UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

THALITA DAMM GRACIOLI

DIMENSIONAMENTO DE DIFERENTES ESTRUTURAS DE PAVIMENTOS SUBMETIDAS A QUATRO SOLICITAÇÕES DE TRÁFEGO: ANÁLISE PELOS MÉTODOS DO DNER E MeDiNa, CONSIDERANDO O DESEMPENHO E OS CUSTOS POR SOLICITAÇÃO

Santa Maria, RS
2022

Thalita Damm Gracioli

DIMENSIONAMENTO DE DIFERENTES ESTRUTURAS DE PAVIMENTOS SUBMETIDAS A QUATRO SOLICITAÇÕES DE TRÁFEGO: ANÁLISE PELOS MÉTODOS DO DNER E MeDiNa, CONSIDERANDO O DESEMPENHO E OS CUSTOS POR SOLICITAÇÃO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Civil, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS) como requisito parcial para obtenção do título de **Engenheira Civil**.

Orientador: Prof. Dr. Magnos Baroni
Coorientadora: Ma. Paula Taiane Pascoal

Santa Maria, RS
2022

Thalita Damm Gracioli

DIMENSIONAMENTO DE DIFERENTES ESTRUTURAS DE PAVIMENTOS SUBMETIDAS A QUATRO SOLICITAÇÕES DE TRÁFEGO: ANÁLISE PELOS MÉTODOS DO DNER E MeDiNa, CONSIDERANDO O DESEMPENHO E OS CUSTOS POR SOLICITAÇÃO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Civil, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS) como requisito parcial para obtenção do título de **Engenheira Civil**.

Aprovado em 11 de fevereiro de 2022

_____

Magnos Baroni, Dr. (UFSM)

(Presidente/Orientador)

_____

Paula Taiane Pascoal, Ma (UFSM)

(Coorientadora)

_____

Lucas Dotto Bueno, Dr. (UFSM)

_____

Amanda Vielmo Sagrilo, Ma (UFSM)

Santa Maria, RS

2022

AGRADECIMENTOS

Ao iniciar a escrita deste agradecimento, são muitas as lembranças que passam pela cabeça, a aprovação no vestibular, o caminho percorrido durante a graduação, e junto aos pensamentos, estão as pessoas, pessoas as quais só tenho a agradecer, além de agradecer a Deus por proporcionar bençãos para que toda a caminhada fosse possível.

Com isso, inicio agradecendo ao meu anjo da guarda, pela certeza que tenho de que a cada passo meu, a cada dificuldade que aparece, tenho um anjinho cuidando de mim lá no céu, obrigada pai, por estar sempre comigo, na pele, na alma e no coração.

Obrigada mãe, obrigada por ser o alicerce de tudo, por ter me ensinado todos os princípios, moldado meu caráter, e estado aqui sempre que precisei, tu és o principal porquê de tudo. Tudo é por nós e para nós, sempre.

Agradeço ao meu padrasto por ser suporte, sempre presente em todas as etapas percorridas, ao meu irmão pelo amor incondicional, e por acreditar em mim como um exemplo. A minha tia, muito obrigada por ser amor, por ser leveza, e por acreditar sempre em mim, e junto da minha mãe, serem meu porto seguro.

Ao meu amor, companheiro de todos os momentos, muito obrigada por todos os ensinamentos sobre a vida profissional, por toda ajuda durante a caminhada, e obrigada por ser morada, e tornar tudo mais fácil e mais leve.

Ao meu orientador, Magnos, obrigada por aceitar me orientar neste trabalho, por toda a ajuda sempre que necessária, e por trazer ainda mais entusiasmo pela profissão durante a minha graduação por ser o professor ímpar que és.

O meu mais sincero agradecimento a minha coorientadora Paula, por ter sido excepcional no decorrer deste trabalho, por me orientar em todas as etapas, e por ser uma pessoa excepcional.

Por fim, aos amigos, obrigada a todos que estiveram sempre comigo no decorrer na graduação, e da vida, sem vocês e minha família, nada teria porquê.

RESUMO

DIMENSIONAMENTO DE DIFERENTES ESTRUTURAS DE PAVIMENTOS SUBMETIDAS A QUATRO SOLICITAÇÕES DE TRÁFEGO: ANÁLISE PELOS MÉTODOS DO DNER E MeDiNa, CONSIDERANDO O DESEMPENHO E OS CUSTOS POR SOLICITAÇÃO

AUTORA: Thalita Damm Gracioli
ORIENTADOR: Prof. Dr. Magnos Baroni
COORIENTADORA: Ma. Paula Taiane Pascoal

O transporte de carga por meio das rodovias é muito utilizado no Brasil. No entanto, as mudanças ocorrentes no campo da pavimentação vêm sendo significativas. Diante disso, o dimensionamento por metodologias mecanísticas-empíricas torna-se cada vez mais presente no âmbito nacional, com a criação do Método de Dimensionamento Nacional de Pavimentos (MeDiNa), com análises mais apuradas não só dos materiais utilizados, mas também das tensões e deformações, desenvolvidas no pavimento. Em decorrência disto, este trabalho demonstra o dimensionamento e avaliação de pavimentos, tanto com o método do DNER quanto com o método MeDiNa, a fim de comparar as estruturas, dimensionadas para diferentes tráfegos e utilizando diversos materiais para as camadas de sub-base do pavimento, além de distintas energias de compactação para o subleito, e variação dos revestimentos asfálticos, mantendo sempre a mesma base granular. O objetivo da presente pesquisa é analisar os materiais do pavimento, quanto à qualidade e o custo, em relação ao número de ciclos, visando a comparação orçamentária e técnica dos métodos e materiais utilizados a longo prazo. Foi possível averiguar o comportamento do subleito frente à energia de compactação e constatar que a mesma influencia no pavimento como um todo, ademais, para a sub-base com a troca dos materiais, é possível perceber que um solo de boa qualidade pode ter características superiores a sub-bases granulares, e sua utilização traz menores custos à estrutura. Por fim, foi possível verificar que o método MeDiNa, se comparado ao DNER, traz pavimentos que tendem a ser mais eficientes. Mantendo a vida útil projetada, não falhando por fadiga e ATR dentro do período de projeto, além de possuir menor custo se comparados o custo do km por solicitações dos pavimentos. Tal economia acontece devido ao método proporcionar maior facilidade de comparação e substituição de materiais e camadas do pavimento, o que otimiza o trabalho do projetista.

Palavras-chave: pavimentação, DNIT, orçamento, camadas estruturais

ABSTRACT

DIMENSIONAMENTO DE DIFERENTES ESTRUTURAS DE PAVIMENTOS SUBMETIDAS A QUATRO SOLICITAÇÕES DE TRÁFEGO: ANÁLISE PELOS MÉTODOS DO DNER E MeDiNa, CONSIDERANDO O DESEMPENHO E OS CUSTOS POR SOLICITAÇÃO

AUTHOR: Thalita Damm Gracioli
ODVISOR: Prof. Dr. Magnos Baroni
CO-ADVISOR: Ma. Paula Taiane Pascoal

Freight transportation via highways is widely used in Brazil. However, the changes occurring in the field of paving have been significant. In view of this, the design by mechanistic-empirical methodologies becomes increasingly present in the national context, with the creation of the National Pavement Design Method (MeDiNa), with more accurate analyses not only of the materials used, but also of the stresses and strains developed in the pavement. As a result of this, this work demonstrates the design and evaluation of pavements, both with the DNER method and the MeDiNa method, in order to compare the structures, designed for different traffic flows and using different materials for the pavement sub-base layers, as well as different compaction energies for the subgrade, and variation of asphalt coatings, always maintaining the same granular base. The objective of this research is to analyze the pavement materials, with regard to quality and cost, in relation to the number of cycles, aiming at a budgetary and technical comparison of the methods and materials used in the long term. It was possible to investigate the behavior of the subgrade in relation to the compaction energy and to see that it influences the pavement as a whole. Furthermore, for the subgrade with the exchange of materials, it is possible to see that a good quality soil can have superior characteristics to granular subgrades, and its use brings lower costs to the structure. Finally, it was possible to verify that the MeDiNa method, if compared to DNER, brings pavement that tend to be more efficient. The pavements maintain the design life, i.e., they do not fail by fatigue and rutting within the design period, and they also have lower cost if compared to the km cost by pavement requests. Such savings occur because the method provides greater ease of comparison and replacement of pavement materials and layers, which optimizes the designer's work.

Keywords: paving, DNIT, budget, structural layers

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação das camadas do pavimento 14
Figura 2 - Representação do comportamento dos revestimentos asfálticos ao carregamento repetido 18
Figura 3 - Modelo de treliça usada para medir afundamento de trilha de roda 20
Figura 4 - Esquema de proteção da camada de subleito 23
Figura 5 - Dados do eixo padrão rodoviário 27
Figura 6 - Dados do tráfego.....27
Figura 7 - Fluxograma de planejamento da pesquisa 38
Figura 8 - Análise ATR das estruturas para Nb: 1,00 x 10^6.....54
Figura 9 - Análise ATR das estruturas para Nm: 5,00 x 10^6.....55
Figura 10 - Análise ATR das estruturas para Na: 1,00 x 10^7 considerando o revestimento CA4.....57
Figura 11 - Análise ATR das estruturas para Nr: 3,57 x 10^7.....59
Figura 12 - ATR e área trincada da estrutura real durante o período de projeto.....62
Figura 13 - ATR e área trincada das versões da Estrutura 1 conforme variação do N 63
Figura 14 - ATR e área trincada das versões da Estrutura 2 conforme variação do N 64
Figura 15 - ATR e área trincada das versões da Estrutura 4 conforme variação do N 66
Figura 16 - ATR e área trincada das versões da Estrutura 12 conforme variação do N 67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Coeficiente de equivalência estrutural.....22
Tabela 2 - Critérios para cada tipo de via.....28
Tabela 3 - Valores típicos de Coeficiente de Poisson 33
Tabela 4 - Limites das classes de desempenho das misturas asfálticas 33
Tabela 5 - Parâmetros do Solo EN e Solo EI utilizados nas estruturas.....40
Tabela 6 - Parâmetros BGS C1 utilizados nas estruturas 41
Tabela 7 - Parâmetros Solo S35 EI e do SOLO S35 EM 42
Tabela 8 - Parâmetros Solo Brita SB2 EM 43
Tabela 9 - Parâmetros BGS SJ.....44
Tabela 10 - Parâmetros CA Classe 2 e Classe 4 44
Tabela 11 - Dimensões do pavimento real implementado na RS 342 (com adaptações) considerando o Nr: 3,57 x 10^7 46
Tabela 12 - Pavimentos propostos pelo Método DNER (1981).....46
Tabela 13 - Estruturas propostas pelo Método MeDiNa para Nb: 1,00 x 10^6 47
Tabela 14 - Estruturas propostas pelo Método MeDiNa para Nm: 5,00 x 10^6 48
Tabela 15 - Estruturas propostas pelo Método MeDiNa para Na: 1,00 x 10^7 com CA 2 48
Tabela 16 - Estruturas propostas pelo Método MeDiNa para Na: 1,00 x 10^7 com CA 4 48
Tabela 17 - Estruturas propostas pelo Método MeDiNa para Nr: 3,57 x 10^7 com CA 2 49
Tabela 18 - Estruturas propostas pelo Método MeDiNa para Nr: 3,57 x 10^7 com CA 4 49
Tabela 19 - Preço unitário dos serviços (SICRO RS jul/21 e ANP dez/21) 52
Tabela 20 - Estruturas propostas com respectivas dimensões de cada camada para o Nb: 1,00 x 10^6.....54
Tabela 21 - Estruturas propostas com respectivas dimensões de cada camada para o Nm: 5,00 x 10^6.....56
Tabela 22 - Estruturas propostas com respectivas dimensões de cada camada para o Na: 1,00 x 10^7 considerando o revestimento CA4 57
Tabela 23 - Estruturas propostas com respectivas dimensões de cada camada para o Na: 1,00 x 10^7 considerando o revestimento CA2.....58

Tabela 24 - Estruturas propostas com respectivas dimensões de cada camada para o Nr: 3,57 x 10^7 considerando o revestimento CA4.....59
Tabela 25 - Estruturas propostas com respectivas dimensões de cada camada para o Na: 3,57 x 10^7 considerando o revestimento CA2 60
Tabela 26 - Dimensões do pavimento real implementado na RS 342 (com adaptações) considerando o Nr: 3,57 x 10^7 61
Tabela 27 - Dimensões dos pavimentos propostos pelo Método DNER (1981).....62
Tabela 28 - Valor por km e km/ N das estruturas empregadas para tráfego o Nm: 5,00 x 10^6 68
Tabela 29 - Valor por km e km/ N das estruturas empregadas para tráfego o Na: 1,00 x 10^7 69
Tabela 30 - Custo por km e km/ N para estruturas dimensionadas a partir de métodos diferentes, para o mesmo trecho.....71

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHO	*American Association of State Highway Officials*
AASHTO	*American Association of Highway and Transportation Officials*
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural E Biocombustíveis
ART's	Anotações de Responsabilidade Técnica
ATR	Afundamento em Trilha De Roda
BDI	Benefícios e Despesas Indiretas
BGS	Brita Graduada Simples
CA	Concreto Asfáltico
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CBR	*California Bearing Ratio*
CCA	Cinza de Casca de Arroz
CENPES	Centro de Pesquisas Leopoldo Américo Miguez de Mello
Cm	Centímetros
CP	Corpo de prova
COPPE	Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Eng.
DAER	Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
DP	Deformação Permanente
EI	Energia Intermediária
EM	Energia Modificada
EN	Energia Normal
ETCR	Ensaio Triaxial de Cargas Repetidas
FEC	Fator de Equivalência de Carga
FV	Fator de veículo
FR	Fator Regional
GEPPASV	Grupo de Estudos em Pavimentação e Segurança Viária
H3PO4	Ácido fosfórico
IPR	Instituto de Pesquisas Rodoviárias
ISC	Índice de Suporte Califórnia
Km	Quilômetros
KPa	Quilo Pascal
LG'	Solo Argiloso Laterítico
LVDT	*Linear Variable Differential Transformer*
LMCC	Laboratório de Materiais de Construção Civil
ME	Método de Ensaio

M-E	Mecanístico-empírico
MEDINA	Método de Dimensionamento Nacional
mm	Milímetros
MPa	Mega Pascal
MR	Módulo de Resiliência
N	Número de Repetições do Eixo Padrão
RDT	*Rectilinear Displacement Transducer*
RS	Rio Grande do Sul
SICRO	Sistema de Custos Referenciais de Obras
SINAPI	Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil
SISPAV	Método de Dimensionamento Mecanístico-Empírico de Pavimentos Asfálticos
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro
UFSM	Universidade Federal de Santa Maria
USACE	Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos
VDM	Volume Médio Diário

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 10
1.1 OBJETIVOS 11
1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO 12
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 13
2.1 PAVIMENTOS FLEXÍVEIS 13
2.1.1 Tipos de ligantes e revestimentos asfálticos 16
2.2 MECANISMOS DE RUPTURA DO PAVIMENTO 16
2.2.1 Fadiga 17
2.2.2 Deformação permanente 18
2.3 DIMENSIONAMENTO – MÉTODO DNER (1981) 20
2.4 MÉTODO MECANÍSTICO-EMPÍRICO 24
2.4.1 Método de Dimensionamento Nacional – MeDiNa 25
2.4.2 Ensaios triaxiais de módulo de resiliência e deformação permanente 28
2.4.3 Coeficiente do Poisson 32
2.4.4 Flow number 33
2.5 ORÇAMENTAÇÃO DOS PAVIMENTOS ASFÁLTICOS 34
2.5.1 Desenvolvimento e importância da orçamentação 34
2.5.2 Orçamentação a partir de projetos desenvolvidos pelo MeDiNa 36
3 METODOLOGIA 37
3.1 PLANEJAMENTO DA PESQUISA 37
3.2 DEFINIÇÃO DOS MATERIAIS 39
3.2.1 Subleito 39
3.2.2 Sub-base 41
3.2.3 Base 43
3.2.4 Revestimentos asfálticos 44
3.3 DEFINIÇÃO DAS ESTRUTURAS 45
3.3.1 Estrutura real 45
3.3.2 Estruturas propostas 46
3.3.3 Análise das estruturas 50
3.4 ORÇAMENTO 51
4 RESULTADOS 53
4.1 DIMENSIONAMENTO DAS CAMADAS E ANÁLISE DA DEFORMABILIDADE DAS CAMADAS DE BASE, SUB-BASE E SUBLEITO 53
4.2 DEFORMAÇÃO PERMANENTE E FADIGA DAS ESTRUTURAS 61
4.3 ORÇAMENTO 68
5 CONCLUSÃO 72
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 75

1 INTRODUÇÃO

No ano de 1960 foi introduzido no Brasil um método de dimensionamento de pavimentos flexíveis, revisado em 1981 e popularmente conhecido como Método do DNER ou Método do engenheiro Murilo Lopes de Souza. Trata-se de uma metodologia empírica, baseado nas curvas do Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos (USACE) e corrigidas para o tráfego rodoviário. O método considera algumas conclusões dos estudos experimentais da *American Association of Highway and Transportation Officials* (AASHTO) e é o grande responsável pelo dimensionamento da maior parte das rodovias brasileiras pavimentadas.

O dimensionamento das estruturas de pavimentos flexíveis deve ser feito com o objetivo de atender as demandas do tráfego. No entanto, há um descompasso entre o aumento do número de veículos em circulação e a expansão da malha rodoviária pavimentada, e isso impõe uma maior demanda sobre a infraestrutura, com uma consequente intensificação do processo de desgaste e do surgimento de defeitos, (CNT, 2021). Para isso, o pavimento deve ser dimensionado para atender satisfatoriamente as ações do tráfego e das intempéries por um período pré-determinado em projeto.

Com a elevada taxa de crescimento da malha rodoviária e a situação regular ou ruim de grande parte das rodovias existentes, fica evidente a necessidade de evolução das técnicas e parâmetros utilizados na construção de pavimentos. De acordo com CNT (2021), 54,1% da extensão total das rodovias avaliadas apresentam algum tipo de problema no pavimento, tendo sido avaliado como Regular, Ruim ou Péssimo.

Ademais, a falta de conservação e a má execução na implantação das mesmas, geram problemas que fazem com que a rodovia não atinja a vida útil projetada. CNT (2021) acrescenta que para que o pavimento mantenha níveis de serviço adequado em relação ao rolamento, à segurança e à capacidade de suporte de carga é necessário manter a rodovia em um bom estado de conservação.

Buscando um método mais eficiente para dimensionamento de pavimentos, teve origem o Método de Dimensionamento Nacional (MeDiNa), por meio do Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR), do próprio DNIT, da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP/PETROBRAS) e da Pós-Graduação e Pesquisa

de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE/UFRJ) com parceria de diversas universidades brasileiras.

O método consiste em uma metodologia mecanístico-empírico, que busca associar dados dos materiais utilizados na estrutura do pavimento com o tráfego aplicado. Por meio de correlações das camadas e de seus respectivos materiais e espessuras pode-se calcular as tensões e deformações, relacionando os dados com o que as repetições de cargas podem causar ao pavimento. O método MeDiNa é um *framework* de cálculo que possibilita verificar rapidamente as espessuras das camadas e analisar suas condições, para que atendam o dimensionamento necessário previsto em projeto. Leva em conta diversos critérios que devem ser inseridos no programa, e tais critérios são obtidos por meio de ensaios nos materiais pétreos, betuminosos e solos.

Com a facilidade que o *framework* de cálculo trás, é possível propor rapidamente estruturas para o mesmo propósito, com materiais e espessuras de camadas diferentes, o que permite ao projetista analisar amplamente suas opções, ou até avaliar um dimensionamento já concluído, frente as suas necessidades. Com isso, no presente trabalho serão dimensionadas e avaliadas diversas estruturas, buscando obter pavimentos com qualidade técnica e menor orçamento dentro da vida útil de projeto.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho é comparar o desempenho de estruturas impostas a quatro diferentes tráfegos, buscando a melhor opção levando em consideração a harmonia entre melhor solução técnica, o orçamento e o custo por solicitação.

Ademais, para melhor entendimento do assunto, os objetivos específicos são:

- Comparar o dimensionamento das estruturas com quatro diferentes solicitações, tanto com o método do DNER (1981) quanto com o MeDiNa;
- Analisar o impacto ao variar condições das estruturas a utilização de concreto asfáltico convencional e modificado com polímero;
- Avaliar a substituição de sub-base granular para solo laterítico compactado na energia intermediária;

- Verificar o comportamento do solo frente duas energias de compactação (Proctor normal e intermediário);
- Avaliar o impacto financeiro da implantação do método MeDiNa em relação ao método DNER (1981), levando em conta o custo do pavimento por número de passagem do eixo padrão.

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho é composto por cinco capítulos. O segundo capítulo deste trabalho traz a revisão bibliográfica, que abordará as definições e conceitos dos métodos de dimensionamento de pavimentos asfálticos, suas camadas, materiais, principais problemas que ocorrem no pavimento com o passar do tempo, as etapas de dimensionamento, o método vigente no Brasil (Método do DNER, 1981) e o Método MeDiNa, que é o novo método de dimensionamento de pavimentos flexíveis do Brasil, já oficializado pelo DNIT.

No segundo capítulo também serão abordados a origem de ambos os métodos, bem como suas bases de criação e formas de aplicação, como levam em consideração as peculiaridades das vias e os materiais utilizados em suas estruturas. Tendo deixado claro as peculiaridades de cada um dos métodos, será analisado também o impacto financeiro que um orçamento pode causar na obra, no caso, como a visão do custo muda quando comparados os métodos a partir do número de passagens do eixo-padrão que cada estrutura suporta.

A metodologia encontra-se no terceiro capítulo, onde consta análises de dados de materiais coletados e ensaiados e suas utilizações tanto no método DNER (1981), como no MeDiNa. Os materiais considerados são provenientes de jazidas com propriedades conhecidas. A utilização em diferentes estruturas e em situações de tráfego variadas serão analisadas, buscando verificar qual o método e estrutura que melhor se aplica, sempre levando em conta o número de passagens do eixo-padrão, pensando no pavimento em toda vida útil.

No quarto capítulo serão demonstrados os resultados a partir dos dados obtidos, e também uma análise orçamentária das estruturas selecionadas, conforme o número de vezes que o pavimento suporta a passagem de eixo-padrão.

Por fim, serão apresentadas as principais conclusões, bem como as referências bibliográficas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão apresentados conteúdos pertinentes para o melhor entendimento do estudo apresentado. Inicialmente será exposto o conceito de pavimento asfáltico, bem como seu funcionamento, estrutura, camadas, ensaios de materiais e defeitos que surgem no longo de sua vida útil.

Tendo bom entendimento dos conceitos iniciais, será abordado, primeiramente, o método de dimensionamento vigente no Brasil, sua história, surgimento e peculiaridades dentre os anos de utilização no país. Após, será abordado o método mecanístico-empírico que se encontra em desenvolvimento, seu surgimento em meio a evolução da tecnologia, os parâmetros utilizados no seu desenvolvimento, e as principais diferenças entre os métodos.

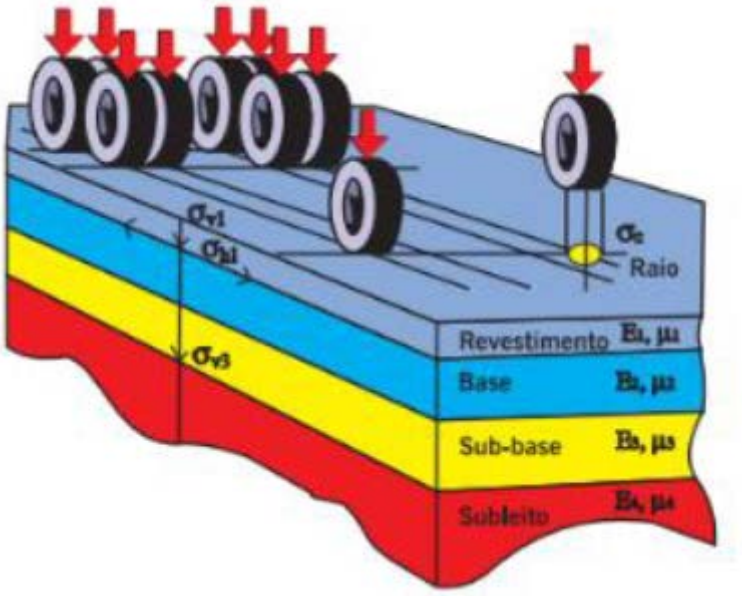
Ademais, para finalizar este capítulo será abordado a questão orçamentária, o custo envolvido na implantação de uma obra de infraestrutura, quais as singularidades da execução, quanto a parte financeira, relação de custo de cada material, com sua durabilidade, pensando sempre no menor custo a longo prazo.

2.1 PAVIMENTOS FLEXÍVEIS

Segundo Bernucci et al. (2010), pavimento é uma estrutura em camadas de espessuras finitas, que é construída sobre a superfície final de terraplenagem, sua função, é resistir técnica e economicamente aos esforços oriundos do tráfego de veículos e do clima.

Os pavimentos rodoviários podem ser classificados em rígidos e flexíveis, ambos com os mesmos objetivos, que são possibilitar aos usuários as melhores condições de uso, com conforto, segurança e buscando maior economia. Os pavimentos asfálticos, de acordo com Bernucci et al. (2010), são aqueles em que o revestimento é composto por uma mistura constituída basicamente de agregados e ligantes asfálticos. O pavimento como um todo é formado por quatro camadas principais: revestimento asfáltico, base, sub-base e subleito, conforme representado na Figura 1.

Figura 1 - Representação das camadas do pavimento



Fonte: Bernucci et al. (2010)

A camada de revestimento asfáltico é a camada superior da estrutura, camada que fica diretamente em contato com os pneus dos veículos. A camada de revestimento asfáltico é a camada responsável por resistir diretamente às ações do tráfego incidente, e transmiti-las de forma atenuada às camadas inferiores, também é função da camada, impermeabilizar o pavimento e melhorar as condições de rolamento.

Ademais, de acordo com Huang (2003) os materiais que melhor resistem aos esforços devem ficar mais próximos à superfície da estrutura, onde as solicitações dos veículos são maiores. Ele complementa afirmando que os materiais com menor resistência, ficam nas partes inferiores, recebendo os esforços já minorados pelas camadas superiores.

Imediatamente abaixo da camada de revestimento asfáltico tem a camada de base, podendo ser executada com diversos materiais. No Rio Grande do Sul, por exemplo, devido a gama elevada de materiais rochosos, tem-se variadas pedreiras que já exploram este material, o que facilita no emprego dos mesmos à camada de base e sub-base do pavimento, devido a isso a camada é feita majoritariamente de materiais pétreos. No entanto, em outros estados, onde não há grande disponibilidade de materiais rochosos, consequentemente pedreiras, o uso de solos estabilizados é

maior. A função da camada de base é aliviar as tensões transmitidas pelos veículos e fazer com que assim as tensões cheguem à sub-base menos acentuadas.

A camada de sub-base se assemelha a camada de base, e pode ou não existir na estrutura. Sua função se equipara com a da base, sendo responsável também por diminuir as tensões para que as mesmas cheguem ao reforço do subleito ou subleito imediatamente menores. Nessa circunstância, o desempenho mecânico das camadas de base e sub-base, compostas de materiais granulares são de grande importância, pois atuam no suporte estrutural do pavimento.

O reforço do subleito é utilizado em algumas estruturas, quando é necessário que a estrutura suporte ainda mais esforços. Sua função, assim como da base e sub-base, é diminuir as tensões que chegam nas camadas adjacentes. No entanto, diferentemente da base e sub-base que utilizam majoritariamente materiais pétreos, ao menos quando há esse tipo de material disponível, o reforço do subleito é feito de solo compactado, podendo ou não ser melhorado, com solos de jazidas que tenham material de melhor qualidade comparado ao solo natural do local (BALBO, 2007).

Por fim, temos a camada de subleito, composta por solo natural compactado, podendo ser compactado com energia normal ou intermediária. É considerada a camada de fundação dos pavimentos.

Conforme Pascoal (2020), a energia de compactação está associada com as deformações. Ao passo que se eleva a energia de normal para intermediária, se obtém um maior valor de módulo de resiliência (MR) e um menor para deformação permanente (DP). Com o aumento da energia de compactação, a tensão confinante passa a ser mais influente no comportamento do solo, e isso não ocorre quando o solo é compactado à energia normal. O mecanismo de densificação consiste na diminuição de volume e, consequentemente, no aumento da densidade. Sua ocorrência pode ser evitada ou controlada através da compactação adequada no momento da construção do pavimento (DNIT, 2006). Diante disso, com maiores valores para o grau de compactação e resistência ao cisalhamento, menor será a vulnerabilidade ao ingresso da água.

Por fim, a umidade é outro fator de suma importância no comportamento dos solos, nas camadas de subleito, reforço do subleito, sub-base e base, sendo as camadas compostas de solos ou materiais pétreos. O teor da umidade deve ser considerado no momento da compactação, à umidade ótima e também sua variação após compactação. Pascoal (2020) ressalta que o teor de umidade é inversamente

proporcional ao comportamento resiliente, bem como o grau de compactação do material. À medida que a umidade aumenta, as deformações também crescem (GUIMARÃES et al., 2018).

Em síntese, todas as camadas do pavimento são de suma importância para a vida útil da estrutura. A faixa de rolamento, a camada asfáltica, é a camada visível aos olhos, e é uma das que mais sofre com as intempéries climáticas, juntamente com o subleito. Na execução a camada asfáltica é a que necessita de maior empenho financeiro e melhor controle tecnológico. Já o subleito tem seu comportamento prejudicado quando em contato com a água, podendo ela ser do lençol freático ou não, devido a isso buscando evitar o efeito das alterações ambientais deve ser executado um sistema de drenagem que atue de maneira eficiente e não prejudique as camadas de estrutura do pavimento.

2.1.1 Tipos de ligantes e revestimentos asfálticos

No Brasil, a Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, a ANP, é o órgão responsável por classificar e garantir a qualidade dos asfaltos, sua resolução descreve as especificações de armazenamento do cimento asfáltico de petróleo (CAP). A escolha dos materiais utilizados na camada de revestimento asfáltico, segundo Cerrati et al. (2015), deve ser feita de forma coerente, considerando as condicionantes de tráfego, clima e estrutura do pavimento, visando à potencialização de propriedades relacionadas ao seu desempenho.

O CAP empregado pode ser o convencional, que é obtido diretamente pelo processo de destilação do petróleo, ou modificado, buscando maior desempenho. Um exemplo de concreto asfáltico modificado é o modificado por polímeros. De acordo com Cerrati et al. (2015), os asfaltos modificados por polímeros são uma alternativa para reduzir os tipos frequentes de falha dos pavimentos, sejam eles, deformações permanentes (afundamento de trilha de roda) ou trincamento por fadiga.

2.2 MECANISMOS DE RUPTURA DO PAVIMENTO

São diversos os fatores que contribuem para a ruptura do pavimento ao longo de sua vida útil. Tais fatores, ligados às intempéries, tráfego, materiais utilizados em cada camada, inclusive a camada de subleito natural do terreno, que é de suma

importância para um o pavimento ter uma boa estrutura, bem como a execução de cada uma das camadas estruturais. Para cada tipo de base, sub-base e revestimento existe um processo específico de execução.

Além disso, deve-se atentar para as condições de drenagem da via, pois muitos dos materiais empregados nas camadas do pavimento têm o comportamento afetado por variações do teor de umidade. Ainda, é necessário considerar diferentes tipos de manutenções na via, seja a manutenção preventiva, corretiva ou de reabilitação. Diversos parâmetros de avaliação nos propiciam uma análise prévia dos defeitos que podem vir a surgir no pavimento, bem como há ensaios específicos capazes de realizar uma avaliação estrutural do pavimento, o que indica os defeitos existentes.

São vários os possíveis defeitos presentes nos pavimentos, porém no Brasil, de acordo com Motta (1991), devido ao clima tropical, tem dois que se sobressaem aos demais: a ruptura por fadiga e a deformação plástica/permanente.

A propagação de trincas no pavimento é o principal mecanismo de ruptura conforme se verificou em estudos feitos nas rodovias federais brasileiras (MOTTA, 1991). A deformação plástica/permanente, também denominado como afundamento de trilha de roda, é um defeito também considerável, e se dá devido ao acúmulo de pequenas deformações, que se somam ao longo da vida útil do pavimento.

2.2.1 Fadiga

Conforme Pinto (1991), o fenômeno de fadiga é o processo de deterioração que o material sofre quando submetido a tensões e deformações repetidas, o que faz com que isso acarrete em trincas, após determinado número de repetições do eixo padrão. Isto é, a fadiga acontece quando o material perde a resistência, por ser solicitado repetidamente por uma carga.

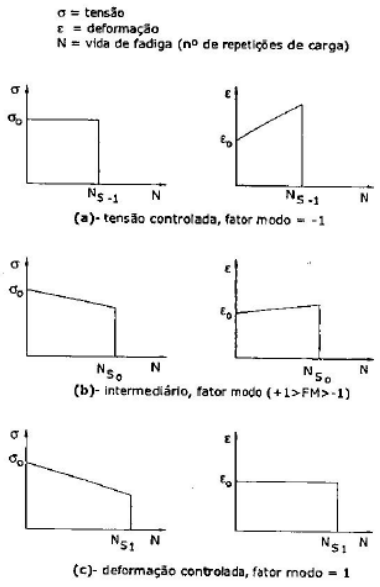
Balbo (2007) acrescenta que a fadiga está relacionada aos níveis de tensão inferiores às tensões de ruptura, evoluindo pouco a pouco, o que resulta na perda das características originais do material e gera o processo de microfissuração, que causa o progressivo aparecimento de fraturas, levando ao rompimento do material.

Iniciam-se trincas, geralmente na parte inferior do revestimento, que se propagam para cima até atingir a superfície, (MEDINA E MOTTA, 2015). E gradativamente as trincas, devido ao carregamento repetido do tráfego, e o processo de reflexão, propagam-se por toda a estrutura, até a superfície da camada de

rolamento. Isso não exclui o fato de que a fadiga pode ter início também na parte superior do revestimento, devido a perda de rigidez devido ao envelhecimento do pavimento.

Medina e Motta (2015), acrescentam que o ensaio de compressão diametral é o mais adequado no Brasil, mas consideram a correlação do mesmo com outros ensaios dinâmicos. O ensaio é realizado a partir de tensões verticais repetidas, distribuídas no friso da geratriz, está não se altera até o corpo-de-prova romper. O ensaio de deformação controlada requer mais atenção, pois a força aplicada deve ser controlada a partir dos desvios de deformação. O ensaio é finalizado quando há uma queda da rigidez do corpo de prova. A Figura 2 é uma representação do comportamento dos revestimentos asfálticos ao carregamento rápido.

Figura 2 - Representação do comportamento dos revestimentos asfálticos ao carregamento repetido



Fonte: Pinto (1991).

2.2.2 Deformação permanente

Sabe-se que o trincamento da camada superior do pavimento, devido a flexão alternada da camada superior, apoiada nas demais, é o defeito mais frequente no Brasil. Não obstante, as deformações permanentes também ocorrem abundantemente no país e tem como principal defeito o afundamento de trilha de roda.

A deformação plástica irreversível que resulta da passagem das cargas leva a uma deformação permanente acumulada em todas as camadas do pavimento, que corresponde ao surgimento da trilha de roda na superfície do revestimento (MOTTA, 1991).

Segundo Medina e Motta (2015), deve se ter um cuidado especial na dosagem das misturas asfálticas, para que resistam aos esforços do tráfego, proporcionados pelo número de ciclos, e para que resistam também às temperaturas, pois essas ações alteram a rigidez do material. Nos ensaios de laboratório busca-se simular as solicitações do tráfego, porém nos ensaios tem-se uma condição de temperatura controlada, o que a campo, não acontece. Logo, a placa ou vigota usada no ensaio não é um modelo físico do pavimento.

A deformação permanente nos pavimentos flexíveis pode estar ou não ligada ao carregamento. A ruptura por cisalhamento, o afundamento de trilha de roda (ATR), e as deformações a longo prazo são defeitos que ocorrem sim devido ao carregamento, seja ele repetido ou centrado. Ademais, as deformações permanentes que não estão associadas ao carregamento, geralmente estão ligadas ao subleito, podendo ele ser constituído de um solo expansivo ou compressível.

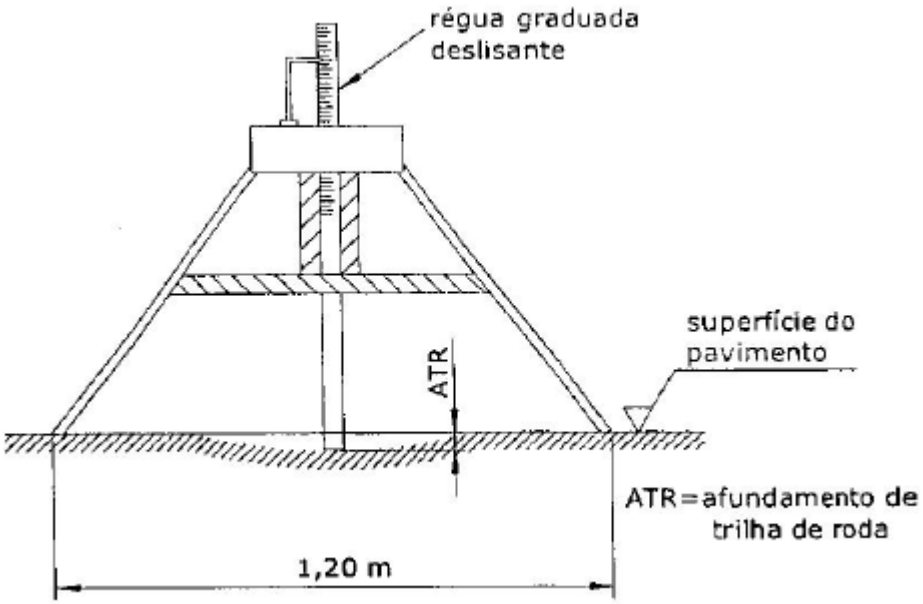
Conforme Guimarães (2009), a deformação permanente depende das solicitações em que o pavimento é submetido, e aumenta conforme a resistência ao cisalhamento dos materiais britados e terrosos diminui, à medida em que se eleva a massa específica do material, a resistência à deformação permanente dos solos aumenta. DNIT (2006) acrescenta que em conformidade com isso temos a importância da energia de compactação do solo, um solo compactado com energia intermediária tende a se comportar melhor que um compactado com energia normal, reduzindo assim a deformação permanente.

O mecanismo de densificação consiste na diminuição de volume e, consequentemente, no aumento da densidade. Sua ocorrência pode ser evitada ou controlada através da compactação adequada no momento da construção do pavimento (DNIT, 2006).

De acordo com Medina e Motta (2015), em uma pista experimental da AASTHO, analisou-se a contribuição de cada camada na deformação permanente total. O revestimento asfáltico contribuiu em média com 32% da DP, à medida que a base de brita contribuiu 4%, a sub-base granular cerca de 45% e o subleito argiloso contribuiu com 19% da deformação permanente.

Nas pistas mede-se o afundamento ou flecha na trilha das rodas com uma treliça de alumínio de 1,20m de base, representada na Figura 3, que possui uma régua vertical corrediça no centro, está se apoia no ponto mais fundo da trilha para medir o afundamento (MEDINA E MOTTA, 2015).

Figura 3 - Modelo de treliça usada para medir afundamento de trilha de roda



Fonte: Medina e Motta (2015).

Bernucci et al. (2010) acrescenta que o afundamento por consolidação é causado sobretudo por má execução, seja por falta de compactação, ou existência de problemas de drenagem, enquanto isso o afundamento plástico, acontece densificação das camadas, ou ruptura por cisalhamento, notamos que há ruptura quando há a deposição de material nas laterais dos trilhos de roda. Em ambos os afundamentos ocorre o surgimento de trincas dentro das trilhas de roda bem como em suas bordas.

2.3 DIMENSIONAMENTO – MÉTODO DNER (1981)

O Método do DNER (1981), é o método utilizado para dimensionamento de pavimentos flexíveis, vigente atualmente no Brasil. O método é também conhecido como método do Engenheiro Murilo Lopes de Souza, que foi quem introduziu esse

modo de dimensionamento no país, em meados da década de 1960. Murilo tomou como base o *Design of Flexible Pavements Considereing Mixed Loads and Traffic Volume*, desenvolvido pela USACE, e tais conclusões geradas pelo trabalho realizado pela USACE foram observadas nas pistas experimentais da AASHTO.

O método foi adaptado para as condições existentes para ser aplicado no Brasil. De acordo com DNIT (2006), aos materiais integrantes do pavimento, são adotados coeficientes de equivalência estrutural tomando por base os resultados obtidos na Pista Experimental da AASHTO, com modificações julgadas oportunas. O método é regulamentado pela 3ª edição do Manual de Pavimentação do DNIT (DNIT, 2006).

A metodologia utiliza informações de capacidade de suporte do subleito obtidas a partir do ensaio de índice de suporte Califórnia (ISC) de corpos de prova indeformados ou moldados em laboratório, como normatizado pelo DNER (1981). Para que seja validada a utilização de um material para subleito, esse deve apresentar expansão menor ou igual a 2% e ISC maior ou igual a 2% (DNIT, 2006).

Após obtenção dos valores de tráfego solicitante à estrutura e valores de ISC do subleito é calculada uma espessura total de pavimento em termos de material granular que é posteriormente separada em camadas utilizando os coeficientes estruturais de equivalência a partir da escolha do material a ser usado para a composição.

O dimensionamento pelo método do DNER (1981), foi desenvolvido para proteger a camada de subleito do pavimento, protege-la contra ruptura por cisalhamento ou deformações excessivas. Tal proteção vem por meio das camadas superiores ao subleito. A capacidade de suporte das camadas do pavimento é dada por meio do ISC, conforme DNIT (2006), adotando-se o método de ensaio preconizado pelo DNER (1981), em corpos de prova indeformados ou moldados em laboratório para as condições de massa específica aparente e umidade especificada para o serviço.

Ademais, para o dimensionamento do pavimento também é levado em conta o Número de Equivalência de Eixos (N) que é o número de repetições dos eixos dos veículos. O cálculo do N tem como base o Fator de Equivalência de Carga (FEC), da USASE, com o eixo padrão, que é o veículo de eixo simples de rodas duplas, que possui 8,2 tf e pressão de inflação dos pneus de 0,56 Mpa. Além disso, o número N é corrigido devido as diversas estações do ano, pois a mudança gera variação de

umidade dos materiais presentes na estrutura do pavimento, o fator responsável por essa correção é o Fator Regional (FR), que também está presente no cálculo do número N. Nos projetos brasileiros se adota um valor de FR igual a 1,0, que tem como base os estudos desenvolvidos no IPR/ DNER.

Com os valores de tráfego e valores de ISC do subleito segue-se para o dimensionamento do pavimento, em termos de espessuras dos materiais, e camadas, para isso são usados os coeficientes de equivalência estrutural. De acordo com Balbo (1997), os coeficientes de equivalência estrutural são conferidos aos materiais participantes das camadas do pavimento de modo intuitivo, tais equivalências representam a capacidade de um dado material em distribuir tensões sobre as camadas adjacentes.

Na Tabela 1 são mostrados os equivalentes estruturais para os diferentes materiais pertencentes às estruturas do pavimento.

Tabela 1 - Coeficiente de equivalência estrutural

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

Fonte: Adaptado de DNIT (2006).

Para designar os coeficientes estruturais, de acordo às camadas a que pertencem, tem-se:

a) Revestimento: K_R

b) Base: K_B

c) Sub-base: K_{20}

d) Reforço do subleito: K_n

e) Subleito: K_m

Bem como a distância da base das camadas até o topo da camada de rolamento:

a) Revestimento: R

b) Base: B

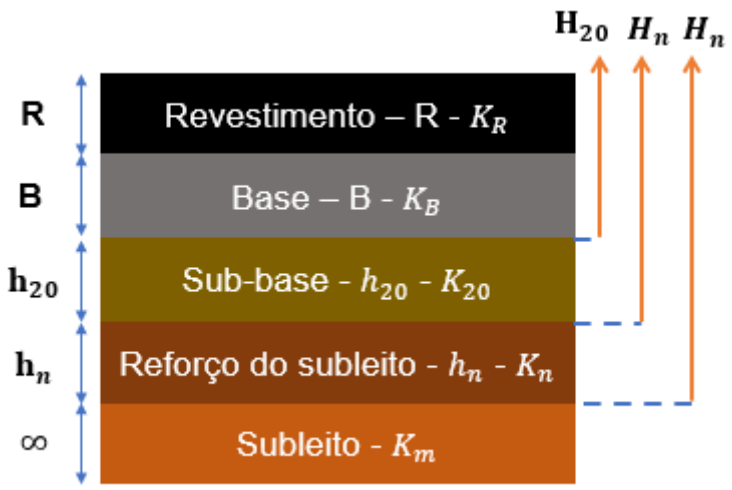
c) Sub-base: h_{20}

d) Reforço do subleito: h_n

e) Subleito: ∞

A Figura 4 representa a configuração dos coeficientes estruturais da estrutura do pavimento.

Figura 4 - Esquema de proteção da camada de subleito



Fonte: Autora.

Em síntese Coutinho (2011), argumenta que a metodologia busca à proteção da camada de subleito do pavimento, para que não venha a ocorrer rupturas por cisalhamento, assim, as camadas acima são dimensionadas com esse intuito.

Como critérios de ruptura da estrutura são considerados o cisalhamento das camadas granulares e solos e a deformação excessiva em trilhas de roda. Porém, neste método não são consideradas rupturas por fadiga, que pode ser apresentada devido às repetições dadas pela ação do tráfego (PINTO, 1991).

Este método, apesar de ter cumprido seu propósito por muitos anos, possui uma base experimental referente às características climáticas e dos solos dos EUA,

assim não levando em consideração as características peculiares dos solos e clima brasileiro.

2.4 MÉTODO MECANÍSTICO-EMPÍRICO

De acordo com Carvalho (1997) quando o comportamento do pavimento é estudado em relação às deformações de seus materiais, existem pontos que se deve ter atenção, como as cargas aplicadas, velocidade e tipo de via, espessura das camadas e propriedades de cada tipo de material, fatores climáticos, dentre outros, que devem ser levados em conta, analisados e compreendidos.

Com isso, se tornou imprescindível novos estudos sobre os materiais utilizados nas camadas da estrutura do pavimento, bem como a inserção de novos ensaios dos materiais empregados. Consequentemente, às metodologias empíricas, até então utilizadas no Brasil, passaram a ter pontos fracos, em relação a não inserção de parâmetros de ensaio em relação às deformações, o que acarreta em não ser possível utilizar com precisão às propriedades dos materiais.

Assim sendo, ciente das carências do método empírico, iniciou-se um estudo para a implantação de uma metodologia mecanístico-empírico no país, buscando uma metodologia que incluíssem parâmetros definidos em ensaios de laboratório, tanto para solos e materiais granulares quanto para os revestimentos asfálticos.

O surgimento do Método de Dimensionamento Nacional, o hoje popularmente conhecido como Método MeDiNa, se deu inicialmente por meio do SisPav, como o programa era chamado. O SisPav foi desenvolvido e apresentado na tese de doutorado de Franco (2007).

De acordo com Franco (2007), a metodologia utilizada no SisPav consiste em agrupar os dados dos materiais usados, juntamente com os parâmetros de tráfego e as condições do clima. O programa analisa o comportamento de cada material empregado a estrutura do pavimento, bem como critérios de deformações, carregamentos e tensões, prevendo as solicitações que o pavimento sofrerá no decorrer de sua vida útil, com isso pode-se chegar às espessuras de cada camada utilizada na estrutura.

Franco (2007) acrescenta que a nova metodologia só pode ser desenvolvida a partir de modelos matemáticos obtidos de regressões de dados de ensaios laboratoriais, tais ensaios buscam traduzir as tensões, deslocamentos e deformações

e coincidi-las com os parâmetros admissíveis para a vida útil do pavimento. Os modelos matemáticos utilizados nos dão a fração mecanística do método.

Com a evolução dos estudos e o aperfeiçoamento do método surge o *software* MeDiNa, que é consequência dos melhoramentos aplicados ao programa SisPav. Tais avanços ocorreram por meio de cooperações do 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/UFRJ), houve também a colaboração do Centro de Pesquisas da Petrobrás (CENPES) e de variadas Universidades do Brasil, representadas pela Rede de Tecnologia em Asfalto, incluindo a Universidade Federal de Santa Maria, representada pelo Grupo de Estudos em Pavimentação e Segurança Viária (GEPPASV).

O *software* que já apresenta uma evolução desde seu surgimento e atualmente já é regularizado pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes está na versão 1.1.5.0 de dezembro de 2020, e leva em consideração à metodologia mecanística-empírica.

O método leva o nome MeDiNa, como forma de homenagem ao professor Jacques de Medina, que é referência na área, considerado uma liderança como formador e motivador na área de geotecnia e pavimentação.

2.4.1 Método de Dimensionamento Nacional – MeDiNa

Conforme Franco (2007), os dados que o *software* considera para avaliação de ruptura, usando a metodologia mecanística-empírica, são a deformação permanente, deflexão máxima na superfície e fadiga do revestimento. Diante disso se fazem necessários os ensaios de Módulo de Resiliência e Deformação Permanente para solos e materiais granulares, além dos ensaios já fundamentados na classificação e caracterização dos materiais. Segundo Medina e Motta (2015) informações relativas ao revestimento também se tornaram fundamentais para a utilização do método, como coeficiente de Poisson, teor de asfalto, ensaios de *Flow Number*, para a deformação permanente do material asfáltico, e ensaio de compressão diametral para obter a curva de fadiga deste material.

De acordo com DNIT (2020) a análise ou dimensionamento da estrutura por meio do método requer informações amplas dos materiais usados na estrutura do pavimento, como também é necessário as características dos mesmos sejam

inseridas de forma correta no programa, só assim os resultados serão válidos. Outra necessidade para que o *software* trabalhe corretamente é a inserção do Número Equivalente de Eixos (N) e a taxa de crescimento anual.

O MeDiNa pode ser utilizado para projetos de reforço de pavimento e para o desenvolvimento de projetos novos. O *software* pede que o projeto a ser desenvolvido seja identificado com nome, que seja informado o responsável, a empresa, a via, dentre outros, para que seja facilmente identificado.

Inicialmente o MeDiNa vem com uma estrutura padrão, como exemplo ao projetista, essa estrutura possui quatro camadas, conforme DNIT (2020) o mínimo de camadas estruturais que o programa aceita são três, e no máximo oito.

É possível, após o projetista lançar os dados do projeto no *software*, que ele análise a estrutura ou a dimensione. A função de análise realiza os cálculos e verifica os critérios de área trincada e/ou deformação permanente, não alterando a espessura da camada em questão. Depois de realizar a análise, o *software* apresenta um resumo para que o projetista avalie e realize possíveis mudanças. A função de dimensionar, dimensiona a camada selecionada, as camadas a serem dimensionadas devem ser marcadas uma a uma pelo projetista.

No modo reforço apenas a camada asfáltica nova poderá ser dimensionada. Nesta opção, o programa irá realizar diversas análises, alterando a espessura da camada marcada de modo a atender primeiramente o critério de fadiga (DNIT, 2020).

A limitação das camadas inseridas no *software*, para os materiais betuminosos, fica entre 5 e 15 cm, cada camada, podendo ser inserida mais de uma. Já para materiais granulares e para os solos finos, siltosos e argilosos, o limite é entre 10 e 40 cm. Os solos e materiais pétreos para base, sub-base, reforço de subleito e subleito inseridos do MeDiNa são representados pelos parâmetros de módulo de resiliência, coeficiente de poisson e deformação permanente, e não são avaliados quanto à fadiga.

Conforme DNIT (2020), ao programa é incorporado uma base de dados, com informações dos materiais ensaiados, porém é possível também que o projetista ensaie seus próprios materiais e os insira em seus projetos. Ademais o programa utiliza para os cálculos o eixo padrão rodoviário, seus dados estão ilustrados na Figura 5.

Figura 5 - Dados do eixo padrão rodoviário

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

Fonte: MeDiNa – v.1.1.5.0 – dezembro/ 2020

DNIT (2020) orienta que quanto às informações de tráfego o programa calcula automaticamente o número N, este pode ser obtido através do Volume Médio Diário (VDM), e do fator de veículo (FV). Com isso o programa calcula o N anual, na Figura 6 está representado o local para inserção dos dados de tráfego no *software* MeDiNa. Mesmo que o programa calcule, o N pode ser inserido também de forma manual.

Figura 6 - Dados do tráfego

DADOS DO TRÁFEGO	
Tipo de Via:	Sistema Arterial Primário
VMD (1º ano):	1370
FV:	1,000
N anual (1º ano):	5,00e+05
% Veículos na faixa de projeto:	100
N Anual da faixa:	5,00e+05
Taxa de crescimento (%):	0,0
Período de projeto (anos):	10
N Total:	5,00e+06

Fonte: MeDiNa – v.1.1.5.0 – dezembro/ 2020

Os tipos de vias foram definidos em conformidade com a hierarquia dos sistemas funcionais publicada pelo DNIT. Eles definem os critérios de parada do dimensionamento, bem como os graus de confiabilidade das análises realizadas pelo MeDiNa, (DNIT, 2020).

A Tabela 2 a seguir nos indica os parâmetros utilizados pelo MeDiNa, levando em consideração o tipo de via.

Tabela 2 - Critérios para cada tipo de via

TIPO DE VIA	DEFORMAÇÃO PERMANENTE
Sistema Arterial Principal	10mm
Sistema Arterial Primário	13mm
Sistema Arterial Secundário	20mm
Sistema Coletor Primário	13mm
Sistema Coletor Secundário	20mm
Sistema Local	20mm

Fonte: Adaptado de DNIT (2020)

Após os dados serem inseridos e a análise ou dimensionamento feitos, o *software* fornece resultados. Os resultados segundo o Manual MeDiNa desenvolvido pelo DNIT (2020), podem ser apresentados de três formas. Uma delas é como evolução mensal de dados, a tabela de evolução mensal de dados nos apresenta os resultados de área trincada, deformação permanente total e módulo signoidal, este último apenas quando houver camadas cimentadas na estrutura, estes resultados podem ser apresentados também de forma resumida, que apresenta a contribuição de deformação permanente de cada uma das camadas. Outra forma de apresentação, é por meio das bacias de deflexão, medidas em 10^{-2}mm no topo de cada uma das camadas e no subleito, as bacias são calculadas com os parâmetros fornecidos pelo projetista, simulando os equipamentos *Falling Weight Deflectometer* (FWD) e *Viga Benkelmann.* Por último, temos o relatório completo do projeto, o relatório reúne todas as informações inseridas no *software*, e os resultados obtidos, podendo ser impresso ou arquivado.

2.4.2 Ensaios triaxiais de módulo de resiliência e deformação permanente

Bernucci et al. (2010) nos traz que as pesquisas sobre o comportamento resiliente dos materiais para pavimentação tiveram início na década de 1930 por Francis Hveem. Balbo (2007) define a resiliência como a capacidade de um corpo deformado elasticamente guardar energia e devolver quando as tensões pararem de ser aplicadas, não segurando as deformações. O comportamento elástico dos

materiais é dado pelo módulo de resiliência, sendo essencial para realizar uma abordagem mecanicista dos pavimentos.

Para se efetuar a análise da deformabilidade da estrutura precisa-se conhecer as relações tensão-deformação ou os módulos de deformabilidade dos materiais que irão compor as camadas. Esse é o Princípio da Mecânica dos Pavimentos (MOTTA, 1991).

Com isso, para obter o módulo de resiliência (MR), é necessário realizar ensaios triaxiais de carga repetidas. Esses ensaios podem ser realizados para solos (DNIT 134/2018) e materiais granulares. Os ensaios triaxiais de módulo de resiliência simulam as condições de carregamento repetido e cíclico em que o pavimento é submetido no campo. O MR é definido como a razão entre a tensão desvio aplicada e a deformação resiliente axial resultante. Já para obter o módulo de resiliência de misturas asfálticas, segundo Medina e Motta (2015), um dos ensaios utilizados é o de cilindros à compressão diametral (DNIT 183/2018), dentro outros.

O ensaio triaxial de cargas repetidas é capaz de reproduzir em laboratório a configuração das tensões desviadora e confinantes sofridas por solos e materiais granulares. O equipamento funciona com duas diferentes tensões, aplicadas pela ação do ar comprimido e controladas por um sistema regulador de pressão. O módulo de resiliência no ensaio triaxial de cargas repetidas é definido pela Equação 1:

$$MR = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_r} \tag{1}$$

Onde:

σd é a tensão desvio, a diferença entre as tensões normais, vertical (σ1) e horizontal (σ3);

εr é a deformação resiliente axial vertical, expresso na Equação 2.

$$\varepsilon_r = \frac{\Delta_h}{h_0} \tag{2}$$

Onde:

Δh é o deslocamento vertical máximo;

h0 é o comprimento inicial de referência do CP cilíndrico.

Diversos autores, no decorrer do tempo, apresentaram modelos de equações para apresentar o módulo de resiliência, como o Modelo de Biarez, apresentado por Preussler (1978); o Modelo de Svenson (1980); e o Modelo Composto (Pezo et al., 1992).

O modelo composto segundo Pezo et al. (1992) foi elaborado buscando o aprimoramento da metodologia, o nome composto é dado pois, é aplicado a solos com influência tanto da tensão desvio, quanto da tensão confinante, diferentemente dos demais, como mostra a Equação 3.

$$MR = k_1 . \sigma_3^k . \sigma_d^{k_3} \quad (3)$$

Onde:

MR é o módulo de resiliência;

σ_3 é a tensão confinante;

σ_d é a tensão desvio;

k1, k2 e k3 são parâmetros do modelo determinados experimentalmente.

Balbo (2007), pontua que analisar as tensões desvio e confinante simultaneamente, como acontece no método composto, é importante pois alguns solos, com composição granulométrica pode apresentar comportamento de solo fino coesivo. No Manual de Pavimentação do DNIT o uso do modelo composto é recomendado para caracterizar o módulo de resiliência do subleito.

Pascoal (2020) acrescenta que o módulo de resiliência varia conforme a condição mineralógica, plasticidade da fração fina e textura do material, e também quanto ao tempo de atuação da carga repetida, pois o MR é estabelecido em função da velocidade dos veículos e do ponto no interior da estrutura do pavimento que se deseja obter o módulo. A frequência dos carregamentos é dada pelas condições de tráfego da via e também é um parâmetro que influencia no módulo de resiliência.

Ademais, para solos coesivos, Medina e Preussler (1980), indicam que a umidade e a massa específica de moldagem são fatores que afetam o módulo de

resiliência, pois tem seu valor reduzido conforme o aumento da umidade. Sabendo disso, busca-se realizar a compactação na umidade ótima buscando reduzir a influência no resultado final.

Já para materiais não coesivos, Preussler (1983) diz que quando exposto ao carregamento repetido, grandes deformações acontecem. Isso devido aos movimentos de acomodamento das partículas, com isso a rigidez tem variabilidade durante a execução do ensaio.

Para os materiais terrosos diversos modelos e equações matemáticas procuram descrever o comportamento da deformação permanente. De acordo com Guimarães (2009), no Brasil o modelo mais é conhecido é o Monismith, desenvolvido por Monismith et al. (1975), o modelo representa de maneira satisfatória o comportamento de solos granulares e solos argilosos, porém foi desenvolvido com poucos ciclos de aplicação de carga em relação aos ciclos previstos em projetos. Guimarães et al. (2004) recomendam utilizar essa equação enquanto a taxa de deformação não for nula, devido a isso desenvolveram um complemento para a equação, que limita o uso da mesma até o número de ciclos do *shakedown* (NSD). Rezende (2009) propôs uma mudança na equação de Monismith para a estimativa da deformação permanente, tal mudança se deu na incorporação da tensão desvio

Segundo Medina e Motta (2015), o modelo de Uzan, que foi proposto no ano de 1982 e relaciona o acúmulo da deformação resiliente com a deformação permanente. Guimarães (2009) desenvolveu um modelo a partir da deformação múltipla de dados obtidos em ensaios de DP para previsão da deformação permanente. Os parâmetros deste modelo são estimados de acordo com a sua aplicação, podendo ser aplicado ao subleito, base e sub-base.

Por fim, Guimarães (2009) desenvolveu um modelo para o estudo da deformação permanente em solos tropicais (DNIT 179/2018) e materiais pedregulhosos. O ensaio de onde saem os dados para o método ser utilizado é o ensaio de deformação permanente, realizado no equipamento triaxial de cargas repetidas. No laboratório o ensaio acontece por meio da aplicação de um grande número de ciclos em um corpo de prova, com um carregamento repetido para um estado de tensões, aferindo as deformações acumuladas ao longo dos ciclos. Os dados obtidos são compilados e processados por um computador.

Conforme proposto por Guimarães (2009), a partir de quatro constantes apuradas em laboratório é que são feitos os cálculos de deformação permanente. DNIT (2020) explica, que no MeDiNa são utilizadas as tensões sob, e entre as rodas.

A Equação 4 é aplicada no cálculo da deformação permanente em cada camada, para obter os valores de DP de cada uma e posteriormente somar para encontrar a deformação permanente total da estrutura.

$$\varepsilon_p^{esp} = \psi_1 . (\sigma_3)^{\psi 2} . (\sigma_d)^{\psi 3} . (N)^{\psi 4} \quad (4)$$

Onde:

$\varepsilon_{p\ (\%)}$: deformação específica plástica;

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

σ_3: tensão confinante;

σ_d: tensão desvio;

ρ_0: tensão de referência (tensão atmosférica);

N: número de ciclos de aplicação de carga.

Ademais, o programa tem como parâmetro que cada camada não tenha deformação permanente superior a 5% de sua espessura, se isso acontecer, o programa emite um alerta e cabe ao projetista estudar uma solução.

2.4.3 Coeficiente do Poisson

Balbo (2007), traz o coeficiente de Poisson (μ), como parâmetro necessário para análise dos sistemas com camadas elásticas. O coeficiente é dado pelo inverso do vínculo entre a deformação vertical, sofrida pelo material, conhecendo a carga aplicada, e a deformação horizontal sofrida pelo corpo-de-prova durante ensaio uniaxial.

Os coeficientes do Poisson são fixados em valores típicos para cada material, já que interferem pouco com a bacia de deflexões, (DNIT, 2006). Na Tabela 3 encontra-se valores típicos de coeficiente de Poisson de acordo com Balbo (2007).

Tabela 3 - Valores típicos de Coeficiente de Poisson

Material	Faixa de variação
Concretos asfálticos	0,32 – 0,38
Concreto de cimento Portland	0,15 - 0,20
BGS, MH, BC	0,35 - 0,40
CCR, BGTC	0,15 - 0,20
SC, SMC	0,20 - 0,30
SCA	0,25 - 0,30
Solos Arenosos	0,30 - 0,35
Areias Compactadas	0,35 - 0,40
Solos Finos	0,40 - 0,45

Fonte: Balbo (2007)

2.4.4 Flow number

Segundo DNIT (2020) a deformação permanente da camada asfáltica é desconsiderada para o cálculo do afundamento de trilha de roda. No entanto a mistura da camada asfáltica deve respeitar o ensaio para obtenção da classe de desempenho *flow number*.

Na Tabela 4 seguinte estão apresentados os limites das classes de desempenho das misturas asfálticas.

Tabela 4 - Limites das classes de desempenho das misturas asfálticas

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

Fonte: Adaptado de Nascimento (2014) apud DNIT (2020)

Em termos práticos, o programa MeDiNa gerou curvas de interpolação de cada condição de tráfego, definindo um número interpolada para cada Número de repetições de carga. Essa interpolação visa eliminar a descontinuidade no *Flow Number*, ao longo do N.

2.5 ORÇAMENTAÇÃO DOS PAVIMENTOS ASFÁLTICOS

2.5.1 Desenvolvimento e importância da orçamentação

O orçamento continua sendo um dos temas mais importantes da Engenharia Civil, pois é uma peça-chave em todo o ciclo de vida da construção (CARDOSO, 2020). É inviável fazer verdadeira engenharia sem operar e calcular preços e custos, para isso é necessário preparo, pois ter o controle e o gerenciamento de custos bem estabelecidos são primordiais.

Segundo Cardoso (2020) antes mesmo do início da obra é fundamental para o bom desenvolvimento da mesma que tenhamos um orçamento definido, pois o orçamento é a fonte de referência para o planejamento e a elaboração do cronograma físico-financeiro da obra. Isso inclui as compras dos materiais que virão a ser utilizados, bem como buscar as melhores negociações com os fornecedores de cada material, buscando chegar a uma boa medição de obra ao final do período. Sendo assim, o orçamento é o documento que engenheiro deve se atentar aos mínimos detalhes, pois é parte integrante do contrato e serve como segurança, podendo haver aditivos de valores e reajustes, conforme a variação dos insumos no decorrer da obra.

Ademais, tais variações podem ser acompanhadas pela base de dados do Sistema de Custos Referenciais de Obras (SICRO) e/ou o Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil (SINAPI). Quando se fala em materiais betuminosos, também é possível acompanhar a variação do custo dos materiais pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP).

A orçamentação divide-se em custos diretos e indiretos. Segundo Tisaka (2006), custos diretos são todos os custos envolvidos justamente na execução da obra, onde estão incluídos os insumos de materiais, mão de obra e equipamentos utilizados na produção, caso não haja produção tais custos não existirão. Sobre os custos indiretos de acordo com o mesmo autor os custos se dão em relação as despesas não vinculadas aos serviços, mas sim ao conjunto da empresa, como custos

administrativos, encargos sociais, despesas de canteiro, Anotações de responsabilidade técnica (ART's), dentre outras, que existirão até que a obra ou empresa seja finalizada ou fechada, quase que independentemente da produção diária.

Partindo do escopo dos projetos, que são a determinação do trabalho a ser realizado, o orçamento será o somatório dos custos diretos com os custos indiretos, acrescidos de impostos calculados sobre o preço de venda e o lucro.

Conforme Matos (2006), o orçamento pode-se classificar em três, de acordo com grau de detalhamento:

a) Estimativa de custo: estima o custo de um empreendimento, isto é, apresenta um custo aproximado, partindo de dados históricos ou calculando a partir de projetos semelhantes;

b) Orçamento preliminar: é um levantamento mais detalhado que a estimativa de custo, pois é feito a partir de algumas quantidades e de cotações de preços;

c) Orçamento analítico: é o mais detalhado, se aproxima da realidade da obra, é calculado através de composições de custos de todos os serviços e também de cotações dos mesmos.

De acordo com Tisaka (2006) uma boa orçamentação está profundamente ligada à qualidade do investimento. Seja o orçamento para uso interno, ou para fins de licitação pública ou privada. A Lei Federal nº 8.666/93, mais conhecida como Lei de Licitações, foi aprovada em 1993 no Congresso Nacional, e sancionada pelo Presidente da República. A Lei trouxe grandes avanços à regulamentação dos métodos de licitação pública, deixando os conceitos mais claros e sanando algumas dúvidas existentes.

É importante salientar que o princípio fundamental que rege atualmente a Lei de Licitações é o menor preço de oferta, não se permitindo negociações após a abertura das propostas dos concorrentes (TISAKA, 2006). No entanto, mesmo que a intenção dos legisladores tenha sido para melhorar o sistema, a Lei contém um defeito irremovível, que consiste em não levar em conta a exigência do nível de qualidade do produto/ serviço do fornecedor contratado.

2.5.2 Orçamentação a partir de projetos desenvolvidos pelo MeDiNa

No Brasil, a orçamentação dos pavimentos asfálticos tem como base as composições de custo do Sistema de Custos Rodoviários. Os valores apresentados pelo SICRO são obtidos por meio de pesquisas regionais de mercado e os valores unitários de cada item são apresentados pelo preço médio encontrado. Além do SICRO, para os materiais betuminosos presentes na camada de revestimento do pavimento os valores de referência são retirados ANP.

Segundo Chiarello et al. (2019) ao orçar projetos dimensionados pelo método mecanístico-empírico, temos maior confiabilidade, pois o método nos passa maior segurança, se comparado aos demais.

Chiarello et al. (2019) ainda salienta que devido a maior confiabilidade do método, ocasionalmente os projetos resultam em maiores espessuras de camada, o que acarreta em maior custo para a estrutura por quilômetro.

No entanto quando comparado ao número de passagens do eixo padrão, o custo pode vir a ser menor, pois a vida útil da estrutura é maior. Isso será um dos tópicos estudados no presente trabalho.

3 METODOLOGIA

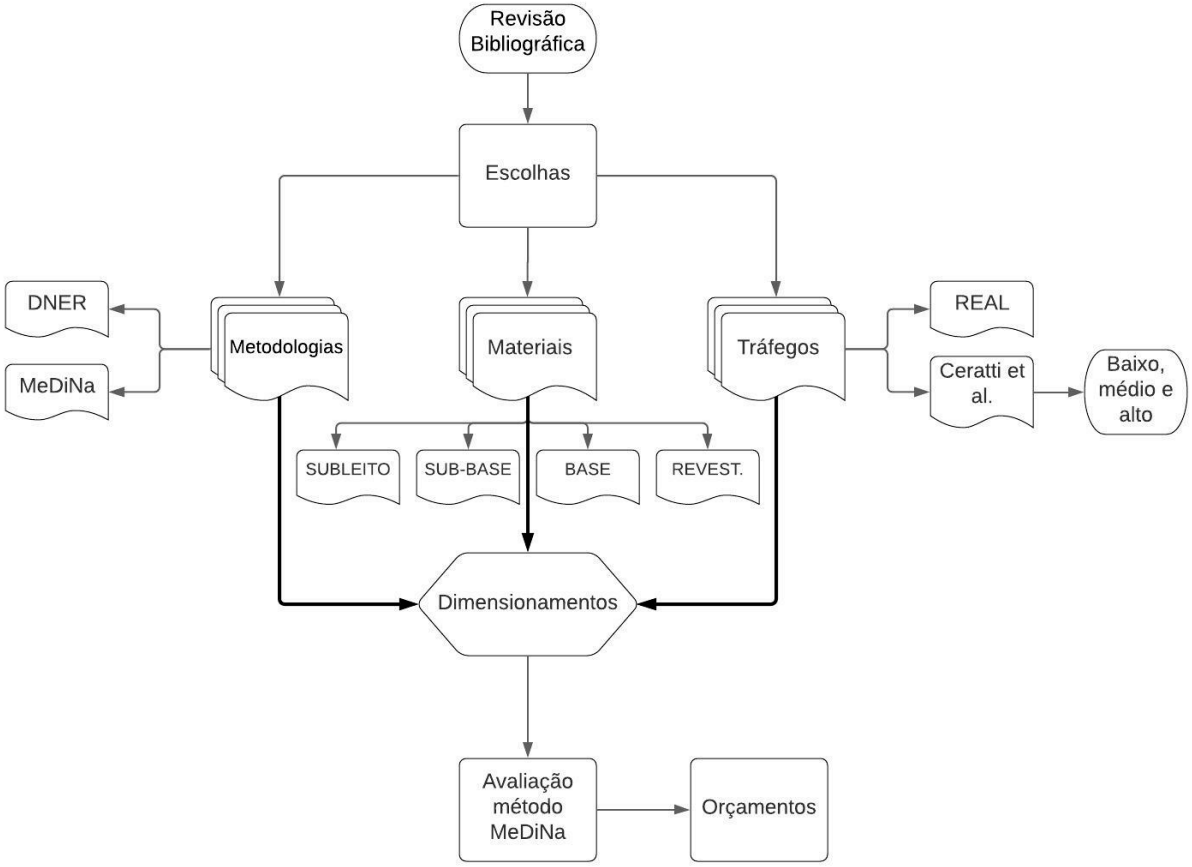
Neste capítulo será apresentado o planejamento adotado para a realização desta pesquisa. Além disso, será apresentado de que modo se deu a definição dos materiais a serem utilizados, ou seja, a pesquisa feita para coleta de dados da caracterização destes materiais. Ainda, serão apresentadas as estruturas estudadas, de acordo com os tráfegos e materiais utilizados. Foi avaliada a estrutura real do trecho analisado, além de novas estruturas dimensionadas no decorrer da elaboração deste trabalho. Com isso, teremos a análise dos resultados, a partir das conclusões retiradas dos resultados do MeDiNa. Por fim, são realizadas análises orçamentárias a partir das estruturas que melhor se adaptam as necessidades do trecho.

3.1 PLANEJAMENTO DA PESQUISA

O planejamento da pesquisa, exposto na Figura 7, se deu a partir da definição das metodologias de dimensionamento que foram utilizadas, sendo: o método do DNER (1981), que utiliza metodologia empírica, e método MeDiNa, que é um método mecanístico-empírico, ambos são regularizados no Brasil, pelo DNIT.

Posteriormente a escolha dos métodos, foi feita a escolha dos materiais a serem utilizados nas camadas do pavimento e definidos os tráfegos a serem considerados. Ressalta-se que os materiais escolhidos para compor as camadas adjacentes ao revestimento, foram empregados em um trecho da RS-342, em Cruz Alta, no Rio Grande do Sul, e tiveram suas propriedades físicas e mecânicas avaliadas por Pascoal (2020) e Sagrilo (2020). Além destes, foram selecionados os materiais estudados por Silva (2021) e Brizolla et al. (2021). Foi envolvido na metodologia o tráfego real do trecho da RS-342. Além do tráfego real (Nr: $3,57 \times 10^7$) foram utilizados os tráfegos propostos por Ceratti et al. (2015), que consistem em tráfegos baixo (Nb: $1,00 \times 10^6$), médio (Nm: $5,00 \times 10^6$) e alto (Na: $1,00 \times 10^7$).

Figura 7 - Fluxograma de planejamento da pesquisa



Fonte: Autora.

Foram realizados os dimensionamentos com o objetivo de analisar o comportamento das estruturas frente a mudança de energia de compactação do subleito, onde foram utilizadas energia normal e energia intermediária de compactação, bem como a influência da alteração dos materiais da camada de sub-base, ora utilizando BGS, ora utilizando solo laterítico com ou sem adições ou mistura de solo-brita.

Primeiramente foram dimensionadas seis estruturas distintas, pelo método do DNER (1981), e após serem dimensionadas pelo DNER (1981), foram analisadas e avaliadas dentro do programa MeDiNa, juntamente com a estrutura real do trecho. A análise realizada através do MeDiNa proporciona verificar a área trincada e o afundamento de trilha de roda estimados do pavimento no fim do período de projeto. Além das estruturas dimensionadas pelo DNER (1981), também foram dimensionadas

pelo método de dimensionamento nacional, doze estruturas distintas para cada um dos quatro N de projeto determinado.

Em síntese, considerando que todas as camadas que compõem a estrutura do pavimento flexível devem suportar as demandas de tráfego e tendo em vista o desenvolvimento e a transição do novo método de projeto brasileiro, se faz necessário uma análise comparativa entre estruturas projetadas pelo método de projeto do DNER (1981) e o método que está em transição, o MeDiNa. A análise estrutural e a viabilidade financeira das estruturas de pavimentos projetadas por diferentes metodologias foram avaliadas, além de compará-las também quanto aos mecanismos de deterioração, ou seja, a deformação permanente e a ruptura por fadiga.

Além de comparar o comportamento estrutural das estruturas propostas, quanto à área fissuração e o ATR, será apresentada uma projeção de custo para estruturas selecionadas, a fim de avaliar a viabilidade financeira apresentada por elas, considerando as duas metodologias de projeto e os materiais empregados. Por fim, foi calculado o custo estimado de estruturas selecionadas, com base em um quilômetro de rodovia, utilizando valores oriundos do SICRO e da ANP. O custo global foi avaliado em relação ao seu desempenho, associando-o à solicitação de tráfego em cada solução indicada.

3.2 DEFINIÇÃO DOS MATERIAIS

Nesta seção serão apresentados os materiais utilizados para compor a as estruturas, bem como o motivo pelo qual eles foram escolhidos e a classificação de cada um, a fim de demonstrar os coeficientes usados na elaboração dos projetos.

3.2.1 Subleito

Para o subleito empregado em todas as estruturas foi utilizado o solo estudado por Pascoal (2020). Este solo é oriundo da cidade de Cruz Alta, localizada na região noroeste do Rio Grande do Sul, classificado como LG’ demonstrando assim, possuir comportamento laterítico pela metodologia MCT. O material foi utilizado na estrutura do pavimento que compõe o trecho da RS-342, estrutura na qual também faz parte desta pesquisa e foi avaliada pelo método mecanístico-empírico.

Pascoal (2020) em sua pesquisa de dissertação coletou amostras dos horizontes A, B e C, porém para o presente trabalho foi utilizado apenas as características dos matérias no horizonte B, isso se deve ao comportamento mais uniforme que o material demonstrou durante a caracterização, juntamente com o menor teor de matéria orgânica em comparação com o horizonte A e menor identidade com a rocha como o horizonte C.

Na composição da estrutura real, o solo laterítico foi utilizado para o subleito, sendo compactado em energia normal no corpo do aterro e compactado na energia intermediária para a camada final de terraplanagem. Na presente pesquisa, foi adotado uma nomenclatura para cada energia, sendo “Solo EN” para o solo compactado em energia normal e “Solo EI” para o solo compactado em energia intermediária.

A Tabela 5 apresenta os parâmetros do Solo EN e do Solo EI, parâmetros que foram considerados nas análises e no dimensionamento das estruturas. Cabe ressaltar que nem todas as informações apresentadas, são necessárias para entrada de dados e dimensionamento no MeDiNa.

Tabela 5 - Parâmetros do Solo EN e Solo EI utilizados nas estruturas

Dados relevantes ao dimensionamento		**SOLO EN**	**SOLO EI**
Parâmetros	Poisson	0,45	
	Contato	não aderido	
Módulo de Resiliência	Modelo Composto	Res. não linear	Res. não linear
	k1	144,29	739,2
	k2	0,18	0,34
	k3	-0,24	0,004
Características	MCT	SOLO LG'	SOLO LG'
	MEAS (g/cm3)	1,55	1,62
	Wot (%)	28,9	25,6
	EC	normal	intermediária
Deformação Permanente	Modelo	Guimarães (2009)	
	Ψ1	0,089	0,017
	Ψ2	0,225	0,699
	Ψ3	2,161	0,517
	Ψ4	0,095	0,103

Fonte: Adaptado de Pascoal (2020)

3.2.2 Sub-base

Para compor a camada de sub-base foram utilizados diversos materiais, em diferentes energias de compactação. As sub-bases utilizadas são formadas a partir de materiais pétreos, solos e solos com adições de outros materiais.

O primeiro material utilizado, a brita graduada simples (BGS) foi retirada da base de dados do MeDiNa. Segundo Lima e Motta (2015) a BGS é um dos materiais mais utilizados no Brasil, como sub-base ou base de pavimentos asfálticos, ademais as autoras acrescentam que os órgãos rodoviários têm especificações que prescrevem sua distribuição granulométrica por meio de faixas e qualidade dos agregados, tais especificações dos materiais são obtidas por meio dos ensaios tradicionais realizados. No entanto, as distintas faixas de órgãos rodoviários para sub-bases/ bases granulares permitem a utilização de materiais com granulometrias bastante diferentes, apresentando grande abrangência sem parâmetros definidores do empacotamento. Os parâmetros de caracterização da BGS C1 presentes no banco de dados do MeDiNa estão listados na Tabela 6 - Parâmetros BGS C1 utilizados nas estruturas.

Tabela 6 - Parâmetros BGS C1 utilizados nas estruturas

Dados relevantes ao dimensionamento		**BGS C1**
Parâmetros	Poisson	0,35
	Contato	não aderido
Módulo de Resiliência	Modelo	Res. linear
	Módulo (Mpa)	259
Características	Descrição do Material	Brita graduada
	MEAS (g/cm3)	2,268
	wot (%)	5,8
	EC	modificada
	Abrasão LA (%)	41
	Norma	DNIT ES 141
Deformação Permanente	Modelo	Guimarães (2009)
	Ψ1	0,1608
	Ψ2	-0,097
	Ψ3	0,525
	Ψ4	0,0752

Fonte: Adaptado do *default* do MeDiNa v.1.1.5.0 (2020)

Por ser um material com bons parâmetros de caracterização, o solo estudado por Pascoal (2020), compactado na energia intermediária, também foi utilizado em alguns casos para compor a sub-base. A energia utilizada está associada com as deformações, com isso ao passo que se eleva a energia de normal para intermediária, se obtém um maior valor de módulo de resiliência e um menor para deformação permanente.

O terceiro material utilizado na sub-base de algumas estruturas foi estudado por Silva (2021) que avaliou os efeitos da adição de ácido fosfórico (H3PO4) e cinza de casca de arroz (CCA) no mesmo solo utilizado por Pascoal (2020). A adição de ácido fosfórico e cinca de casca de arroz ao solo laterítico foi nomeado nesta pesquisa como Solo S35, sendo o solo compactado com energia intermediária denominado “Solo S35 EI” que tem seus parâmetros expostos na Tabela 7, e o compactado com energia modificada, “Solo S35 EM” com parâmetros inseridos na mesma tabela.

Tabela 7 - Parâmetros Solo S35 EI e do SOLO S35 EM

Dados relevantes ao dimensionamento		**SOLO S35 EI**	**SOLO S35 EM**
Parâmetros	Poisson	0,45	
	Contato	não aderido	
Módulo de Resiliência	Modelo Composto	Res. não linear	Res. não linear
	k1	1506,25	2056,53
	k2	0,553	0,617
	k3	0,11	0,068
Características	MEAS (g/cm3)	1,58	1,64
	Wot (%)	27,22	24,72
	EC	intermediária	modificada
	Norma	DNIT ES 139	
Deformação Permanente	Modelo	Guimarães (2009)	
	Ψ1	0,017	0,017
	Ψ2	0,699	0,699
	Ψ3	0,517	0,517
	Ψ4	0,103	0,103

Fonte: Adaptado de Silva (2021).

Por fim, para a camada de sub-base também foi utilizado um solo-brita, o material foi estudado por Brizolla et al. (2021). Os autores avaliaram como base a mistura de três diferentes percentuais de solo brita, sendo a mistura utilizada no presente trabalho a mistura nomeada por Brizolla et al. (2021) como SB2, composta

por 25% de solo laterítico caracterizado por Pascoal (2020), 45% de brita 3/4” e 30% de brita 3/8”, caracterizados por Back (2018). Os parâmetros do solo SB2 que foram utilizados nos dimensionamentos estão listados na Tabela 8.

Tabela 8 - Parâmetros Solo Brita SB2 EM

Dados relevantes ao dimensionamento		**SOLO BRITA SB2**
Parâmetros	Poisson	0,45
	Contato	não aderido
Módulo de Resiliência	Modelo Composto	Res. não linear
	k1	1542,54
	k2	0,66
	k3	-0,16
Características	MEAS (g/cm3)	2,2582
	wot (%)	10,1
	EC	modificada
	Norma	DNIT ES 139
Deformação Permanente	Modelo	Guimarães (2009)
	Ψ1	0,017
	Ψ2	0,699
	Ψ3	0,517
	Ψ4	0,103

Fonte: Adaptado de Brizolla et al. (2021).

3.2.3 Base

Foi utilizado uma única fonte de agregado para a camada de base, desde a estrutura real do trecho onde foi empregado o material, até as dimensionadas pela autora. O material também é do município de Cruz Alta, proveniente da Pedreira São Juvenal, e foi coletado próximo a obra de duplicação do trevo de acesso à cidade, na RS 342. Trata-se de um agregado basáltico e apresentou uniformidade entre a curva ajustada proposta e o material após a compactação e o ensaio de módulo de resiliência, ou seja, não demonstrou quebra excessiva das partículas (SAGRILO, 2020). No presente trabalho foram utilizados os parâmetros dispostos na Tabela 9, caracterizados por Sagrilo (2020). Adotou-se uma nomenclatura para o material, sendo chamado de Brita Graduada Simples São Juvenal (BGS SJ).

Tabela 9 - Parâmetros BGS SJ

Dados relevantes ao dimensionamento		BGS SJ
Parâmetros	Poisson	0,35
	Contato	não aderido
Módulo de Resiliência	Modelo Constituinte	Res. não linear
	k1	2256,46
	k2	0,589
	k3	0,196
Características	Descrição do Material	Trevo acesso CA
	MEAS (g/cm3)	2,6
	wot (%)	5,25
	EC	modificada
	Abrasão LA (%)	12,56
	Norma	DNIT ES 141
Deformação Permanente	Modelo	Guimarães (2009)
	Ψ1	0,048
	Ψ2	-0,622
	Ψ3	1,188
	Ψ4	0,138

Fonte: Adaptado de Sagrilo (2020).

3.2.4 Revestimentos asfálticos

Os revestimentos asfálticos que compõem a estrutura dos pavimentos estudados no presente trabalho são componentes do banco de dados do MeDiNa. Foram utilizados concretos asfálticos convencionais e modificados com polímero, que tem suas propriedades apresentadas na Tabela 10

Tabela 10 - Parâmetros CA Classe 2 e Classe 4

Dados relevantes ao dimensionamento		Classe 2	Classe 4
Parâmetros	Poisson	0,3	
	Contato	não aderido	
Módulo de Resiliência	Modelo Constituinte	Res. linear	Res. linear
	Módulo (Mpa)	6743	10492
Características	Massa específica (g/cm^3)	2,4	2,4
	Norma	DNIT ES 31	DNIT ES 31
Curva de Fadiga	Modelo		
	k1	1,11 e^{-13}	1,91 e^{-5}

k2	-3,979	-1,9
Classe	2	4
FFM	0,86	1

Fonte: Fonte: Adaptado do *default* do MeDiNa v.1.1.5.0 (2020)

3.3 DEFINIÇÃO DAS ESTRUTURAS

Neste tópico serão expostas as estruturas definidas a partir dos métodos do DNER (DNIT, 2006) e pelo método MeDiNa (DNIT, 2020). As estruturas foram projetadas utilizando os materiais apresentados no item 3.2 e levaram em conta o tráfego real da RS 342, e os três tráfegos definidos por Ceratti et al. (2015).

3.3.1 Estrutura real

A estrutura real utilizada na pesquisa é proveniente da RS 342. A RS 342 inicia em Doutor Mauricio Cardoso e termina em Cruz Alta, no entroncamento entre a BR 158 e a BR 377. O município de Cruz Alta é considerado estrategicamente importante pelo entroncamento rodoferroviário da região centro-norte do estado. A estrutura real do pavimento da RS 342 foi elaborada com base no Método DNER (1981). Segundo DAER (2017), o ISC utilizado em projeto foi de 8% e o N considerado foi igual a 3,57 x 10^7 passagens do eixo padrão, para um período de 10 anos.

De acordo com o projeto desenvolvido para a RS-342 (DAER, 2017), a estrutura do pavimento da pista e interseções foi constituída de 10,0cm de capa de CA, sendo implantado em duas camadas de 5,0cm, uma com CA modificado com polímero e uma de CA convencional; 15,0cm de base de brita graduada simples; e 19,0cm de sub-base de macadame seco, para o subleito foi utilizado o solo laterítico, classificado como LG’, sendo compactado em energia normal no corpo do aterro e compactado na energia intermediária para a camada final de terraplanagem. Para a avaliação do pavimento dimensionado pelo método do DNER (1981), foi utilizado o programa MeDiNa. Os materiais inseridos foram escolhidos de acordo com a semelhança de seus parâmetros, conforme apresentado na Tabela 11.

Tabela 11 - Dimensões do pavimento real implementado na RS 342 (com adaptações) considerando o Nr: 3,57 x 10^7

Estrutura	Subleito	Sub-base	Base	Revestimento
DNER Nr	EI	BGS C1	BGS SJ	CA 2 + CA 4

Dimensões de revestimento, base e sub-base dadas em centímetros.

Fonte: Autora

3.3.2 Estruturas propostas

As estruturas propostas foram dimensionadas por dois métodos distintos, o método do DNER (1981), com bases empíricas, e o método de dimensionamento nacional, com base mecanística-empírica, o MeDiNa.

Pelo método do DNER (1981) foram dimensionadas seis estruturas, variando o tráfego, em N real (Nr: 3,57 x 10^7) que é o tráfego existente na RS-342, e em tráfegos propostos por Ceratti et al. (2015), que consistem nos tráfegos baixo (Nb: 1,00 x 10^6), médio (Nm: 5,00 x 10^6) e alto (Na: 1,00 x 10^7). Para os tráfegos real e alto foram dimensionadas duas estruturas, uma utilizando CA convencional e outra com polímero.

Os materiais utilizados nas camadas das estruturas foram mantidos, o ISC utilizado foi de 16,6%, porém devido ao valor do N, para Na e Nr foram dimensionadas duas estruturas, simulando a utilização apenas do asfalto convencional e a utilização do CA modificado com polímero. As estruturas projetadas pelo método do DNER (1981) podem ser visualizadas na Tabela 12, nela estão indicados a variação dos materiais e a diferença do tráfego imposto a elas.

Tabela 12 - Pavimentos propostos pelo Método DNER (1981)

Estrutura	N	Subleito	Sub-base	Base	Revestimento
DNER Nb	1,00 x 10^6	EN	BGS C1	BGS SJ	CA 2
DNER Nm	5,00 x 10^6			BGS SJ	CA 2
DNER Na C2	1,00 x 10^7			BGS SJ	CA 2
DNER Nr C2	3,57 x 10^7			BGS SJ	CA 2

DNER Na C4	1,00 x 10^7	BGS SJ	CA 4
DNER Nr C4	3,57 x 10^7	BGS SJ	CA 4

Fonte: Autora

No método MeDiNa foram dimensionadas doze estruturas para cada um dos tráfegos. Para os tráfegos impostos foram utilizadas as mesmas variações de estruturas, buscando compará-las quanto às energias de compactação empregues no subleito, que mantêm sempre o mesmo material nas diversas estruturas, e também quanto às alterações dos materiais de sub-base, que hora são de material pétreo e hora de solo laterítico, com ou se adições, ou solo brita. A camada de base manteve o material para todas as estruturas, já para a camada de revestimento para os tráfegos maiores foi utilizado além do CA convencional, também o concreto asfáltico com polímero. Da Tabela 13 até a Tabela 18 são demonstradas as estruturas propostas a depender de cada um dos tráfegos, e materiais empregados.

Tabela 13 - Estruturas propostas pelo Método MeDiNa para Nb: 1,00 x 10^6

Estrutura	Subleito	Sub-base	Base	Revestimento
Eb1	EN	BGS C1	BGS SJ	CA 2
Eb2	EI	BGS C1		
Eb3	EN	EI		
Eb4	EI	EI		
Eb5	EN	S35 EI		
Eb6	EI	S35 EI		
Eb7	EN	S35 EM		
Eb8	EI	S35 EM		
Eb9	EN	SB2		
Eb10	EI	SB2		
Eb11	EN	-		
Eb12	EI	-		

Fonte: Autora.

Tabela 14 - Estruturas propostas pelo Método MeDiNa para Nm: 5,00 x 10^6

Estrutura	Subleito	Sub-base	Base	Revestimento
Em1	EN	BGS C1	BGS SJ	CA 2
Em2	EI	BGS C1		
Em3	EN	EI		
Em4	EI	EI		
Em5	EN	S35 EI		
Em6	EI	S35 EI		
Em7	EN	S35 EM		
Em8	EI	S35 EM		
Em9	EN	SB2		
Em10	EI	SB2		
Em11	EM	-		
Em12	EI	-		

Fonte: Autora

Tabela 15 - Estruturas propostas pelo Método MeDiNa para Na: 1,00 x 10^7 com CA 2

Estrutura	Subleito	Sub-base	Base	Revestimento
Ea1 C2	EN	BGS C1	BGS SJ	CA 2
Ea2 C2	EI	BGS C1		
Ea3 C2	EN	EI		
Ea4 C2	EI	EI		
Ea5 C2	EN	S35 EI		
Ea6 C2	EI	S35 EI		
Ea7 C2	EN	S35 EM		
Ea8 C2	EI	S35 EM		
Ea9 C2	EN	SB2		
Ea10 C2	EI	SB2		
Ea11 C2	EN	-		
Ea12 C2	EI	-		

Fonte: Autora

Tabela 16 - Estruturas propostas pelo Método MeDiNa para Na: 1,00 x 10^7 com CA 4

Estrutura	Subleito	Sub-base	Base	Revestimento
Ea1 C4	EN	BGS C1	BGS SJ	CA 4
Ea2 C4	EI	BGS C1		
Ea3 C4	EN	EI		
Ea4 C4	EI	EI		
Ea5 C4	EN	S35 EI		
Ea6 C4	EI	S35 EI		
Ea7 C4	EN	S35 EM		

Ea8 C4	EI	S35 EM
Ea9 C4	EN	SB2
Ea10 C4	EI	SB2
Ea11 C4	EN	-
Ea12 C4	EI	-

Fonte: Autora

Tabela 17 - Estruturas propostas pelo Método MeDiNa para Nr: 3,57 x 10^7 com CA 2

Estrutura	Subleito	Sub-base	Base	Revestimento
Er1 C2	EN	BGS C1	BGS SJ	CA 2
Er2 C2	EI	BGS C1		
Er3 C2	EN	EI		
Er4 C2	EI	EI		
Er5 C2	EN	S35 EI		
Er6 C2	EI	S35 EI		
Er7 C2	EN	S35 EM		
Er8 C2	EI	S35 EM		
Er9 C2	EN	SB2		
Er10 C2	EI	SB2		
Er11 C2	EN	-		
Er12 C2	EI	-		

Fonte: Autora.

Tabela 18 - Estruturas propostas pelo Método MeDiNa para Nr: 3,57 x 10^7 com CA 4

Estrutura	Subleito	Sub-base	Base	Revestimento
Er1 C4	EN	BGS C1	BGS SJ	CA 4
Er2 C4	EI	BGS C1		
Er3 C4	EN	EI		
Er4 C4	EI	EI		
Er5 C4	EN	S35 EI		
Er6 C4	EI	S35 EI		
Er7 C4	EN	S35 EM		
Er8 C4	EI	S35 EM		
Er9 C4	EN	SB2		
Er10 C4	EI	SB2		
Er11 C4	EN	-		
Er12 C4	EI	-		

Fonte: Autora.

3.3.3 Análise das estruturas

Com as estruturas apresentadas nos tópicos 3.3.1 e 3.3.2 foram realizadas avaliações quanto à espessura, dimensão de cada camada, e verificação dos mecanismos de danificação: afundamento de trilha de roda e fadiga (área trincada).

Para avaliar o desempenho das seis estruturas projetadas pelo método do DNER (1981) e a estrutura real do trecho da RS 342, foi utilizada a ferramenta “Avaliar estrutura” presente no *framework* do MeDiNa. Para fazer uso desta ferramenta foi necessário introduzir os parâmetros dos materiais expostos no item 3.2, relacionados ao comportamento resiliente dos mesmos e a deformação permanente.

Tanto para avaliar as estruturas projetadas pelo método DNER (1981) quanto para dimensionar as demais estruturas projetadas pelo método MeDiNa, foi considerado um período de projeto de dez anos. Em todas as análises considerou-se a via como “Sistema Arterial Principal”, tendo taxa de crescimento médio de 3,0%, e o nível de confiabilidade das análises realizadas pelo MeDiNa foi de 95%, com isso, o critério de aceitação do dimensionamento passa a ser 30% de área trincada e 10 mm de deformação permanente.

Para que fosse possível realizar um comparativo entre as metodologias de dimensionamento e verificar o comportamento delas, foi necessário adotar um padrão de materiais para compor o subleito, a sub-base, a base e o revestimento asfáltico, de modo a avaliar o comportamento dos materiais em questão, frente às tensões e deformações, através dos mecanismos de rupturas.

Os dimensionamentos com diferentes energias de compactação para o subleito e diferentes materiais empregados na sub-base tiveram o objetivo de analisar o comportamento dos materiais frente as solicitações impostas. Comparando as diferentes estruturas foi possível analisar a diferença do ATR nas camadas de subleito compactadas à energia normal e intermediária, e na camada sub-base utilizando material pétreo ou solo, além disso foi possível comparar entre as estruturas a área trincada do revestimento ao longo dos anos. No entanto, para a camada asfáltica, fez-se necessário utilizar dois tipos de mistura, onde uma é denominada, dentro do banco de dados do MeDiNa, como “Classe 2”, utilizada na estrutura real da RS 342, e para os dimensionamentos conforme a variação dos tráfegos Nb, Nm, Na e Nr, e a outra denominada “Classe 4” foi utilizada apenas para os tráfegos com número de passagens do eixo padrão maiores, ou seja, Na e Nr. O CA “Classe 4” foi utilizado

para representar a mistura com ligante modificado, assim foi possível verificar a influência da mistura asfáltica nos custos e na vida útil do projeto.

3.4 ORÇAMENTO

Posteriormente à finalização do projeto das estruturas e avaliação de seu desempenho estrutural, foram feitas propostas de composições orçamentárias, para 14 estruturas distintas. As estruturas foram escolhidas levando em conta as características das suas camadas, para os tráfegos, médio, alto e real, buscando comparar além do desempenho técnico, o desempenho financeiro dos materiais.

Para comparar o valor da compactação do subleito em energia normal ou intermediária, foi escolhido realizar o orçamento para a Estrutura 1, composta de subleito compactado à energia normal. Ela foi comparada a Estrutura 2, que é composta de subleito compactado à energia intermediária e possui sub-base de BGS, ambas, foram comparadas também com a Estrutura 4. Na Estrutura 4 a sub-base é composta por solo laterítico compactado com energia intermediária, assim como seu subleito. E por fim as três estruturas citadas são comparadas a Estrutura 12, que é composta de base de BGS SJ, assim como as anteriores, e se diferencia por não possuir sub-base em sua estrutura e ter subleito compactado à energia intermediária.

Os revestimentos das estruturas variam entre “Classe 2” e “Classe 4”, e para o tráfego alto a mudança de revestimento será analisada financeiramente. Por fim, o dimensionamento feito pelo DNER (1981) e executado no trecho da RS-342 é comparado orçamentariamente ao dimensionamento realizado pelo MeDiNa, levando em conta o valor do pavimento por km e tráfego imposto.

As composições tiveram como base o SICRO do DNIT, de julho de 2021, através das composições disponibilizadas pelo DNIT e/ou criadas para atender as necessidades dos projetos. As estruturas foram orçadas levando em consideração apenas um quilômetro de rodovia, com largura de pista de 3,5m, somando 7,2 m de geometria básica de via principal e 5,0 m de acostamento.

No orçamento foram considerados somente os custos diretos de implantação da rodovia, que levam em conta os movimentos de terra, a execução de bases granulares ou de solo compactado, as camadas de colagem e primer, camadas asfálticas. A sinalização a ser colocada ao longo da estrada, os Benefícios e Despesas Indiretas (BDI) e o custo do canteiro de obras não foram considerados no orçamento.

Os principais serviços considerados, juntamente com seus custos unitários, são apresentados na Tabela 19. Alguns itens necessários ao orçamento não constavam no SICRO, então, foi consultado também a Agência Nacional do Petróleo (ANP).

Com os orçamentos finalizados, foram feitos dois tipos de análise. A primeira análise refere-se ao custo total da rodovia por quilômetro, para cada uma das estruturas, podendo compará-las entre si. O segundo tipo de análise considerou o custo total por quilômetro dividido pelo número de solicitações que o pavimento permaneceria sem sofrer danos excessivos por fadiga e DP, considerando os limites impostos a esse tipo de via.

Tabela 19 - Preço unitário dos serviços (SICRO RS jul/21 e ANP dez/21)

Serviço	Custo Unitário
Regularização do Subleito	0,80 R$/m²
Reforço do Subleito com Material de Jazida	11,17 R$/m³
Base ou sub-base de brita graduada com brita produzida	89,23 R$/m³
Imprimação com Asfalto Diluído	5,12 R$/m²
Pintura de ligação	1,52 R$/m²
Concreto asfáltico – faixa C - Areia extraída, brita produzida	375,90 R$/t
Concreto asfáltico com asfalto polímero - faixa C - areia extraída, brita produzida	421,73 R$/t
Mistura Convencional	4.014,29 R$/t
Mistura Asfáltica com Ligante Polimérico Modificado	4.994,71 R$/t

Fonte: Autora.

4 RESULTADOS

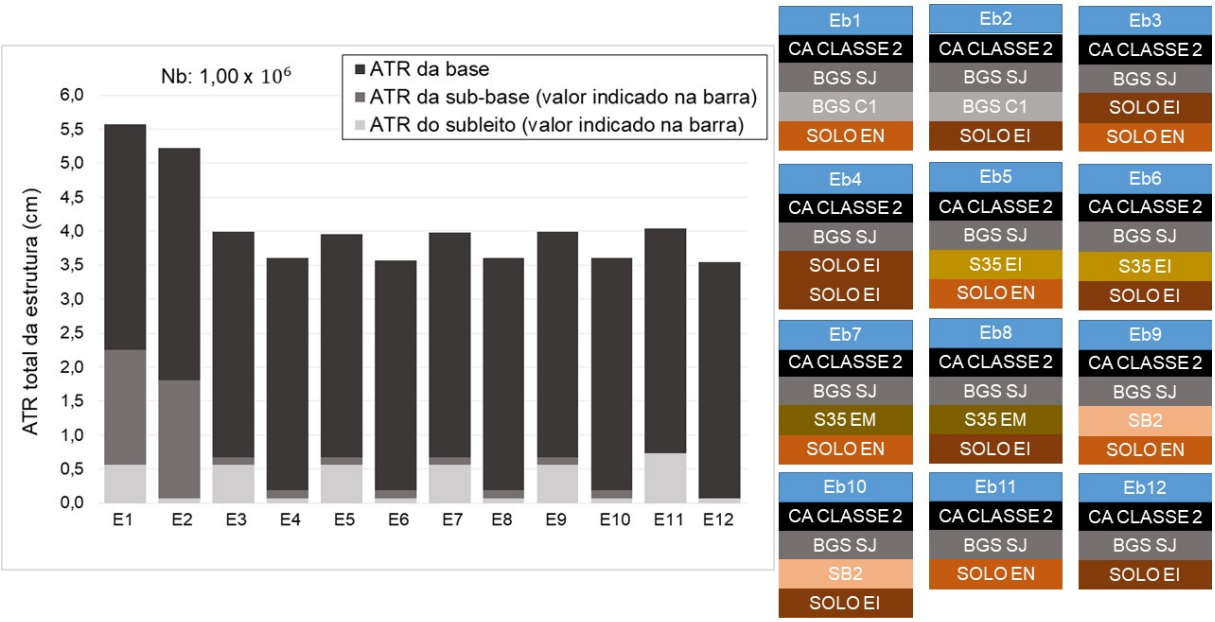
Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos a partir da análise e dimensionamento dos projetos selecionados, assim como as respectivas discussões para as estruturas de pavimentos propostas, tanto para as dimensionadas pelo método do DNER (1981) e seguindo os preceitos de avaliação, quanto para as dimensionamento da metodologia mecanística-empírico presente no MeDiNa. Todos resultados foram obtidos com base nas características mecânicas dos materiais, apresentadas no capítulo da metodologia (item 3.2).

Os objetivos destas análises foram comparar os dimensionamentos de metodologias distintas e avaliar o desempenho dos materiais quanto a sua deformabilidade ao serem aplicados nas camadas do pavimento.

4.1 DIMENSIONAMENTO DAS CAMADAS E ANÁLISE DA DEFORMABILIDADE DAS CAMADAS DE BASE, SUB-BASE E SUBLEITO

O software MeDiNa é um *framework* de cálculo que facilita a obtenção de análises e dimensionamento de um determinado pavimento. Na presente metodologia buscou-se comparar e avaliar o desempenho dos materiais quanto a sua deformabilidade ao serem aplicados na base, sub-base e subleito do pavimento. Assim, na Figura 8, constam as doze estruturas projetadas para o tráfego baixo e dimensionadas pelos preceitos do método MeDiNa, considerando o número de solicitações admissíveis (Nb: 1,00 x 10^6). O que difere as estruturas são os materiais empregados na camada de sub-base, além da energia de compactação do subleito. Todas as estruturas mantêm o mesmo material para base e revestimento asfáltico, bem como sua espessura. As espessuras das camadas dos pavimentos podem ser visualizadas na Tabela 20.

Figura 8 - Análise ATR das estruturas para Nb: 1,00 x 10^6



Fonte: Autora.

Tabela 20 - Estruturas propostas com respectivas dimensões de cada camada para o Nb: 1,00 x 10^6

Estrutura	Subleito	Sub-base	Base	Revestimento
Eb1	EN	15 BGS C1	15 BGS SJ	5 CA 2
Eb2	EI	15 BGS C1		
Eb3	EN	15 EI		
Eb4	EI	15 EI		
Eb5	EN	15 S35 EI		
Eb6	EI	15 S35 EI		
Eb7	EN	15 S35 EM		
Eb8	EI	15 S35 EM		
Eb9	EN	15 SB2		
Eb10	EI	15 SB2		
Eb11	EN	-		
Eb12	EI	-		

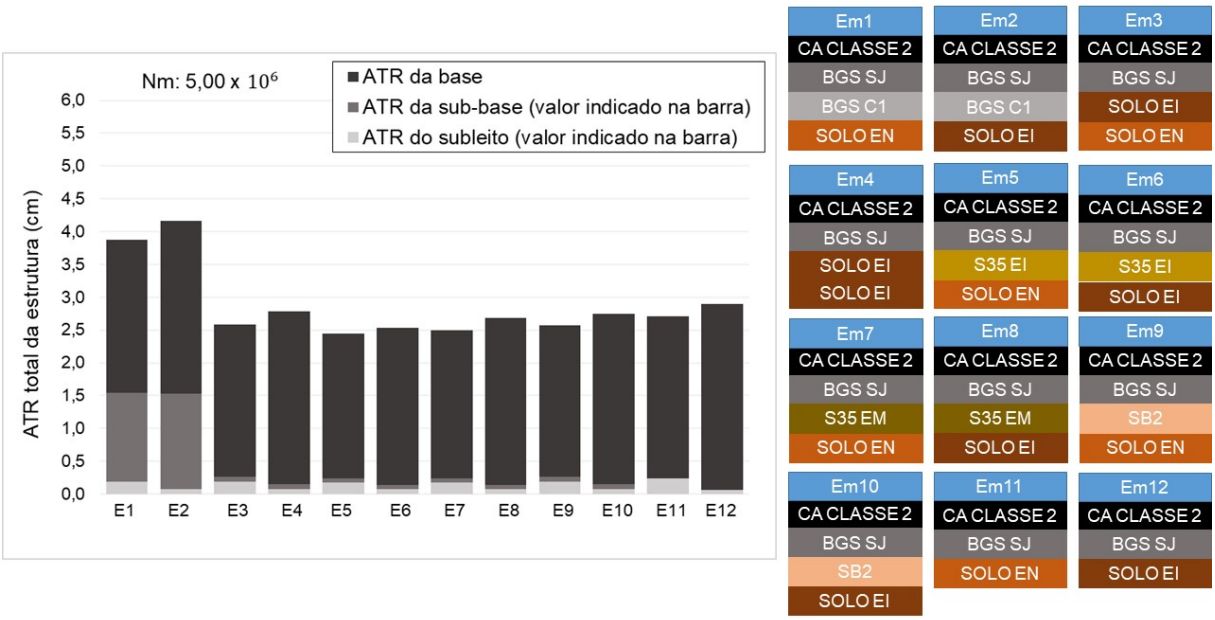
Dimensões de revestimento, base e sub-base dadas em centímetros.

Fonte: Autora.

É possível visualizar o comportamento das doze estruturas frente ao afundamento de trilha de roda. Na camada de subleito, fica claro que a mudança de energia, de normal para intermediária, traz uma redução significativa em relação ao ATR, ademais também é possível visualizar que com a mudança do material da sub-base, de BGS C1 para o solo EI, para S35 EI, para S35 EM, ou também a substituição por solo-brita, há um avanço na qualidade do pavimento, ou seja, as deformações da camada de sub-base diminuíram, em relação ao uso da BGS C1. Além disso, é possível visualizar que para o tráfego imposto não se faz necessária a utilização de uma camada de sub-base, pois as estruturas que não possuem sub-base, apresentaram bom desempenho quanto ao ATR.

Assim como para o tráfego baixo, foi feita a comparação da deformabilidade para o tráfego médio, conforme apresentado na Figura 9, considerando o número de solicitações admissíveis (Nm: 5,00 x 10^6). Para o tráfego médio, a espessura das camadas de revestimento asfáltico é acrescida, se comparado com o tráfego inferior. As espessuras podem ser visualizadas na Tabela 21.

Figura 9 - Análise ATR das estruturas para Nm: 5,00 x 10^6



Fonte: Autora.

Tabela 21 - Estruturas propostas com respectivas dimensões de cada camada para o Nm: 5,00 x 10^6

Estrutura	Subleito	Sub-base	Base	Revestimento
Em1	EN	15 BGS C1	15 BGS SJ	11,3 CA 2
Em2	EI	15 BGS C1		10,6 CA 2
Em3	EN	15 EI		11,2 CA 2
Em4	EI	15 EI		10,5 CA 2
Em5	EN	15 S35 EI		11,4 CA 2
Em6	EI	15 S35 EI		11,1 CA 2
Em7	EN	15 S35 EM		11,4 CA 2
Em8	EI	15 S35 EM		10,7 CA 2
Em9	EN	15 SB2		11,3 CA 2
Em10	EI	15 SB2		10,6 CA 2
Em11	EM	-		10,9 CA 2
Em12	EI	-		10,2 CA 2

Dimensões de revestimento, base e sub-base dadas em centímetros.

Fonte: Autora

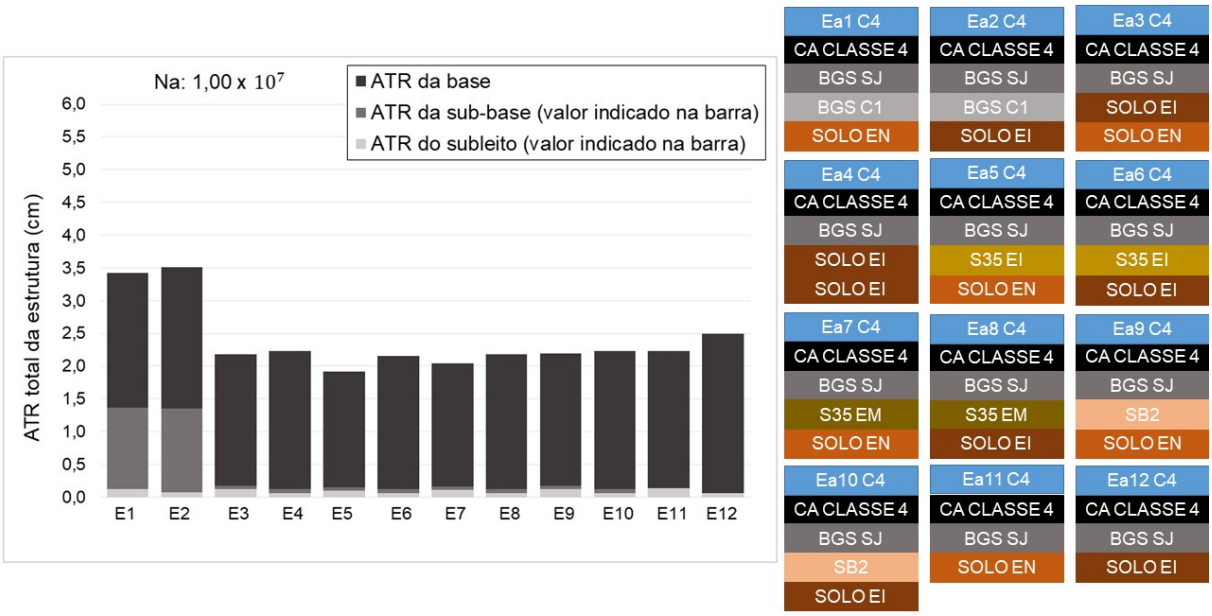
A partir da análise é possível visualizar que para o tráfego médio, devido ao aumento da espessura do revestimento asfáltico, na camada de subleito já não é tão visível a diminuição do ATR frente a mudança da energia de compactação. No entanto é possível notar que há uma diminuição considerável na deformação total do pavimento quando na sub-base a BGS C1 é substituída pelo Solo EI, ou pelo S35 EI ou até mesmo pelo SB2. Entre as estruturas apresentadas, a camada que mais traz diferenças de deformação nas estruturas apresentadas é a sub-base, no entanto os três diferentes solos adotados para a camada, se comparados entre si não trazem grandes variações de deformação, a variação considerável ocorre quando os solos são comparados com a BGS C1, para a camada de sub-base.

Outro ponto a destacar é que, assim como no tráfego baixo, para o tráfego médio, a camada de sub-base também não é necessária, pois nas estruturas que não a possuem, o subleito não sofreu mais com deformações do que comparado as estruturas que possuem sub-base.

A mesma avaliação foi feita também para o tráfego alto, porém devido ao aumento no número de passagens optou-se por utilizar um concreto asfáltico modificado com polímero, assim para o tráfego alto, os dados da deformabilidade dos materiais estão dispostos na Figura 10, considerando o número de solicitações

admissíveis (Na: 1,00 x 10^7). A Tabela 22 demonstra as dimensões de cada camada nessa condição de dimensionamento.

Figura 10 - Análise ATR das estruturas para Na: 1,00 x 10^7 considerando o revestimento CA4



Fonte: Autora.

Tabela 22 - Estruturas propostas com respectivas dimensões de cada camada para o Na: 1,00 x 10^7 considerando o revestimento CA4

Estrutura	Subleito	Sub-base	Base	Revestimento
Ea1 C4	EN	15 BGS C1	15 BGS SJ	11,9 CA 4
Ea2 C4	EI	15 BGS C1		11,9 CA 4
Ea3 C4	EN	15 EI		11,9 CA 4
Ea4 C4	EI	15 EI		11,9 CA 4
Ea5 C4	EN	15 S35 EI		12,7 CA 4
Ea6 C4	EI	15 S35 EI		11,8 CA 4
Ea7 C4	EN	15 S35 EM		12,3 CA 4
Ea8 C4	EI	15 S35 EM		11,9 CA 4
Ea9 C4	EN	15 SB2		11,9 CA 4
Ea10 C4	EI	15 SB2		11,9 CA 4
Ea11 C4	EN	-		11,9 CA 4
Ea12 C4	EI	-		11,1 CA 4

Dimensões de revestimento, base e sub-base dadas em centímetros.

Fonte: Autora

Visualizando a análise das estruturas para o tráfego alto é possível notar que o comportamento das deformações no geral, se assemelham às do tráfego médio, devido à espessura do revestimento asfáltico, e para este caso devido também à qualidade do mesmo, por ser um CA modificado com polímero. Assim como na análise anterior, na camada de subleito não é tão visível a diminuição do ATR frente a mudança da energia de compactação, porém é possível notar que na camada de sub-base, quando a BGS C1 é substituída pelos demais solos, a deformação da camada diminui bastante, sendo que entre eles não há diferenças consideráveis frente a deformação permanente da camada de sub-base. Além disso, nas estruturas que não possuem sub-base, a deformação da camada de subleito também não é de maior valor, se comparada as estruturas que possuem sub-base.

O mesmo dimensionamento foi realizado considerando o revestimento asfáltico classe 2, conforme exposto na Tabela 23 a fim de comparar com os dimensionamentos da Tabela 22.

Tabela 23 - Estruturas propostas com respectivas dimensões de cada camada para o Na: 1,00 x 10^7 considerando o revestimento CA2

Estrutura	Subleito	Sub-base	Base	Revestimento
Ea1 C2	EN	15 BGS C1	15 BGS SJ	16,3 CA 2
Ea2 C2	EI	15 BGS C1		16 CA 2
Ea3 C2	EN	15 EI		16,5 CA 2
Ea4 C2	EI	15 EI		16,1 CA 2
Ea5 C2	EN	15 S35 EI		16,6 CA 2
Ea6 C2	EI	15 S35 EI		16,2 CA 2
Ea7 C2	EN	15 S35 EM		16,7 CA 2
Ea8 C2	EI	15 S35 EM		16,3 CA 2
Ea9 C2	EN	15 SB2		16,3 CA 2
Ea10 C2	EI	15 SB2		16,0 CA 2
Ea11 C2	EN	-		16,3 CA 2
Ea12 C2	EI	-		15,7 CA 2

Dimensões de revestimento, base e sub-base dadas em centímetros.

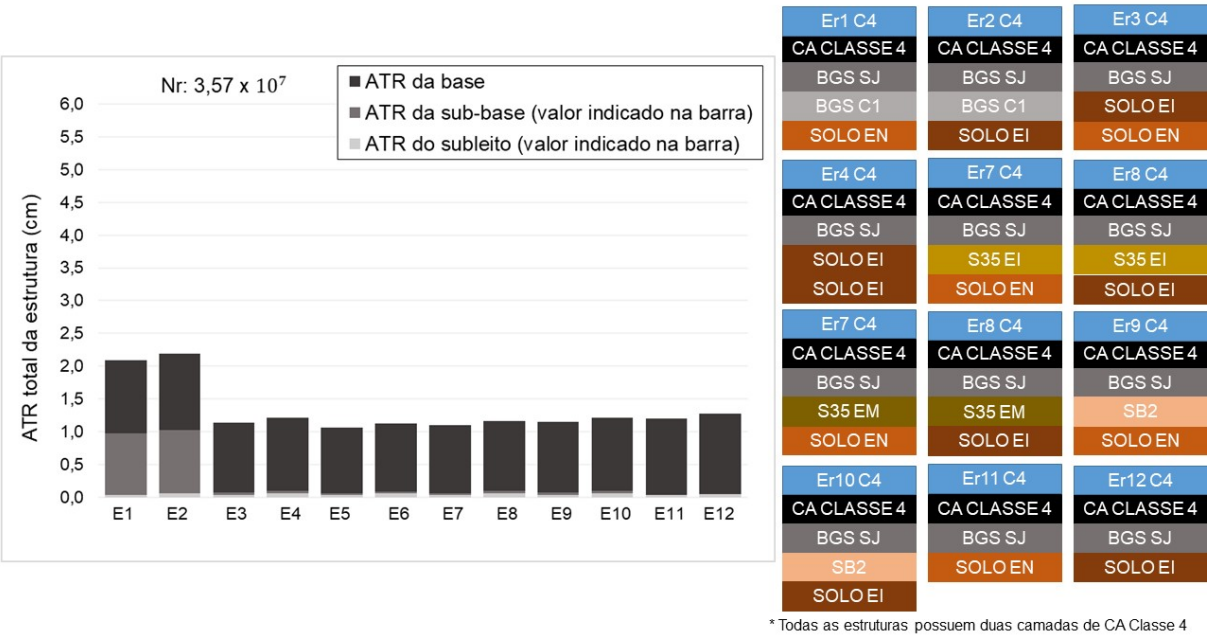
Fonte: Autora

Visualizando então, a Tabela 22 e comparando-a com a Tabela 23, é possível notar que a espessura da camada asfáltica, quando empregado o concreto asfáltico “Classe 4” é significativamente menor que quando utilizado o CA “Classe 2”, isso se

dá devido ao fato de o CA “Classe 4” ser modificado com polímero, o que aumento sua qualidade consideravelmente.

Para completar a análise da deformabilidade das camadas foi feita a comparação para o tráfego real da RS-342. Foram analisadas as doze estruturas, com os materiais já apresentados e variação das energias de compactação. No entanto devido ao tráfego que corresponde ao real, a solução adotada foi a utilização do concreto asfáltico “Classe 4” em duas camadas, já que este tem melhor comportamento no ponto de vista técnico. Considerando o número de solicitações admissíveis (Nr projeto: 3,57 x 10^7), os dados de deformação obtidos estão dispostos na Figura 11, com as espessuras demonstradas na Tabela 24.

Figura 11 - Análise ATR das estruturas para Nr: 3,57 x 10^7



Fonte: Autora.

Tabela 24 - Estruturas propostas com respectivas dimensões de cada camada para o Nr: 3,57 x 10^7 considerando o revestimento CA4

Estrutura	Subleito	Sub-base	Base	Revestimento
Er1 C4	EN	15 BGS C1		20,2 CA 4
Er2 C4	EI	15 BGS C1		20,0 CA 4
Er3 C4	EN	15 EI	15 BGS SJ	20,4 CA 4
Er4 C4	EI	15 EI		20,2 CA 4
Er5 C4	EN	15 S35 EI		20,5 CA 4

Er6 C4	EI	15 S35 EI		20,3 CA 4
Er7 C4	EN	15 S35 EM		20,3 CA 4
Er8 C4	EI	15 S35 EM		20,3 CA 4
Er9 C4	EN	15 SB2		20,3 CA 4
Er10 C4	EI	15 SB2		20,3 CA 4
Er11 C4	EN	-		20,2 CA 4
Er12 C4	EI	-		19,9 CA 4

Fonte: Autora.

As estruturas dimensionadas para o tráfego real seguiram na mesma direção que as analisadas anteriormente. A deformação do subleito, devido ao revestimento asfáltico e sua espessura é irrelevante quando comparada dentre as estruturas, sendo compactado a energia normal ou intermediária. A camada de sub-base, tem diferença em sua deformação quando a BGS C1 é substituída pelos materiais das demais sub-bases apresentadas, ou quando a camada é suprimida, resultando em uma diminuição do ATR total. O mesmo dimensionamento foi realizado considerando o revestimento asfáltico “Classe 2”, conforme exposto na Tabela 25.

Tabela 25 - Estruturas propostas com respectivas dimensões de cada camada para o Na: 3,57 x 10^7 considerando o revestimento CA2

Estrutura	Subleito	Sub-base	Base	Revestimento
Er1 C2	EN	15 BGS C1	15 BGS SJ	20,9 CA 2
Er2 C2	EI	15 BGS C1		20,6 CA 2
Er3 C2	EN	15 EI		20,9 CA 2
Er4 C2	EI	15 EI		20,8 CA 2
Er5 C2	EN	15 S35 EI		21,2 CA 2
Er6 C2	EI	15 S35 EI		21,0 CA 2
Er7 C2	EN	15 S35 EM		21,1 CA 2
Er8 C2	EI	15 S35 EM		20,8 CA 2
Er9 C2	EN	15 SB2		21,0 CA 2
Er10 C2	EI	15 SB2		20,7 CA 2
Er11 C2	EN	-		20,7 CA 2
Er12 C2	EI	-		20,4 CA 2

Fonte: Autora.

Comparando as espessuras de revestimento asfáltico para o tráfego real, de acordo com a Tabela 24 e Tabela 25, podemos visualizar, que em média a espessura da camada asfáltica, quando empregado o concreto asfáltico “Classe 4” é 0,5 cm

menor do que quando utilizado o CA “Classe 2”, isso se dá devido ao fato de o CA “Classe 4” ser modificado com polímero, o que aumento sua qualidade. No entanto, ambas as estruturas têm comportamento satisfatório perante o tráfego imposto, durante sua vida útil, devido a isso, outros parâmetros devem ser analisados, para chegar à conclusão de qual revestimento asfáltico utilizar.

Nas comparações realizadas, levando em consideração os diferentes tráfegos e estruturas, foi possível notar que a deformação permanente da camada de base, onde foi empregado em todas as estruturas o mesmo material e espessura, não teve variação considerável perante a mudança dos materiais das demais camadas do pavimento.

4.2 DEFORMAÇÃO PERMANENTE E FADIGA DAS ESTRUTURAS

Como abordado anteriormente, o pavimento flexível utilizado na estrutura real da RS-342, com dimensões e materiais das camadas, expostas na Tabela 26, foi projetado considerando a metodologia do DNER (1981), tendo como base um ISC de solo de subleito de 16,6% e o número de passagens do eixo padrão igual a $3,57 \times 10^7$. Vale salientar que a BGS C1 está representando o macadame-seco utilizado na estrutura real.

Tabela 26 - Dimensões do pavimento real implementado na RS 342 (com adaptações) considerando o Nr: $3,57 \times 10^7$

Estrutura	Subleito	Sub-base	Base	Revestimento
DNER Nr	EI	19 BGS C1	15 BGS SJ	5 CA 2 + 5 CA 4

Dimensões de revestimento, base e sub-base dadas em centímetros.

Fonte: Autora

Ademais, foram dimensionadas novas estruturas pelo método do DNER (1981). Para as estruturas projetadas foram variados os tráfegos, mantidos o subleito e a sub-base, a camada de base teve variação de espessura e manteve o mesmo material, ao passo que para o revestimento, nos tráfegos alto e real foi utilizado, além do concreto asfáltico convencional, o modificado com polímero, os dimensionamentos finais das estruturas pelo método do DNER (1981) estão representados na Tabela 27.

Tabela 27 - Dimensões dos pavimentos propostos pelo Método DNER (1981)

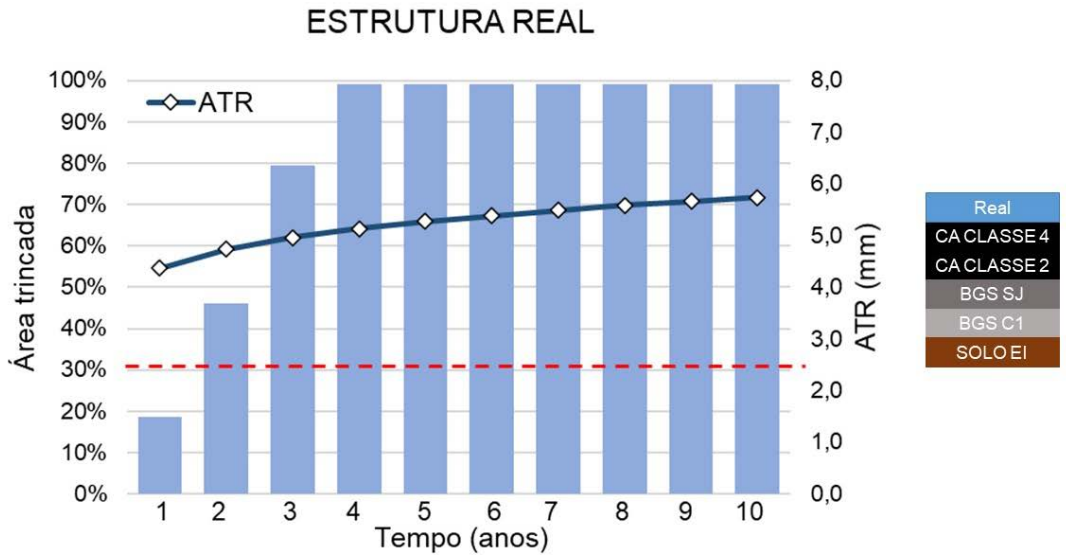
Estrutura	N	Subleito	Sub-base	Base	Revestimento
DNER Nb	$1,00 \times 10^6$	EN	15 BGS C1	20 BGS SJ	5 CA 2
DNER Nm	$5,00 \times 10^6$			18 BGS SJ	5 CA 2
DNER Na C2	$1,00 \times 10^7$			15 BGS SJ	7,5 CA 2
DNER Nr C2	$3,57 \times 10^7$			15 BGS SJ	10 CA 2
DNER Na C4	$1,00 \times 10^7$			15 BGS SJ	7,5 CA 4
DNER Nr C4	$3,57 \times 10^7$			15 BGS SJ	10 CA 4

Dimensões de revestimento, base e sub-base dadas em centímetros.

Fonte: Autora

Para verificar o desempenho das estruturas dimensionadas pelo método do DNER (1981) em relação aos mecanismos de afundamento de trilha de roda e trincas por fadiga, para o período do projeto, a estrutura avaliada pelo *framework* de cálculo do MeDiNa pela opção “avaliar estrutura” foi a estrutura real. Os resultados da avaliação são apresentados na Figura 12.

Figura 12 - ATR e área trincada da estrutura real durante o período de projeto



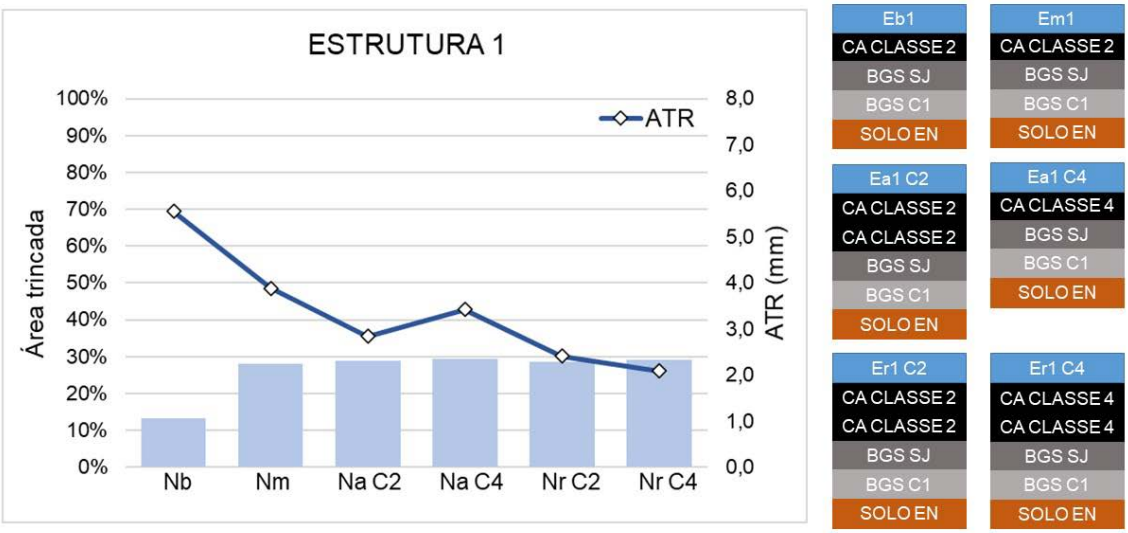
Fonte: Autora.

Ao final do 17º mês de solicitações de carga, a estrutura estará próxima ao limite de área trincada, sendo esses 30%. No 17º mês, quando atinge o N de 4,43 x 10^6, caso o pavimento fosse bem executado, atingiria 28,51% e no 18º mês, 30,78% de área trincada e então sofreria o dano mais crítico avaliado, de falha do revestimento por fadiga. O pavimento, dentro do período de projeto, não chegaria ao limite do seu desempenho em relação a deformação permanente. Porém, com base na falha por fadiga, é possível concluir que a estrutura projetada seguindo os preceitos do DNER (1981) é estruturalmente ineficiente para solicitações de tráfego com esses materiais constituintes.

Dentre as estruturas dimensionadas pelo método MeDiNa e já apresentadas, quatro delas foram selecionadas para serem analisadas quanto à fadiga e deformação permanente, dentre as variações de tráfego impostas. A análise será apresentada para as estruturas E1, E2, E4 e E12 e suas variações, para as demais estruturas os resultados serão apresentados no Apêndice 1.

As variações da Estrutura 1, projetadas pelo MeDiNa, tem suas composições e demandas de tráfego apresentadas Figura 13, bem como a análise das mesmas à fadiga e a deformação permanente.

Figura 13 - ATR e área trincada das versões da Estrutura 1 conforme variação do N



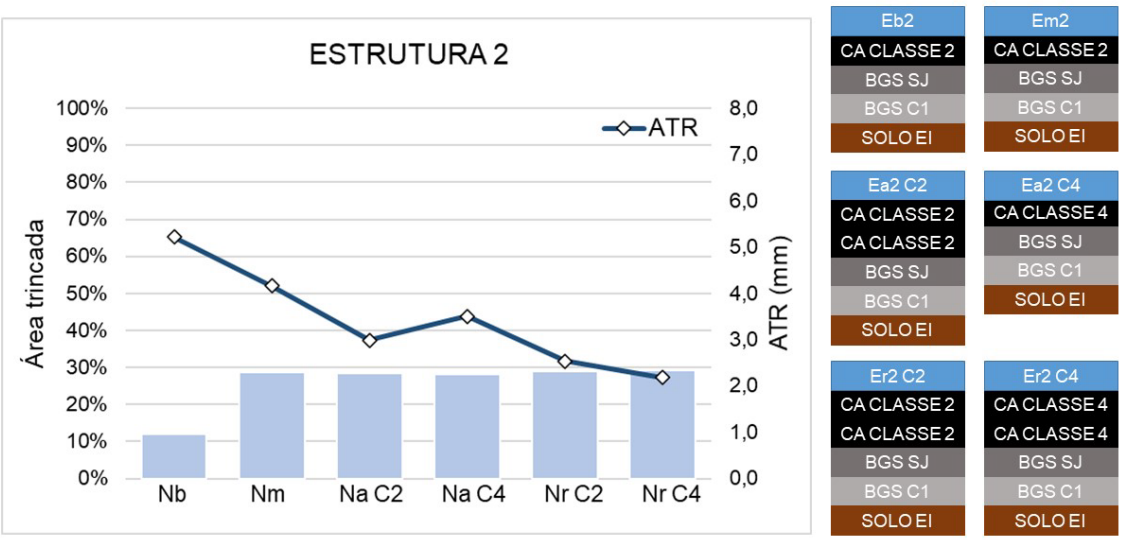
Fonte: Autora.

As estruturas variam os materiais constituintes e a demanda de tráfego. Em algumas, devido ao tráfego elevado, foi necessário adicionar uma camada asfáltica de CA convencional “Classe 2”, ou mudar o CA para modificado com polímero, representado pelo CA “Classe 4”, conforme o banco de dados do *software*. As dimensões das camadas podem ser visualizadas nas tabelas do Item 4.1.

Ao analisar as variações da Estrutura 1 para os tráfegos, baixo, médio, alto e real, e simular dois diferentes revestimentos asfálticos para Na e Nr, além de aumentar a camada de revestimento à medida que o tráfego aumenta, é notório que as estruturas apresentaram comportamento satisfatório quanto à DP e área trincada, ambas dentro dos limites impostos para o tipo de via, durante os 10 anos de projeto. Ao final dos 10 anos, todas as variações da Estrutura 1, desde que bem executadas, apresentariam menos de 30% de área fissurada e sulcos menores que 5,0 mm, com exceção da Estrutura Eb1, que se aproxima dos 6,00 mm de DP total, mesmo assim, não chegando perto do máximo, que são 10,00 mm.

A exploração do comportamento das variações da Estrutura 2 nos 10 anos de projeto, foram feitas para analisar os resultados frente à mudança da energia de compactação do subleito, pois a Estrutura 2 se difere da Estrutura 1 apenas nisso. Para demonstrar esse comparativo é apresentado na Figura 14 os resultados de fadiga e DP para as variações da Estrutura 2, com subleito compactado à energia intermediária.

Figura 14 - ATR e área trincada das versões da Estrutura 2 conforme variação do N



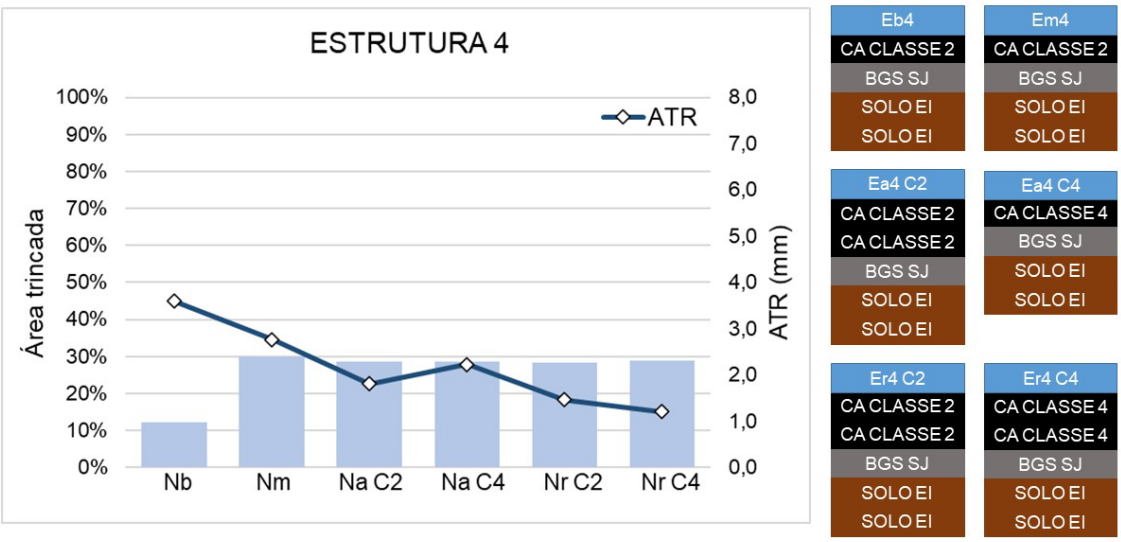
Fonte: Autora.

Para as variações da Estrutura 2, seguindo os mesmos tráfegos e mudanças de revestimento impostos às versões da Estrutura 1, é possível notar que as estruturas apresentaram comportamento satisfatório quanto à DP e área fissurada. Ao final dos 10 anos, todas as variações da Estrutura 2, desde que executadas corretamente, apresentariam menos de 30% de área fissurada e DP inferior a 10,00 mm. Diante disso, se torna importante a análise de viabilidade financeira das estruturas, por isso será apresentado no item 4.2.3 a comparação financeira das estruturas “Ea1 C4” e “Ea2 C4”.

As estruturas “Ea1 C4” e “Ea2 C4” diferenciam-se apenas devido a energia de compactação do subleito, para as demais camadas, as estruturas mantêm mesmos materiais e espessuras das camadas, o comportamento das estruturas é semelhante pois por utilizarem concreto asfáltico “Classe 4”, as solicitações impostas pelo tráfego chegam as camadas sob ele com tensões já menos acentuadas, isso porque o revestimento já supre consideravelmente as solicitações das tensões, porém quando comparadas separadamente as deformações dos subleitos das Estruturas “Ea1 C4” e “Ea2 C4” é possível notar que ao passo que o subleito compactado à energia normal deforma 0,12 cm, o subleito compactado à energia intermediária deforma 0,07 cm, ficando evidente a melhor qualidade técnica do subleito quando compactado à energia intermediária.

A modificação das variações da Estrutura 4 em relação às apresentadas acima é em relação a troca do material da sub-base, diferentemente das Estruturas 1 e 2 e suas variações, a sub-base que era de material pétreo passa a ser de solo laterítico compactado à energia intermediária. Para analisar o comportamento das estruturas devido a mudança da sub-base, as variações da Estrutura 4 devido ao tráfego são apresentadas juntamente com a análise das estruturas frente ao ATR e fadiga.

Figura 15 - ATR e área trincada das versões da Estrutura 4 conforme variação do N

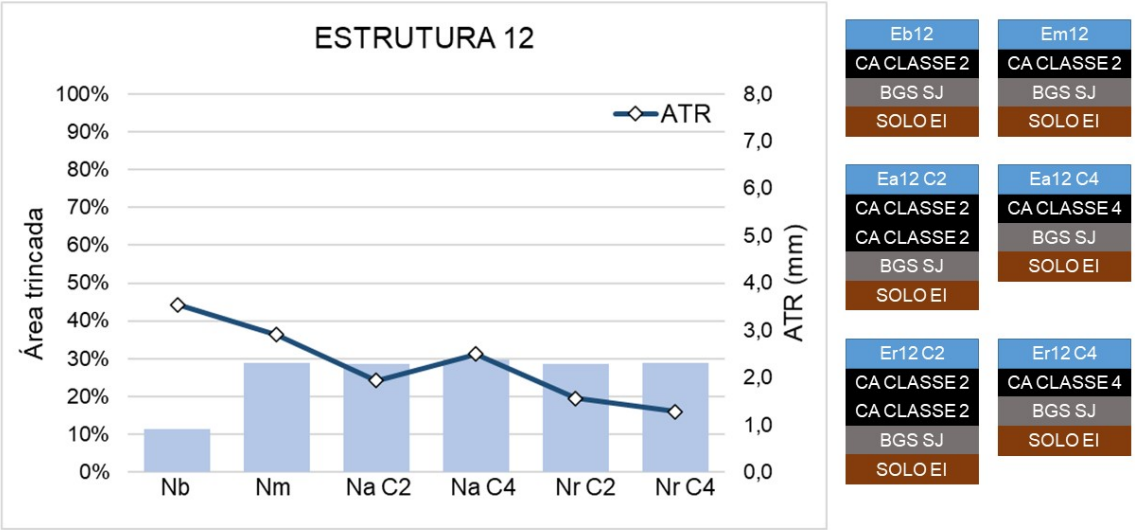


Fonte: Autora.

Conforme abordado no item 4.1, é possível verificar que ao substituir o material pétreo na sub-base, pelo solo laterítico compactado com energia intermediária, há um ganho de desempenho quanto à deformação permanente, ao passo que com o material pétreo o ATR no fim dos 10 anos de projeto tem valores inferiores a 5,0 mm, para o uso do solo laterítico traz valores de ATR inferiores a 4,0 mm. Ademais, todas as variações da Estrutura 4 também são satisfatórias frente ao rompimento por fadiga, pois ao fim do período de 10 anos, terão área trincada inferior a 30%, no entanto, assim como as estruturas já apresentadas, chegarão à ruptura primeiramente por fadiga, pois os valores de ATR são bastante inferiores aos 10,00 mm.

Para completar a análise dos pavimentos dimensionados pelo MeDiNa frente à DP e fadiga, foi inserida nas análises a Estrutura 12. Nas estruturas foram testadas a possibilidade de o pavimento ser composto apenas pelo subleito, base e revestimento. As variações do pavimento conforme a mudança do N podem ser visualizadas na Figura 16 juntamente com os dados de ATR e área trincada das variações das estruturas.

Figura 16 - ATR e área trincada das versões da Estrutura 12 conforme variação do N



Fonte: Autora.

A Estrutura 12 se diferencia das Estruturas 1, 2 e 4 pelo fato de suprimir a camada de sub-base. Além disso, a Estrutura 1 e suas variações têm o subleito compactado à energia normal, e sub-base de material pétreo. Já as variações da Estrutura 2 têm subleito compactado à energia intermediária, no entanto mantêm a sub-base de BGS C1. Ao passo que a Estrutura 4 substitui a sub-base das demais por solo laterítico e tem subleito compactado à energia intermediária. Diante disso, é importante analisar o comportamento da Estrutura 12 e suas variações, que não possuem sub-base alguma.

Tendo os resultados das análises das Estruturas 12, podemos notar que mesmo sem a existência da camada de sub-base o pavimento como um todo apresenta comportamento satisfatório quanto à deformação permanente e área fissurada, ambas dentro dos limites impostos para o tipo de via, durante os 10 anos de projeto. É possível perceber que mesmo sem a camada de sub-base o comportamento do pavimento frente ao ATR, ao fim do período de projeto, é superior ao pavimento que tem camada de sub-base composta de material pétreo (Estruturas 1 e 2), e comportamento bastante semelhante ao pavimento que tem a sub-base composta de solo laterítico compactado à energia intermediária (Estrutura 4), com isso, faz-se necessária uma análise de viabilidade financeira para as estruturas, que será apresentada no próximo item.

4.3 ORÇAMENTO

Para a comparação entre as quatro estruturas propostas para o tráfego médio (Nm: 5,00 x 10^6), dimensionadas no MeDiNa, obteve-se os valores expressos na Tabela 28, a estrutura “Em1” tem subleito compactado à energia normal, e é comparada à estrutura “Em2”, que por sua vez é composta de subleito compactado à energia intermediária e possui sub-base de BGS. A terceira estrutura orçada, a estrutura “Em4”, é composta por solo laterítico em sua sub-base e tem subleito compactado à energia intermediária. Por fim, a estrutura “Em12” é composta apenas pelas camadas de revestimento, base e subleito, suprimindo a camada de sub-base. É importante salientar, que todas as estruturas obtiveram resultados satisfatórios dentro do período de projeto de 10 anos, e são compostas por revestimento asfáltico “Classe 2” e base de material pétreo (BGS SJ).

Tabela 28 - Valor por km e km/ N das estruturas empregadas para tráfego o Nm: 5,00 x 10^6

Estrutura	Valor por km	Custo km/N
Em1	R$ 1.773.015,33	R$ 0,355
Em2	R$ 1.768.065,00	R$ 0,354
Em4	R$ 1.640.185,53	R$ 0,328
Em12	R$ 1.586.729,51	R$ 0,317

Fonte: Autora

Tendo em vista os valores apresentados na Tabela 28 é possível visualizar que em relação ao custo da compactação empregada no subleito, quando olhamos o valor global por km, há uma diferença entre as estruturas “Em1” onde o subleito é compactado à energia normal, e “Em2”, onde é compactado a energia intermediária, porém quando visualizamos o custo dessas estruturas levando em consideração o N, a diferença fica imperceptível, ficando a cargo do projetista a escolha, tendo em vista que ambas são satisfatórias do ponto de vista técnico. O que chama a atenção, é que a estrutura “Em2” tem valor global inferior a “Em1”, isso ocorre devido ao fato de o subleito ter maior qualidade, por ser compactado à energia intermediária, e devido a isso a camada de revestimento asfáltico necessária ser menor, as espessuras

utilizadas podem ser visualizadas na Tabela 21. No entanto, a estrutura “Em4”, onde a sub-base de material pétreo das anteriores é substituída por solo laterítico o custo global e o custo por N ficam perceptível, a diferença se dá ao fato de o solo ter custo inferior à BGS. Para a estrutura “Em12” a diferença é ainda mais considerável, pois pelo fato de a camada de sub-base ser suprimida, o custo da mesma também não existe, resultando em uma estrutura mais enxuta, devido a isso o custo do km por N é consideravelmente menor, assim como o custo global do km.

Outra comparação orçamentária realizada foi o uso do revestimento asfáltico “Classe 2” e o uso do CA “Classe 4”, para isso realizou-se a comparação das estruturas impostas ao tráfego alto (Na: 1,00 x 10^7). As estruturas que possuem em sua nomenclatura a sigla “C2” utilizam o concreto asfáltico convencional, e as estruturas com a sigla “C4” utilizam CA modificado por polímero. Além disso, entre a classe que utiliza CA “Classe 2” e CA “Classe 4” há diferença entre os materiais das camadas adjacentes, utilizando apenas o mesmo material na base de todas as estruturas. Ao passo que a variação da Estrutura “Ea1” possui subleito de solo laterítico compactado a EN, e sub-base de BGS, a variação da Estrutura “Ea2” tem sub-base de BGS, porém solo laterítico compactado a EI em seu subleito, nas variações da Estrutura “Ea4” o subleito e a sub-base são compostos por solo LG’ EI, e por fim, as variações das Estruturas “Ea12” suprimem a camada de sub-base, diminuindo as camadas do pavimento, e mantendo o subleito compactado a EI e com mesmo solo. O custo das estruturas por km e custo km/ N estão apresentados na Tabela 29.

Tabela 29 - Valor por km e km/ N das estruturas empregadas para tráfego o Na: 1,00 x 10^7

Estrutura	**Valor por km (R$)**	**Custo km / N (R$)**	**Estrutura**	**Valor por km (R$)**	**Custo km / N (R$)**
Ea1 C2	2.323.338,80	0,232	Ea1 C4	1.971.223,13	0,197
Ea2 C2	2.362.414,35	0,236	Ea2 C4	2.043.318,09	0,204
Ea4 C2	2.256.547,82	0,226	Ea4 C4	1.926.445,09	0,193
Ea12 C2	2.192.085,33	0,219	Ea12 C4	1.807.223,08	0,181

Fonte: Autora

Tendo em visto os valores apresentados na Tabela 29 é possível notar que os custos por km e km/N, quando feitos para o mesmo tráfego, são inferiores quando utilizado o CA “Classe 4” em comparação a utilização do CA “Classe 2”, isso se deve ao fato de o CA convencional requisitar espessuras maiores se comparado ao CA modificado por polímero. As espessuras das estruturas para o tráfego alto podem ser visualizadas na Tabela 22 para CA “Classe 4” e na Tabela 23 para CA “Classe 2”. Ademais, é possível notar, que quando o subleito é compactado a EI o valor é superior ao compactado a EN, e quando na sub-base a BGS é substituída pelo solo LG’ EI o custo é inferior, além disso, quando a sub-base é suprimida da estrutura o custo é ainda menor.

Para finalizar, foram comparadas financeiramente duas estruturas impostas ao mesmo tráfego, porém dimensionadas por métodos diferentes. A estrutura, real “DNER Nr”, dimensionada pelo método do DNER (1981) e implantada na RS-342, e a estrutura “Er12 C4” dimensionada a partir da metodologia MeDiNa.

A estrutura “Er12 C4” foi escolhida com base nos dados já demonstrados ao longo do trabalho de conclusão, por ser uma estrutura com desempenho satisfatório, mesmo possuindo uma estrutura mais enxuta, por não possuir sub-base. E por possuir menor espessura de revestimento devido a utilização de CA modificado por polímero, que possui melhor qualidade quando comparado ao convencional.

Para realizar a comparação, mesmo que as estruturas tenham sido projetadas para o mesmo N real da rodovia (Nr: $3{,}57 \times 10^7$), foi utilizado para o orçamento, na estrutura “DNER Nr” um N de $4{,}43 \times 10^6$, que é o N do 17º mês após o início da utilização da estrutura, isso ocorre devido ao fato de a estrutura apresentar valores de área trincada superiores a 30% a partir do 18º mês, segundo a avaliação realizada através do *framework* de cálculo do MeDiNa. O gráfico da estrutura levando em conta um período de projeto de 10 anos pode ser visualizado na Figura 12, e a comparação financeira das estruturas projetadas pelos dois métodos é apresentada na Tabela 30.

A partir da Tabela 30 é notório que o custo por km para o pavimento dimensionado pelo método do DNER (1981) é inferior ao custo do pavimento dimensionado a partir do MeDiNa. No entanto, é necessário levar em consideração o custo do km/ N, que no pavimento “Er12 C4” dimensionado a partir do MeDiNa, é mais de quatro vezes inferior ao valor do dimensionado pelo DNER (1981). Ademais, importante levar em consideração que o método do DNER (1981) não foi satisfatório para a proposta inicial do projeto, que contava com tráfego Nr: $3{,}57 \times 10^7$, chegando

à ruptura quando a rodovia chega ao tráfego de $4{,}43 \times 10^6$. Enquanto a estrutura “Er12 C4” dimensionada pelo MeDiNa durante os 10 anos não chega à ruptura por área trincada e ATR.

Tabela 30 - Custo por km e km/ N para estruturas dimensionadas a partir de métodos diferentes, para o mesmo trecho

Estrutura	**N**	**Valor por km**	**Custo km/ N**
DNER Nr	$4{,}43 \times 10^6$	R$ 1.778.233,39	R$ 0,401
Er12 C4	$3{,}57 \times 10^7$	R$ 2.904.787,72	R$ 0,081

Fonte: Autora

5 CONCLUSÃO

O objetivo geral do presente trabalho foi avaliar e comparar o desempenho de estruturas impostas a quatro diferentes tráfegos, buscando a melhor opção levando em consideração a harmonia entre a melhor solução técnica, o orçamento e o custo por solicitação. Para isso, foram analisados o comportamento dos diferentes materiais empregados nas camadas de subleito, sub-base e revestimento dos pavimentos, frente a dois métodos de dimensionamento: o método do DNER (1981) e o método MeDiNa.

Após o dimensionamento das estruturas ser feito pelos métodos do DNER (1981) e MeDiNa, e a avaliação dos pavimentos dimensionados pelo DNER (1981) ser feita pelo *framework* de cálculo do MeDiNa foi possível concluir questões relativas a cada camada dos pavimentos, como a deformação de cada camada e a % de área trincada do pavimento como um todo.

Com isso, para o subleito, a variação das energias de compactação empregadas nos pavimentos rodoviários dimensionados apresenta resultados satisfatórios quando comparadas às compactações para Proctor normal e intermediário. Quando o subleito foi compactado à energia normal, a deformação da camada foi superior à compactada a energia intermediária. No entanto, a medida que as camadas superiores ao subleito eram alternadas trazendo maior desempenho ao pavimento a diferença de DP na camada de subleito ia diminuindo entre as duas energias de compactação, isso porque à medida que as tensões impostas no pavimento vão sendo absorvidas pelas camadas superiores e vão chegando ao subleito com menor intensidade, não necessitando que o mesmo seja compactado à energia intermediária, o que acarreta na diminuição do custo da obra, contudo, fica claro que o subleito quando compactado à energia intermediária é superior ao compactado à energia normal. No que se refere ao custo, a escolha fica a critério do projetista, pois isso não impacta grandemente no custo por quilômetro.

Na camada de sub-base foram analisados diversos materiais. A partir dos dimensionamentos realizados pelo MeDiNa, foi possível concluir que quando a sub-base era composta de BGS C1 era satisfatório, porém foi possível visualizar que quando ocorria a mudança do material da sub-base, de BGS C1 para solo EI, ou S35 EI, ou S35 EM, ou também a substituição por solo-brita, ocorria um avanço significativo na qualidade do pavimento, ou seja, as deformações da camada de sub-

base diminuíam, em relação ao uso da BGS C1. Além disso, quando a camada de sub-base era suprimida do pavimento a deformação total do mesmo era ainda menor, chegando à conclusão que para os quatro tráfegos impostos, a melhor solução, frente aos materiais utilizados, é a supressão da camada de sub-base, buscando menor custo e maior facilidade de execução do pavimento.

Em relação a camada de revestimento asfáltico, devido aos tráfegos impostos ao pavimento, fez-se necessário também o dimensionamento da estrutura utilizando concreto asfáltico modificado com polímero para os tráfegos mais elevados. Devido a isso, para dois dos quatro tráfegos estudados, foram dimensionadas estruturas, utilizando concreto asfáltico convencional, e CA modificado por polímero, tendo as estruturas e suas espessuras correspondentes, deixando claro que ambas com desempenho satisfatório, para os tráfegos empregues dento do período de projeto, foi fundamental, que as estruturas fossem comparadas também orçamentariamente.

Frente as conclusões já apresentadas, de todos os dimensionamentos e avaliações feitos pelo método MeDiNa, foram selecionadas 14 estruturas para a comparativo orçamentário. Tais estruturas foram selecionadas, pois apresentaram comportamento satisfatório dentro do período de projeto. Com exceção da estrutura real utilizada na RS-342, a qual também foi realizado o orçamento, no entanto, perante a avaliação realizada pelo MeDiNa apresentou ruptura no 17º mês de utilização.

Além disso, as estruturas foram selecionadas, pois a partir do levantamento orçamentário das mesmas, poderia ser obtido a diferença de custo entre um pavimento com subleito compactado à energia intermediária e à energia normal; além de a diferença de utilizar, na sub-base BGS C1 e solo EI, que por si só já se mostrou superior à BGS C1, não apresentando comportamento distinto, quando substituído pelos materiais S35 EI, S35 EM, ou também solo-brita. Devido a isso, por escolha, os últimos não foram orçados. Por fim, para escolha das estruturas a serem orçadas, foi levado em consideração a utilização de concreto asfáltico convencional, e modificado com polímero, pois, mesmo o CA modificado tendo o custo mais elevado, pelos dimensionamentos, quando utilizado o CA convencional, para o mesmo tráfego, as espessuras eram consideravelmente superiores, devido a isso fez-se necessário tal comparação orçamentária.

Feita a comparação orçamentária entre as 14 estruturas selecionadas, foi possível concluir que a diferença de compactação do subleito não traz grandes diferenças de custos, mesmo que a diferença do valor por km seja inferior quando o

subleito é compactado à EN, com exceção dos resultados apresentados para o tráfego médio, pois devido a compactação do subleito na estrutura, foi possível diminuir a espessura do revestimento asfáltico, diminuindo o custo do pavimento como um todo. O que deixa claro, como já dito, que o subleito compactado com EI tem desempenho superior ao compactado à EN. Logo, na tomada de decisões quanto à energia de compactação do subleito, deve-se levar em conta o desempenho e o custo.

Para a parcela de custo da sub-base, as diferenças quando a BGS é substituída pelo solo EI é notória, tanto do custo por km, como custo do km/N. Isso acontece, devido ao solo ser um material com valor inferior à BGS, sendo que, esse custo é ainda menor quando a sub-base é suprimida da estrutura, pois mesmo sem a existência da camada de sub-base a estrutura continua sendo tecnicamente satisfatória, e assim não há custo relacionada à camada.

Em síntese, a camada que traz mais impacto ao custo é a de revestimento. Quanto a ela, quando comparada as estruturas impostas ao mesmo tráfego e com mesmos materiais nas camadas adjacentes, fica nítido o quão benéfico é utilizar o CA “Classe 4”, ou seja, modificado com polímero. Para a comparação de custo imposta ao tráfego alto, com os diferentes tipos de revestimos asfálticos, a diferença de custo do km/ N foi em média de 4 centavos por passagem do eixo padrão, em todas as estruturas propostas. Isso dentro do período de projeto, e com N de $1,00 \times 10^7$ é uma economia de custo de obra considerável.

Por fim, foram comparados os orçamentos das estruturas dimensionadas a partir dos distintos métodos de dimensionamento estudados. Levando em consideração o mesmo tráfego, o tráfego real da RS-342. Para isso, foi necessário considerar, que o pavimento real, utilizado na rodovia e dimensionado pelo DNER (1981), rompe antes do previsto em projeto, tal conclusão foi obtida através da avaliação do pavimento pelo *framework* de cálculo do MeDiNa. Devido a isso o N considerado para o custo de km/N foi inferior ao real, utilizando para o cálculo o N do mês em que o pavimento já apresenta área trincada superior à 30%. Ao passo que a estrutura dimensionada pelo MeDiNa se mostra satisfatória quando imposta ao N real, e período de projeto de 10 anos. A partir da comparação orçamentária de ambas as estruturas foi possível concluir, que a estrutura dimensionada pelo MeDiNa tem também menor custo de km/N, o que está atrelado a sua durabilidade. Em conclusão, temos que o custo do pavimento do DNER (1981), levando em consideração o custo do km/N é mais de quatro vezes superior ao pavimento dimensionado pelo MeDiNa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO – **Tabela de preços materiais asfálticos**. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/precos-e-defesa-da-concorrencia/precos/precos-de-distribuicao-de-produtos-asfalticos>. Acesso em 26 jan. 2022.

BACK, A. H. **Avaliação das propriedades químicas e geomecânicas de agregados oriundos de jazidas de rochas de diferentes litologias do estado do RS.** 2018. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2018.

BALBO, 1997. **High Quality Cement Treated Crushed Stones for Concrete Pavement Bases.** In: 6th Purdue Conference on Concrete Pavement, Indianapolis, U.S.A., 1997.

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

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L.M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES; J. B. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**. Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA, 2008.

BERNUCCI, et al. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros.** Rio de Janeiro: Ed. Abeda, 2010.

Mello, L.B.; Chiarello, G.P.; Pascoal, P.T.; Baroni, M. & Specht, L.P. 2021. Solo-Brita em Bases de Pavimentos Flexíveis: Avaliação quando à Fadiga Utilizando o MeDiNa. *Anuário do Instituto de Geociências, 44*: 35192. DOI 1982-3908_2021_44_35192 CARDOSO, R. S. **Orçamento de obras em foco** 4.ed. São Paulo: Ed. Oficina de Textos, 2020.

CARVALHO, C. A. B. **Estudo de contribuição das deformações permanentes de solo na formação das trilhas de roda num pavimento flexível.** 1997. Tese de Doutorado – Escola de Engenharia de São Carlos, São Paulo, SP, 1997.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTE. **Pesquisa CNT de rodovias 2021**. – CNT, Brasília, 2021.

CHIARELLO, G. P.; PASCOAL, P. T.; SANTOS, T. A.; PEREIRA, D. S.; BARONI, M.; GERING, R. P. **Avaliação estrutural e financeira de pavimento flexível dimensionado pelo método do DNER (1981) e MEDINA (2019): estudo de caso da duplicação da BR 287** – Trecho Santa Cruz do Sul à Tabaí/RS. In: 33º ANPET, Balneário Camboriú, SCl. **Anais...** 2019.

COUTINHO, J. C. P. C. **Dimensionamento de pavimento asfáltico:** Comparação do método do DNER com um método mecanístico-empírico aplicada a um trecho. 2011. Dissertação de Mestrado – Universidade de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, 2011.

CERATTI, J. A. P. et al. **Utilização de ligantes asfálticos em serviços de pavimentação**. Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA, 2015. 146 p.

DEPARTAMENTO AUTÔNOMO DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Projeto final de engenharia de adequação do aumento de capacidade de tráfego, duplicação com pavimentação**. DAER, Rio Grande do Sul, 2017

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Método de projeto de pavimentos flexíveis.** DNER, Rio de Janeiro, 1981.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTES. **DNIT 2006b**: Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos. 2. ed. Rio de Janeiro. 310 pp. (Publ, IPR., 720).

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTES. **DNIT 2020**: Manual de Ajuda Programa MeDiNa versão 1.1.5, Brasil, 2020.

DEPARTAMENTO N0ACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Norma DNIT 134/2018**: pavimentação: solos: determinação do módulo de resiliência: método de ensaio. Rio de Janeiro, 2018. 18 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Norma DNIT 179/2018**: pavimentação: solos: determinação da deformação permanente: instrução de ensaio. Rio de Janeiro, 2018. 20 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Norma DNIT** 183/2018. Pavimentação asfáltica: Ensaio de fadiga por compressão diametral à tensão controlada. Rio de Janeiro, 2018. 7 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Publicação IPR - 719**: Manual de pavimentação. 3ed. Rio de Janeiro, 2006. 274 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTES - DNIT. **Tabela de custos SICRO-DNIT**. Disponível em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/custos-e-pagamentos/custos-e-pagamentos-dnit/sistemas-de-custos/sicro>. Acesso em 26 jan. 2022.

FRANCO, F. A. C. P. **Método de dimensionamento mecanístico empírico de pavimentos asfálticos – SisPav.** 2007. Tese de doutorado - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2007.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE. Disponível em: https://cidades.ibge.gov.br/brasil/rs/cruz-alta/panorama Acesso em 25 jan. 2022.

GUIMARÃES, A. C. R; MOTTA, L. M. G.; MEDINA, J. Considerações sobre o modelo e Monismith de previsão de deformação permanente em solos sujeitos a cargas repetidas em pavimentos. In: 35ª Reunião Anual e Pavimentação. Florianópolis. **Anais**... 2004.

GUIMARÃES, A. C. R. **Um método mecanístico-empírico para a previsão da deformação permanente em solos tropicais constituintes de pavimentos**. 2009.

GUIMARÃES, A. C. R.; MOTTA, L. M. G.; CASTRO, C. D. **Permanent deformation parameters of fine-grained tropical soils**. Road Materials and Pavemente Design, v. 19, p 1-18, 2018.

HUANG, Y. H. **Pavements analysis and design**. Prentice-Hall Inc. New Jersey, 2003.

MATTOS, A. D. **Como Prepara Orçamentos de Obras. 4. ed**. São Paulo: Pini, 2006.

MEDINA, J., MOTTA, L. M. G., **Mecânica dos Pavimentos**. Rio de Janeiro: Ed. UFRJ, 2015.

MEDINA, J., PREUSSLER, E. S. **Características resilientes de solos em estudos de pavimentos.** Solos e Rochas. Associação Brasileira de Mecânica dos Solos, Rio de Janeiro, RJ. vol 3, n 1, p. 3-26, 1980.

MOTTA. L. M. G. **Método de dimensionamento de pavimentos flexíveis***:* Critério de Confiabilidade e Ensaios de Cargas Repetidas. 1991. Tese de Doutorado – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 1991.

PASCOAL, P. T. **Avaliação do comportamento resiliente e deformação permanente do solo empregado no pavimento rodoviário da RS 342.** 2020. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2020.

PEZO, R. F.; CLAROS, G.; HUDSON, W. R.; STOKOE II, K. H. **Development of reliable resilient modulus test for subgrade and non-granular subbase materials for use in toutine pavement design**. Research Report 1177, 1992.

PINTO, S. **Estudo do comportamento à fadiga de misturas betuminosas e aplicação na avaliação estrutural de pavimentos.** 1991. Tese de Doutorado - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 1991.

PREUSSLER, E. S. **Ensaios triaxiais dinâmicos de um solo arenoso**. 1978. 141 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 1978.

PREUSSLER, E.S., **Estudo da Deformação Resiliente de Pavimentos Flexíveis e Aplicação ao Projeto de Camadas de Reforço**. Tese de Doutorado, Programa de Engenharia Civil – COPPE / Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1983.

REZENDE, D. de S. V. **Comportamento mecânico de alguns tipos de solo através de ensaios triaxiais de cargas repetidas para projetos de pavimentos rodoviários**. 2009. 144 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2009.

SAGRILO, A. V. **Estudo de deformabilidade e empacotamento de britas com diferentes origens litológicas do Estado do Rio Grande do Sul.** 202. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2020.

SILVA, A. M. S. **Estudo do comportamento resiliente de um solo laterítico com ácido fosfórico e cinza de casca de arroz.** 2021. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2021.

SVENSON, M. **Ensaios triaxiais dinâmicos de solos argilosos**. 1980. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 1980.

TISAKA, M. **Orçamento na Construção** Civil: Consultoria, Projeto e Execução. 1. ed. São Paulo: Pini, 2006.

APÊNDICE 1

Figura 1.1 - ATR e área trincada das versões da Estrutura 3 conforme variação do N

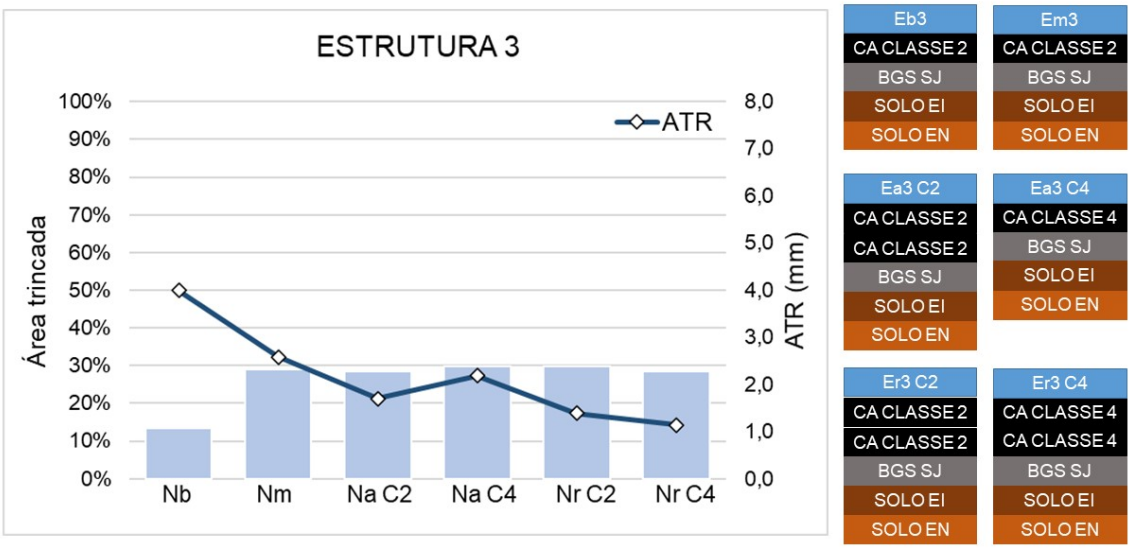


Figura 1.2 - ATR e área trincada das versões da Estrutura 5 conforme variação do N

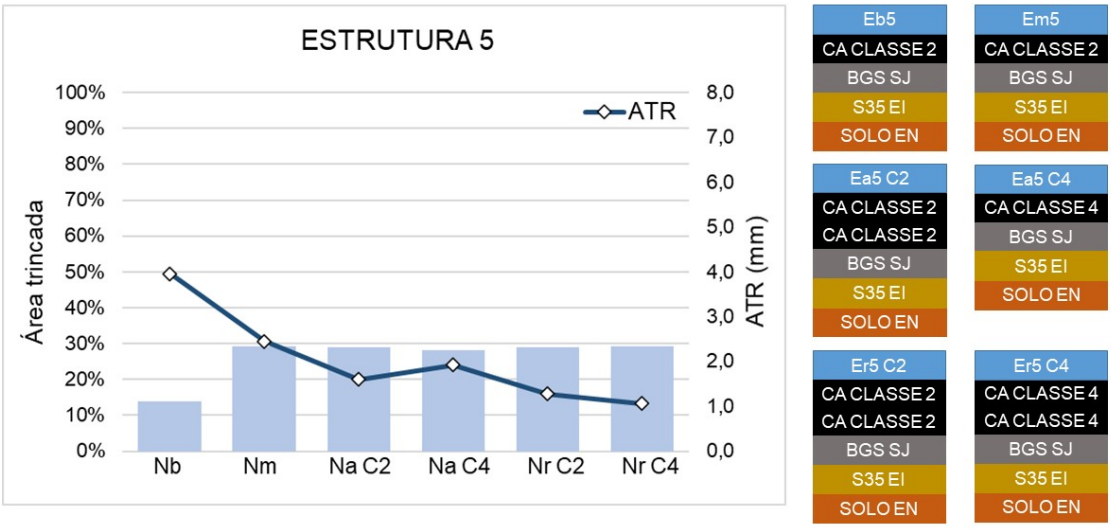


Figura 1.3 - ATR e área trincada das versões da Estrutura 6 conforme variação do N

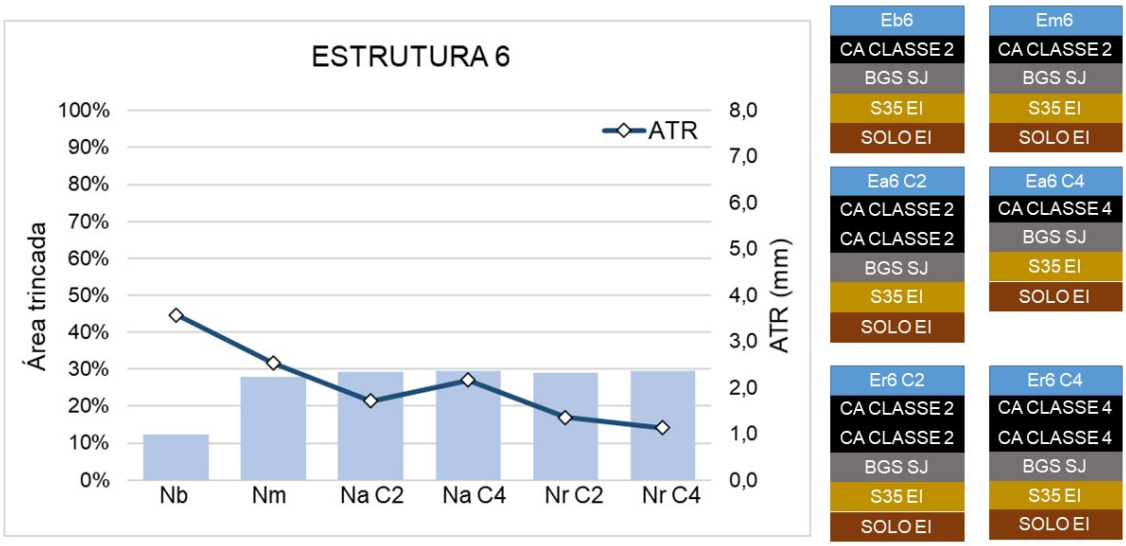


Figura 1.4 - ATR e área trincada das versões da Estrutura 7 conforme variação do N

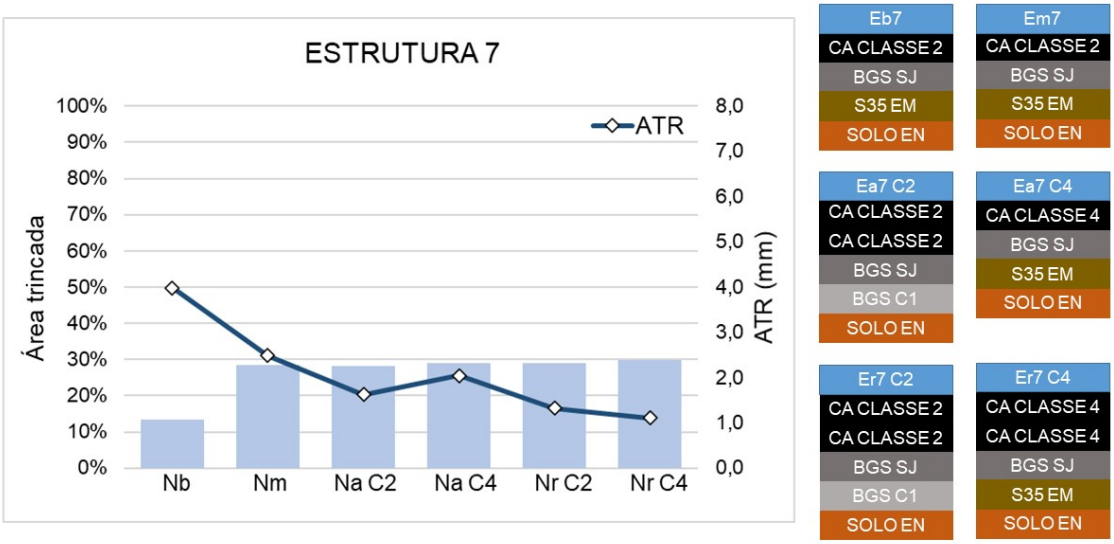


Figura 1.5 - ATR e área trincada das versões da Estrutura 8 conforme variação do N

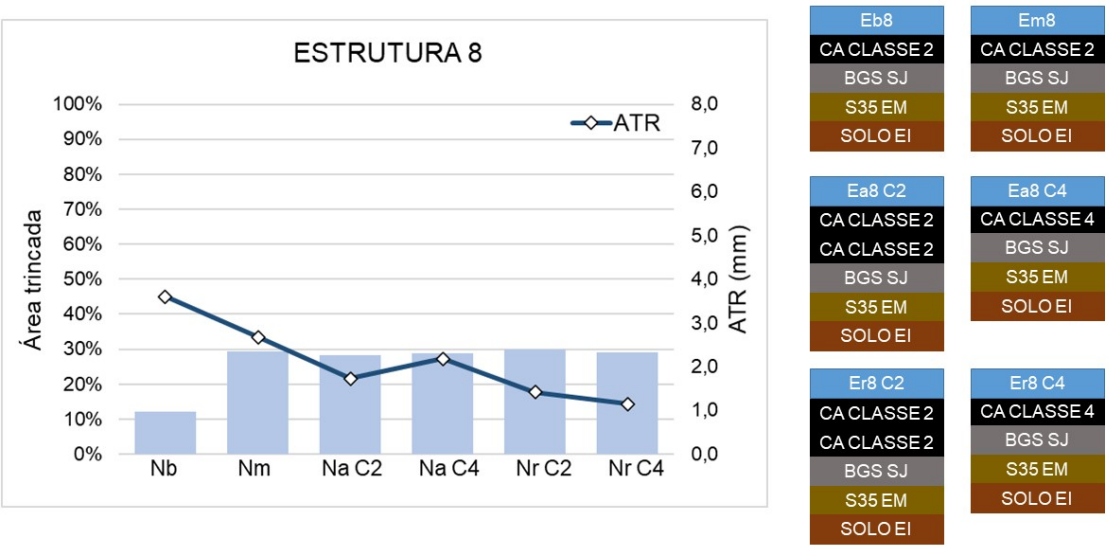


Figura 1.6 - ATR e área trincada das versões da Estrutura 9 conforme variação do N

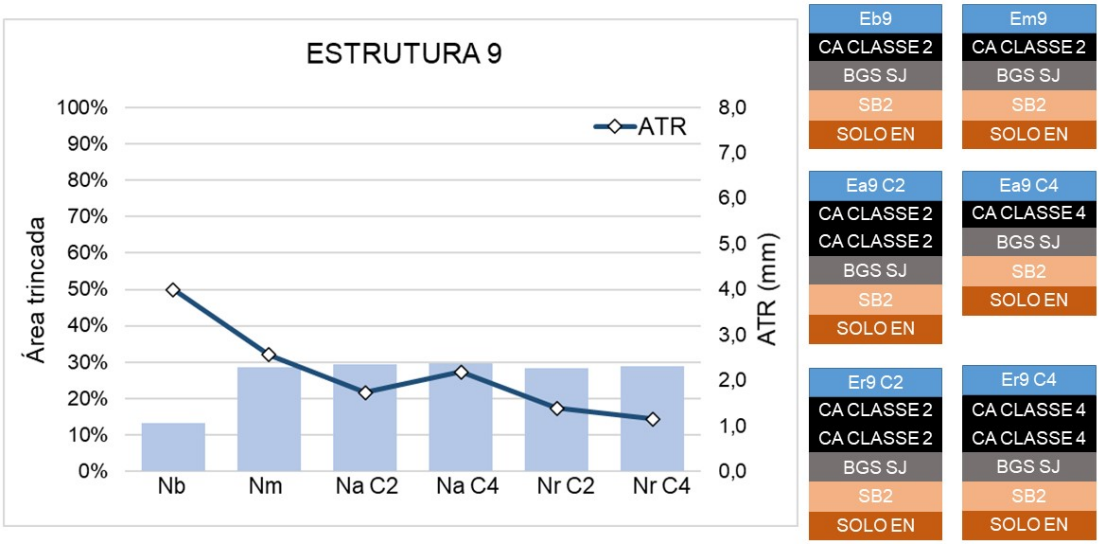


Figura 1.7 - ATR e área trincada das versões da Estrutura 10 conforme variação do N

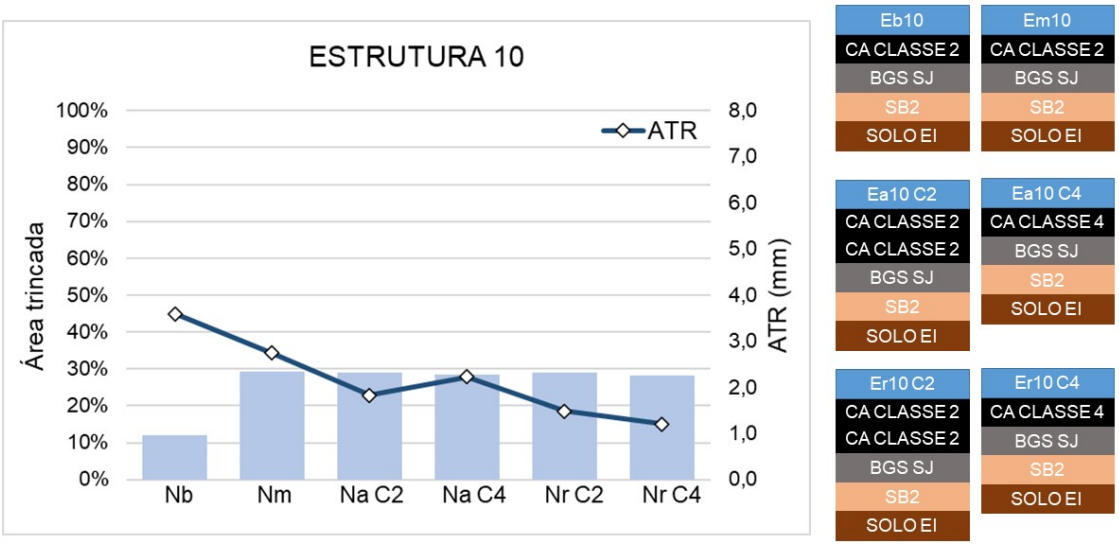
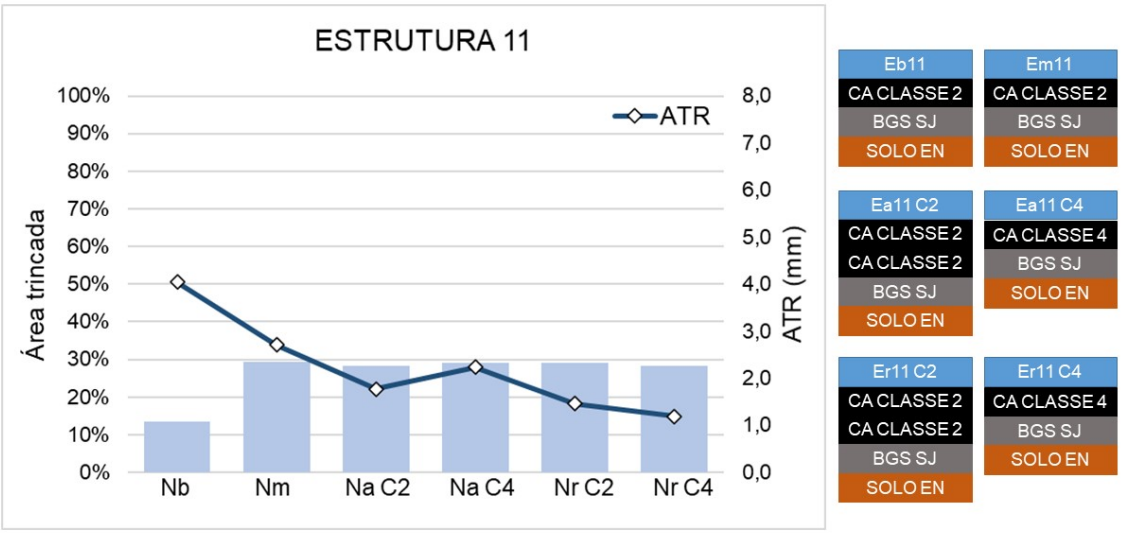



Figura 1.8 - ATR e área trincada das versões da Estrutura 11 conforme variação do N