



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
UNIDADE ACADÊMICA DO CABO DE SANTO AGOSTINHO
BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL

CARLOS HENRIQUE CORDEIRO DA SILVA

Análise estrutural e econômica de pavimentos flexíveis com adição de RAP na camada de revestimento, dimensionados pelo método do DNER e MeDiNa

Cabo de Santo Agostinho – PE

2024

CARLOS HENRIQUE CORDEIRO DA SILVA

Análise estrutural e econômica de pavimentos flexíveis com adição de RAP na camada de revestimento, dimensionados pelo método do DNER e MeDiNa

Monografia apresentada ao Curso de Graduação em Engenharia Civil da Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho - UACSA da Universidade Federal Rural de Pernambuco - UFRPE para obtenção do título de Bacharelado em Engenharia Civil.

Orientadora: Profa. Dra. Laiana Ferreira da Costa

Cabo de Santo Agostinho – PE

2024

FICHA CARTOGRÁFICA

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal Rural de Pernambuco
Sistema Integrado de Bibliotecas
Gerada automaticamente, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

S586a

Silva, Carlos Henrique Cordeiro da

Análise estrutural e econômica de pavimentos flexíveis com adição de RAP na camada de revestimento, dimensionados pelo método do DNER e MeDiNa / Carlos Henrique Cordeiro da Silva. - 2024.
58 f. : il.

Orientadora: Laiana Ferreira da Costa.
Inclui referências.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Bacharelado em Engenharia Civil, Cabo de Santo Agostinho, 2024.

I. Mistura asfáltica reciclada. 2. RAP. 3. MeDiNa. 4. Mecânica de pavimentos. 5. SICRO. I. Costa, Laiana Ferreira da, orient. II. Título

CDD 624

CARLOS HENRIQUE CORDEIRO DA SILVA

Análise estrutural e econômica de pavimentos flexíveis com adição de RAP na camada de revestimento, dimensionados pelo método do DNER e MeDiNa

Monografia apresentada ao Curso de Graduação em Engenharia Civil da Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho - UACSA da Universidade Federal Rural de Pernambuco - UFRPE para obtenção do título de Bacharelado em Engenharia Civil.

Aprovada em: **07 de março de 2024.**

BANCA EXAMINADORA

(Orientadora)

Profa. Dra. Laiana Ferreira da Costa

(Examinador interno)

Prof. Dr. Martonio Jose Marques Francelino

(Examinador externo)

Ma. Sonaly Mendes Arruda

Cabo de Santo Agostinho – PE

2024

DEDICATÓRIA

A Deus que me guiou até aqui. À razão do meu viver, meu alicerce: meus pais, Geraldo Cordeiro (*In memoriam*) e Josefa Morato, meus irmãos, José Elton e Lidiane Cordeiro, pelo amor verdadeiro, insubstituível e eterno.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente à Deus pela dádiva da vida, por ter me concedido saúde, sabedoria e persistência, e por me proporcionar a realização desse sonho. A ele toda a honra e toda a glória.

Aos meus pais, Geraldo Cordeiro (*In memoriam*) e Josefa Morato que não mediram esforços para que pudesse conseguir estudar fora da minha cidade natal, e sempre me apoiaram me dando força e coragem para continuar a caminhada e não esmorecer no trajeto.

Aos meus irmãos José Elton e Lidiane Cordeiro, que sempre tive não como irmãos e sim como pais, sempre participaram ativamente da minha educação e formação como homem. Muito obrigado por todo apoio e pelo amor incondicional e genuíno, companheirismo, paciência e pela união da nossa família. Com certeza essa vitória é nossa, amo vocês!

Aos meus familiares e amigos por todas as palavras de incentivo e carinho durante essa caminhada.

À minha orientadora, professora Laiana Ferreira, pela paciência, confiança e incentivo. Muito obrigado por toda disponibilidade que sempre teve e por todos os conhecimentos transmitidos, não só nessa pesquisa mais durante a graduação.

Ao professor Mauricio Pimenta, pessoa que sempre foi mais que um professor, um amigo, cara que me acolheu desde o primeiro dia em que pisei no *campus* da universidade.

Ao professor Martonio Francelino, grande mestre não só da academia, mais da vida, muito obrigado por todos os ensinamentos.

E em geral a todos os professores que fazem parte do corpo docente do curso de engenharia civil da UFRPE – UACSA, deixo aqui o meu muito obrigado a cada um por todo conhecimento compartilhado, todos tiveram papel fundamental na minha formação.

A Sonaly Mendes, pela excelente pesquisa desenvolvida durante seu mestrado, onde tive o prazer de utilizar os seus resultados para desenvolver meu TCC.

Aos meus amigos que construí durante a graduação, parceiros de guerra, Glivio Batista, Pedro Laet, Matheus Bezerra, Julia Carvalho, Pedro Bertonha e Misael Almeida. Muito obrigado por todos os momentos vividos nessa jornada, pela amizade e pelos conhecimentos partilhados.

A Universidade Federal Rural de Pernambuco – UFRPE, por me promover a formação em engenharia civil.

E a todos aqueles que contribuíram direto e indiretamente para a conclusão dessa importante fase da minha vida. Meu muito obrigado a todos!

Epígrafe

*“Sorte é o que acontece quando a preparação
encontra a oportunidade”.*

Séneca (4 a.C.-Roma, 65)

RESUMO

A indústria da construção civil brasileira tem sido estimulada a investir em tecnologias de materiais, principalmente que atendam aos preceitos da sustentabilidade, e atualizações de métodos de dimensionamento de pavimentos flexíveis, pois grande parte da malha rodoviária do Brasil é constituída por esse tipo de pavimento e tem sofrido com o desgaste precoce, acarretando manutenções constantes. A reutilização do material fresado, também chamado de *Reclaimed Asphalt Pavement (RAP)* tem surgido como uma alternativa para a redução dos custos de pavimentação e do impacto ambiental causado por esse serviço. Essa pesquisa buscou realizar um comparativo estrutural e de custos da implantação de pavimentos com a adição de RAP nos teores de 0%, 10%, 30% e 50% na camada de revestimento, dimensionados pelo método do Departamento Nacional de Estradas e Rodagens - DNER (1981) e pelo Método de Dimensionamento Nacional - MeDiNa. Inicialmente realizou-se uma coleta de dados na literatura sobre os materiais que seriam utilizados nas camadas dos pavimentos estudados. Após o dimensionamento foi realizado um comparativo estrutural e de custo de implantação de um quilômetro de via para todas as estruturas propostas na pesquisa. A Estrutura 01, com 0% de RAP e dimensionada pelo DNER (1981), foi a que apresentou menor custo, porém ao ser analisada pelo MeDiNa observou-se falha por deformação permanente no primeiro mês de projeto e quanto a fadiga no 25º mês de utilização. A Estrutura 02, com 0% de RAP foi a mais onerosa entre todas, porém, assim como as demais estruturas dimensionadas pelo MeDiNa, suportará as solicitações de tráfego durante todo o tempo de projeto (10 anos). O número de solicitações equivalentes (N_{eq}) de falha quanto a fadiga entre as estruturas demonstrou que a 02 é 67% mais econômica. Para as demais estruturas ao aumentar o teor de RAP o custo de implantação diminuiu chegando a uma redução de 79% para a estrutura com uso de 50% de RAP em sua camada de revestimento. Por tanto, por meio dos resultados obtidos na pesquisa observou-se que o MeDiNa se mostrou mais adequado para atender o tempo de projeto estimado, além de permitir o uso de diferentes tipos de materiais disponíveis para a execução de pavimentos sem comprometer sua eficiência, como o é o caso das misturas asfálticas recicladas contendo RAP. Observou-se ainda, que ao aumentar o teor de RAP na mistura asfáltica diminuiu-se o custo da estrutura, gerando economia na implantação do pavimento.

Palavras Chave: mistura asfáltica reciclada; RAP; MeDiNa; mecânica de pavimentos; SICRO.

ABSTRACT

The Brazilian construction industry has been encouraged to invest in materials technology, mainly those that meet the precepts of sustainability, and updates on methods for sizing flexible pavements, considering that a large portion of Brazil's road network consists largely of this type of pavement and has suffered from premature wear, leading to constant maintenance. The reuse of milled material, also called Reclaimed Asphalt Pavement (RAP), has emerged as an alternative for reducing paving costs and the environmental impact caused by this service. This research sought to make a structural and cost comparison of implementing pavements with the addition of RAP at rates of 0%, 10%, 30%, and 50% in the surface layer, sized by the method of the National Highway Department - DNER (1981) and by the National Sizing Method (MeDiNa). Initially, data collection was conducted from literature sources on the materials that would be used in the layers of the pavements studied. After sizing, a structural and implementation cost comparison was made for one kilometer of road for all the structures proposed in the research. Structure 01, with 0% RAP and sized by DNER (1981), had the lowest cost, however, upon analyzed by the MeDiNa, permanent deformation failure was observed in the first month of the project and fatigue at the 25th month of use. Structure 02, with 0% RAP, was the costliest among all, however, like the other structures sized by MeDiNa, it will withstand traffic demands over the project's duration (10 years). The number of equivalent fatigue failure requests (Neq) between the structures showed that structure 02 is 67% more economical. For the other structures, as the RAP content increases, the implementation cost decreases, reaching a reduction of 79% for the structure with 50% RAP in its surface layer. Therefore, through the results obtained in the research, it was observed that MeDiNa proved to be more suitable for meeting the estimated project time, besides allowing the use of different types of materials available for pavement execution without compromising its efficiency, as is the case with recycled asphalt mixtures containing RAP. It was also observed that increasing the RAP content in the asphalt mixture reduces the cost of the structure, saving cost in pavement implementation.

Keywords: recycled asphalt mixture; RAP; MeDiNa; pavement mechanics; SICRO.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Composições granulométricas dos tipos de misturas a quente	16
Figura 2 - Exemplo de fresadora e de serviço de fresagem em uma rodovia.....	17
Figura 3 - Exemplos de equipamentos recicladores com emulsão asfáltica e usina móvel	18
Figura 4 - Esquema do ensaio de MR e variáveis constantes na equação.....	21
Figura 5 - Gráfico ensaio de Flow Number	21
Figura 6 - Carregamento e deformação no ensaio uniaxial de carga repetida.....	22
Figura 7 - Representação das tensões no centro de um corpo de prova	24
Figura 8 - Ábaco para dimensionamento de pavimentos	28
Figura 9 - Representação das espessuras do pavimento	29
Figura 10 - Fator de deslocamento em função do dano médio.....	32
Figura 11 - Fluxograma das atividades desenvolvidas	33
Figura 12 - Planilha de dimensionamento DNER (1981).....	37
Figura 13 - Janela de inserção dos dados de tráfego	38
Figura 14 - Tela inicial do MeDiNa	38
Figura 15 - Janela de Propriedades das camadas.....	39
Figura 16 - Janela de resultado da análise da estrutura proposta.....	40
Figura 17 - Evolução mensal de área trincada e ATR.....	40
Figura 18 - Bacias defletométricas	41
Figura 19 - Relatório geral do dimensionamento	41
Figura 20 - Seção Estrutura 01	43
Figura 21 - Seção Estrutura 02	45
Figura 22 - Seção Estrutura 03	46
Figura 23 - Seção Estrutura 04	47
Figura 24 - Seção Estrutura 05	48
Figura 25 - Evolução da área trincada das estruturas	49
Figura 26 - Evolução do ATR das estruturas	50
Figura 27 - Custo de implantação das estruturas	51
Figura 28 - Custo por número N equivalente	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classes das misturas asfálticas determinadas em relação ao Flow Number	22
Tabela 2 - Espessura mínima recomendada para revestimentos asfálticos	27
Tabela 3 - Coeficientes de equivalência estrutural	27
Tabela 4 - Parâmetros solo subleito.....	34
Tabela 5 - Parâmetros de resiliência e deformação permanente do solo do subleito	35
Tabela 6 - Parâmetros dos materiais utilizados na base e sub-base.....	35
Tabela 7 - Parâmetros das misturas asfálticas utilizadas	36
Tabela 8 - Custo unitário por serviço	42
Tabela 9 - Resultados dimensionamento Estrutura 01 método DNER	43
Tabela 10 - Evolução da área trincada e ATR para a Estrutura 01	44
Tabela 11 - Resultados dimensionamento Estrutura 02 MeDiNa	45
Tabela 12 - Evolução da área trincada e ATR para a Estrutura 02	45
Tabela 13 - Resultados dimensionamento Estrutura 03 MeDiNa	46
Tabela 14 - Evolução da área trincada e ATR para a Estrutura 03	46
Tabela 15 - Resultados dimensionamento Estrutura 04 MeDiNa	47
Tabela 16 - Evolução da área trincada e ATR para a Estrutura 04	47
Tabela 17 - Resultados dimensionamento Estrutura 05 MeDiNa	48
Tabela 18 - Evolução da área trincada e ATR para a Estrutura 05	48
Tabela 19 - ATR subleito	51

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CNT – Confederação Nacional do Transportes.
DNER – Departamento Nacional de Estradas e Rodagens.
DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes.
RAP – *Reclaimed Asphalt Pavement*.
CPA – Camada Porosa de Atrito
SMA – *Stone Matrix Asphalt*.
CA – Concreto Asfáltico.
CBUQ – Concreto Betuminoso Usinado a Quente.
CAP – Cimento Asfáltico de Petróleo.
AR – Agente Rejuvenescedor.
EAP – Emulsão Asfáltica de Petróleo.
MR – Módulo de Resiliência.
FN – *Flow Number*.
Vt – Volume Total de Tráfego.
FV – Fator de Veículo.
FR – Fator Climático Regional.
ATR – Afundamento de Trilha de Roda.
CBR – *California Bearing Ratio*.
USACE – *U.S. Army Corps of Engineers*.
DRC – Divisão de Rodovias da Califórnia.
AASHTO – *Association of State Highway and Transportation Officials*.
NAPA – *National Asphalt Pavement Association*.
AEMC – Análise Elástica de Múltiplas Camadas.
IPR – Instituto de Pesquisas Rodoviárias.
MCT – Miniatura Compactação Tropical.
SUCS – Sistema Unificado de Classificação de Solos.
SICRO – Sistema de Custos Referenciais de Obras.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	OBJETIVOS	14
1.1.1	Objetivo Geral.....	14
1.1.2	Objetivos Específicos.....	14
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1	REVESTIMENTOS ASFÁLTICOS.....	15
2.1.1	Misturas Asfálticas Usinadas a Quente.....	15
2.1.2	Misturas Asfálticas Recicladas	17
2.2	DESEMPENHO MECÂNICO DOS PAVIMENTOS.....	19
2.2.1	Módulo de Resiliência.....	20
2.2.2	Deformação Permanente	21
2.2.3	Vida de Fadiga	23
2.3	MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO.....	24
2.3.1	Método do Departamento Nacional de Estradas de Rodagem – DNER (1981)	25
2.3.2	Método de Dimensionamento Nacional de Pavimentos – MeDiNa	29
3	METODOLOGIA	33
3.1	COLETA DE DADOS NA BIBLIOGRAFIA.....	34
3.2	DIMENSIONAMENTO	36
3.2.1	Dimensionamento Método do DNER	36
3.2.2	Dimensionamento MeDiNa	37
3.3	ESTIMATIVA DOS INVESTIMENTOS PARA IMPLANTAÇÃO	41
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	43
4.1	RESULTADOS DO DIMENSIONAMENTO	43
4.2	COMPARATIVO ESTRUTURAL	49
4.3	COMPARATIVO DE CUSTOS DE IMPLANTAÇÃO	51
5	CONCLUSÕES	54
	REFERÊNCIAS	55

1 INTRODUÇÃO

A busca por pavimentos flexíveis com melhor desempenho e que possam apresentar uma maior durabilidade, com menor custo possível e oferecendo conforto e segurança aos usuários configura um grande desafio para a indústria da construção civil no Brasil.

Em 2017 um levantamento realizado pela Confederação Nacional do Transportes (CNT) apontou que 99% das rodovias do país são compostas por pavimentos flexíveis. Um contraponto é que, ainda de acordo com essa entidade, a metodologia brasileira atual para o dimensionamento de pavimentos flexíveis apresenta uma defasagem média de 40 anos em relação a países como Estados Unidos, Japão e Portugal. Essa defasagem pode ser responsável pelo desgaste precoce dos pavimentos flexíveis brasileiros.

Em relação à camada de revestimento, o principal dano está associado à repetição do carregamento que leva ao trincamento por fadiga e à deformação permanente, refletindo assim no desprendimento de material e em afundamentos excessivos nas trilhas de rodas (Nunes, 2017). Até então os pavimentos flexíveis no Brasil eram, em sua maioria, dimensionados utilizando o método do Departamento Nacional de Estradas e Rodagens - DNER (1981) que não analisava as características mecânicas de toda a estrutura, apenas o *California Bearing Ratio (CBR)* do subleito, diferentemente do novo Método de Dimensionamento Nacional - MeDiNa, que realiza essa análise.

Além dos aspectos de dimensionamento atrelados à precocidade do desgaste dos pavimentos, outro fator importante, é a exploração desenfreada de recursos naturais na busca por matéria-prima para reconstrução e restauração das estruturas danificadas, além do grande volume de resíduos gerados durante esse processo, tendo geralmente como destino bota foras, ocasionando assim grande preocupação ambiental (Santos *et al.*, 2017).

Diante deste cenário, é urgente que todas as partes envolvidas na indústria da pavimentação estejam comprometidas com a adoção de práticas mais sustentáveis. O conceito de sustentabilidade de pavimentos deve estar em pauta durante a abordagem de materiais alternativos, elaboração de projetos e adoção de boas práticas de construção, manutenção e preservação dessas estruturas (Bernucci *et al.*, 2022).

Uma alternativa que pode contribuir com a sustentabilidade no meio rodoviário é a reutilização do *Reclaimed Asphalt Pavement (RAP)*, que é o material retirado de revestimentos antigos por meio do processo de fresagem. Hilário (2016), destaca que o processo de fresagem está entre as atividades que produzem a maior quantidade de resíduos poluentes nas obras de manutenção e restauração de rodovias.

O RAP tem sido utilizado em novas misturas asfálticas, trazendo uma redução significativas dos custos de restauração do pavimento danificado (Bernucci *et al.*, 2022).

Segundo Unger Filho (2015), todos os anos são produzidas cerca de 100 milhões de toneladas de RAP nos Estados Unidos e todo este material é reaproveitado em novas misturas. A essas misturas, dá-se o nome de mistura asfáltica reciclada, que no Brasil ainda é uma técnica consideravelmente nova, com poucos trechos construídos utilizando esse material (Arruda, 2021).

Nesse sentido, este trabalho tem a finalidade de avaliar a utilização de misturas asfálticas recicladas com incorporação de diferentes teores de material fresado na camada de revestimento, dimensionadas por meio do método do DNER e pelo MeDiNa, com o objetivo de estabelecer um comparativo sob a ótica estrutural e de custo.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Realizar um comparativo estrutural e de custo, de pavimentos com adição de RAP como componente da camada de revestimento, dimensionados através do método do DNER (1981), e do novo Método de Dimensionamento Nacional do DNIT (MeDiNa).

1.1.2 Objetivos Específicos

- Realizar um levantamento bibliográfico acerca do desempenho mecânico de misturas asfálticas contendo RAP;
- Realizar o dimensionamento de pavimentos com camada de revestimento contendo RAP por meio de metodologias diferentes;
- Avaliar o comportamento mecânico das estruturas dimensionadas por diferentes métodos, verificando a deformação permanente (Afundamento de Trilha de Roda - ATR) e o rompimento do pavimento por fadiga;
- Analisar a viabilidade econômica da incorporação de diferentes teores de RAP na camada de revestimento de um pavimento;
- Realizar uma análise comparativa de custo e de vida útil entre as estruturas dimensionadas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão apresentadas informações da literatura para um embasamento teórico da pesquisa realizada, tais como: tipos e aplicabilidade das misturas asfálticas, incluindo misturas recicladas com a adição de RAP; propriedades mecânicas e ensaios realizados para o controle tecnológico de misturas asfálticas e as principais metodologias utilizadas no Brasil para dimensionamento de pavimentos flexíveis.

2.1 REVESTIMENTOS ASFÁLTICOS

O pavimento asfáltico é a estrutura constituída por um sistema de camadas de espessuras finitas assentes sobre um semiespaço considerado teoricamente como infinito – a infraestrutura ou terreno de fundação, a qual é designada de subleito. Tem a característica de suportar um certo grau de deformações sem causar o rompimento da estrutura (Senço, 2007).

De acordo com Bernucci *et al.* (2022) o revestimento asfáltico de um pavimento flexível é a camada superior destinada a resistir diretamente às ações do tráfego e transmiti-las de forma atenuada às camadas inferiores, impermeabilizar o pavimento, além de melhorar as condições de rolamento (conforto e segurança).

As misturas asfálticas são utilizadas como camada de revestimento, e seu dimensionamento é feito visando combater esforços de compressão e de tração na flexão. Esses esforços são provocados através do surgimento de bacias deflectométricas proveniente das cargas impostas pelos veículos, causando deformações permanentes e rompimento por fadiga na estrutura (Senço, 2008).

A correta dosagem dos materiais componentes do revestimento associada a um dimensionamento eficiente garantem os requisitos de impermeabilidade, flexibilidade, estabilidade às deformações permanentes, durabilidade à desagregação e envelhecimento, resistência à derrapagem dos pneus, resistência à fadiga e ao trincamento, de acordo com o clima e o tráfego previstos para o local (Bernucci *et al.*, 2022).

2.1.1 Misturas Asfálticas Usinadas a Quente

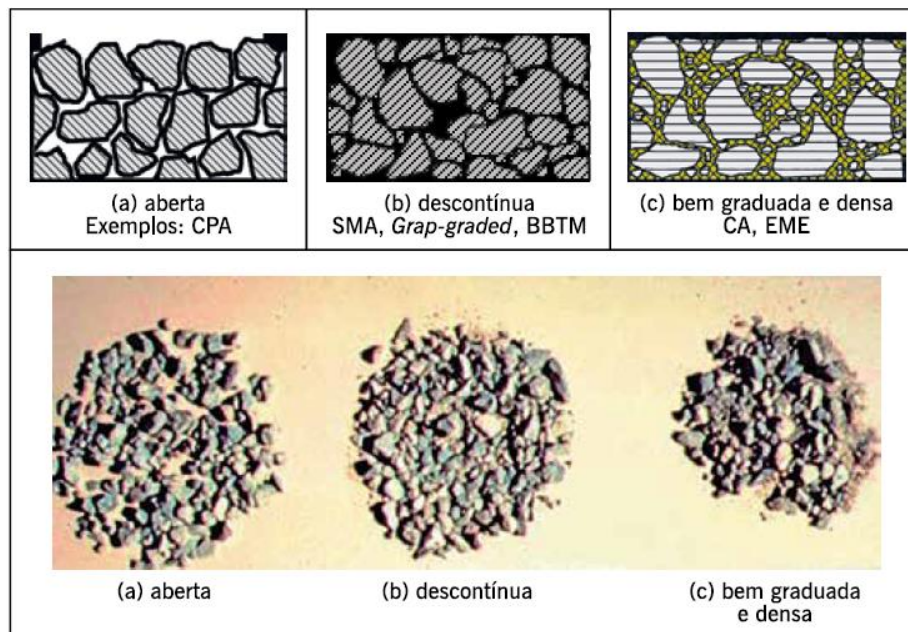
As misturas asfálticas usinadas a quente tem seu processo de fabricação em usinas específicas fixas ou móveis, com o uso de temperaturas elevadas, geralmente acima dos 150

°C, e podem ser classificadas de acordo com o padrão granulométrico empregado e as exigências de características mecânicas em função da aplicação de destino (Bernucci *et al.*, 2022).

Conforme apresentado na Figura 1 e detalhado na sequência, com relação à granulometria de seus agregados as misturas asfálticas usinadas à quente podem ser classificadas em:

- Aberta – possui granulometria uniforme com agregados quase que exclusivamente do mesmo tamanho. Ex: Camada Porosa de Atrito (CPA);
- Descontínua – possui a granulometria com grãos de maiores dimensões em quantidade dominante completados por agregados finos. Ex: *Stone Matrix Asphalt (SMA)*;
- Densa, ou contínua – possui uma granulometria bem contínua e bem graduada. O esqueleto mineral possui poucos vazios devido à variação granulométrica. Ex: Concreto Asfáltico (CA).

Figura 1 - Composições granulométricas dos tipos de misturas a quente



Fonte: Bernucci *et al.*, 2022.

Segundo Bernucci *et al.* (2022) essas misturas são aplicadas para qualquer tipo de tráfego seja ele leve ou muito pesado, com algumas ressalvas para a de graduação aberta e descontínua que sempre são colocadas sobre camadas existentes de CA ou até mesmo de concreto convencional de cimento Portland.

No Brasil, a mais utilizada é o Concreto Asfáltico (CA) também denominado Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ). É composto de uma mistura de agregados de vários tamanhos, fíler e Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP), podendo ainda ter alguns aditivos, aquecidos em temperaturas previamente escolhidas de acordo com a viscosidade do ligante (Bernucci *et al.*, 2022).

2.1.2 Misturas Asfálticas Recicladas

Quando um pavimento está deteriorado, seja com danos em sua infraestrutura ou apenas na camada superficial, surge a necessidade da operação de restauração, que pode acontecer por meio da adição de camadas ou realizando o corte “total” ou “parcial” para a execução de uma nova camada de revestimento asfáltico. Esse corte é realizado através de um equipamento especial denominado fresadora (Figura 2).

Com o processo de fresagem de pavimentos asfálticos é gerado o RAP um material de valor econômico e com propriedades físicas e mecânicas que podem ser introduzidas na composição de novas misturas asfálticas (Cunha *et al.*, 2018). O RAP é constituído basicamente por unidades pétreas (agregado), cobertas de um mástique (fíler e ligante envelhecido) formando ali grumos do material fresado.

Figura 2 - Exemplo de fresadora e de serviço de fresagem em uma rodovia



Fonte: Wirtgen, 2024.

Em 2021, a resolução nº 14 do DNIT estabeleceu que o RAP gerado em uma determinada obra de restauração de um pavimento deverá ser incluído no projeto de reconstrução das novas camadas da infraestrutura ou ser utilizado como componente de novos

concretos asfálticos utilizados na camada de revestimento, podendo vir a ser utilizado em sua obra de origem ou em outras obras em que abriguem as tecnologias de reciclagem.

O processo de reciclagem de um pavimento trata da reutilização de misturas asfálticas envelhecidas utilizadas para produção de novas misturas, aproveitando os agregados e ligantes remanescentes, provenientes da fresagem, podendo conter ou não aditivos denominados Agentes Rejuvenescedores (AR), espuma de asfalto, CAP ou Emulsões Asfálticas de Petróleo (EAP) novos, quando houver necessidade (Bernucci *et al.*, 2022).

A reciclagem do pavimento pode ocorrer em usina fixa ou móvel, com transporte do material fresado para a usina, em processo a quente ou a frio conforme descrição a seguir: A reciclagem pode ocorrer:

- A quente, com a utilização de CAP, AR e agregados fresados aquecidos, podendo ainda conter agregados virgens quando necessário;
- A frio, com a utilização EAP, Agente Rejuvenecedor Emulsionado (ARE) e agregados fresados à temperatura ambiente.

Além disso, a reciclagem também pode ser realizada no local (*in situ*), com o material fresado sendo misturado no próprio local do corte.

A Figura 3 mostra um exemplo de equipamentos de reciclagem a frio *in situ*, com emulsão modificada (a) e (b), com espuma de asfalto e usina móvel para reciclagem de pavimentos (c).

Figura 3 - Exemplos de equipamentos recicladores com emulsão asfáltica e usina móvel



(a) Reciclagem *in situ* com emulsão modificada



(b) Reciclagem *in situ* com espuma de asfalto



(c) Usina de asfalto móvel contínua.

De acordo com a NAPA (2015) nos EUA 100% do material proveniente de fresagem de pavimentos asfálticos são reutilizados seja na camada de revestimento ou em camadas subjacentes, isso representou aproximadamente 100 milhões de toneladas no ano de 2018.

O Departamento de Transporte Estadual dos EUA (DOT) especifica que a utilização de até 30 % de teor de RAP em composições de camadas de pavimentos não compromete o seu desempenho mecânico. Alguns autores como Hansen e Copeland (2013) citam que a porcentagem de material fresado que irá ser adicionado pode depender da legislação específica do local de aplicação, podendo chegar em alguns casos em até 50%.

Segundo Sabahfar e Hossain (2016), os teores de RAP incorporados em misturas recicladas ainda são bem reduzidos pois o processo de fabricação depende de alguns pontos fundamentais como, processo de mistura, agente de reciclagem, design de mistura, tipo de usina utilizada, temperatura de produção, tempo de mistura e temperatura de aplicação, desempenho esperado e propriedades do RAP.

2.2 DESEMPENHO MECÂNICO DOS PAVIMENTOS

Caracterizar materiais utilizados na pavimentação é uma tarefa complexa pois suas propriedades dependem de diversos fatores, entre eles estão: meio ambiente, magnitude, tempo de aplicação e frequência das cargas dos veículos, e estado de tensões gerados. Quando tratamos das misturas asfálticas, o envelhecimento gradativo do ligante aumenta ainda mais a complexidade, uma vez que é muito difícil simular esse fenômeno em laboratório para caracterizar de forma devida o material (Babadopulos *et al.*, 2015).

Com intuito de dimensionar uma estrutura resistente aos esforços solicitantes a mecânica dos pavimentos estuda as tensões e deformações no pavimento buscando compreender os mecanismos de deterioração tais como resistência, fadiga e deformabilidade das misturas asfálticas (Medina e Motta, 2015).

Desse modo, o desempenho das misturas asfálticas fica condicionado a sua resistência às tensões advindas do carregamento dinâmico do tráfego, e em função das ações climáticas. Para confirmar o fato as misturas asfálticas são ensaiadas em laboratório, a fim de obter parâmetros e índices usados para simular a situação real de campo. A deformação permanente e o trincamento por fadiga são as patologias mais comuns e presentes nas camadas de revestimento (Medina e Motta, 2015).

Para a obtenção dos parâmetros e índices de desempenho das misturas, são realizados ensaios que nos dão respostas quanto ao seu comportamento, como por exemplo o módulo de resiliência, ensaio de deformação permanente e de vida de fadiga.

2.2.1 Módulo de Resiliência

O Ensaio de Módulo de Resiliência (MR) tem como objetivo fornecer um parâmetro de rigidez do material ensaiado, cujo módulo determinado estabelece a relação entre a tensão horizontal gerada no corpo de prova em função de uma carga vertical cíclica aplicada, e da deformação horizontal desenvolvida pelo deslocamento horizontal resiliente, que é recuperável (DNIT ME 135/2018).

O termo resiliência foi utilizado na pavimentação pela primeira vez em 1930 por Francis Hveem, quando ele relacionou as deformações recuperáveis com as fissuras que apareciam nos revestimentos asfálticos. Hveem definiu resiliência como a energia potencial de deformação em um corpo deformado elasticamente, que retorna ao seu estado inicial quando as cargas são sessadas, matematicamente seu módulo relaciona a tensão aplicada (σ) e a deformação correspondente (ϵ), conforme apresentado na Equação 1.

$$MR = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (\text{Equação 1})$$

De acordo com a DNIT ME 135/2018 o módulo de resiliência pode ser obtido através da relação da aplicação de uma carga repetidamente sobre o plano diametral de um corpo de prova cilíndrico, com a medição do deslocamento no plano axial como determina a Equação 1. A Figura 4 mostra o esquema do ensaio de MR e as variáveis constantes na equação.

$$MR = \frac{F}{|\Delta H|t} (0,2692 + 0,9976\mu) \quad (\text{Equação 1})$$

Onde:

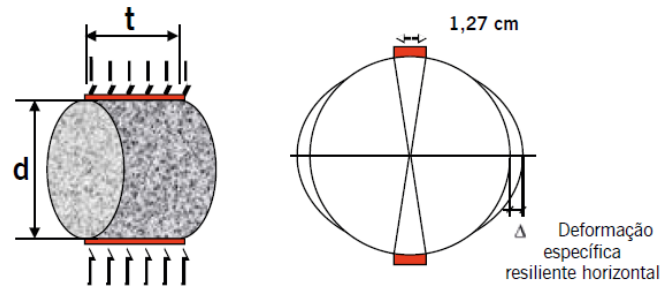
F = Carca cíclica aplicada;

ΔH = Deslocamento horizontal medido;

t = Altura do corpo de prova;

μ = Coeficiente de Poisson.

Figura 4 - Esquema do ensaio de MR e variáveis constantes na equação



Fonte: Adaptado de Medina, 1988.

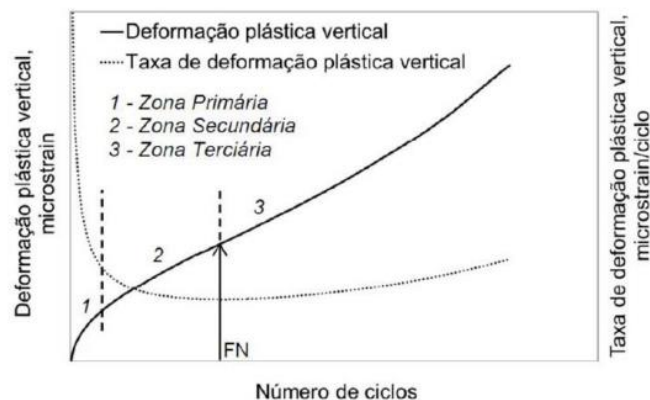
2.2.2 Deformação Permanente

Segundo Borges (2014), deformação permanente em pavimentação é a depressão longitudinal que tem aumento significativo de acordo com as cargas repetidas impostas pelo tráfego de veículos.

A deformação permanente em misturas asfálticas ocorre devido a uma combinação do fluxo do material viscoelástico ou viscoplástico e do dano nesse material, representado pelo surgimento e propagação de trincas. Para que uma mistura resista bem a esse tipo de deformação depende de diversos fatores, entre os quais a consistência do ligante e a volumetria da mistura, além de uma adequada dosagem da mistura asfáltica (Bernucci *et al.*, 2022).

O ensaio uniaxial de carga repetida vem sendo amplamente utilizado pela comunidade rodoviária brasileira. O ensaio fornece um parâmetro bastante utilizado, o *Flow Number (FN)*. O FN é definido como o número do ciclo inicial da zona terciária, onde a taxa de deformação chega ao valor mínimo Figura 5 (Portela Neto, 2018).

Figura 5 - Gráfico ensaio de *Flow Number*

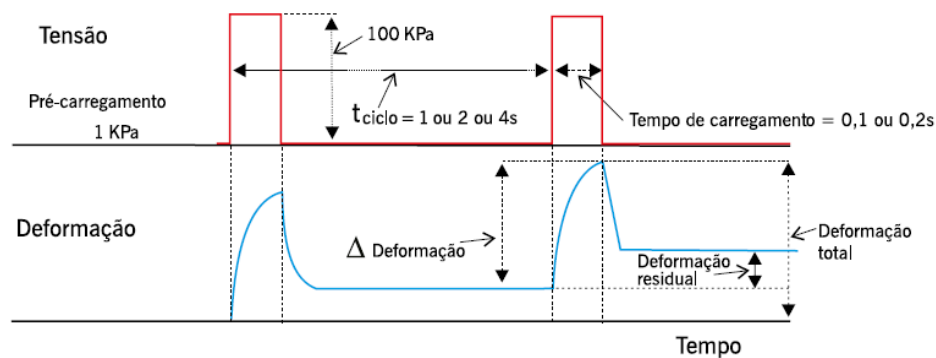


Fonte: ANBT NBR 16505, 2016.

Assim a mistura asfáltica terá maior capacidade de resistir à deformação permanente se apresentar baixas inclinações na zona secundária (pequeno valor de deformação permanente ao fim do ensaio) e um elevado FN (longo tempo de ensaio) (Ferreira, 2017).

O ensaio consiste na aplicação de cargas em pulsos ao corpo de prova, a uma determinada frequência, tempo de aplicação e intervalo entre as aplicações das cargas, a uma temperatura especificada. A Figura 6 mostra um exemplo de carregamento empregado em ensaio uniaxial de carga repetida e a deformação permanente acumulada (Bernucci *et al.*, 2022).

Figura 6 - Carregamento e deformação no ensaio uniaxial de carga repetida



Fonte: Dongré *et al.*, 2009.

O *Flow Number* faz parte de um importante critério para a classificação de misturas asfálticas em métodos mecânicos de dimensionamento de pavimentos. O método MeDiNa, por exemplo, utiliza a divisão por classes de misturas definida por Nascimento (2004), buscando a prevenção contra a deformação permanente no revestimento, pois no MeDiNa é desconsiderada a potencial parcela de deformação permanente da camada asfáltica no cálculo do afundamento trilha de roda, desde que as misturas se enquadrem nas classes de desempenho apresentadas na Tabela 1 (Arruda, 2021).

Tabela 1 - Classes das misturas asfálticas determinadas em relação ao Flow Number

Classe	Flow Number (FN)	Condições Normais	Condições Severas
1	$FN \leq 100$ ciclos	$N < 1 \times 10^6$	Não recomendado
2	$100 \text{ ciclos} \leq FN \leq 300$ ciclos	$1 \times 10^6 \leq N < 1 \times 10^7$	$N < 1 \times 10^6$
3	$300 \text{ ciclos} \leq FN \leq 750$ ciclos	$1 \times 10^7 \leq N < 1 \times 10^8$	$1 \times 10^6 \leq N < 1 \times 10^7$
4	$750 \text{ ciclos} \leq FN \leq 2000$ ciclos	$N \geq 1 \times 10^8$	$1 \times 10^7 \leq N < 1 \times 10^8$
5	$FN \geq 2000$ ciclos	-	$N \geq 1 \times 10^8$

Fonte: DNIT, 2018.

2.2.3 Vida de Fadiga

Em revestimentos asfálticos, o fenômeno da fadiga está associado à repetição da rolagem de cargas variadas na superfície. Carregamentos dessa natureza geram tensões de tração na base do revestimento, com isso, surgem pequenas fissuras, que evoluem para trincas levando a falha do pavimento. Ao entrar em fase de fadiga, a mistura asfáltica rapidamente perde a sua rigidez característica passando a acumular maiores valores de deflexão (Colpo, 2014).

Um ensaio bastante utilizado para aferir a fadiga em revestimentos asfálticos é o ensaio de fadiga por compressão diametral, regido pela normativa DNIT 183/2018-ME, cujo procedimento estabelece a utilização de corpos de prova cilíndricos que são comprimidos diametralmente, gerando uma tensão de tração na direção horizontal da amostra.

No decorrer do ensaio são geradas tensões cisalhantes próxima aos frisos dos pratos de apoio e do atuador, com isso, gera-se um acúmulo de deformação em cada aplicação do carregamento, assim, o corpo de prova acaba rompendo por excesso de deformação de tração e não propriamente por fadiga.

No ensaio de fadiga por compressão diametral de tração indireta sob tensão controlada, a carga vertical diametral pulsante gera uma tensão de tração perpendicular provocando a ruptura do corpo de prova ao longo da parte central do plano diametral vertical. Assim a vida de fadiga é determinada pelo número total de aplicações de carga que provoca a ruptura do corpo de prova a cada nível de tensão (DNIT, 2018).

De acordo com DNIT (2018), a vida de fadiga é definida pelo número de solicitações necessárias para o fim do ensaio (ruptura do corpo de prova) em uma dada temperatura podendo ser relacionada à tensão de tração e à deformação de tração inicial. Em condições de teste, a vida de fadiga é expressa pelo número de solicitações que, em ensaio de tensão controlada, é determinado pelas Equação 2 e Equação 3.

$$N = k_1 \frac{1}{\Delta\sigma} n_1 \quad (\text{Equação 2})$$

$$N = k_3 \frac{1}{\varepsilon_i} n_3 \quad (\text{Equação 3})$$

Onde:

$\Delta\sigma$ = diferença de tensões;

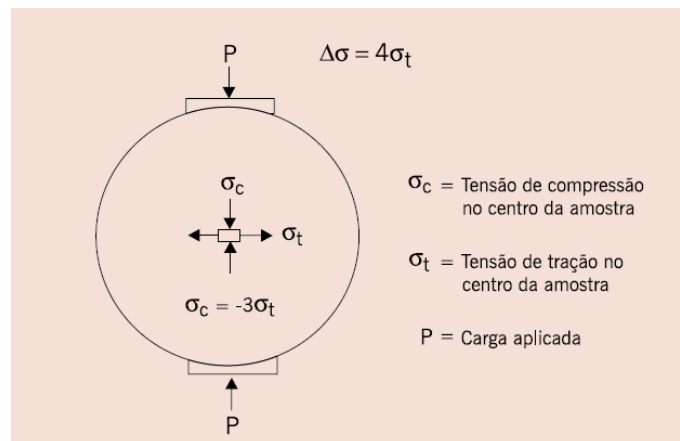
ϵ_i = deformação específica resiliente;

k_1, n_1, k_3, n_3 são parâmetros experimentais determinados em ensaio.

Em ensaios com deformação controlada, leva em conta a deformação de tração medida no centro do corpo de prova como mostra a Figura 7. Assim, a Equação 4 transforma-se na Equação 4, onde ϵ_t é a deformação específica e k_2, n_2 são parâmetros experimentais determinados em ensaio.

$$N = k_2 \frac{1}{\epsilon_t} n_2 \quad (\text{Equação 4})$$

Figura 7 - Representação das tensões no centro de um corpo de prova



Fonte: Bernucci *et al*, 2022.

2.3 MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO

O dimensionamento de um pavimento consiste na determinação de espessuras de camadas de forma que essa estrutura consiga resistir, transmitir e distribuir as tensões resultantes do tráfego de veículos ao subleito, esse conjunto de camadas deve ser resistente a grandes deformações, rupturas e desgastes superficiais excessivos (Senço, 2007).

Segundo Balbo (2007), os métodos de dimensionamento são classificados em três tipos:

- Método empírico: que utiliza uma modelagem estatística com base na evolução dos parâmetros físicos observados nos pavimentos em serviço;

- Método semi-empírico: advindo da extrapolação e expansão de resultados empíricos com base em uma teoria analítica consistente;
- Método empírico-mecanicista: originado da calibração de modelos teóricos com dados obtidos em campo através de pistas experimentais e em laboratório.

O objetivo de todas as metodologias citadas é projetar um pavimento que seja capaz de resistir ao tráfego de projeto. Ou seja, que o pavimento seja capaz resistir as cargas a ele imposta sem que a sua capacidade estrutural e de utilização seja alterada. Em métodos mais atuais são considerados como critério de falha o Afundamento de Trilha de Roda (ATR), deflexão da camada de revestimento e trincamento por fadiga.

2.3.1 Método do Departamento Nacional de Estradas de Rodagem – DNER (1981)

O século passado foi marcado por grandes guerras que de certa forma impulsionaram a evolução tecnológica em diversas áreas, muito em função da necessidade dos exércitos obterem vantagens sobre seus inimigos. Em meio a tantos avanços tecnológicos estava o dimensionamento de pavimentos (Coutinho, 2011).

Durante a segunda guerra mundial ao observar que as pistas de pouso existente não suportariam a operação dos seus novos e pesados bombardeiros, o exército americano se viu obrigado a aperfeiçoar as suas metodologias de dimensionamento de pavimentos. Com adaptabilidade para utilização em aeródromos foi escolhido então o *California Bearing Ratio (CBR)* método que era utilizado até então pela Divisão de Rodovias da Califórnia (DRC) como base para o desenvolvimento de uma tecnologia mais sofisticada (Coutinho, 2011).

Essa metodologia foi fundamentada no trabalho “*Design of Flexible Pavements Considering Mixed Loads and Traffic Volume*”, que foi apresentado em 1962 pelos autores W.J. Turnbull, C.R Foster e R. G. Ahlvin, membros do *U.S. Army Corps of Engineers (USACE)* (Baptista, 1978). Com base nesses estudos, em 1950 o engenheiro Murillo Lopes de Souza introduziu no Brasil a metodologia de dimensionamento de pavimentos flexíveis, o método do DNER, vindo a ser oficializado em 1961 e por último revisado em 1981.

O método empírico baseado em ensaios realizados nas pistas experimentais da *American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO)*, visa a proteção do subleito contra a geração de deformações plásticas excessivas durante o período de projeto (DNIT, 2006).

Segundo Franco (2007), o empirismo é muito eficiente para as condições em que ele foi determinado, porém se torna limitado quando aplicado a condições divergentes. Com isso, a comunidade da pavimentação tem cada vez mais buscado reduzir a parcela de empirismo no dimensionamento de pavimentos.

O Método do DNER que tem como premissa básica o critério do CBR, define as espessuras das camadas constituinte da estrutura através da capacidade de suporte do subleito, reforço do subleito, sub-base e do volume de tráfego.

A capacidade de suporte do subleito e dos materiais constituintes das camadas se dá através do CBR. O método do DNER (1981) avalia o potencial de ruptura do solo por meio do Índice de Suporte Califórnia (ISC) e relaciona seu resultado com número repetições do eixo simples padrão de 8,2 t (N), dessa forma, através da composição estrutural do pavimento, visa proteger o subleito frente a ruptura por cisalhamento. A metodologia empírica não contempla efeitos de fadiga na estrutura do pavimento flexível (Franco, 2007).

O número N engloba o Volume Total de Tráfego (Vt) durante o período, características do veículo de projeto Fator de Veículo (FV) e Fator Climático Regional (FR). Para que seja realizado um dimensionamento adequado a metodologia impõe alguns limites para os materiais constituintes de cada camada, apresentados no Quadro 1.

Quadro 1 - Fatores limitantes por camada

Camada	Fatores Limitantes
Subleito	- Expansão $\leq 2\%$. - CBR $\geq 2\%$.
Reforço do Subleito	- CBR maior que o do subleito. - Expansão $\leq 2\%$.
Sub-base	- CBR $\geq 20\%$. - Índice de grupo igual a 0. - Expansão $\leq 1\%$.
Base	- CBR $\geq 80\%$. - Expansão $\leq 0,5\%$. - Limite de liquidez ≤ 25 . - Índice de plasticidade ≤ 6 .

Fonte: DNIT, 2006.

Ainda tratando da base, para valores de N menores que 10^6 podem ser admitidos materiais com valores de CBR maiores ou iguais a 60%, e para casos em que o número de repetições do eixo simples padrão seja superior a 10^7 recomenda-se o aumento de 20% na espessura total acima da sub-base (H_{20}).

Com base no número N, a metodologia indica que deve-se definir o material mais indicado para a camada de revestimento. A Tabela 2 apresenta as espessuras mínimas recomendadas para os revestimentos asfálticos.

Tabela 2 - Espessura mínima recomendada para revestimentos asfálticos

Valores de N	$R_{\text{mín}}$ (cm)	Tipo de Revestimento
$N \leq 10^6$	2,5 – 3,0	Tratamentos superficiais betuminosos
$10^6 \leq N \leq 5 \cdot 10^6$	5,0	Revestimentos betuminosos
$5 \cdot 10^6 \leq N \leq 10^7$	7,5	Concreto betuminoso
$10^7 \leq N \leq 5 \cdot 10^7$	10,0	Concreto betuminoso
$N > 5 \cdot 10^7$	12,5	Concreto betuminoso

Fonte: Adaptado de DNIT, 2006.

Para que seja possível determinar as espessuras das camadas subjacentes deve-se ter conhecimento de como seus materiais constituintes se comporta estruturalmente. Para isso, são empregados os coeficientes de equivalência estrutural que é um valor empírico definido como a relação entre as espessuras de uma base granular e de uma camada de material semelhante. Adota-se como coeficiente estrutural padrão da base granular $K=1$.

A Tabela 3 apresenta os seguintes valores de coeficientes de equivalência estrutural para os diferentes materiais constitutivos do pavimento.

Tabela 3 - Coeficientes de equivalência estrutural

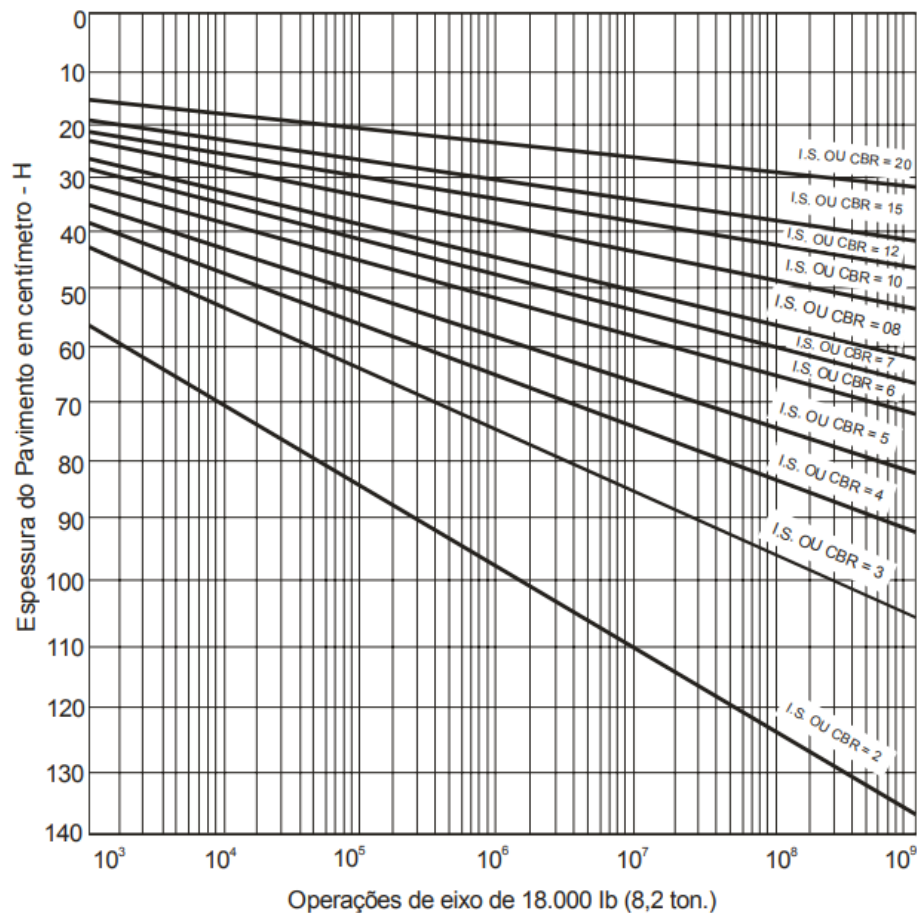
Componentes do Pavimento	Coefficiente K
Base ou revestimento de concreto betuminoso	2,00
Base ou revestimento pré-misturado a quente, de graduação densa	1,70
Base ou revestimento pré-misturado a frio, de graduação densa	1,40
Base ou revestimento pré-misturado a frio, de graduação densa	1,20
Camadas Granulares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

Fonte: Adaptado de DNIT, 2006.

De posse dos coeficientes de equivalência estrutural pode-se definir as espessuras totais necessárias do pavimento, acima do reforço do subleito e acima da sub-base por meio da Equação 6, ou utilizando o ábaco de dimensionamento apresentado na Figura 8. As curvas de dimensionamento são apresentadas no ábaco em função do material granular (Balbo, 2007).

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

Figura 8 - Ábaco para dimensionamento de pavimentos



Fonte: DNIT, 2006.

Uma vez determinadas as espessuras totais e de posse dos coeficientes de equivalência estrutural prossegue-se o dimensionamento determinando as espessuras da base, sub-base e reforço do subleito (quando houver necessidade). Para isso são utilizadas as inequações apresentadas nas Equação 7, Equação 8 e Equação 9. A Figura 9 mostra a representação gráfica das espessuras das camadas.

$$R * K_R + B * K_B \geq H_{20} \quad (\text{Equação 7})$$

$$R * K_R + B * K_B + h_{20} * K_S \geq H_n \quad (\text{Equação 8})$$

$$R * K_R + B * K_B + h_{20} * K_S + h_n * K_{Ref} \geq H_m \quad (\text{Equação 9})$$

Onde:

R = Espessura do revestimento;

K_R = Coeficiente de equivalência estrutural do revestimento;

B = Espessura da base;

K_B = Coeficiente de equivalência estrutural da base;

H₂₀ = Espessura acima da sub-base;

h₂₀ = Espessura da sub-base;

K_S = Coeficiente de equivalência estrutural da sub-base;

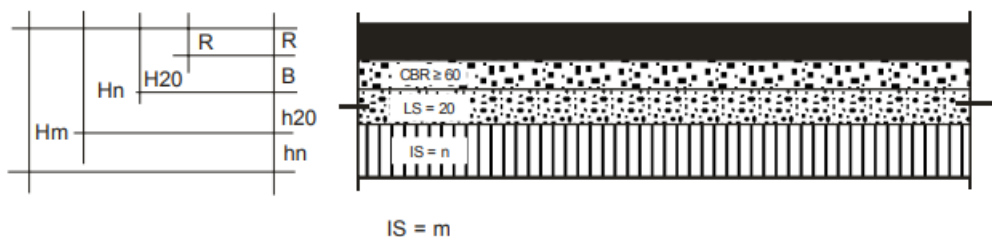
H_n = Espessura acima do reforço do subleito;

h_n = Espessura do reforço do subleito;

K_{ref} = Coeficiente de equivalência estrutural do subleito;

H_m = Espessura acima do subleito.

Figura 9 - Representação das espessuras do pavimento



Fonte: DNIT, 2006.

2.3.2 Método de Dimensionamento Nacional de Pavimentos – MeDiNa

O MeDiNa é *software* computacional que realiza a verificação do dimensionamento de estruturas de pavimentos mecanístico-empírico, por meio da Análise Elástica de Múltiplas Camadas (AEMC). Foi desenvolvido entre 2015 e 2018 por meio de uma parceria entre o Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR) e o Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação

e Pesquisa de Engenharia, da Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE). O desenvolvimento teve também a colaboração do Centro de Pesquisas da Petrobrás (CENPES) e de diversas Universidades do Brasil, com o intuito de dimensionar e verificar estruturas de pavimentos já dimensionados por meio da análise mecânica (DNIT, 2018).

O novo método foi batizado em homenagem ao engenheiro e professor Jacques de Medina, que ao longo dos anos no trabalho e nos estudos e ao realizar seu mestrado nos EUA foi o grande responsável pela introdução da mecânica dos pavimentos no Brasil (DNIT, 2018).

Diferente do método do DNER a rotina presente no MeDiNa realiza uma análise mecanicista da estrutura do pavimento durante o dimensionamento, levando em conta as características mecânicas dos materiais das camadas constituintes. Com isso, o *software* consegue analisar a fadiga utilizando a relação entre a deformação específica resiliente e vida de fadiga dos materiais.

Uma base de dados confiável é fator preponderante para o bom funcionamento do *software* MeDiNa, esses dados devem ser sempre coletados através de ensaios em laboratório ou em campo nas jazidas de onde serão retirados os materiais utilizados nas camadas de reforço do subleito, sub-base e base. Além disso, o MeDiNa define parâmetros mínimos utilizados na dosagem de bases estabilizadas quimicamente e misturas asfálticas (DNIT, 2018).

O manual de utilização do *software* traz algumas hipóteses e considerações com base na solução de problemas de elasticidade linear em sistemas de multicamadas e contínuos, são elas:

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

Pitangui (2019), lembra que para execução dos cálculos de danos no pavimento, deve-se realizar principalmente o ajuste adequado da função de transferência. No MeDiNa esse ajuste

foi proposto por Fritzen (2016) que identificou e definiu matematicamente a curva sigmoideal com melhor representação evolutiva da área trincada de segmentos monitorados. Com isso para todas as seções avaliadas foram multiplicados fatores de deslocamento aos valores de Número N onde existia leituras de área trincada, tendo como objetivo a diminuição do erro entre curva padrão e área trincada. A Equação 10 apresenta o Número N ajustado.

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

Onde:

N' = Número N ajustado;

N = Número de repetições do eixo padrão quando foi realizada a medição da área trincada;

fS = Fator de deslocamento atribuído de forma aleatória até minimizar o erro entre a evolução da área trincada com a curva sigmoide padrão.

Uma vez definida a curva é preciso correlacionar os dados de área trincada com informações estruturais do pavimento. O dano médio é estimado numa malha distribuída em 20 pontos da camada de revestimento, isso quer dizer que o programa calcula para cada período, o dano médio distribuído nestes 20 pontos através da divisão de uma aplicação de carga do eixo simples padrão pelo número permissível de aplicações de eixos de carga, conforme a Equação 11 (DNIT, 2018).

$$D_{méd} = \frac{1}{20} \sum \left(\frac{1}{N} \right)_{t,c} \quad (\text{Equação 11})$$

Com isso obtemos a função de transferência, que transforma o dano médio em 20 pontos em uma previsão de área trincada através de duas constantes C_1 e C_2 como mostra a Equação 12 e visualizada na Figura 10.

$$fS = C_1 * (D_{méd})^{C_2} \quad (\text{Equação 12})$$

Onde:

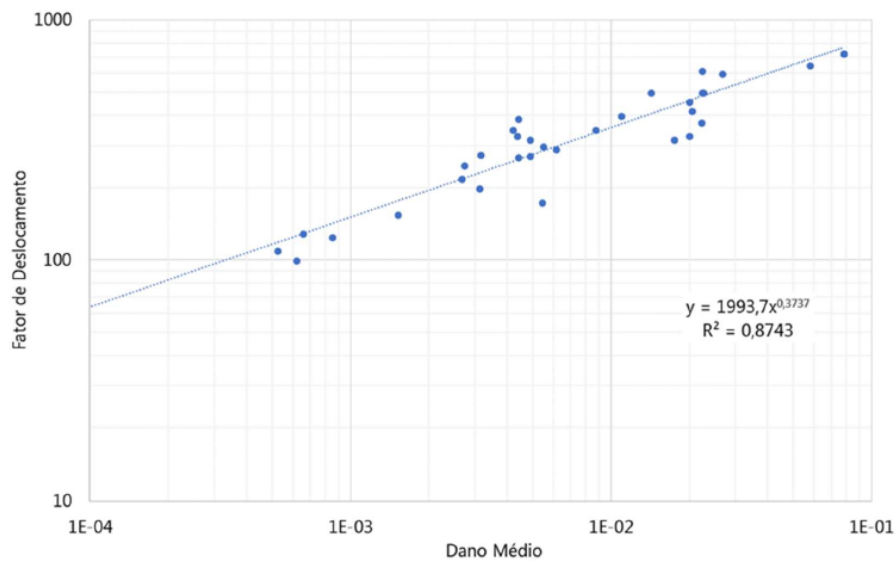
fS = Fator de deslocamento

$C_1 = 1993,7$

$C_2 = 0,3737$

$D_{méd}$ = Dano médio

Figura 10 - Fator de deslocamento em função do dano médio



Fonte: DNIT, 2018.

O MeDiNa analisa a fadiga utilizando os coeficientes experimentais K_1 e K_2 utilizando a relação entre a deformação específica resiliente e vida de fadiga. Como descrito na Equação 13.

$$N_{fad} = K_1 * \varepsilon_t^{K_2} \quad (\text{Equação 13})$$

Onde:

N_{fad} = Vida de fadiga

ε_t = Deformação específica resiliente

A partir das equações apresentadas e com base nos coeficientes cadastrados, o MeDiNa calcula a área trincada prevendo a ruptura da estrutura proposta para o pavimento.

O MeDiNa tem como critérios de falha o Afundamento de Trilha de Roda (ATR) e a área trincada do revestimento ao fim da sua vida útil estimada. O Quadro 2 apresenta os critérios

de falha para MeDiNa de acordo com o tipo de via definidos pela hierarquia dos sistemas do DNIT.

Quadro 2 - Critério de falha MeDiNa

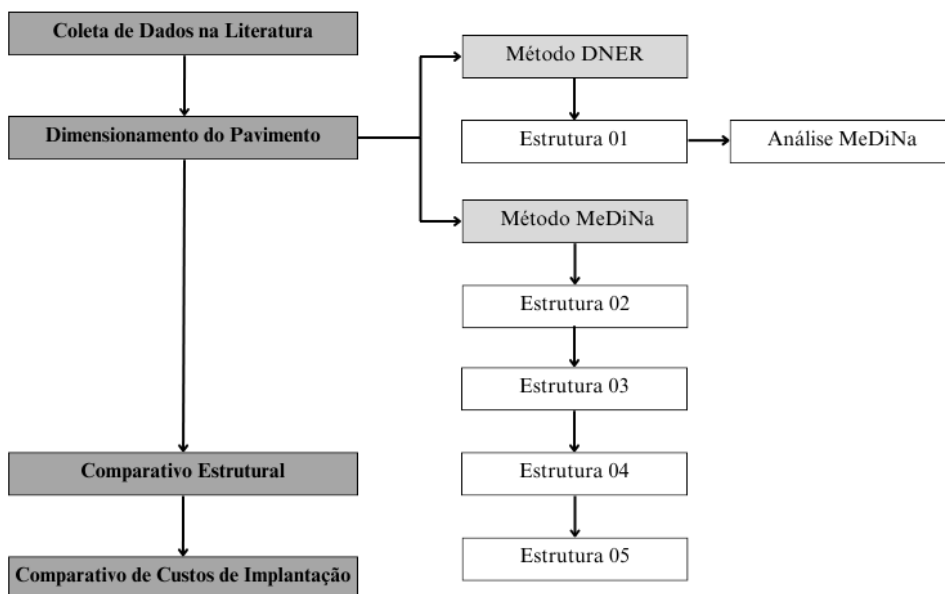
Fenômeno	Limite
Deformação Permanente	Sistema Arterial Principal - 10 mm Sistema Arterial Primário - 13 mm Sistema Arterial Secundário - 13 mm Sistema Coletor Primário - 20 mm Sistema Coletor Secundário - 20 mm
Área Trincada	Sistema Arterial Principal - 30 % Sistema Arterial Primário - 30 % Sistema Arterial Secundário - 30 % Sistema Coletor Primário - 30 % Sistema Coletor Secundário - 30 %

Fonte: DNIT, 2018.

3 METODOLOGIA

Neste capítulo são descritos os procedimentos metodológicos adotados durante a pesquisa, ilustrados no fluxograma da Figura 11.

Figura 11 - Fluxograma das atividades desenvolvidas



Fonte: O autor, 2024.

De forma resumida, foram dimensionadas e avaliadas estruturas de pavimentos pelo método do DNER e pelo método MeDiNa, fixando os materiais de base, sub-base e subleito e variando o tipo de material utilizado na camada de revestimento: misturas asfálticas virgens (contendo somente materiais novos) e misturas asfálticas contendo teores de RAP na sua composição.

As nomenclaturas das estruturas dimensionadas nessa pesquisa são apresentadas no Quadro 3, que também indica as características da camada de revestimento e o método de dimensionamento utilizado.

Quadro 3 - Nomenclaturas e descrição das estruturas dimensionadas

Nomenclatura das Estruturas	Camada de revestimento	Método de Dimensionamento
Estrutura 01	Mistura asfáltica virgem	DNER 81
Estrutura 02	Mistura asfáltica virgem	MeDiNa
Estrutura 03	Mistura asfáltica contendo 10% de RAP	MeDiNa
Estrutura 04	Mistura asfáltica contendo 30% de RAP	MeDiNa
Estrutura 05	Mistura asfáltica contendo 50% de RAP	MeDiNa

3.1 COLETA DE DADOS NA BIBLIOGRAFIA

Inicialmente, foi feita uma busca na literatura para a coleta de dados de características físicas e mecânicas dos materiais considerados na composição de cada estrutura estudada. Algumas informações também foram obtidos diretamente no banco de dados do MeDiNa.

Para o subleito de todas as estruturas foi adotado um solo com característica argilosa de comportamento lateríticos (LG') de acordo com a metodologia Miniatura Compactação Tropical (MCT) estudado por Zago (2016). Este material foi classificado como argila inorgânica de baixa plasticidade de acordo com o Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS). A densidade máxima, umidade ótima e o CBR desse solo foram obtidos por Zago (2016) por meio da norma DNER-ME 049/1994 e estão descritos na Tabela 4.

Tabela 4 - Parâmetros solo subleito

Densidade máxima - Energia normal	1,669 g/cm ³
Umidade ótima - Energia normal	18,2 %
CBR	11,0 %

Fonte: Zago, 2016.

Zago (2016), obteve o módulo de resiliência e os parâmetros de deformação permanente por meio de ensaios triaxiais de cargas repetidas, normatizados pela norma DNIT 134/2018-ME e REDE 03 (PETROBRÁS, 2010), respectivamente. Os dados são apresentados na Tabela 5

Tabela 5 - Parâmetros de resiliência e deformação permanente do solo do subleito

Módulo de Resiliência não Linear	
Coefficiente de Regressão k1	181,01
Coefficiente de Regressão k2	0,32
Coefficiente de Regressão k3	-0,53
Deformação Permanente	
Coefficiente de Regressão Ψ 1	0,385
Coefficiente de Regressão Ψ 2	-0,861
Coefficiente de Regressão Ψ 3	1,523
Coefficiente de Regressão Ψ 4	0,075

Fonte: Zago, 2016.

Para composição das camadas de base e sub-base da estrutura padrão foram utilizados materiais com composição granular presente no banco de dados do *software* MeDiNa. Para a base foi utilizada a “Brita graduada – C5”, e como constituinte da sub-base foi utilizado a “Brita graduada – C6”, material semelhante ao macadame seco. Suas propriedades estão apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6 - Parâmetros dos materiais utilizados na base e sub-base

Parâmetros	Brita graduada – C5	Brita graduada – C6
	Base	Sub-base
Coefficiente de Poisson	0,35	0,35
Módulo de Resiliência (Mpa)	381,0	278,0
Massa Específica (g/cm ³)	2,223	2,025
Abrasão Los Angeles (%)	43,0	43,0
Umidade Ótima (%)	5,0	7,5
Coefficiente de Regressão Ψ 1	0,0868	0,1294
Coefficiente de Regressão Ψ 2	-0,2801	-0,0647
Coefficiente de Regressão Ψ 3	0,8929	1,1000
Coefficiente de Regressão Ψ 4	0,0961	0,0735

Fonte: MeDiNa, 2023.

Para as camadas de revestimento das estruturas propostas foram utilizadas misturas asfálticas recicladas com a incorporação de diferentes teores de RAP e sem a adição de agentes rejuvenescedores estudadas por Arruda (2021). A autora analisou misturas asfálticas com teores de 0%, 10%, 30% e 50% de RAP em sua composição, determinando parâmetros de massa específica, módulo de resiliência e vida de fadiga. Arruda (2021) utilizou as normas (AASHTO-T-209/2012), (NBR 16018/2011) e (DNIT-ME 183/2018) para a obtenção desses respectivos parâmetros. Os resultados estão apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 - Parâmetros das misturas asfálticas utilizadas

Parâmetro	RAP 0%	RAP 10%	RAP 30%	RAP 50%
Módulo de Resiliência (MPa)	6295	7326	9692	11287
Massa Específica (g/cm ³)	2,34	2,34	2,34	2,34
Coefficiente de Regressão k1	2,00E-12	5,12E-02	6,14E-02	2,41E-02
Coefficiente de Regressão k2	-3,904	-1,139	-1,137	-1,230

Fonte: Arruda, 2021.

3.2 DIMENSIONAMENTO

Para dimensionar as estruturas dos pavimentos utilizou-se a rotina empírica do método do DNER e a rotina mecanística-empírica presente no *software* MeDiNa, versão 1.1.9.0 de abril de 2023. Visando a representação de um tráfego pesado o número de repetições do eixo simples padrão N ficou fixado em $5,00 \times 10^7$ para o dimensionamento de todas as estruturas propostas, assim como o tipo de via estabelecido como um sistema arterial principal.

Os materiais constituintes das camadas subjacentes também foram fixados com o intuito de comparar a influência da espessura ou adição de novas camadas em uma estrutura inicialmente dimensionada através do método do DNER.

3.2.1 Dimensionamento Método do DNER

Para realizar o dimensionamento da Estrutura 01 utilizando a metodologia do DNER foi desenvolvida uma planilha automatizada no *software Excel*. Foram utilizados como dados de entrada na planilha o número de solicitações, a espessura do revestimento, o CBR do subleito e os coeficientes de equivalência estrutural da base e sub-base da estrutura a ser dimensionada. A Figura 12 mostra a planilha de dimensionamento.

Figura 12 - Planilha de dimensionamento DNER (1981)

DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTO FLEXÍVEL MÉTODO DNER (1981)			
Número de Repetições do Eixo Padrão de 8,2 ton (N):	50000000	Espessura Revestimento:	10 cm
CBR Sub-base:	20 %	KR:	2
CBR Ref. Subleito:	0 %	KB:	1
CBR Subleito:	11 %	KSB:	1
		KREF:	0
BASE:			
H20=	36,52 cm	B=	16,52 cm
		Espessura da Base:	17 cm
SUB-BASE:			
Hn=	43,51	SB=	6,51 cm
		Espessura da Sub-Base:	15 cm
REFORÇO DO SUBLEITO:			
Hm=	0,00	REF =	0,00 cm
		Espessura do Ref. Subleito:	0 cm

Fonte: O autor, 2024.

De posse do número N foi determinado a espessura do revestimento e inserido os dados de entrada, destacado em amarelo na planilha. Com isso, foram obtidas as espessuras das camadas de base e sub-base da estrutura destacado na cor verde na planilha.

Vale salientar que como o N é maior que 10^7 foi acrescido 20% no valor d da espessura total acima da sub-base (H_{20}). Para a sub-base como o valor calculado foi menor que o mínimo exigido pelo método adotou-se a espessura mínima.

3.2.2 Dimensionamento MeDiNa

A determinação das espessuras das camadas por meio do novo método de dimensionamento nacional utilizando o *software* MeDiNa, seguiu uma sequência de etapas de inserção de dados e análises descritas a seguir.

Para o dimensionamento da Estrutura 02 o primeiro passo foi configurar o *software* para trabalhar em um projeto de pavimento novo, uma vez que ele fornece também a opção de realizar projetos de reforços em pavimentos já existentes através de uma retroanálise de dados. Feito isso, foi inserido os dados referentes ao tráfego, nesse caso o N. A Figura 13 mostra a janela de inserção do número N.

Figura 13 - Janela de inserção dos dados de tráfego

+ EIXO PADRÃO RODOVIÁRIO	
- DADOS DO TRÁFEGO	
Tipo de Via:	Sistema Arterial Principal
VMD (1º ano):	13699
FV:	1.000
N anual (1º ano):	5,00e+06
% Veículos na faixa de projeto:	100
N Anual da faixa:	5,00e+06
Taxa de crescimento (%):	0,0
Período de projeto (anos):	10
N Total:	5,00e+07

Fonte: Software MeDiNa, 2023.

Posteriormente foi determinada a estrutura do pavimento e ser inseridos os dados referentes as propriedades mecânicas dos materiais constituintes das camadas como: tipo, espessura, coeficiente de Poisson, módulo de resiliência, massa específica e umidade ótima, além dos coeficientes de regressão da curva de fadiga para o revestimento e deformação permanente para das camadas subjacentes. A Figura 14 apresenta a tela inicial do MeDiNa onde observa-se a descrição dos materiais da Estrutura 02 e o resumo dos dados mecânicos de cada umas delas.

Figura 14 - Tela inicial do MeDiNa

Projeto Editar Análise Ajuda

ESTRUTURA MODELAGEM RESULTADOS

RESPONSÁVEL: CARLOS HENRIQUE EMPRESA: UFRPE

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

Alterar Estrutura >>

CAMADA	DESCRIÇÃO DO MATERIAL	TIPO	ESPESSURA (cm)	MÓDULO (MPa)	COEFICIENTE DE POISSON
>> 1 <<	CONCRETO ASFÁLTICO	Concreto Asfáltico - faixa C - RAP 0%	10,0	6295	0,35
2	CONCRETO ASFÁLTICO	Concreto Asfáltico - faixa C - RAP 0%	10,0	6295	0,35
3	MATERIAL GRANULAR	Brita Graduada - Gnaisse C5	17,0	381	0,35
4	MATERIAL GRANULAR	Brita Graduada - Gnaisse C6	15,0	278	0,35
SL	SUBLEITO	Argila Arenosa LG'	0,0	Resiliente Não Linear	0,45

+ EIXO PADRÃO RODOVIÁRIO	
- DADOS DO TRÁFEGO	
Tipo de Via:	Sistema Arterial Principal
VMD (1º ano):	13699
FV:	1.000
N anual (1º ano):	5,00e+06
% Veículos na faixa de projeto:	100
N Anual da faixa:	5,00e+06
Taxa de crescimento (%):	0,0
Período de projeto (anos):	10
N Total:	5,00e+07

Fonte: Software MeDiNa, 2023.

A inserção dos dados como: coeficiente de Poisson, módulo de resiliência massa específica e os coeficientes de regressão referente a cada camada constituinte de todas as estruturas dimensionadas foi realizada por meio da janela de propriedades da camada, como mostrado a Figura 15, para a Estrutura 02.

Figura 15 - Janela de Propriedades das camadas

The screenshot shows the 'Propriedades da Camada 1' window. On the left, there is a list of layers under 'BASE DE DADOS'. The selected layer is 'Concreto Asfáltico - faixa C - RAP 0%'. On the right, the properties for 'CONCRETO ASFÁLTICO' are displayed in a table:

CONCRETO ASFÁLTICO	
Material	Concreto Asfáltico - faixa C - RAP 0%
Parâmetros	
Espessura (cm)	10,0
Coeficiente de Poisson	0,35
Contato	Aderido
Módulo (MPa)	
Modelo Constituinte	Resiliente Linear
Módulo (MPa)	6295
Características	
Norma ou Especificação	DNIT ES 31
Abrasão Los Angeles (%)	...
Faixa Granulométrica	...
Volume de vazios (%)	...
Teor de asfalto (%)	...
Resistência à tração CD (MPa)	...
Massa específica (g/cm³)	2,34
Tipo de CAP	...
Curva de Fadiga	
Modelo:	k1 .(et ^ k2)
Coeficiente de Regressão (k1):	2e-12
Coeficiente de Regressão (k2):	-3.904
Classe de Fadiga:	4
FFM (100µ a 250µ):	1,25

At the bottom of the window, there are buttons for 'Excluir', 'Atualizar', 'Salvar', 'OK', and 'Cancel'.

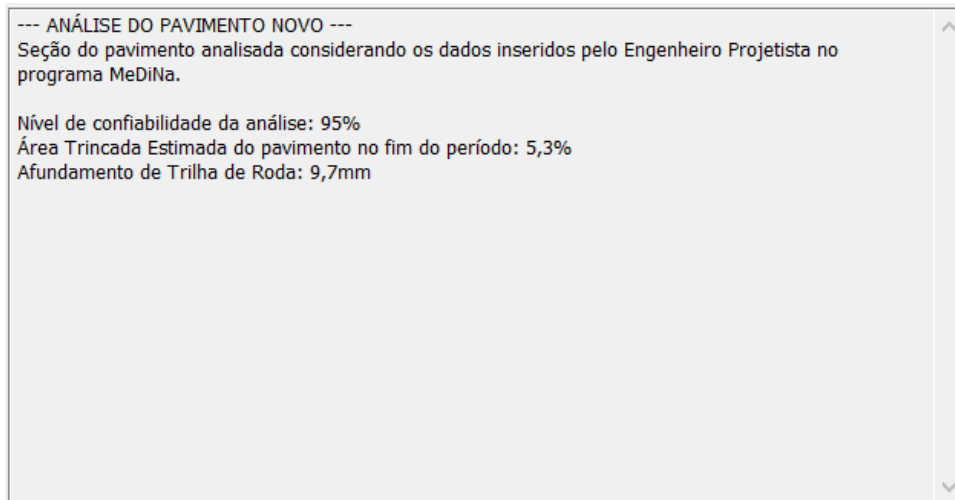
Fonte: Software MeDiNa, 2023.

É importante ressaltar que os resultados do dimensionamento estão inteiramente relacionados à confiabilidade dos dados inseridos no *software* pelo projetista. Evidenciando a necessidade de ensaiar e conhecer todas as propriedades dos componentes das camadas do pavimento, para que venha a representar de forma mais fidedigna possível seu comportamento em campo.

Após inserir todos os dados, foi feita uma análise geral de cada estrutura, por meio do relatório gerados pelo *software*, conforme exemplo mostrado na Figura 16, referente à Estrutura 02, e em seguida realizado o dimensionamento da camada de interesse que nesse caso é a de revestimento com base nos critérios que estão incluído na rotina do MeDiNa.

A confiabilidade da análise realizada pelo *software* varia de acordo com o tipo de via, assim como os critérios de falha limitada em 30% de área trincada ao fim do tempo de projeto e ATR variado entre 10 mm e 20 mm dependendo do tipo de via analisada.

Figura 16 - Janela de resultado da análise da estrutura proposta



Fonte: *Software* MeDiNa, 2023.

Com o dimensionamento realizado acessando a aba “resultados” foi possível ter acesso a um conjunto de informações sobre estrutura dimensionada, como a evolução da área trincada e ATR de acordo com o número N (Figura 17), as bacias defletométricas (Figura 18) ou ainda ter acesso a um relatório geral com todas as informações do dimensionamento e resultados podendo ser impresso para controle em campo (Figura 19).

Figura 17 - Evolução mensal de área trincada e ATR

<input checked="" type="button" value="Danos Mensais"/> <input type="button" value="ATR"/> <input type="button" value="Bacias de campo"/> <input type="button" value="Completo"/>			
Mês	N equiv	ÁREA TRINCADA (%)	ATR (mm)
1	4,167e+05	0,91%	6,72
2	8,333e+05	1,15%	7,09
3	1,250e+06	1,31%	7,32
4	1,667e+06	1,45%	7,48
5	2,083e+06	1,56%	7,61
6	2,500e+06	1,66%	7,72
7	2,917e+06	1,75%	7,82
8	3,333e+06	1,83%	7,90
9	3,750e+06	1,91%	7,97
10	4,167e+06	1,98%	8,04
11	4,583e+06	2,05%	8,10
12	5,000e+06	2,11%	8,15

Fonte: *Software* MeDiNa, 2023.

Figura 18 - Bacias defletométricas

Danos Mensais		ATR		Bacias de campo		Completo						
Camada	Equipamento	Raio (cm)	Carga (ton)	Sensor 1 0 cm	Sensor 2 20 cm	Sensor 3 30 cm	Sensor 4 45 cm	Sensor 5 60 cm	Sensor 6 90 cm	Sensor 7 120 cm	Sensor 8 150 cm	Sensor 9 180 cm
1	Viga Benkelman	10,8	8,20	16	14	12	10	8	6	4	3	3
1	FWD	15,0	4,0	16	13	11	9	7	4	3	2	2
2	Viga Benkelman	10,8	8,20	30	24	19	14	10	6	5	4	4
3	Viga Benkelman	10,8	8,20	43	29	22	14	11	8	6	5	5
4	Viga Benkelman	10,8	8,20	48	30	22	15	12	9	7	6	5
5	Viga Benkelman	10,8	8,20	48	30	22	15	12	9	7	6	5

Fonte: *Software MeDiNa*, 2023.

Figura 19 - Relatório geral do dimensionamento

Danos Mensais
ATR
Bacias de campo
Completo

Tipo de via: **Sistema Arterial Principal**
 Nível de confiabilidade: 95%
 Período de projeto: 10 anos.

Análise realizada em 17/02/2024 às 19:39:09 no modo: **Pavimento Novo (Nível A)**
 Área trincada prevista no pavimento no fim do período: 5,3%
 Afundamento de Trilha de Roda previsto no pavimento no fim do período: 9,7mm

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

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

Cam	Material	Espessura (cm)	Módulo de Resiliência	Coeff de Poisson
1	CONCRETO ASFÁLTICO Concreto Asfáltico - faixa C - RAP 0%	10,0	Resiliente Linear MR = 6295 MPa	0,35
2	CONCRETO ASFÁLTICO Concreto Asfáltico - faixa C - RAP 0%	10,0	Resiliente Linear MR = 6295 MPa	0,35
3	MATERIAL GRANULAR Brita Graduada - Gnaisse C5	17,0	Resiliente Linear MR = 381 MPa	0,35
4	MATERIAL GRANULAR Brita Graduada - Gnaisse C6	15,0	Resiliente Linear MR = 278 MPa	0,35
5	SUBLEITO Argila Arenosa LG	SL	Resiliente Não Linear MR = 345 MPa (1º mês) k1 = 181,01 k2 = 0,320 k3 = -0,530 k4 = 0,000	0,45

Fonte: *Software MeDiNa*, 2023.

3.3 ESTIMATIVA DOS INVESTIMENTOS PARA IMPLANTAÇÃO

As estruturas foram orçadas considerando um quilômetro de via em pista simples, com geometria básica de 7,2 m de pista e 5,0 m de acostamento. Na estimativa de investimentos foram considerados os custos associados a produção dos materiais utilizados e construção do pavimento.

Para isso elaborou-se composições unitária com base no Sistema de Custos Referenciais de Obras (SICRO) do DNIT referente ao mês de outubro de 2023 para o estado de Pernambuco.

As composições unitárias usadas foram as seguintes:

- 4011209 - Regularização do subleito;
- 4011279 - Sub-base de macadame seco com brita comercial;
- 4011276 - Base ou de brita graduada com brita comercial;
- 4011351 - Imprimação com asfalto diluído;
- 4011353 - Pintura de ligação;
- 4011463 - Concreto asfáltico - faixa C - areia e brita comerciais;
- 6416078 - Usinagem de concreto asfáltico - faixa C - areia e brita comerciais;
- 6416098 - Usinagem de concreto asfáltico reciclado em usina fixa com adição de material fresado e brita comercial.

É importante ressaltar que para as misturas asfálticas foi montada uma composição de custos com base na dosagem utilizada por Arruda (2021) em sua pesquisa.

Durante os cálculos foi considerado apenas os custos diretos para implantação da rodovia, os valores referentes a Benefícios e Despesas Indiretas (BDI) e o custo para execução do canteiro de obras, por exemplo, não foi considerado. A Tabela 8 apresenta os custos unitários para os serviços utilizados.

Tabela 8 - Custo unitário por serviço

Serviços	Custo Unitário	Unidade
Regularização do subleito	1,11	m ²
Sub-base em Macadame Seco (MS)	173,76	m ³
Base em Brita Graduada Simples (BGS)	195,90	m ³
Imprimação em asfalto diluído	0,37	m ²
Pintura de ligação	0,28	m ²
Concreto Asfáltico - faixa C - RAP 0%	299,01	t
Concreto Asfáltico Reciclado - faixa C - RAP 10%	262,70	t
Concreto Asfáltico Reciclado - faixa C - RAP 30%	221,83	t
Concreto Asfáltico Reciclado - faixa C - RAP 50%	176,39	t

Fonte: SICRO, 2023.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos no dimensionamento das estruturas propostas pelo método DNER e pelo *software* MeDiNa, além da análise realizada na estrutura dimensionada pela metodologia empírica. Por fim será apresentado um estudo do custo de implantação de cada uma das estruturas, além de uma análise de custo de implantação em relação a vida útil do pavimento.

4.1 RESULTADOS DO DIMENSIONAMENTO

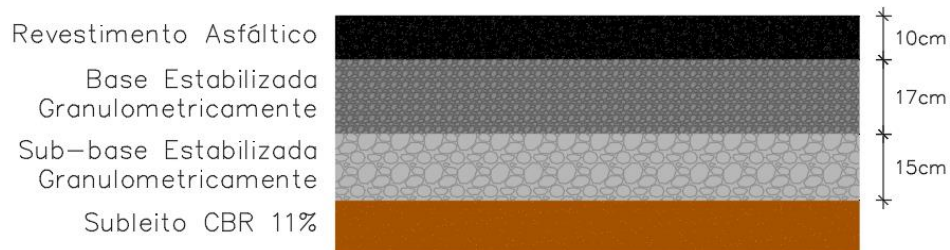
Conforme apresentado no capítulo 3 as estruturas propostas foram dimensionadas para um tráfego com número $N = 5,00 \times 10^7$, e considerando um CBR de 11% para o subleito compactado a energia normal. É importante destacar que segundo o método do DNER a espessura mínima adotada para camadas granulares é de 15 cm. Os resultados do dimensionamento para a Estrutura 01 estão apresentados na Tabela 9 e ilustrados na Figura 20.

Tabela 9 - Resultados dimensionamento Estrutura 01 método DNER

Camada	Tipo do Material	Espessura (cm)
Revestimento	Revestimento Asfáltico	10,0
Base	Estabilizada Granulometricamente	17,0
Sub-base	Estabilizada Granulometricamente	15,0

Fonte: O autor, 2024.

Figura 20 - Seção Estrutura 01



Fonte: O autor, 2024.

Com o intuito de realizar uma análise mecânica a Estrutura 01 foi inserida no *software* MeDiNa, para isso, utilizou-se como camada de revestimento o concreto asfáltico presente no seu banco de dados “Classe 4”, mais indicado para o tráfego utilizado durante o dimensionamento. Com isso, foi possível observar que a estrutura falha com relação ao afundamento de trilha de roda e pouco após os dois primeiros anos de utilização a mesma já estaria comprometida quanto a fadiga. A Tabela 10 mostra a evolução do Afundamento de Trilha de Roda (ATR) e da área trincada da Estrutura 01.

Os resultados apresentados evidenciam a falha da Estrutura 01 que no primeiro mês já apresenta 12,72 mm de ATR tendo em vista o limite de 10,0 mm para via arterial principal. Assim, a estrutura projetada seguindo a metodologia do DNER seria ineficiente para esta solicitação de tráfego e com estes materiais constituintes.

Tabela 10 - Evolução da área trincada e ATR para a Estrutura 01

Mês	N_{eq}	Área Trincada (%)	ATR (mm)
1	4,17E+05	3,34	12,72
6	2,50E+06	7,91	14,61
12	5,00E+06	13,40	15,41
24	1,00E+07	28,86	16,26
36	1,50E+07	50,12	16,78
60	2,50E+07	93,12	17,46
120	5,00E+07	99,00	18,40

Fonte: O autor, 2024.

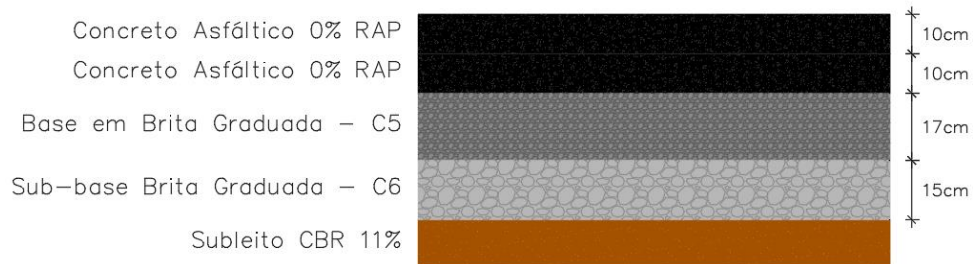
A composição da Estrutura 02 dimensionada pelo *software* MeDiNa, está apresentada na Tabela 11 e ilustrada na Figura 21. Essa estrutura possui camada de revestimento em concreto asfáltico virgem sem adição de RAP, estudado por Arruda (2021). As espessuras e materiais constituintes de suas camadas subjacentes são as mesmas da estrutura anterior.

Como o revestimento dimensionado foi superior a 15,0 cm de espessura, a rotina de dimensionamento do MeDiNa determina que seja dividido em duas camadas para uma melhor eficiência durante a análise do *software*. Assim a camada de concreto asfáltico de 20 cm foi subdividida em duas, com 10 cm cada. O revestimento teve sua espessura duas vezes maior se comparada a estrutura anterior dimensionada com o DNER, tais resultados corroboram com os estudos realizados por Santos e Silva (2021) e Rodrigues (2023) que verificaram situações semelhantes.

Tabela 11 - Resultados dimensionamento Estrutura 02 MeDiNa

Camada	Tipo do Material	Espessura (cm)
Revestimento	Concreto Asfáltico - faixa C - RAP 0%	10,0
Revestimento	Concreto Asfáltico - faixa C - RAP 0%	10,0
Base	Brita Graduada - Gnaisse C5	17,0
Sub-base	Brita Graduada - Gnaisse C6	15,0

Fonte: O autor, 2024.

Figura 21 - Seção Estrutura 02

Fonte: O autor, 2024.

Na Tabela 12 é apresentada a evolução do ATR e da área trincada da Estrutura 02. Nota-se que a Estrutura 02 ao chegar no final do tempo de projeto (120º mês ou 10 anos) apresentará uma área trincada de apenas 5,29% e um ATR de 9,75 mm, ambos dentro dos limites impostos para via arterial principal.

Tabela 12 - Evolução da área trincada e ATR para a Estrutura 02

Mês	N_{eq}	Área Trincada (%)	ATR (mm)
1	4,17E+05	0,91	6,72
6	2,50E+06	1,66	7,72
12	5,00E+06	2,11	8,15
24	1,00E+07	2,71	8,60
36	1,50E+07	3,16	8,88
60	2,50E+07	3,87	9,24
120	5,00E+07	5,29	9,75

Fonte: O autor, 2024.

Para as estruturas com revestimento contendo diferentes teores de RAP, os materiais e espessuras das camadas subjacentes foram fixados e se mantiveram os mesmos das estruturas anteriores.

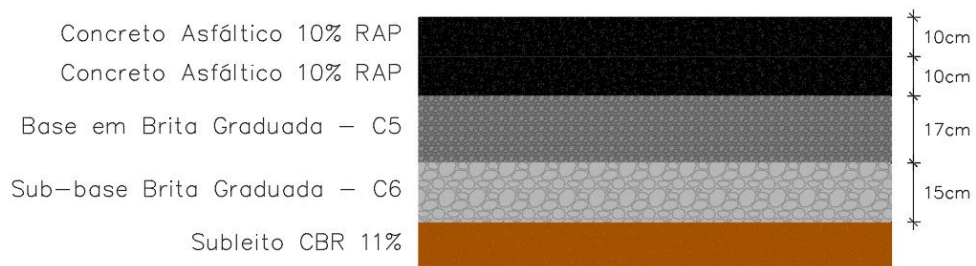
A Tabela 13 mostra o resultado do dimensionamento para a Estrutura 03 ilustrados na Figura 22, que contêm 10% de RAP na camada de revestimento. Nota-se espessuras de camadas semelhantes às da Estrutura 02, diferindo apenas no tipo de mistura asfáltica utilizada na camada de revestimento, devido o teor de RAP diferente.

Tabela 13 - Resultados dimensionamento Estrutura 03 MeDiNa

Camada	Tipo do Material	Espessura (cm)
Revestimento	Concreto Asfáltico Reciclado - faixa C - RAP	10,0
Revestimento	Concreto Asfáltico Reciclado - faixa C - RAP	10,0
Base	Brita Graduada - Gnaisse C5	17,0
Sub-base	Brita Graduada - Gnaisse C6	15,0

Fonte: O autor, 2024.

Figura 22 - Seção Estrutura 03



Fonte: O autor, 2024.

A Tabela 14 apresenta a evolução do ATR e da área trincada da Estrutura 03. Essa estrutura chegará ao final do tempo de projeto com área trincada igual a 28,62% e ATR de 9,25 mm, ambos dentro dos limites impostos para o tipo de via.

Tabela 14 - Evolução da área trincada e ATR para a Estrutura 03

Mês	N_{eq}	Área Trincada (%)	ATR (mm)
1	4,17E+05	1,85	6,38
6	2,50E+06	3,58	7,33
12	5,00E+06	4,82	7,74
24	1,00E+07	6,89	8,16
36	1,50E+07	8,89	8,43
60	2,50E+07	13,32	8,77
120	5,00E+07	28,62	9,25

Fonte: O autor, 2024.

A Estrutura 04 contém 30% de RAP na composição da mistura asfáltica utilizada em seu revestimento. A Tabela 15 apresenta o resultado do dimensionamento para a respectiva estrutura ilustrada na Figura 23.

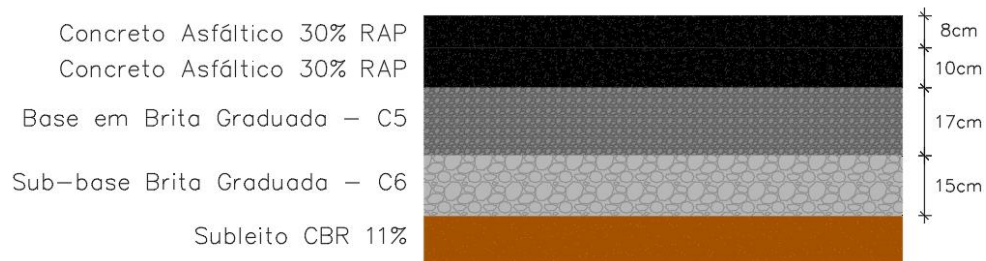
A Estrutura 04 é composta por duas camadas de concreto asfáltico uma de 10,0 cm e outra de 8,0 cm somando 18,0 cm de revestimento no total

Tabela 15 - Resultados dimensionamento Estrutura 04 MeDiNa

Camada	Tipo do Material	Espessura (cm)
Revestimento	Concreto Asfáltico Reciclado - faixa C - RAP	8,0
Revestimento	Concreto Asfáltico Reciclado - faixa C - RAP	10,0
Base	Brita Graduada - Gnaisse C5	17,0
Sub-base	Brita Graduada - Gnaisse C6	15,0

Fonte: O autor, 2024.

Figura 23 - Seção Estrutura 04



Fonte: O autor, 2024.

A Tabela 16 apresenta a evolução do ATR e da área trincada da Estrutura 04. A estrutura chega ao final do tempo de projeto com área trincada igual a 21,86% e ATR de 9,42 mm, ambos dentro dos limites impostos para o tipo de via.

Tabela 16 - Evolução da área trincada e ATR para a Estrutura 04

Mês	N_{eq}	Área Trincada (%)	ATR (mm)
1	4,17E+05	1,72	6,49
6	2,50E+06	3,28	7,46
12	5,00E+06	4,37	7,87
24	1,00E+07	6,10	8,31
36	1,50E+07	7,71	8,57
60	2,50E+07	11,06	8,92
120	5,00E+07	21,86	9,42

Fonte: O autor, 2024.

Por fim, a Estrutura 05 possui 50% de RAP na composição da mistura asfáltica utilizada em seu revestimento.

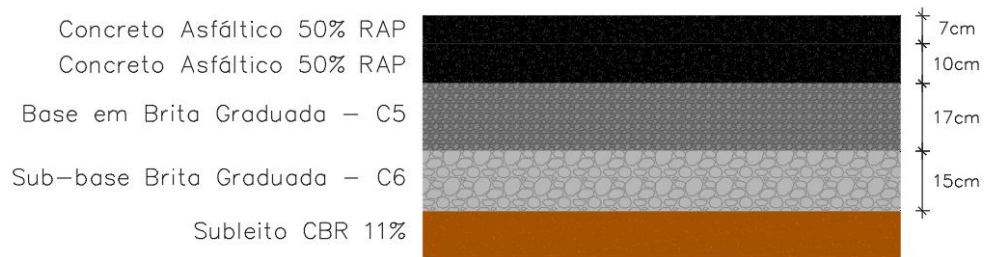
A Tabela 17 apresenta o resultado do dimensionamento para a respectiva estrutura, ilustrados na Figura 24. A estrutura é composta por duas camadas de concreto asfáltico uma de 10,0 cm e outra de 7,0 cm, totalizando 17,0 cm de revestimento.

Tabela 17 - Resultados dimensionamento Estrutura 05 MeDiNa

Camada	Tipo do Material	Espessura (cm)
Revestimento	Concreto Asfáltico Reciclado - faixa C - RAP	7,0
Revestimento	Concreto Asfáltico Reciclado - faixa C - RAP	10,0
Base	Brita Graduada - Gnaisse C5	17,0
Sub-base	Brita Graduada - Gnaisse C6	15,0

Fonte: O autor, 2024.

Figura 24 - Seção Estrutura 05



Fonte: O autor, 2024.

A Tabela 18 apresenta a evolução do ATR e da área trincada da Estrutura 05. Essa estrutura chegará ao final do tempo de projeto com área trincada igual a 21,81% e ATR de 9,51 mm, resultados bem parecidos com os da Estrutura 04, ambos estão dentro dos limites impostos para o tipo de via.

Tabela 18 - Evolução da área trincada e ATR para a Estrutura 05

Mês	N_{eq}	Área Trincada (%)	ATR (mm)
1	4,17E+05	1,72	6,55
6	2,50E+06	3,28	7,53
12	5,00E+06	4,37	7,95
24	1,00E+07	6,10	8,39
36	1,50E+07	7,70	8,66
60	2,50E+07	11,05	9,01
120	5,00E+07	21,81	9,51

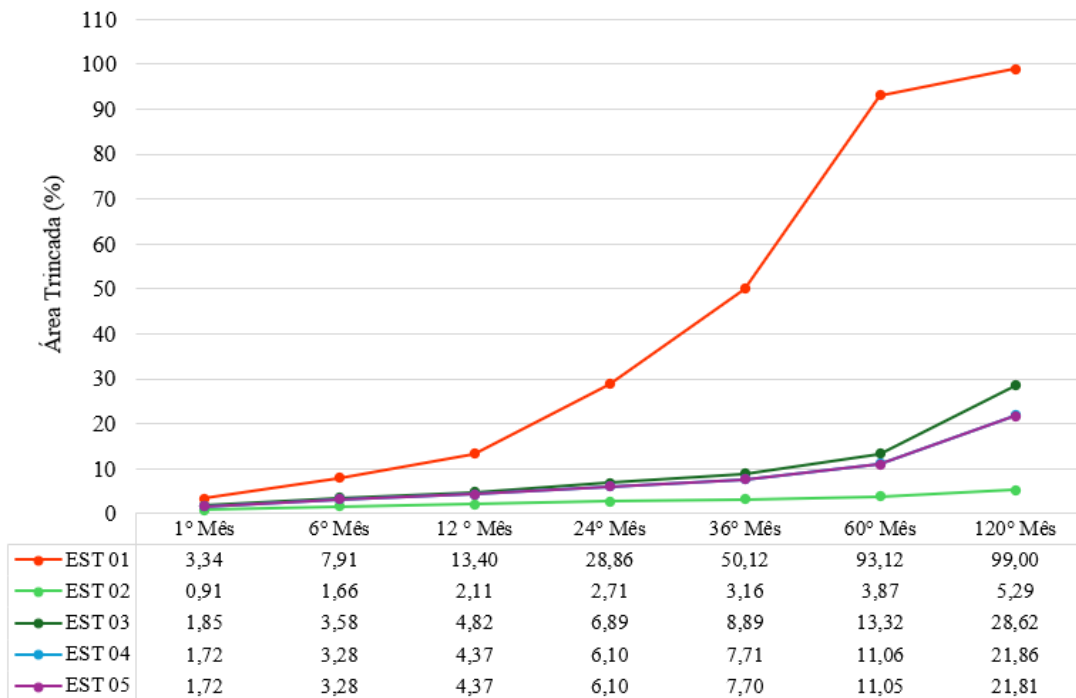
Fonte: O autor, 2024.

4.2 COMPARATIVO ESTRUTURAL

A Figura 25 apresenta a evolução da área trincada das estruturas durante o tempo de projeto.

Ao analisar as estruturas dimensionadas observa-se uma discrepância na evolução da área trincada entre Estrutura 01, dimensionada pelo método DNER, e as demais estruturas dimensionadas através do MeDiNa. Isso acontece devido a falha prematura da estrutura dimensionada pela metodologia empírica do DNER quanto a esse critério. Esse problema pode estar relacionado com o N de projeto elevado para a espessura da camada de revestimento dimensionada. Outro ponto observado é a proximidade nos valores referente a área trincada entre a Estrutura 03, Estrutura 04 e Estrutura 05, isso pode ter relação com a presença do RAP nas misturas utilizadas em seus revestimentos, pois ao inserir material fresado em uma mistura ela tende a ganhar rigidez ficando mais suscetível a fadiga.

Figura 25 - Evolução da área trincada das estruturas

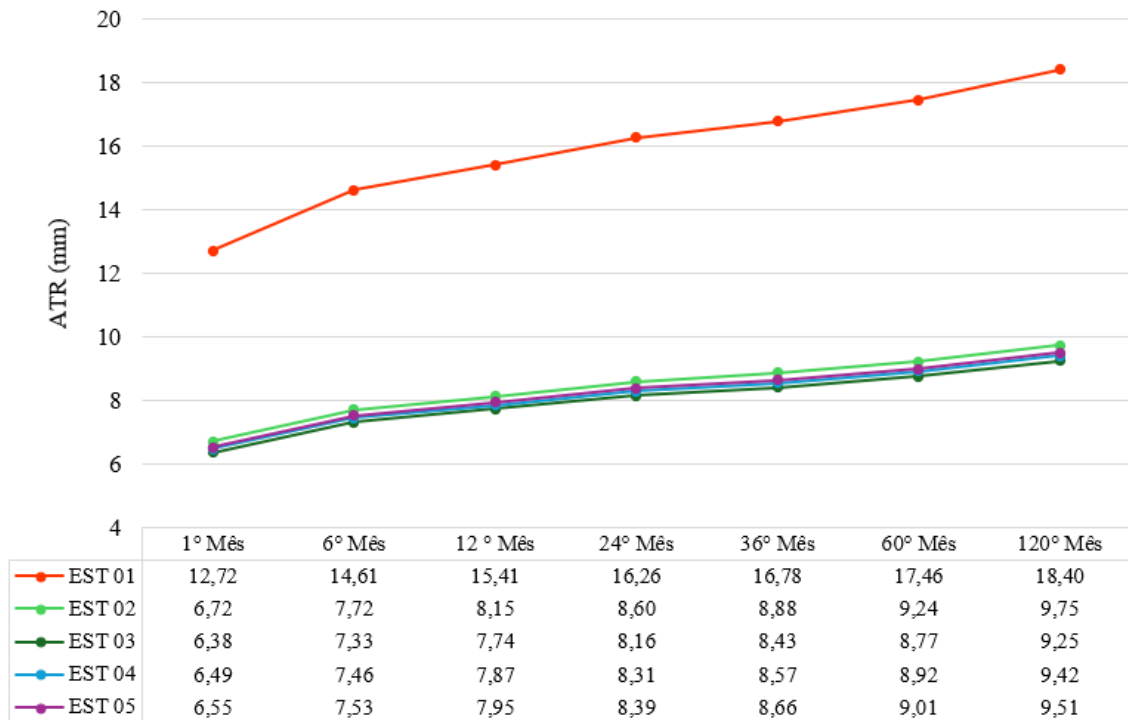


Fonte: O autor, 2024.

A Figura 26 demonstra a evolução do ATR das estruturas durante o tempo de projeto. Observa-se que o mesmo comportamento acontece quando analisamos essa evolução, visto que antes mesmo do primeiro mês de projeto a Estrutura 01 falha em relação ao critério de deformação permanente.

A partir dos resultados dos dimensionamentos, notou-se uma fragilidade do solo presente no subleito, pois durante o tempo de projeto o ATR ficou sempre mais evidente do que a área trincada. Para todas as estruturas dimensionadas atinge-se primeiro a falha por deformação permanente. Analisando a Estrutura 02 isso fica ainda mais evidente pois observa-se uma área trincada ao fim de projeto de apenas 5,29%.

Figura 26 - Evolução do ATR das estruturas



Fonte: O autor, 2024.

A análise de Afundamento de Trilha de Roda gerada no relatório de dimensionamento do MeDiNa corrobora com essa observação, pois aponta a ultrapassagem dos limites de ATR especificados para o subleito, que é 5 mm de profundidade ao fim do tempo de projeto. A Tabela 19 apresenta o ATR para o subleito das estruturas dimensionadas.

Tabela 19 - ATR subleito

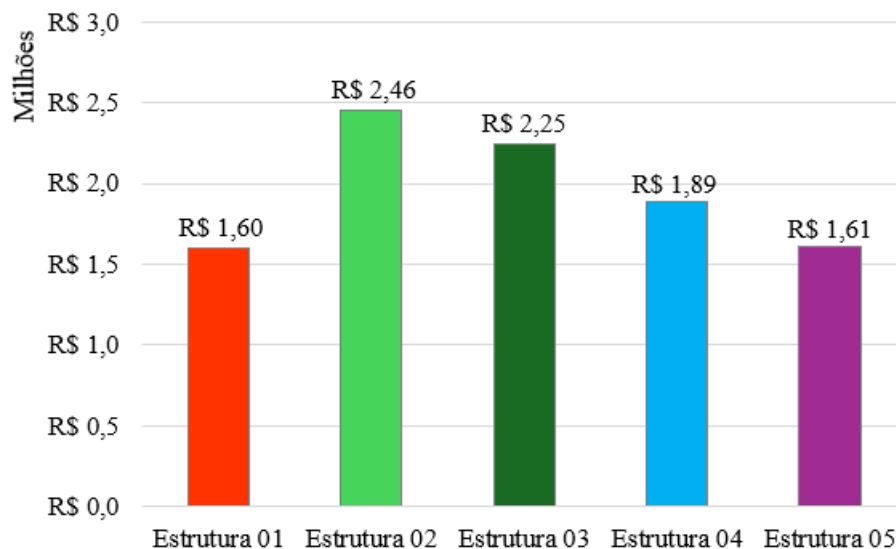
Estrutura	ATR Subleito (mm)
Estrutura 01	15,10
Estrutura 02	7,77
Estrutura 03	7,36
Estrutura 04	7,51
Estrutura 05	7,59

Fonte: O autor, 2024.

Para combater esse problema seria necessário propor um reforço do subleito, melhorar os materiais constituintes das camadas granulares e redimensioná-las o que poderia resultar na diminuição das espessuras das camadas de revestimento garantindo um menor custo de implantação das estruturas.

4.3 COMPARATIVO DE CUSTOS DE IMPLANTAÇÃO

Analisando os valores orçados para construção das estruturas propostas apresentados na Figura 27, é possível verificar os aumentos significativos em custo diretos de implantação, quando comparada uma estrutura dimensionada considerando a metodologia do DNER em relação às outras dimensionadas pela metodologia mecânica-empírica do MeDiNa.

Figura 27 - Custo de implantação das estruturas

Fonte: O autor, 2024.

Com relação aos custos de implantação, a Estrutura 01 demandaria um investimento de R\$ 1.599.354,35 por quilômetro de via implantada, considerando as espessuras das camadas constituintes, valor coerente com a média atual dos custos de implantação de rodovias em pista simples no Brasil, que segundo o DNIT (2023) é de aproximadamente R\$ 1,9 mi por quilômetro implantado.

As outras estruturas, diferente da Estrutura 01, possuem mais de uma camada de revestimento o que implica no aumento dos custos com pintura de ligação, impactando nos investimentos totais.

A Estrutura 02 resultou em um orçamento estimado de R\$ 2.456.375,31 por quilômetro de via construído. É notório o acréscimo no valor total para implantação dessa estrutura quando comparada com a Estrutura 01. Observa-se, portanto, a necessidade de um aumento nos investimentos para conceber uma estrutura com melhor qualidade e maior capacidade de resistir aos esforços solicitados.

Já o valor orçado para a Estrutura 03 foi de R\$ 2.249.095,48 por quilômetro de via. Essa redução no custo de implantação em relação a Estrutura 02 se dá em função da utilização do RAP na composição da mistura asfáltica utilizada na camada de revestimento, pois ao inserir o RAP é reduzida a quantidade de agregados e ligante utilizado na mistura.

Para a construir a Estrutura 04 será necessário um investimento total de R\$ 1.889.046,15. Mais uma vez fica evidente a redução no custo de implantação pela redução no valor referente a mistura asfáltica utilizada, uma vez que para essa estrutura utilizou-se 30% de RAP em sua camada de revestimento.

Por fim, o valor orçado para a implantação da Estrutura 05 foi de R\$ 1.605.224,32 por quilômetro de via construído. Isso representa uma redução de aproximadamente 35% no custo de construção se comparada com a Estrutura 02. Fica evidente que a utilização do RAP nas camadas de revestimento garante a redução do custo de implantação sem que seja prejudicada a eficiência do pavimento, à medida que aumenta-se o teor de RAP esse custo diminui.

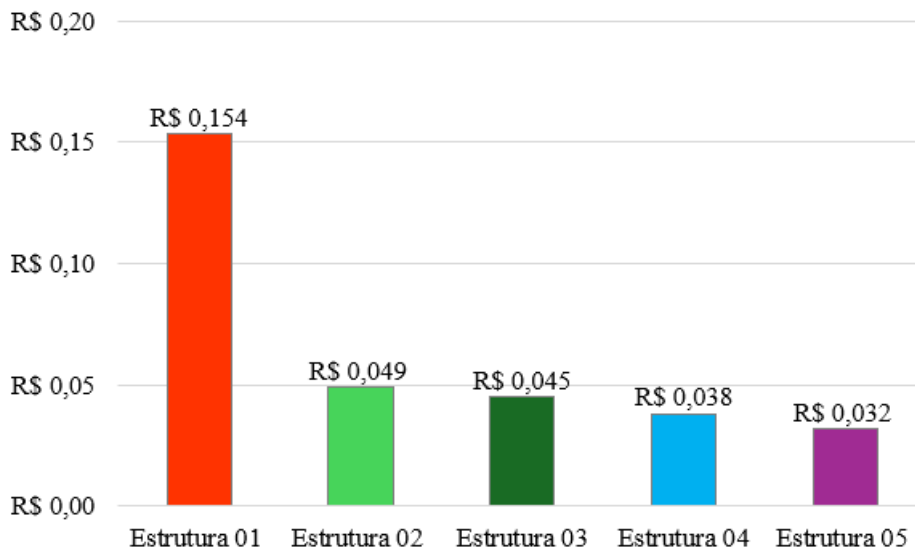
Ao analisar as estruturas 1 e 2 separadamente fica claro que o investimento para implantação da estrutura dimensionada pelo MeDiNa é bem maior, quando comparado aos valores da estrutura dimensionada pelo método do DNER. Porém, relacionando esses valores com o número de solicitações suportadas frente ao dano, observou-se que a Estrutura 01 não resistiria nem ao primeiro mês de utilização, falhando em relação ao fenômeno de deformação permanente, considerando o limite de 10,0 mm. No entanto, a consideração de um reforço no subleito poderia garantir a eficiência da mistura, o que reduziria a espessura necessária calculada pelo MeDiNa, reduzindo assim seu custo.

A Figura 28 apresenta os resultados da relação entre o custo de implantação por quilômetro e o número de solicitações resistidas por cada estrutura.

Para avaliar o custo em relação ao número N, para a Estrutura 01 considerou-se o seu valor orçado por quilômetro e o N_{eq} do primeiro mês de utilização, quando a estrutura falha por ATR que corresponde a $4,17 \times 10^5$. Desta maneira, o custo dessa estrutura seria de R\$ 3,835 por solicitação em relação a deformação permanente. Se realizar essa mesma análise utilizando o N_{eq} do 25º mês que é de $1,04 \times 10^7$ quando a estrutura atinge o limite quanto a área trincada, o custo pelo N_{eq} seria de R\$ 0,154.

Ao realizar a mesma análise para as demais estruturas, uma vez que todas foram dimensionadas pelo MeDiNa e atenderiam as solicitações durante o tempo de projeto, considerando o N_{eq} do 120º mês de solicitação observa-se a redução no custo em relação ao número N equivalente.

Figura 28 - Custo por número N equivalente



Fonte: O autor, 2024.

Desta maneira, pode-se verificar que a Estrutura 01 dimensionada pelo DNER acaba tendo um custo mais elevado mesmo quando considerado apenas a falha por área de trincamento, uma vez que ela apresenta um custo de aproximadamente R\$ 0,15 por solicitação imposta, enquanto a Estrutura 02 a mais cara entre todas as dimensionadas pelo MeDiNa oferece um custo de aproximadamente R\$ 0,05 por solicitação, uma diferença de 67% entre as duas.

Nesse contexto, em um primeiro momento pode-se haver um questionamento sobre o custo para a implantação das estruturas dimensionadas pelo MeDiNa, uma vez que em geral são mais onerosas que as dimensionadas pelo método do DNER. Porém ao diluir esse custo de implantação em função do número N resistido pelo pavimento, justifica-se esse maior investimento inicial.

5 CONCLUSÕES

Por meio desta pesquisa observou-se que o dimensionamento pelo MeDiNa resultou em camadas de revestimento mais espessas do que pelo método do DNER, chegando ao dobro para algumas estruturas.

Dentre as estruturas verificou-se que àquelas dimensionadas pelo MeDiNa foram as que apresentaram melhor desempenho durante todo o tempo de projeto. Qualquer uma delas, poderiam ser implantadas e teriam um bom desempenho durante toda sua vida útil, pois mesmo as estruturas com camada de revestimento contendo RAP se mostraram muito eficientes.

Quando aos custos de implantação das estruturas propostas, nota-se que o dimensionamento realizado pelo DNER resulta em estruturas menos onerosas quando comparado ao MeDiNa, porém com menor tempo de vida útil. Isso poderá implicar em gastos futuros com recuperação e manutenção do pavimento. Além disso, o MeDiNa considera as características mecânicas de materiais convencionais e não convencionais nas camadas da estrutura, como foi o caso da adição de RAP na mistura asfáltica utilizada no revestimento.

Observou-se que à medida que aumenta-se o teor de material fresado na mistura asfáltica o custo para implantação da estrutura diminui chegando quase a se equiparar a estrutura dimensionada pelo método DNER, como foi o caso da mistura asfáltica contendo 50% de RAP. Isso evidencia o potencial de misturas asfálticas recicladas com elevado teor de RAP de serem uma alternativa mais econômica e sustentável para a construção de rodovias.

Diante disso, conclui-se que devido a fatores como: crescimento do tráfego, aumento das solicitações, capacidade de carga e o surgimento de novas tecnologias, se faz necessária a introdução de novas metodologias de dimensionamento que considerem as propriedades mecânicas da estrutura e as características dos materiais empregados possibilitando a utilização de materiais diversos, a exemplo das misturas asfálticas recicladas, em prol da concepção de pavimentos com melhor desempenho e menores custos de ciclo de vida.

REFERÊNCIAS

- AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO T 209**: Standard Method of Test for Theoretical Maximum Specific Gravity (G_{mm}) and Density of Asphalt Mixtures. Washington, D.C.: AASHTO, 2023. Disponível em: <https://wsdot.wa.gov/publications/manuals/fulltext/m46-01/t209.pdf>. Acesso em: 04 jan. 2024.
- ARRUDA, S. M. **Avaliação do Comportamento mecânico e autorregenerativo de misturas asfálticas recicladas**. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Campina Grande, 2021. Disponível em: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/2182>. Acesso em: 10 dez. 2023.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16018**: Misturas asfálticas: determinação da rigidez por compressão diametral sob carga repetida. Rio de Janeiro: ABNT, 2011. Disponível em: <https://www.normas.com.br/autorizar/visualizacao-nbr/31439/identificar/visitante>. Acesso em: 04 jan. 2024.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16505**: Misturas asfálticas: resistência à deformação permanente utilizando o ensaio uniaxial de carga repetida. Rio de Janeiro: ABNT, 2016. Disponível em: <https://www.normas.com.br/autorizar/visualizacao-nbr/11717/identificar/visitante>. Acesso em: 04 jan. 2024.
- BABADOPULOS, L. F. A. L.; SOARES, J. B.; CASTELO BRANCO, V. T. F. Interpreting fatigue tests in hot mix asphalt (HMA) using concepts from viscoelasticity and damage mechanics. **Revista Transportes**, v. 23, n. 2, p. 85-94, 2015. Disponível em: <https://www.revistatransportes.org.br/anpet/article/view/898>. Acesso em: 07 jan. 2024.
- BALBO, J. T. **Pavimentação asfáltica, materiais, projetos e restauração**. 1. Ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.
- BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação asfáltica, formação básica para engenheiros**. 2. ed. Rio de Janeiro: Petrobras: ABEDA, 2022.
- BORGES, R. L. **Deformação permanente em misturas asfálticas a partir do shift model viscoplástico e ensaios triaxiais de carga repetida**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Fortaleza, 2014. Disponível em: <https://repositorio.ufc.br/handle/riufc/11168>. Acesso em: 07 jan. 2024.
- CONFEDERAÇÃO NACIONAL DOS TRANSPORTES. **Transporte rodoviário: por que os pavimentos das rodovias não duram?**. Brasília: CNT, 2017. Disponível em: <https://cnt.org.br/por-que-pavimentos-rodovias-nao-duram>. Acesso: 03 jan. 2024.

COLPO, G. B. **Análise de Fadiga de Misturas Asfálticas Através do Ensaio de Flexão em Viga Quatro Pontos**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre, 2014. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/114463>. Acesso: 15 jan. 2024.

COUTINHO, J. C. P. **Dimensionamento de pavimento asfáltico: comparação do método do DNER com um método mecanístico-empírico aplicada a um trecho**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geotécnica) - Universidade Federal de Ouro Preto, Núcleo de Geotecnia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Geotécnica, Ouro Preto, 2011. Disponível em: <https://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/2328>. Acesso: 15 jan. 2024.

CUNHA, C. B. *et al.* Avaliação de concreto asfáltico usinado a quente com incorporação de material fresado. **Revista Matéria**, v. 23, n. 3, 2018. Disponível em: <https://revistas.ufrj.br/index.php/rm/article/view/22418>. Acesso: 16 jan. 2024.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 134/2018**: pavimentação solos: determinação do módulo de resiliência - método de ensaio. Rio de Janeiro: DNIT, 2018. Disponível em: https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/metodo-de-ensaio-me/dnit_134_2018_com_incorporacao_da_errata_1.pdf. Acesso: 20 jan. 2024.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 183/2018**: pavimentação asfáltica: ensaio de fadiga por compressão diametral à tensão controlada: método de ensaio. Rio de Janeiro: DNIT, 2018. Disponível em: https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/metodo-de-ensaio-me/dnit183_2018_me.pdf. Acesso: 20 jan. 2024.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de Pavimentação**. 3. Ed. Rio de Janeiro: DNIT, 2006. Disponível em: https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-manuais/vigentes/ipr_719_manual_de_pavimentacao_versao_corrigda_errata_1.pdf. Acesso: 03 jan. 2024.

FERREIRA, J. L. S. **Novas diretrizes para seleção granulométrica de misturas asfálticas densas com foco na deformação permanente**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Fortaleza, 2017. Disponível em: <https://repositorio.ufc.br/handle/riufc/24096?locale=en>. Acesso: 20 jan. 2024.

FRANCO, F. A. C. P. **Método de dimensionamento empírico-mecanístico de pavimentos asfálticos SisPav**. 2007. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Programa de Pós-Graduação em Engenharia, Rio de Janeiro, 2007. Disponível em: <https://www.coc.ufrj.br/pt/teses-de-doutorado/151-2007/1107-filipe-augusto-cinque-de-proenca-franco>. Acesso: 20 jan. 2024.

FRANCO, F. A. C. P.; MOTTA, L. M. G. **Execução de estudos e pesquisa para elaboração de método mecanístico - empírico de dimensionamento de pavimentos asfálticos**: Manual para utilização do método MeDiNa. Rio de Janeiro: DNIT, 2018. Disponível em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/paginas-de-pesquisas/novo-metodo-de-dimensionamento-mecanistico-empirico-de-pavimentos-asfalticos>. Acesso: 04 jan. 2024.

FRITZEN, M. A. **Desenvolvimento e validação de função de transferência para previsão do dano por fadiga em pavimentos asfálticos**. 2016. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Rio de Janeiro, 2016. Disponível em: <https://www.coc.ufrj.br/pt/teses-de-doutorado/391-2016/4707-marcos-antonio-fritzen>. Acesso: 22 jan. 2024.

HANSEN, K. R.; COPELAND, A. **Annual asphalt pavement industry survey on recycled materials and warm-mix asphalt usage**. Federal Highway Administration, Final report, USA. 2013. Disponível em: <https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/26950>. Acesso: 15 jan. 2024.

HILÁRIO, R. Q. **Uso de pavimento reciclado adicionado com cimento para uso como reforço de base para rodovias**: Estudo de caso BR-120. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geotécnica) - Universidade Federal de Ouro Preto, Núcleo de Geotecnia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Geotécnica, Ouro Preto, 2016. Disponível em: <https://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/7036>. Acesso: 15 jan. 2024.

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

NATIONAL ASPHALT PAVEMENT ASSOCIATION. **High Rap Asphalt Pavements Japan Practice - Lessons Learned**. Lanham: NAPA, 2015. Disponível em: https://www.asphalt pavement.org/uploads/documents/EngineeringPubs/IS139_High_RAP_Aspphalt_Pavements_Japan_Practice-lr.pdf. Acesso: 15 jan. 2024.

PORTELA NETO, M. G. **Avaliação da faixa de agregados dominantes e componentes Intersticiais em misturas asfálticas**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Fortaleza, 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufc.br/handle/riufc/49901>. Acesso: 20 jan. 2024.

NUNES, C. L. **Fadiga de Misturas Asfálticas Descontínuas com Asfalto Borracha de 4ª Geração**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Brasília, 2017. Disponível em: https://bdtd.ibict.br/vufind/Record/UNB_216f9bcb4e27da238e5b0122d07f5038. Acesso: 22 jan. 2024.

PITANGUI, L. C. **Análise comparativa do método do DNER com o método mecanístico-empírico MeDiNa**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade de Brasília, Brasília, 2019. Disponível em: https://bdm.unb.br/bitstream/10483/25932/1/2019_LaraCordeiroPitangui_tcc.pdf. Acesso: 22 jan. 2024.

RODRIGUES, W. dos. S. **Análise comparativa do dimensionamento de estruturas de Pavimentos flexíveis por meio dos métodos DNER/1981 e MeDiNa.** 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal De Santa Catarina, Florianópolis, 2023. Disponível em:

<https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/248194>. Acesso: 04 jan. 2024.

SABAHFAR, N.; HOSSAIN, M. **Effect of asphalt rejuvenating agent on aged reclaimed asphalt pavement and binder properties.** Kansas State University Transportation Center, final report, 2016. Disponível em:

https://www.academia.edu/113486106/Effect_of_asphalt_rejuvenating_agent_on_aged_reclaimed_asphalt_pavement_and_binder_properties?uc-sb-sw=51265454. Acesso: 22 jan. 2024.

SANTOS, J; FLINTSCH, G; FERREIRA, A. Environmental and economic assessment of pavement construction and management practices for enhancing pavement sustainability.

Resources, Conservation And Recycling, v.116, n.1, p. 15-31, 2017. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921344916302178>. Acesso: 15 jan. 2024.

SENÇO, Wlastermiler de. **Manual de Técnicas de Pavimentação.** 2. ed. São Paulo: Pini, 2007.

SILVA, L. M.; SANTOS, R. O. G. Estudo comparativo: método empírico do DNIT e mecanístico-empírico (Medina) no dimensionamento de pavimentos flexíveis. **Engineering Sciences**, v.9, n.1, 2021. Disponível em:

<https://sustenere.inf.br/index.php/engineeringsciences/article/view/CBPC2318-3055.2021.001.0012>. Acesso: 22 jan. 2024.

UNGER FILHO, W. **Estudo de mistura asfáltica reciclada a frio produzida com 100% de revestimento asfáltico fresado e agente de reciclagem emulsionado.** 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Universidade de São Paulo, escola politécnica, São Paulo, 2019. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3138/tde-25032019-102457/pt-br.php>. Acesso: 15 jan. 2024.

WIRTGEN GROUP. **Linha de Produtos:** Fresadoras a frio. Windhagen: WIRTGEN GROUP, 2022. Disponível em: [https://www.wirtgen-](https://www.wirtgen-group.com/binary/full/o295885v77_Product_Range_Brochure_ptBr.pdf)

[group.com/binary/full/o295885v77_Product_Range_Brochure_ptBr.pdf](https://www.wirtgen-group.com/binary/full/o295885v77_Product_Range_Brochure_ptBr.pdf). Acesso: 15 jan. 2024.

ZAGO, J. P. **Estudo da deformação permanente de três solos típicos de subleitos rodoviários de Santa Maria - RS.** 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) -

Universidade Federal de Santa Maria, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Santa Maria, 2016. Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/handle/1/12036>. Acesso: 15 jan. 2024.