, pode-se afirmar que são notavelmente semelhantes, não apresentando variações significativas quanto à classificação do trincamento.

No estudo de Guerra (2019) a mistura que apresentou a menor espessura para o pavimento foi a mistura de referência, onde a espessura foi de 25,6 cm. A incorporação de diferentes proporções de óleo de canola nas misturas asfálticas revelou-se insatisfatória, conforme evidenciado pela classificação zero na categoria de fadiga e pelo aumento da espessura da camada do pavimento. Entretanto, é perceptível neste estudo que o fator de fadiga da mistura cresce proporcionalmente à adição do agente redutor de viscosidade, nesse sentido, a mistura contendo 3% de óleo de canola destaca-se significativamente em relação à mistura de referência e às demais, em contrapartida, em termos de porcentagem de área trincada ao longo de 10 anos, a mistura de referência se sobressai ligeiramente, demonstrando um desempenho superior ao trincamento em comparação com as outras três. Conseqüentemente, pode-se afirmar que, principalmente devido à espessura da camada do pavimento ser a mais reduzida entre todas, a mistura de referência apresenta um desempenho superior.

No estudo de Sousa (2020) a mistura que apresentou a menor espessura para o pavimento foi a mistura com 1% de cera de abelha, onde a espessura foi de 7,3 cm. Pode se observar que esta mistura evidenciou um destaque tanto no fator de fadiga quanto na sua classificação, apresentando um resultado de 1,43 e pertencendo à categoria mais favorável

quanto à classe de fadiga, isso implica um desempenho satisfatório em relação à fadiga. Ao analisar os resultados da porcentagem de área trincada ao longo de 10 anos, constata-se que são notavelmente semelhantes os resultados, não apresentando variações significativas quanto à classificação do trincamento.

Ao analisar todos os estudos que empregam agentes redutores de viscosidade, é possível constatar que as misturas que apresentaram menor espessura no pavimento foram as misturas de referência para os estudos de Carvalho (2018) e Guerra (2019), além das misturas contendo 2% de cera de carnaúba e 1% de cera de abelha nos estudos de Moraes (2018) e Sousa (2020). Com base na classificação de fadiga das misturas, pode-se concluir que a adição de óleos em misturas asfálticas não resulta em um desempenho satisfatório para o pavimento. Por outro lado, as misturas com ceras, especificamente 2% de cera de carnaúba e 1% de cera de abelha, foram classificadas nas categorias 3 e 4 de fadiga, indicando um desempenho e resistência à fadiga.

No que diz respeito à porcentagem de área trincada ao longo de 10 anos, todas as misturas apresentaram valores dentro de uma faixa entre 28,22% e 29,98%. Isso sugere uma semelhança nos resultados, sem variações significativas quanto à classificação do trincamento. Entre todas as misturas avaliadas, pode-se afirmar que o estudo com 1% de cera de abelha exibe o melhor desempenho. No entanto, é importante destacar que o afundamento de trilha de roda em 10 anos foi o mais pronunciado entre todas as misturas analisadas. Esse aspecto, no entanto, é compensado pelo bom desempenho em termos de fadiga e pela considerável redução na espessura do pavimento.

4.3.3 Misturas Asfálticas Recicladas

A Tabela 14 apresenta os resultados do dimensionamento das misturas asfálticas com recicladas.

Tabela 14: Resultados do dimensionamento pela metodologia MeDiNa das misturas asfálticas puras e recicladas

Misturas	Espessura (cm)	Fator de Fadiga da Mistura (FFM)	Classe de Fadiga da Mistura	Porcentagem de área trincada em 10 anos (%)	Afundamento de trilha de roda em 10 anos (mm)
Melo Neto (2022) - Ref	44,9	1,09	3	29,92	0,70
Melo Neto (2022) - 40%RAP + 0%Ácido Graxo	17,0	1,27	4	29,89	3,00
Melo Neto (2022) - 40%RAP + 3%Ácido Graxo	16,8	1,20	4	29,97	3,10
Melo Neto (2022) - 40%RAP + 5%Ácido Graxo	12,9	1,32	4	29,42	4,20

Carvalho (2022) - Ref	19,6	1,17	4	29,54	2,50
Carvalho (2022) - 30%RAP	15,5	1,07	4	29,97	2,90
Carvalho (2022) - 30%RAP + Óleo de Girassol	15,1	1,28	4	29,81	3,60
Carvalho (2022) - 30%RAP + Zeólita	26,6	0,81	1	29,21	1,90
Carvalho (2022) - 30%RAP + WARMGRIP	17,5	1,03	4	29,20	2,40
Carvalho (2022) - 70%RAP	15,6	1,15	4	29,57	2,10
Carvalho (2022) - 70%RAP + Óleo de Girassol	16,4	1,26	4	29,87	3,20
Carvalho (2022) - 70%RAP + Zeólita	14,7	1,25	4	29,92	3,10
Carvalho (2022) - 70%RAP + WARMGRIP	5,0	1,48	4	15,69	7,00
Costa (2023) - Ref	31,1	0,11	0	28,83	1,10
Costa (2023) - 15%RAP + 4%Óleo de Algodão	36,7	0,00	0	28,97	0,90
Costa (2023) - 25%RAP + 6%Óleo de Algodão	38,3	0,00	0	29,52	0,80
Costa (2023) - 33%RAP + 10%Óleo de Algodão	29,2	0,32	0	29,75	1,10
Costa (2023) - 15%RAP + 0,3%Zeólita	20,5	0,73	1	29,87	1,90
Costa (2023) - 25%RAP + 0,3%Zeólita	23,8	0,41	0	29,09	1,10
Costa (2023) - 33%RAP + 0,3%Zeólita	29,1	0,00	0	29,95	0,80
Arruda (2021) - Ref	13,5	1,25	4	28,99	3,90
Arruda (2021) - 10%RAP	19,7	1,21	4	29,91	2,30
Arruda (2021) - 30%RAP	15,6	1,24	4	29,96	2,70
Arruda (2021) - 50%RAP	14,9	1,22	4	29,91	2,70

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023

No estudo de Melo Neto (2022) a mistura que apresentou a menor espessura para o pavimento foi a mistura com 40%RAP + 5%Ácido Graxo, onde a espessura foi de 12,9 cm. Observa-se que a adição de RAP já induz a uma redução significativa na espessura do pavimento em comparação com a mistura de referência contendo 40% RAP + 0% Ácido Graxo. A incorporação do ácido graxo na mistura asfáltica resulta não apenas em uma diminuição na espessura do pavimento, mas também em um aumento no fator de fadiga e na classificação de fadiga. Notavelmente, a mistura, que já possuía uma classificação favorável antes da adição do ácido graxo, atinge o nível mais elevado de classificação após a incorporação desse componente.

Quanto ao trincamento ao longo da vida útil do pavimento, observa-se que a adição de RAP e ácido graxo não exerce uma influência significativa, uma vez que os valores se assemelham. Portanto, é possível afirmar que a mistura com 40% RAP + 5% Ácido Graxo demonstra o melhor desempenho e resistência à fadiga.

No estudo de Carvalho (2022) a mistura que apresentou a menor espessura para o pavimento foi a mistura com 70%RAP + WARMGRIP, onde a espessura foi de 5,0 cm. Conforme evidenciado no estudo conduzido por Melo Neto (2022), a inclusão de RAP

resulta em uma redução na espessura do pavimento. No estudo de Carvalho (2022), além das misturas de referência e com 30% e 70% de RAP, foram incorporados separadamente óleo de girassol, zeólita e WARMGRIP. Verificou-se que as misturas contendo RAP + óleo de girassol apresentaram um aumento no fator de fadiga em comparação com as misturas que continham apenas 30% e 70% de RAP. A incorporação de zeólita na mistura resultou em classificações de fadiga de classe 1 e 4 para as misturas com 30% de RAP e 70% de RAP, respectivamente. Ao comparar as classificações de fadiga, observa-se que apenas a mistura de 30% de RAP + Zeólita não apresentou um desempenho satisfatório, provavelmente devido à maior espessura do pavimento em relação às demais misturas.

A incorporação de WARMGRIP nas misturas com 70% e 30% de RAP resulta na redução da camada de pavimento, quando comparadas com as demais misturas. A mistura com 70% de RAP, incorporada com WARMGRIP, evidenciou uma diminuição significativa na porcentagem de área trincada em 10 anos quando comparada à mistura com 30% de RAP incorporada com WARMGRIP, isso sugere uma subutilização da vida útil do pavimento.

Logo, é pertinente afirmar que a mistura que apresenta melhores desempenhos e resistência é a com 70% de RAP + Zeólita, apresentando espessura de 14,7 cm, fator de fadiga 1,25, classe de fadiga 4 e 29,92% de área trincada para 10 anos.

No estudo de Costa (2023) a mistura que apresentou a menor espessura para o pavimento foi a mistura com 15%RAP + 0,3%Zeólita, onde a espessura foi de 20,5 cm. É evidente que a incorporação de RAP em misturas asfálticas resulta na redução da espessura do pavimento. Costa (2023) analisa a adição de 4%, 6%, e 10% de óleo de algodão e 0,3% de zeólita às misturas contendo 15%, 25%, e 33% de RAP, respectivamente. O estudo revelou que as misturas de RAP com óleo de algodão apresentaram dimensões superiores na espessura do pavimento em comparação com aquelas contendo zeólita. Isso corrobora com as conclusões anteriores de Carvalho (2018) e Guerra (2019), indicando que a adição de óleo em misturas asfálticas não resulta em um desempenho satisfatório, estas conclusões são confirmadas pelos baixos valores do fator de fadiga para as misturas com óleo de algodão, bem como pela classificação de fadiga 0 para todas essas misturas. Por outro lado, a inclusão de zeólita no RAP apresenta um desempenho superior em termos de espessura, embora o desempenho em relação ao fator de fadiga seja semelhante. A mistura contendo 15% de RAP + 0,3% de zeólita foi a única que não obteve uma classificação de fadiga 0; no entanto, seu desempenho em relação à fadiga não é ótimo, pois sua classificação é 1. No que se refere à

porcentagem de área trincada ao longo de 10 anos, todas as misturas apresentaram valores semelhantes. Portanto, é possível classificar a mistura com 15% de RAP + 0,3% de zeólita como a com o melhor desempenho e resistência.

No estudo de Arruda (2017), a mistura que apresentou a menor espessura para o pavimento foi a mistura de referência, onde a espessura foi de 13,5 cm. O estudo se concentra exclusivamente na adição de RAP em diferentes proporções em misturas asfálticas, sendo incorporados 10%, 30%, e 50% do mesmo. Observou-se que, à medida que o teor de RAP aumentou, a espessura da camada diminuiu. No entanto, é importante notar que a mistura de referência, ou seja, a mistura sem RAP, apresentou uma espessura inferior em comparação com as demais apresentadas.

A classe de fadiga para todas as misturas foi avaliada como 4, o que corrobora com conclusões anteriores acerca do RAP em misturas asfálticas. Os resultados do fator de fadiga e da porcentagem de área trincada ao longo de 10 anos mostram-se semelhantes para todas as misturas. Portanto, apesar do bom desempenho e resistência demonstrados pelo RAP, é notório afirmar que, nesse cenário, a mistura de referência emerge como a melhor opção.

Ao analisar todos os estudos com as misturas asfálticas recicladas, é possível constatar que a mistura que apresentou menor espessura no pavimento foi a com 70%RAP + WARMGRIP de Carvalho (2022).

A avaliação das classes de fadiga nas diversas misturas sugere que a inclusão de RAP nas misturas resultou em um desempenho satisfatório em relação à fadiga. Esta conclusão é respaldada pelo fato de que a grande maioria das misturas recebeu a classificação de fadiga 4. Entretanto, aquelas que não obtiveram essa classificação eram misturas asfálticas que incorporavam RAP juntamente com um óleo e/ou a zeólita mineral, indicando assim, que a adição de óleo de girassol não atuou de forma positivo.

No que diz respeito à porcentagem de área trincada ao longo de 10 anos, todas as misturas apresentaram valores dentro da faixa de 28,83% a 29,96%, exceto a mistura com 70%RAP + WARMGRIP, que registrou 15,69% de área trincada em 10 anos, indicando que não haverá uma utilização plena da vida útil do pavimento.

Entre todas as misturas avaliadas, pode-se afirmar que a mistura que se destaca com melhor desempenho e resistência nas condições de espessura e fadiga é aquela com 40%RAP + 5%Ácido Graxo do estudo de Melo Neto (2022). Esta mistura atende aos requisitos necessários para um bom desempenho, apresentando uma classe de fadiga igual a

4 e uma porcentagem de área trincada em 10 anos próxima a 30%. Em comparação com as demais misturas, suas características de espessura e fator de fadiga se sobressaem.

4.3.4 Misturas Asfálticas do tipo Stone Matrix Asphalt (SMA) com Fibras de Bananeira

A Tabela 15 apresenta os resultados do dimensionamento das misturas asfálticas do tipo SMA.

Tabela 15: Resultados do dimensionamento pela metodologia MeDiNa das misturas asfálticas puras e do tipo SMA

Misturas	Espessura (cm)	Fator de Fadiga da Mistura (FFM)	Classe de Fadiga da Mistura	Porcentagem de área trincada em 10 anos (%)	Afundamento de trilha de roda em 10 anos (mm)
Costa (2017) - Ref	15,0	0,51	1	28,59	2,4
Costa (2017) - Fibra 5mm	13,9	0,74	2	29,14	2,9
Costa (2017) - Fibra 10mm	13,0	0,90	3	28,67	3,2
Costa (2017) - Fibra 15mm	9,5	1,28	4	28,43	4,6
Costa (2017) - Fibra 20mm	11,5	1,08	4	28,58	3,8

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023

No estudo de Costa (2017), a mistura que registrou a menor espessura para o pavimento foi aquela incorporando fibras de 15 mm, onde a espessura foi de 9,5 cm. As misturas do tipo SMA demonstraram uma redução na espessura do pavimento em comparação com a mistura de referência. Ao examinar os resultados do fator de fadiga, observa-se um aumento gradual a partir da adição de fibras de diferentes comprimentos às misturas. As misturas contendo fibras de 15 mm e 20 mm obtiveram uma classificação de fadiga mais favorável, sendo ambas classificadas como classe 4. Quanto à porcentagem de área trincada ao longo de 10 anos, as misturas apresentaram valores na faixa de 28,67% a 29,17%, com diferenças inferiores a 1%. Portanto, ao avaliar a espessura, desempenho e resistência à fadiga, conclui-se que a mistura com fibras de 15 mm é a que apresenta os melhores parâmetros.

Portanto, após a análise do dimensionamento pelo MeDiNa de todas as misturas asfálticas acima, conclui-se que as misturas asfálticas recicladas foram as que obtiveram melhor classe de fadiga, em que na grande maioria das misturas estão classificadas com classe 3 e 4, seguidas das misturas tipo SMA. As demais misturas apresentaram classe de fadiga entre 0 e 1. Logo, foi observado que adicionar óleo na mistura asfáltica não proporcionou resultados satisfatórios quanto a fadiga, isto é provado a partir da análise dos

estudos de misturas asfálticas com redutores de viscosidade e agentes rejuvenescedores encapsulados, pois a classe de fadiga da grande maioria destes tendem a zero e consequentemente a espessura da camada do pavimento se apresenta com dimensões superiores quando comparadas com misturas asfálticas que apresentam classes 3 e 4.

As misturas asfálticas com a adição de RAP, em sua grande maioria, apresentam classes de fadiga 3 e 4, exceto as misturas incorporadas com óleo de algodão, ou seja, reafirmando mais uma vez, o quanto a adição de óleos não beneficiam o pavimento asfáltico em parâmetros de espessura e fadiga.

Logo, é correto afirmar que as misturas do tipo SMA apresentam um melhor desempenho a fadiga, pois dentre todas analisadas as espessuras de menor dimensões foram as misturas asfálticas do tipo *Stone Matrix Asphalt* (SMA) com fibras de bananeira e com classe de fadiga acima de 2 a 4, ou seja, estas misturas se apresentaram melhores comparadas com os outros tipos de misturas refletindo em camadas mais delgadas e podendo reduzir os custos de construção de pavimentos.

4.4 Comparação entre os Métodos de Dimensionamento na Camada de Rolamento

As dimensões das espessuras obtidas no dimensionamento pelo do método do DNIT resultam da propensão do método de dimensionar as camadas de base em função do critério de ruptura. Biedacha (2020) mostra que esse critério se fundamenta como proteção da camada do subleito e contra as deformações plásticas, ou seja, contra a ruptura por cisalhamento.

Ao analisar o método MeDiNa, pode-se observar de forma clara que a metodologia leva em consideração tanto o critério de deformação permanente quanto o de trincamento por fadiga.

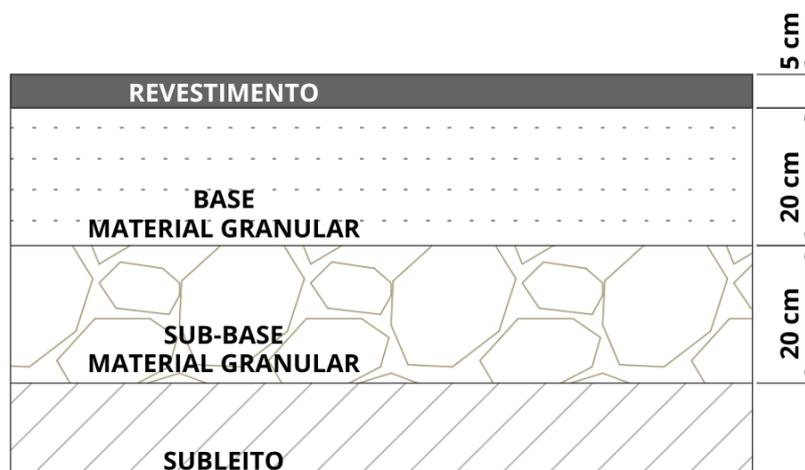
O dimensionamento da mistura asfáltica pelo método DNIT apresentou para camada de rolamento uma espessura consideravelmente baixa, o que implica dizer que a metodologia do DNIT subdimensiona o pavimento, logo isso é confirmado devido a espessura substancialmente delgada apresentada.

Os dimensionamentos das misturas asfálticas pela metodologia MeDiNa demonstra que o aumento gradual da espessura da camada de rolamento, resulta em um menor afundamento de trilha de roda e menor porcentagem de área trincada prevista, logo, este

dimensionamento mostra que as camadas de rolamento precisam ser mais robustas para enfrentar as deformações permanentes, o trincamento por fadiga e conseqüentemente ter uma durabilidade maior. Entretanto, a composição de custo de produção das misturas asfálticas conseqüentemente irá aumentar, devido também ao aumento ou uso de materiais alternativos, mão de obra e transporte.

As Figuras 15 e 16 representam as espessuras das camadas de revestimento, base e sub-base, de acordo com os dimensionamentos do DNIT e MeDiNa.

Figura 15: Espessuras das camadas do pavimento pela metodologia do DNIT



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Figura 16: Espessuras das camadas do pavimento pela metodologia do MeDiNa



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

O intervalo referente a espessura da camada de revestimento da Figura 16 representa todos os valores que englobam os dimensionamentos das misturas asfálticas analisadas neste trabalho. Observa-se que o uso de materiais alternativos afeta substancialmente o desempenho das misturas asfálticas e, conseqüentemente, as espessuras obtidas no processo de dimensionamento devido ao desempenho estrutural. Portanto, avaliar criteriosamente a influência dos aditivos no desempenho mecânico das misturas asfáltica é imprescindível para se obter um pavimento duradouro e um dimensionamento fidedigno.

Guabiroba *et al.* (2023) avaliaram o comportamento mecânico da vida de fadiga e da deformação permanente de misturas asfálticas produzidas em Goiás. As misturas estudadas pelos autores foram analisadas e dimensionadas pelo método de dimensionamento nacional (MeDiNa), este método foi utilizado para o dimensionamento da espessura da camada de revestimento asfáltico, classificação e desempenho das misturas quanto à fadiga e resistência.

No tópico 4.3 deste estudo, realizou-se o dimensionamento da camada de revestimento asfáltico pelo MeDiNa, de forma similar ao estudo de Guabiroba *et al.* (2023).

Guabiroba *et al.* (2023) apresentou misturas asfálticas denominadas como Ganisse Bailey (GB) e Micaxisto Bailey (MB). A Tabela 16 mostra os resultados referente a espessura da camada de rolamento, porcentagem de área trincada e afundamento da trilha em 10 anos das misturas GB e MB do estudo de Guabiroba *et al.* (2023).

Tabela 16 - Resultados do dimensionamento pela metodologia MeDiNa das misturas do estudo de Guabiroba *et al.* (2023)

Mistura Asfáltica	Espessuras Dimensionadas (cm)			Classe de Fadiga	AT (%)	ATR (mm)
	Binder	Camada de rolamento	Total			
Ganisse Bailey (GB)	15,0	5,0	20,0	4	29,2	6,1
Micaxisto Bailey (MB)	15,0	5,4	20,4	4	29,2	6,2

Fonte: Adaptado de Guabiroba *et al.* (2023)

Para os tipos de mistura consideradas pelos autores, o MeDiNa apresentou os valores de 29,2% de área trincada em 10 anos e 6,1 e 6,2, de afundamento de trilha de roda em 10 anos e classe 4 de fadiga, respectivamente. Quando comparados estes valores com os resultados encontrados no estudo em questão, pode-se notar que as espessuras das camadas de rolamento foram semelhantes a maioria das misturas analisadas em estudo. Pois, os autores consideraram duas camadas de revestimento asfáltico, binder e camada de rolamento, que ao ser somadas totalizaram cerca de 20 cm de espessura.

As espessuras apenas da camada de rolamento das misturas GB e MB se assemelham com o da mistura de Carvalho (2022) com 70%RAP + WARMGRIP, onde a espessura de rolamento da GB é igual a com 70%RAP + WARMGRIP e MB difere 0,4 cm, em que a classe de fadiga foram exatamente iguais para ambas as misturas. Entretanto, a porcentagem de área trincada em 10 anos das misturas do estudo de Carvalho (2022) com 70%RAP + WARMGRIP teve um desempenho melhor, isto significa que diferente ligeiramente da mistura de Guabiroba *et al.* (2023). A mistura GB tende a ter uma utilização plena da vida útil do pavimento, pois sua porcentagem de área trincada em 10 anos se aproxima do valor esperado de 30%.

Logo, é correto afirmar, que para as condições analisadas, as misturas de Guabiroba *et al.* (2023) apresentam melhor desempenho quanto à fadiga e afundamento da trilha de roda em 10 anos.

Ao comparar as misturas do tipo *Stone Matrix Asphalt* (SMA) com fibras de bananeira, que demonstraram o melhor desempenho à fadiga no estudo em questão, com as misturas do estudo conduzido por Guabiroba *et al.* (2023), é apropriado afirmar que, apesar do desempenho satisfatório, as misturas GB e MB se destacam ao apresentar resultados superiores em termos de espessura, classe de fadiga e porcentagem de área trincada, no entanto. No que diz respeito ao afundamento da trilha de roda em 10 anos, os resultados não superam os obtidos neste estudo, ressaltando o comportamento mais favorável das misturas do tipo *Stone Matrix Asphalt* (SMA). Essa discrepância pode ser explicada pela espessura das camadas, que é superior nas misturas GB e MB. Em outras palavras, os resultados de afundamento da trilha de roda são inversamente proporcionais à espessura das camadas de rolamento.

Ao analisar as simulações de dimensionamento pelo método MeDiNa, pode-se observar que o aumento progressivo na espessura da camada de rolamento resulta em uma redução nos critérios de deformação permanente e no de trincamento por fadiga, fazendo com que o pavimento asfáltico tenha um melhor desempenho e vida útil, havendo, de fato, uma melhoria após a implementação dessa nova metodologia de dimensionamento em misturas asfálticas. Entretanto, é indicando a necessidade de aprimoramentos contínuos nessa nova forma de dimensionar estruturas de pavimentos.

A necessidade de reajustes e especificidades nos novos métodos de dimensionamento se justifica ao baixo estado de serventia e funcionalidade dos pavimentos asfálticos

brasileiros conforme apresentado no tópico 4.2, segundo a Confederação Nacional do Transporte (2022). Isso auxiliará num dimensionamento mais representativo e poderá prorrogar o surgimento de defeitos no pavimento e a vida útil da rodovia.

Quanto à análise da deformação permanente, realizada por meio do ensaio de *Flow Number* (FN), pode-se apontar que as misturas asfálticas de Carvalho (2018) com 3% de óleo de girassol, Moraes (2018) com 2% e 3% de cera de carnaúba, Guerra (2019) com 1%, 2%, 3% de óleo de canola, Sousa (2020) com 5% de cera de abelha, Arruda (2021) com 0% de RAP, e Carvalho (2022) com 0% de RAP não satisfizeram a condição estabelecida pelo MeDiNa em que o valor de FN para o nível de tráfego (N) em condições normais de 10^6 a 10^7 deve ser maior ou igual a 100 e menor que 300 ciclos. Todas as misturas supracitadas apresentaram valores inferiores a 100 ciclos, podendo inferir um baixo desempenho frente às deformações plásticas. Dessa forma, essas misturas tornam-se inviáveis para aplicação em campo ao considerar o nível de tráfego proposto nesse estudo. As demais misturas avaliadas apresentaram valores de FN superiores a 100 ciclos, satisfazendo a condição imposta pelo método MeDiNa.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES

Neste tópico serão apresentadas as conclusões obtidas por meio dessa pesquisa, bem como sugestões para pesquisas futuras envolvendo o mesmo objeto de estudo.

5.1 Considerações Finais

O objetivo geral deste estudo foi avaliar a influência dos aditivos constituintes em misturas asfálticas no dimensionamento da camada de rolamento pela metodologia empírica do Departamento Nacional de Infraestrutura Terrestre (DNIT) e mecanístico-empírico do Método de Dimensionamento Nacional (MeDiNa). Conclui-se que, tal como qualquer ramo no âmbito da engenharia civil, a realização de uma verificação analítica de diversas variáveis torna o projeto consideravelmente mais previsível e confiável. Esta é a premissa do método MeDiNa, um software computacional projetado para conduzir a verificação e o dimensionamento mecanístico-empírico de estruturas de pavimentos asfálticos.

Os resultados dos dimensionamentos realizados pelas metodologias do DNIT e MeDiNa nas misturas asfálticas investigadas revelaram diferenças consideráveis na espessura da camada de rolamento. Entre as diversas misturas avaliadas, as composições do tipo Stone Matrix Asphalt (SMA) demonstraram um desempenho notável em relação à espessura da camada de rolamento, fator de fadiga e classe de fadiga. Esses resultados destacados conferiram a essas misturas uma performance superior quando comparadas às demais analisadas. Além disso, observou-se que tais misturas apresentaram camadas mais delgadas, implicando, portanto, em uma possível redução nos custos de construção do pavimento.

Os resultados obtidos para as misturas asfálticas contendo redutores de viscosidade do ligante asfáltico revelaram espessuras variando entre 38,9 cm e 7,3 cm. A mistura asfáltica de Sousa (2020) com 1% de Cera de Abelha demonstrou um desempenho satisfatório em relação à classe de fadiga, espessura da camada e fator de fadiga, destacando-se em comparação com as outras misturas que continham redutores de viscosidade. Por outro lado, as demais misturas não apresentaram um bom desempenho em relação à fadiga, possivelmente devido à sua natureza oleosa. Conseqüentemente, as misturas asfálticas com adição de óleo de canola e de girassol mostraram as menores classes de fadiga e maiores espessuras, quando comparadas às misturas com adição de cera de abelha e carnaúba.

As misturas asfálticas com agentes rejuvenescedores encapsulados apresentaram espessuras consideravelmente altas quando comparadas com as misturas do tipo *Stone Matrix Asphalt* (SMA), em que as menores espessuras dentre todas analisadas são as de Barros (2020) com Cápsulas T1 e Silva (2022) com Cápsulas C/AGS0,1. A incorporação dos agentes

rejuvenescedores encapsulados não acarretou aumento significativo no desempenho à fadiga da mistura asfáltica.

As misturas asfálticas recicladas apresentaram um desempenho semelhante quanto à classe de fadiga das misturas do tipo SMA. Todos os estudos de misturas asfálticas com RAP, exceto Costa (2023), mostraram que adição de RAP na mistura resulta em um aumento da classe de fadiga. No entanto, o estudo de Costa (2023) com misturas recicladas não corroborou esse efeito. Essa disparidade pode ser atribuída à incorporação de óleo de algodão na mistura, pois à medida que esses agentes foram introduzidos, observou-se um aumento na espessura da camada para as composições com 15%RAP + 4%Óleo de Algodão e 25%RAP + 6%Óleo de Algodão. Concomitantemente, houve uma diminuição no fator de fadiga, um aumento na porcentagem de área trincada e uma classificação de fadiga de 0. Portanto, conclui-se que a adição de óleo de algodão não contribui para um bom desempenho à fadiga da mistura.

De maneira geral, ao comparar os dimensionamentos realizados pelo método DNIT com o método MeDiNa, constata-se que os resultados relativos à espessura da camada de rolamento divergiram. A metodologia do DNIT proporcionou uma espessura da camada de rolamento consideravelmente delgada, enquanto a metodologia do MeDiNa resultou em espessuras mais substanciais, influenciadas pelos critérios de deformação permanente e trincamento por fadiga incorporados no processo de dimensionamento. Este estudo, portanto, contribuiu para a exposição das distintas espessuras da camada de rolamento em misturas asfálticas com diversos aditivos. Adicionalmente, as análises de desempenho em relação à fadiga e à porcentagem de área trincada ao longo de 10 anos confirmaram a viabilidade do uso de misturas asfálticas do tipo SMA e com RAP, destacando-se a eficácia da mistura asfáltica com fibra de 15mm e com 70%RAP + WARMGRIP.

5.2 Sugestões para Pesquisas Futuras

Com a finalidade de aprofundar os resultados encontrados nessa pesquisa, propõe-se para trabalhos futuros:

- Realizar a composição de custo de produção para cada mistura asfáltica avaliada;
- Avaliar os impactos ambientais gerados pela adição dos aditivos nas misturas asfálticas e compará-los com os impactos de uma mistura tradicional.

REFERÊNCIAS

AL-MANSOORI, T.; NORAMBUENA-CONTRERAS, J.; GARCÍA, Á. Effect of capsule addition and heal-ing temperature on the self-healing potential of asphalt mixtures. **Materials and Structures**, 51(53), 2018.

AL-MANSOORI, T.; NORAMBUENA-CONTRERAS, J.; MICAELLO, R.; GARCÍA, Á. Self-healing of asphalt mastic by the action of polymeric capsules containing rejuvenators. **Construction and Building Materials**, v. 161, p. 330–339, 2018.

ANDRADE, V.D.; BARRA, B.S.; BERNUCCI, L.; MOMM, L.; et al Impacto da formulação de composições granulométricas nas propriedades mecânicas e funcionais de misturas asfálticas densas. *Matéria* (Rio de Janeiro), [S.L.], v. 25, n. 4, 2020.

ARRUDA, Sonaly Mendes. **Avaliação do comportamento mecânico e autorregenerativo de misturas asfálticas recicladas**. 2021. 119 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2021.

BANDEIRA, Geovana de Sousa; SIGUIM, Wilquer Domingos. **Influência da incorporação da borracha de pneus reciclados no desempenho mecânico dos pavimentos**. 2021. 110 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Faculdade de Inhumas, Inhumas, 2021.

BARDINI, Vivian Silveira dos Santos. **Influência do fíler mineral nas propriedades mecânicas de misturas asfálticas densas**. 2013. 344 f. Tese (Doutorado) - Curso de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Transportes, Escola de Engenharia da Universidade de São Pão, São Carlos, 2013.

BARROS, Ablenya Grangeiro. **O efeito do uso de agentes rejuvenescedores encapsulados sobre a autorregeneração de misturas asfálticas**. 2020. 139 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2020.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação Asfáltica: Formação básica para engenheiros**. 4ªed. Rio de Janeiro: Petrobras – Asfalto/ABEDA, 2022. 475p.

BIEDACHA, Marina Myszak. **Dimensionamento de pavimento asfáltico pelo método DNER e comparativo com o atual método mecanístico-empírico MeDiNa**. 2020. 132 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2020.

CARDOZO, Letícia Gabrielle Esteves; RESENDE, Daiany Cristina Costa; SILVA, Natalia Assunção Brasil. Dimensionamento empírico e empírico-mecanicista: Impacto na área trincada e no período de projeto de pavimentos flexíveis. **Research, Society and Developmen**, v. 12, n. 7, 2023.

CARVALHO, Flávia do Socorro de Sousa. **Estudo de misturas asfálticas com adição de cascalho de poços de perfuração**. 2021. 126 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2021.

CARVALHO, Jeovanesa Régis. **Avaliação de diferentes tecnologias de misturas asfálticas mornas com a incorporação de elevadas quantidades de material fresado**. 2022. 195 f. Tese (Doutorado) - Curso de Doutorado em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2022.

CARVALHO, Jeovanesa Régis. **Estudo do comportamento do asfalto modificado com óleo de girassol visando à obtenção de misturas mornas**. 2018. 124 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2018.

CHAVES, Andressa Cristina Borges. **análise da interação entre ligantes de mistura asfáltica com RAP, com e sem uso de agentes rejuvenescedores**. 2023. 119 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2023.

CHIARELLO, Gabriéli Pires; PASCOAL, Paula Taiane; SANTOS, Thaís Aquino; PEREIRA, Deividi da Silva; BARONI, Magnos; GERGING, Rafael Parmeggiani. Avaliação estrutural e financeira de pavimento flexível dimensionado pelo método do DNER (1981) e MeDiNa (2019): estudo de caso da duplicação da BR 287 - trecho Santa Cruz do Sul à Tabai/RS. **In: Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes da ANPET, 2019, Balneário Camboriú.** Anais do 33º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes da ANPET, 2019.

COSTA, Laiane Ferreira. **Análise do uso das fibras do pseudocaule da bananeira em misturas asfálticas SMA.** 2017. 161 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2017.

COSTA, Laiane Ferreira. **Misturas asfálticas recicladas a quente contendo aditivos: avaliação do desempenho mecânico, econômico e ambiental.** 2023. 304 f. Tese (Doutorado) - Curso de Doutorado em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2023.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 667/22:** Método de Projeto de Pavimentos Flexíveis. Rio de Janeiro, 1981.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT – IPR 719.** Manual de Pavimentação. 3ª Edição. Rio de Janeiro, 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **Manual de ajuda: Programa MeDiNa.** Brasília, 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/medina/manual-medina-1-1-9.pdf>. Acesso em: out. 2023.

FERNANDES, Wagner Dambros. **Análise comparativa entre os métodos de dimensionamento de pavimentos flexíveis do Brasil e o método da AASHTO.** 2016. 169 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2019.

FERREIRA, A. V.; COELHO, J. M.; OLIVEIRA, J. K. S. P.; PEDROSO, L. B.; SANTOS, M. F.. **Estudo de Caso das Principais Patologias em Pavimentos Flexíveis na Avenida João Netto de Campos em Catalão - GO.** 2021. 23 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade UNA de Catalão, Catalão, 2021.

FRANCO, Filipe Augusto Cinque de Proença. **Método de dimensionamento mecanístico-empírico de pavimentos asfálticos - SISPAV.** 2007. 315 f. Tese (Doutorado) - Curso de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

GUABIROBA, João Victor de Oliveira Coelho; REZENDE, Lilian Ribeiro; BARROSO, Laynara Xavier; SILVA, João Paulo Souza. Estudo da Fadiga e da Deformação Permanente de Misturas Asfálticas Produzidas em Goiás. **Revista Matéria**, v. 28, n. 1, 2023.

GUERRA, Thamires Dantas. **Utilização do óleo de canola para redução das temperaturas de usinagem e compactação de misturas asfálticas.** 2019. 87 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2019.

GUNGAT, L.; *et al.* Design and properties of high reclaimed asphalt pavement with RH-WMA. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.** 2019.

KILPP, Raquel. **Desenvolvimento de modelos para previsão de temperatura em pavimentos flexíveis.** 2004. 87 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, 2004.

LAUBE, Alan Gabriel; BATISTA, Marlon. **Estudo comparativo no dimensionamento do pavimento flexível através do método DNER e do método MeDiNa.** 2021. 64 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Centro Universitário UNISOCIESC, Joinville, 2021.

LOPES, Jayne Chrystie dos Santos; SOARES, Nayara Polianna de Jesus. **Revisão bibliográfica sobre o método nacional de dimensionamento do DNIT - MeDiNa.** 2022. 66

f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de São João Del Rei, Ouro Branco, 2022.

LUCENA, Lêda Christiane de F. Lopes; SILVEIRA, Iarly Vanderlei; COSTA, Daniel Beserra. Avaliação de ligantes asfálticos modificados com óleo da Moringa Oleífera Lam para uso em misturas mornas **Revista Matéria**, v. 21, n. 1, 2016.

LUZ, P. M. S. G.; MARTINS, S. F.; COSTA, D. B.; LUCENA, L. C. . Avaliação das propriedades mecânicas de misturas asfálticas mornas modificadas com adição de óleos vegetais. **TRANSPORTES**, [S. l.], v. 27, n. 1, p. 141–155, 2019. DOI: 10.14295/transportes.v27i1.1594. Disponível em: <https://www.revistatransportes.org.br/anpet/article/view/1594>. Acesso em: 21 out. 2023.

MARTIN, A. R.; MARTINS, M. A.; MATTOSO, L. H. C. Caracterização química e estrutural de fibra de sisal da variedade agave sisalana. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v. 19, n. 1, p. 40-46, 2009.

MARTIN, Adriana R.; MATTOSO, Maria A. Martins, Luiz H. C.; SILVA, Odilon R. R. F.. Caracterização Química e Estrutural de Fibra de Sisal da Variedade Agave sisalana. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v. 19, n. 1, p. 40–46, 2009.

MARTÍNEZ, Juan Gabriel Bastidas; CARDENAS, Juan Carlos Ruge; GARCÍA, Liosber Medina; ZULUAGA, Robinson Andrés Giraldo. Incorporação de pó de agregados reciclados de concreto como fíler em misturas asfálticas. **Revista Matéria**, v. 26, n. 3, 2021.

MELO NETO, Osires de Medeiros. **Proposta de intervenção pedagógica para estudo de misturas asfálticas recicladas no curso técnico em estradas**. 2022. 31 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Curso Especialização em Docência para Educação Profissional e Tecnológica, Instituto Federal de Educação Tecnológica da Paraíba, Araruna, 2022.

MELO METO, Osires de Medeiros; SILVA, Gustavo Correia Basto; LUCENA, Lêda Christiane de Figueirêdo Lopes. Utilização de material fresado em misturas asfálticas: uma

revisão integrativa. **In: CONAPESC - DIGITAL EDITION, 2021**, Campina Grande. Anais do V CONAPESC, 2021.

MELO NETO, Osires de Medeiros. **Viabilidade de misturas asfálticas recicladas com ácido graxo da borra do óleo de soja**. 2022. 157 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2022.

MORAES, Thalita Maria Ramos Pôrto. **Utilização da cera de carnaúba como aditivo redutor de temperaturas de usinagem e compactação de misturas asfálticas**. 2018. 135 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2018.

Pesquisa CNT de rodovias 2022. – Brasília: CNT: SEST SENAT, 2022.

RODRIGUES, Danieli Klein. **Avaliação da angularidade de agregados miúdos de diferentes litologias para uso em pavimentação**. 2019. 148 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2019.

SABINO, Irraualy Siqueira; DIAS, Rafael da Silva. **Estudo de caso de manifestações patológicas de pavimento flexível em trechos da PB-393 através do método índice de gravidade global (IGG)**. 2023. 72 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, Cajazeiras, 2023.

SILVA, Ingridy Minervina. **Análise do efeito de agentes rejuvenescedores encapsulados na autorregeneração da mistura asfáltica**. 2022. 144 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2022.

SILVA, José Emerson Gonçalves. **Método Nacional de Dimensionamento de Pavimentos - MeDiNa, avaliação da duplicação da AL-145**. 2018. 79 f. Trabalho de Conclusão de Curso

(Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Alagoas, Delmiro Gouveia, 2018.

SILVA, Paulo Otávio Amaral; OLIVEIRA, Ricardo Fonseca. Patologias em pavimentos flexíveis. **GeTeC**, v. 10, n. 30, p. 35–52, 2021.

SOUSA, Talita Miranda. **Estudo de misturas asfálticas mornas modificadas com adição da cera de abelha**. 2020. 107 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2020.

VENDRUSCULO, Jennifer Ilha; PASCOAL, Paula Taiane; SANTOS, Thaís Aquino; BUENO, Lucas Dotto; PINHEIRO, Rinaldo José Barbosa. Comparação entre pavimentos dimensionados com os métodos do DNER (1981) e MeDiNa (2018): estudo de caso com solos de subleito da cidade de Santa Maria/RS. **In: Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes da ANPET, 2018, Gramado**. Anais do 32º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes da ANPET, 2018.