



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE TECNOLOGIA  
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL**



**ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DAS RESPOSTAS DO *SOFTWARE*  
MEDINA ÀS VARIAÇÕES DOS PARÂMETROS DE ENTRADA DAS  
CAMADAS E DO SUBLEITO DE UM PAVIMENTO FLEXÍVEL.**

**Ana Beatriz Marques de Araújo  
Luan Patrick Reis Lima**

**Belém - PA  
Junho/2022**

**Ana Beatriz Marques de Araújo  
Luan Patrick Reis Lima**

**ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DAS RESPOSTAS DO *SOFTWARE*  
MEDINA ÀS VARIAÇÕES DOS PARÂMETROS DE ENTRADA DAS  
CAMADAS E DO SUBLEITO DE UM PAVIMENTO FLEXÍVEL.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a  
Faculdade de Engenharia Civil do Instituto de  
Tecnologia da Universidade Federal do Pará,  
como parte dos requisitos para obtenção do título  
de Bacharel em Engenharia Civil

Orientador: Dr. Marcelo Figueiredo Massulo  
Aguiar

**Belém - PA  
Junho/2022**

**ANA BEATRIZ MARQUES DE ARAÚJO**

**LUAN PATRICK REIS LIMA**

**Análise de sensibilidade das respostas do *software* MeDiNa às variações dos parâmetros de entrada das camadas e do subleito de um pavimento flexível**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a Faculdade de Engenharia Civil do Instituto de Tecnologia da Universidade Federal do Pará, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Belém, 24 de junho de 2022

**BANCA EXAMINADORA**



---

Prof. Dr. Marcelo Figueiredo Massulo Aguiar  
Orientador



---

Prof. Dr. Gérson Jacques Miranda dos Anjos  
Examinador interno



---

Prof. Dr. Ricardo Freire Gonçalves  
Examinador externo

Aprovado, com conceito EXC.

Dedicamos este  
trabalho a Deus, aos  
nossos familiares, e a  
todos que contribuíram  
direta e indiretamente  
dentro dessa trajetória.

## **AGRADECIMENTOS**

### **Ana Beatriz**

Agradeço primeiramente a Deus por absolutamente tudo, sem Ele nada disso seria possível. Obrigada, meu Pai, por tantas bênçãos sem medida!

Aos meus pais, Cícera e Nazareno, por serem meu alicerce e por nunca medirem esforços para que eu pudesse realizar meus sonhos.

À minha irmã, Bruna, por todo apoio e incentivo para que esta monografia fosse terminada.

Ao meu namorado, Bernardo, por toda compreensão e companheirismo nessa caminhada.

Ao Luan, que desde o início do curso me presenteou com sua amizade, que sempre me ajudou em muitos momentos durante todo esse período e que aceitou produzir esse trabalho junto comigo. Obrigada, meu amigo!

Aos meus amigos e companheiros de curso que sempre estiveram ao meu lado demonstrando apoio, que, sem dúvidas, foram essenciais nesses anos de formação. Obrigada!

Ao nosso professor orientador, Dr. Marcelo Massulo, por toda orientação que nos foi dada e pelo constante apoio.

A todos amigos, colegas e familiares que de alguma forma contribuíram para realização deste trabalho e da minha formação.

E a Universidade Federal do Pará pela oportunidade concedida de concluir mais essa etapa da minha vida.

## **AGRADECIMENTOS**

### **Luan**

A Deus, por ter realizado o desejo do meu coração de passar no vestibular para o curso e a instituição que eu sonhava, e por ter me fortalecido durante esse árduo percurso de quase 6 anos.

Aos meus pais, Cleonice e Antônio, por todo esforço feito para me manter estudando em outra cidade distante com todos os desafios que isso representa. E, por durante toda minha vida terem cuidado de tudo para que meus irmãos e eu pudéssemos nos preocupar apenas em estudar.

À minha mãe novamente, um agradecimento especial por acordar todas as madrugadas para se despedir de mim e me abençoar quando chegava o momento de retornar a Belém. Obrigado pelas orações e por ter sido forte o suficiente para lidar com todos os medos e receios de ter um filho longe dos seus cuidados. Te amo.

À minha amiga Gabi, a quem eu dei a dica de ler os agradecimentos dos trabalhos e que certamente estava aguardando para ler esse. Obrigado pela parceria de inúmeras viagens exaustivas de ônibus, e por ter sido um pedacinho de Ipixuna dentro da UFPA para que eu me sentisse um pouco mais em casa.

Aos meus colegas de turma, em especial aos que estiveram do meu lado em quase todos os trabalhos possíveis: Bia, Bruno, Mateus e Rodrigo, além dos nossos representantes de turma e muitas vezes salva vidas Luiz e Flávio. Obrigado!

À minha amiga e parceira de TCC, Bia, pela amizade que eu levarei para a vida toda e pelo companheirismo e apoio desde os primeiros momentos do curso até aqui. Não poderia ser diferente finalizar etapa se não fosse com você. Obrigado por tudo!

Ao nosso orientador, Prof. Dr. Marcelo Massulo, pela paciência extrema e por todo esforço para nos passar as orientações necessárias sempre mantendo um diálogo descontraído e amigável. B O R A !

À minha namorada, Geovana, por ter sido meu ponto de paz durante esse período de TCC. Obrigado por toda compreensão, amor e cuidado comigo, e pelos inúmeros momentos em que você me fortaleceu e me apoiou. “É a melhor do mundo!” “Obrigado meu Deus!” Te amo.

*Será que você não sabe?  
Nunca ouviu falar?  
O Senhor é o Deus eterno,  
o Criador de toda a terra.  
Ele não se cansa nem fica  
exausto;  
sua sabedoria é insondável.*

*Ele fortalece o cansado e dá  
grande vigor ao que está sem  
forças.*

*Até os jovens se cansam e  
ficam exaustos, e os moços  
tropeçam e caem;*

*mas aqueles que esperam no  
Senhor renovam as suas  
forças. Voam alto como  
águias; correm e não ficam  
exaustos, andam e não se  
cansam.*

*Isaias 40:28-31*

## RESUMO

ARAUJO, A. B. M.; LIMA, L. P. R. **ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DAS RESPOSTAS DO SOFTWARE MEDINA ÀS VARIAÇÕES DOS PARÂMETROS DE ENTRADA DAS CAMADAS E DO SUBLEITO DE UM PAVIMENTO FLEXÍVEL**. 2022. 83 p. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal do Pará, Belém.

Atualmente há uma necessidade de substituir os métodos empíricos de dimensionamento de pavimentos por novos métodos que utilizam conceitos da mecânica (empírico-mecanísticos), assim como ocorre na transição do método vigente brasileiro para o método MeDiNa. No entanto, o *software* MeDiNa requer muitos parâmetros de entrada que são obtidos através de ensaios pouco acessíveis, e por isso acabam sendo estimados por meio de correlações. Sendo assim, o objetivo deste trabalho é realizar uma análise de sensibilidade da porcentagem de Área Trincada Estimada (TRI) e do Afundamento de Trilha de Roda (ATR) em dois pavimentos flexíveis, calculados pelo MeDiNa. Para tanto, foram utilizados dados do Projeto de Duplicação da BR-316 a partir dos quais, mediante correlações empíricas, foram estimados os parâmetros de entrada do cenário de referência tais como: Módulo de Resiliência (MR), Coeficiente de Poisson ( $\mu$ ), Coeficientes de Regressão de deformação permanente ( $\Psi_i$ ) e fadiga (K1). Posteriormente estes parâmetros de entrada foram variados, individualmente, em  $\pm 25\%$  e analisados os resultados de ATR e TRI em dois pavimentos de tráfegos diferentes, ambos sobre o mesmo subleito. Para as estruturas estudadas, a técnica de análise de sensibilidade detectou forte susceptibilidade do ATR às variações de coeficiente de regressão  $\Psi_2$  e coeficiente de Poisson no subleito e especialmente na base onde geraram respectivamente aumentos de 41,0% e 18,1%, além de indicar que a TRI é muito afetada pela espessura da camada e módulo de resiliência do revestimento, onde registraram respectivamente aumentos de 29,6% e 17,7%. Portanto recomenda-se a realização prioritária desses ensaios, em detrimento dos demais, cujos parâmetros poderiam ser obtidos por correlações, no presente cenário de restrição de ensaios.

Palavras-chave: Análise de sensibilidade, Dimensionamento de pavimentos, MeDiNa, afundamento de trilha de roda, área trincada.

## ABSTRACT

ARAÚJO, A. B. M.; LIMA, L. P. R. **SENSITIVITY ANALYSIS OF MEDINA SOFTWARE'S RESPONSES TO VARIATIONS IN LAYER AND SUBGRADE INPUT PARAMETERS OF A FLEXIBLE PAVEMENT**. 2022. 83 p. Diplomation Work (Graduate in Civil Engineering) – Faculty of Civil Engineering, Federal University of Pará, Belém.

Currently, there is a need to replace empirical methods of pavement design with new methods that use mechanical concepts (empirical-mechanistic), as occurs in the transition from the current Brazilian method to the MeDiNa method. However, the MeDiNa software requires many input parameters that are obtained through inaccessible tests, and therefore end up being estimated through correlations. Therefore, the objective of this work is to perform a sensitivity analysis of the percentage of Estimated Cracked Area (TRI) and Wheel Track Sinking (ATR) in two flexible pavements, calculated by MeDiNa. For that, data from the BR-316 Duplication Project were used, from which, through empirical correlations, the input parameters of the reference scenario were estimated, such as: Modulus of Resilience (MR), Poisson's Coefficient ( $\mu$ ), Regression coefficients of permanent deformation ( $\Psi_i$ ) and fatigue (K1). Subsequently, these input parameters were individually varied by  $\pm 25\%$  and the results of ATR and TRI were analyzed on two pavements of different traffic, both on the same subgrade. For the structures studied, the sensitivity analysis technique detected strong susceptibility of the ATR to variations in the regression coefficient  $\Psi_2$  and Poisson's coefficient in the subgrade and especially in the base where they generated increases of 41.0% and 18.1%, respectively, in addition to indicate that the TRI is greatly affected by the layer thickness and modulus of resilience of the coating, which recorded increases of 29.6% and 17.7%, respectively. Therefore, it is recommended to carry out these tests as a priority, to the detriment of the others, whose parameters could be obtained by correlations, in the present scenario of test restriction.

Key words: Sensitivity analysis, Pavement design, MeDiNa, wheel track sinking, cracked area.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema de seção típica de um pavimento flexível. ....	21
Figura 2 – Parâmetros avaliados na análise empírico-mecanicista. ....	25
Figura 3 – Fluxograma representando as etapas do método. ....	33
Figura 4 – Determinação do tipo e espessura da camada de revestimento. ....	43
Figura 5 – Utilização do ábaco para determinação das espessuras. ....	44
Figura 6 – Espessuras das camadas do Estrutura 1. ....	46
Figura 7 – Espessuras das camadas da Estrutura 2. ....	46
Figura 8 – Dados de tráfego da Estrutura 1. ....	47
Figura 9 – Dados de tráfego da Estrutura 2. ....	47
Figura 10 – Dados da Estrutura 1. ....	48
Figura 11 – Dados da Estrutura 2. ....	48
Figura 12 – Resultados da análise da Estrutura 1. ....	48
Figura 13 – Resultados da análise da Estrutura 2. ....	49
Figura 14 – Resultados dos danos mensais da Estrutura 1. ....	50
Figura 15 - Resultados dos danos mensais da Estrutura 2. ....	51
Figura 16 - Sensibilidade do ATR na camada de revestimento da Estrutura 1. ....	53
Figura 17 - Sensibilidade do ATR na camada de base da Estrutura 1. ....	54
Figura 18 - Sensibilidade do ATR na camada de sub-base da Estrutura 1. ....	55
Figura 19 - Sensibilidade do ATR no subleito da Estrutura 1. ....	56
Figura 20 - Sensibilidade do ATR na camada de revestimento da Estrutura 2. ....	58
Figura 21 - Sensibilidade do ATR na camada de base da Estrutura 2. ....	59
Figura 22 - Sensibilidade do ATR na camada de sub-base da Estrutura 2. ....	60
Figura 23 - Sensibilidade do ATR no subleito da Estrutura 2. ....	61
Figura 24 - Sensibilidade da TRI na camada de revestimento da Estrutura 1. ....	64
Figura 25 - Sensibilidade da TRI na camada de base da Estrutura 1. ....	65
Figura 26 - Sensibilidade da TRI na camada de sub-base da Estrutura 1. ....	66
Figura 27 - Sensibilidade da TRI no subleito da Estrutura 1. ....	67
Figura 28 – Dados mensais da Estrutura 2. ....	69
Figura 29 - Sensibilidade da TRI na camada de revestimento da Estrutura 2. ....	70
Figura 30 - Sensibilidade da TRI na camada de base da Estrutura 2. ....	71
Figura 31 – Sensibilidade da TRI da camada de sub-base da Estrutura 2. ....	72
Figura 32 - Sensibilidade da TRI do subleito da Estrutura 2. ....	73

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores estimados para Módulo de Resiliência de diferentes materiais..	29
Tabela 2 – Faixas de valores para coeficiente de Poisson.....	29
Tabela 3 – Coeficiente de Regressão para diferentes classificações de solo.....	31
Tabela 4 – Dados do projeto da BR-316. ....	34
Tabela 5 – Parâmetros de inserção do material da camada de base. ....	35
Tabela 6 – Parâmetros de inserção do material da camada de sub-base. ....	36
Tabela 7 – Parâmetros de inserção do material do subleito. ....	36
Tabela 8 – Parâmetros de inserção do material da camada de revestimento. ....	37
Tabela 9 – Critérios de parada de dimensionamento do MeDiNa.....	38
Tabela 10 – Variação dos parâmetros na Estrutura 1. ....	39
Tabela 11 – Variação dos parâmetros na Estrutura 2. ....	40
Tabela 12 – Determinação do índice de suporte para o índice de grupo.....	42
Tabela 13 – Coeficiente de equivalência estrutural. ....	45
Tabela 14 – Maiores variações diretamente proporcionais de ATR na Estrutura 1 ..	56
Tabela 15 - Maiores variações inversamente proporcionais de ATR na Estrutura 1.	57
Tabela 16 - Maiores variações diretamente proporcionais de ATR na Estrutura 2. ..	61
Tabela 17 - Maiores variações inversamente proporcionais de ATR na Estrutura 2.	62
Tabela 18 - Maiores variações inversamente proporcionais de TRI na Estrutura 1 ..	67
Tabela 19 - Maiores variações inversamente proporcionais de TRI na Estrutura 2. .	73

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHO – *American Association of State Highway and Transportation Officials*  
ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas  
AEMC – Análise Elástica de Múltiplas Camadas  
ALA – Abrasão Los Angeles  
ATR – Afundamento de Trilha de Roda  
BC – Brita Corrida  
BC – Bica Corrida  
BGS – Brita Graduada Simples  
BGTC – Brita Graduada Tratada com Cimento  
CAP – Cimento Asfáltico de Petróleo  
CBR – *California Bearing Ratio*  
CCR – Concreto Compactado em Rolo  
CENPES – Centro de Pesquisas da Petrobrás  
CNT – Confederação Nacional do Transporte  
COPPE – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia  
DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem  
DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes  
IPR – Instituto de Pesquisas Rodoviárias  
ESRD – Eixo Simples de Rodas Duplas  
FFM – Fator de Fadiga da Mistura  
FNR – Fundo Rodoviário Nacional  
ISC – Índice de Suporte Califórnia  
IS – Índice de Suporte do Subleito  
K – Coeficiente de Equivalência Estrutural  
MEA – Massa Específica Aparente  
MeDiNa – Método de Dimensionamento Nacional de Pavimentos  
MEPDG – *Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide*  
MH - Macadame Hidráulico  
MR – Módulo de Resiliência  
Número N – Número de Repetições do Eixo Padrão Rodoviário  
RT – Resistência à Tração  
SC – Solo-Cimento  
SCA – Solo-Cal

SMC – Solo Melhorado com Cimento

T.A – Teor de Asfalto

TRI – Área Trincada

VDMA – Volume Diário Médio Anual de Tráfego

Vv – Volume de Vazios

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\varepsilon$  – Deformação

$\sigma$  – Tensão

$\mu$  – Coeficiente de Poisson

% – Porcentagem

$\Psi_i$  – Coeficiente de Regressão - Deformação Permanente

$K_i$  – Coeficiente de Regressão - Fadiga

$\pm$  – Mais ou menos

# Sumário

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	17
<b>1.1 OBJETIVOS</b> .....	18
1.1.1 Geral.....	18
1.1.2 Específicos .....	18
<b>1.2 JUSTIFICATIVA</b> .....	19
<b>1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO</b> .....	20
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	21
<b>2.1 PAVIMENTOS FLEXÍVEIS</b> .....	21
<b>2.2 MÉTODO EMPÍRICO DO DNIT</b> .....	22
<b>2.3 MÉTODOS EMPÍRICO-MECANICISTAS</b> .....	23
<b>2.4 MÉTODO DE DIMENSIONAMENTO NACIONAL DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS (MEDINA)</b> .....	25
<b>2.5 CORRELAÇÕES ENTRE PARÂMETROS</b> .....	27
<b>2.6 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE</b> .....	31
2.6.1 Utilização da análise de sensibilidade em estudos sobre desempenho dos pavimentos flexíveis.....	31
<b>3 MÉTODO</b> .....	33
<b>3.1 DIMENSIONAMENTO DE DOIS PAVIMENTOS PELO MÉTODO DNER (1981)</b> 34	
<b>3.2 SELEÇÃO DOS VALORES DE REFERÊNCIA DOS PARÂMETROS DE ENTRADA DO MEDINA</b> .....	34
<b>3.3 ANÁLISE DAS ESTRUTURAS NO MEDINA PARA O CENÁRIO DE REFERÊNCIA</b> .....	37
<b>3.4 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DO ATR</b> .....	38
<b>3.5 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DA ÁREA TRINCADA</b> .....	41
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	42
<b>4.1 DIMENSIONAMENTO PELO MÉTODO DO DNER</b> .....	42
4.1.1 Dimensionamento da Estrutura 1 .....	42
4.1.2 Dimensionamento da Estrutura 2.....	46
<b>4.2 ANÁLISE DAS ESTRUTURAS NO MEDINA</b> .....	47
<b>4.3 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DO ATR</b> .....	51
4.3.1 Análise de sensibilidade do ATR na Estrutura 1 .....	52

4.3.2	Análise de sensibilidade do ATR na Estrutura 2 .....	57
4.4	<b>ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DA TRI</b> .....	63
4.4.1	Análise de sensibilidade da TRI na Estrutura 1 .....	63
4.4.2	Análise de sensibilidade da TRI na Estrutura 2.....	68
4.5	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	74
5	<b>CONCLUSÃO</b> .....	77
6	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	80

# 1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento sustentável do país, no sentido econômico, social e ambiental, depende de um sistema de transporte mais produtivo e com maior qualidade. O aumento do desempenho do transporte, necessita de regular revisão da sua infraestrutura, tornando-a mais apropriada para as novas demandas (ROCHA, 2015).

A consolidação do modal rodoviário como sistema preferencial de transporte pode ser explicada pelo baixo custo de implantação, em comparação aos demais modos, e por possibilitar ampliações graduais de capacidade, atendendo à demanda conforme se apresenta. Mecanismos institucionais como a criação do Fundo Rodoviário Nacional - (FRN), contribuíram para o ritmo acelerado de crescimento da infraestrutura rodoviária no Brasil (GRACIANO, 1971 apud SCHMIDT, 2011).

Pesquisa feita pela Confederação Nacional do Transporte (CNT), em 2021, indica que cerca de 99% das rodovias são constituídas de pavimento flexível. Esse tipo de pavimento possui uma vida útil, com correta manutenção periódica, de 8 a 12 anos. Porém é comum encontrar rodovias brasileiras deterioradas precocemente. As causas destes defeitos são diversas, tais como falhas no processo construtivo, a falta de manutenção preventiva e de fiscalização (tanto executiva quanto em relação ao excesso de peso dos veículos) e deficiências no método de dimensionamento.

O método de dimensionamento de pavimentos asfálticos vigente é baseado em métodos empíricos oriundos de experimentos e observações feitas ainda na década de 1960. Esse método tem limitações e possíveis falhas na representação do comportamento do pavimento asfáltico, sobretudo porque só poderia ser aplicado adequadamente nos locais com condições climáticas semelhantes ao ambiente onde o método foi desenvolvido. O método sofre ainda de desatualização, visto que as características dos veículos mudaram nos últimos 50 anos - tipo do eixo, pressão de enchimento dos pneus e cargas transportadas (PELISSON et al., 2016).

Em solução, nos últimos anos têm-se desenvolvido os métodos Mecanísticos-Empíricos (ME). São métodos que se valem de conceitos da mecânica para desenvolver modelos teóricos sobre o comportamento estrutural do pavimento. O comportamento dos materiais constituintes é parametrizado por meio de

conhecimento empírico, laboratorial ou de pista, e essa é a quantia empírica do método (BALBO, 2007).

Dessa forma, o Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes (DNIT), desde 2015, tem trabalhado na elaboração do novo Método de Dimensionamento Nacional de Pavimentos (MeDiNa), um método mecanístico-empírico, para substituir o método vigente. Atualmente o DNIT encontra-se em uma fase de transição do método, onde se está aperfeiçoando a calibração do *software* por meio da avaliação dos dados obtidos em laboratório com os dados verificados em campo (BARBOSA; SILVA, 2021).

Entretanto, o *software* MeDiNa requer muitas variáveis de entrada que não são utilizadas no método atual, tais como: Módulo de resiliência, coeficiente de Poisson, coeficientes de regressão, dentre outros. Esses parâmetros precisam de ensaios que não são corriqueiramente realizados, seja pela falta de equipamentos necessários ou até mesmo pelo desconhecimento técnico para executá-los.

Desse modo, os projetistas acabam buscando publicações na literatura técnica, de correlações entre parâmetros empíricos como CBR e parâmetros mecanísticos como o Módulo de Resiliência. Isto traz um enorme grau de incerteza aos resultados gerados no MeDiNa, abrindo espaço para a utilização de análises de sensibilidade que buscam aplicar um tratamento estatístico que agregue mais conhecimento sobre os efeitos dos parâmetros e consequentemente mais segurança ao projetista.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Geral

O objetivo geral deste trabalho é realizar uma análise de sensibilidade da porcentagem de Área Trincada Estimada (TRI) e do Afundamento de Trilha de Roda (ATR) de dois pavimentos flexíveis a partir da variação individual dos valores de parâmetros físicos e mecânicos do subleito e das camadas (sub-base, base e revestimento) dimensionadas pelo *software* MeDiNa, ferramenta do mais novo Método de Dimensionamento Nacional de pavimentos (MeDiNa).

### 1.1.2 Específicos

- Realizar uma avaliação, por meio do MeDiNa, de dois pavimentos dimensionados pelo método tradicional como efeito de comparação;

- Identificar os parâmetros de entrada que mais influenciam no resultado do afundamento de trilha de roda;
- Identificar os parâmetros de entrada que mais influenciam no resultado da porcentagem de área trincada;
- Mencionar os entraves para a implementação do MeDiNa;
- Contribuir para a difusão do novo Método de Dimensionamento Nacional.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

Atualmente observa-se a tendência em substituir os métodos puramente empíricos pelos empírico-mecanísticos, em que se relaciona o empirismo de ensaios de campo e laboratoriais com métodos de cálculo mais precisos e realistas, permitindo a determinação das respostas estruturais do pavimento (tensão, deformação e deslocamento). Tais repostas são utilizadas para analisar o desempenho dos pavimentos quanto ao surgimento das mais comuns deteriorações (trincas por fadiga e deformações permanentes nas trilhas de roda), prevendo assim os danos acumulados ao longo do período de projeto (Fernandes Jr., 1994; Fontenele, 2011).

Nesse sentido, o MeDiNa exige um conhecimento de dados mais detalhados, que só são obtidos através da realização de ensaios específicos de caracterização dos materiais que compõem as camadas do pavimento. Entretanto, esses ensaios necessitam de equipamentos que ainda são de difícil acesso no país, além de exigirem profissionais qualificados dada a complexidade de operação de muitos deles. E, para contornar esse entrave, ocorre a busca por identificar na literatura correlações entre os dados que são comumente utilizados nos projetos de pavimentação, e, os novos dados que são requeridos pelo *software*. Consequentemente isso traz a possibilidade de imprecisões nos resultados, mas acaba sendo uma solução usual e que também permite utilizar materiais locais para estudos e/ou projetos que serão executados.

Diante disso, a ferramenta da análise de sensibilidade permite verificar quais parâmetros causam maior influência no desempenho do pavimento dentro da configuração das camadas e do conjunto de materiais específicos de cada caso, possibilitando identificar quais são os ensaios efetivamente fundamentais, ou seja, aqueles cujos parâmetros alcançados produzem importantes variações no

desempenho do pavimento (no MeDiNa isso é avaliado através da área trincada e do afundamento de trilha de roda ao final da vida útil de projeto) e quais ensaios podem ser considerados secundários, visto que determinados parâmetros podem não gerar alterações expressivas nos resultados e, portanto, não possuem influência no desempenho das estruturas de pavimento. Para esse último caso, os projetistas poderiam continuar se valendo das correlações da literatura para identificar os valores desses parâmetros menos relevantes.

Portanto, estudos como este que utilizam a análise de sensibilidade, promovem mais conhecimento aos projetistas e oferecem uma maior segurança acerca do uso de correlações empíricas para alcançar parâmetros exigidos pelo *software* MeDiNa, e assim contribuir para que esse novo método seja mais usual e difundido.

### 1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está estruturado em cinco capítulos, já incluindo esta introdução, cujos conteúdos são descritos a seguir.

Capítulo 2: neste capítulo é realizada uma revisão de literatura acerca dos pavimentos flexíveis e dos diferentes métodos de dimensionamento existentes e as fundamentações teóricas que as sustentam. Além disso, são apresentadas correlações entre parâmetros físicos e mecânicos dos materiais que compõem as camadas do pavimento asfáltico.

Capítulo 3: trata do método e procedimentos utilizados para alcançar os objetivos do trabalho. Neste capítulo são apresentados os pavimentos asfálticos do estudo de caso, os materiais selecionados e os procedimentos de cálculo e obtenção de parâmetros utilizados nas análises de sensibilidade.

Capítulo 4: mostra os resultados e discussões sobre os efeitos que a variação dos parâmetros físicos e mecânicos dos materiais empregados nos pavimentos causam no seu desempenho segundo a avaliação do *software* MeDiNa.

Capítulo 5: apresenta as conclusões e recomendações para trabalhos futuros que podem ser desenvolvidos na área.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

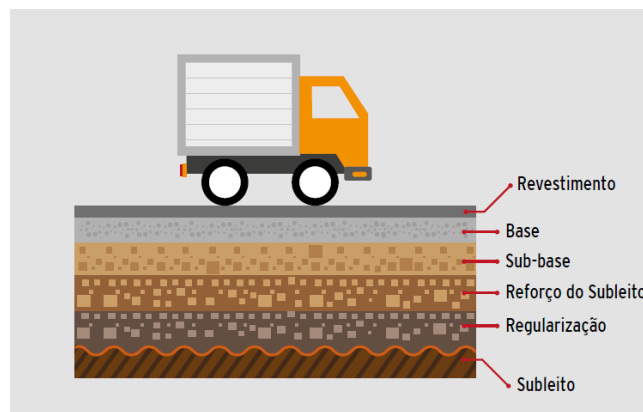
Neste capítulo apresenta-se uma revisão de literatura acerca dos pavimentos flexíveis, do atual método de dimensionamento vigente no Brasil (DNER 1981), sobre o método empírico-mecanicista (MeDiNa) e as fundamentações teóricas que os sustentam. Além disso, são apresentados estudos sobre utilização da análise de sensibilidade no desempenho dos pavimentos flexíveis e correlações entre parâmetros físicos e mecânicos dos materiais que compõem as camadas do pavimento asfáltico.

### 2.1 PAVIMENTOS FLEXÍVEIS

O pavimento é uma estrutura composta por camadas sobrepostas de diferentes materiais compactados a partir do terreno natural. Sua função é atender estruturalmente e operacionalmente ao tráfego de maneira durável e ao mínimo de custos possíveis, considerando no seu horizonte de serviço a manutenção preventiva, corretiva e de reabilitação. Seu trabalho estrutural se dá em receber e transmitir esforços de modo a atenuar as pressões às camadas inferiores, que geralmente são menos resistentes. Para que a estrutura trabalhe satisfatoriamente todos os elementos constituintes precisam ser solicitados dentro de suas capacidades. Isso impede que aja deformações ou mesmo rupturas incompatíveis que levem o pavimento à ruína prematura (BALBO, 2007).

Uma seção transversal típica do pavimento, conforme ilustrado na Figura 1, é composta por camadas de reforço de subleito, Sub-base, Base e Revestimento, construídas sobre o subleito (base do terreno natural).

Figura 1 – Esquema de seção típica de um pavimento flexível.



Fonte: CNT, 2016.

Os pavimentos flexíveis, mais comumente usados no Brasil, são aqueles em que o revestimento é composto por uma mistura constituída basicamente de agregados e ligantes asfálticos. O revestimento asfáltico pode ser composto por camada de rolamento, em contato direto com as rodas dos veículos e por camadas intermediárias ou de ligação, por vezes denominadas de *binder*. Dependendo do tráfego e dos materiais disponíveis, pode-se ter ausência do reforço do subleito e da sub-base. As camadas da estrutura repousam sobre o subleito, ou seja, a plataforma da estrada terminada após a conclusão dos cortes e aterros. (Bernucci et al., 2006).

O revestimento asfáltico é a camada superior destinada a resistir diretamente às ações do tráfego e transmiti-las, de forma atenuada, às camadas inferiores, impermeabilizar o pavimento e melhorar as condições de rolamento (conforto e segurança). As tensões e deformações induzidas na camada asfáltica pelas cargas do tráfego estão associadas ao trincamento por fadiga dessa camada. Parte de problemas relacionados à deformação permanente e outros defeitos pode ser atribuída ao revestimento asfáltico. Nos pavimentos asfálticos, as camadas de base, sub-base e reforço do subleito são de grande importância estrutural. (MEDINA, 1997).

## 2.2 MÉTODO EMPÍRICO DO DNIT

As grandes guerras do século passado impulsionaram diversas evoluções em variadas áreas do conhecimento, em função da necessidade de se sobressair aos inimigos; dentre estas evoluções destaca-se, para esta pesquisa, o dimensionamento de pavimentos. Após o exército americano observar que suas pistas de pouso não suportariam o carregamento de seus novos bombardeiros, foi determinado que o aperfeiçoamento de um método de dimensionamento de pavimentos já existente seria o ideal, e em meio a isso o CBR (*California Bearing Ratio*) foi escolhido por diversos fatores, dentre eles a possibilidade de poder ser adaptado para a construção de aeródromos (COUTINHO, 2011, p.15).

O método do CBR, desenvolvido pela Divisão de Rodovias da Califórnia na década de 1920, determina a espessura total do pavimento necessária para que o subleito suporte o carregamento imposto pelo tráfego previsto, levando em consideração o valor do CBR do solo do subleito e o próprio tráfego. A concepção do método baseou-se na criação de um gráfico com duas curvas para essa determinação da espessura e o exército americano fez estudos de campo para criar extrapolações

dessas curvas (COUTINHO, 2011, p.16). Portanto, a partir dos conhecimentos adquiridos por tal estudo e dos dados obtidos nos testes em pistas experimentais desenvolvidos posteriormente pela AASHO, o engenheiro Murilo Lopes de Souza adaptou o método para ser utilizado no Brasil (SOUZA, 1981, p.7).

O dimensionamento pelo método empírico obteve sucesso visto sua consolidação junto ao DNIT durante tantos anos sendo utilizado no país, porém, pelo fato de ser uma adaptação, existem deficiências. Franco (2007 apud CHIARELLO et al., 2019) destaca que a adaptação desconsidera a diferença do comportamento entre os solos (americano e brasileiro), além dos efeitos da fadiga na estrutura do pavimento, causada pela repetição das cargas do tráfego. Outro fator que tem se tornado problemático é o aumento da frota de veículos do país, tanto em volume quanto em peso, o que tem tornado o eixo padrão um tanto defasado (CHIARELLO et al., 2019). Silva (2018) indica também que em alguns momentos a estrutura pode estar superdimensionada, visto que o degelo da primavera (considerado nos testes da AASHO) que ocorre nos EUA se faz ausente em um país predominantemente tropical como o Brasil.

Franco (2007) lembra que o empirismo é muito válido para as condições em que ele foi determinado, porém se torna um limitante quando aplicado a condições divergentes. Portanto, reduzir a parcela de empirismo no dimensionamento de pavimentos se tornou o objetivo dos engenheiros de pavimentação.

## 2.3 MÉTODOS EMPÍRICO-MECANICISTAS

A primeira Conferência Internacional de Dimensionamento Estrutural de Pavimentos Asfálticos (Michigan, 1962) é considerada como o marco para aplicação do princípio empírico-mecanicista no projeto de pavimentos. Nas décadas seguintes houve evolução no dimensionamento de pavimentos flexíveis, passando de uma abordagem empírica para a empírico-mecanicista que se é conhecida (HAAS, 2007).

Os métodos empírico-mecanicistas surgiram a partir da necessidade de analisar as tensões, deformações e deslocamento do pavimento que eram desconsiderados nos métodos empíricos. Desta forma, o uso de ensaios de caracterização concomitantemente às análises de tensões e deformações do sistema de camadas da estrutura do pavimento se tornou uma necessidade para o

aperfeiçoamento dos métodos de dimensionamento de pavimentos flexíveis (MOTTA, 1991).

Os conceitos mecanísticos que são empregados no dimensionamento tem o objetivo de melhorar o desempenho de cada material empregado evitando que as solicitações sejam concentradas em uma das camadas ao ponto de levar a estrutura à ruptura. (MATTOS, 2014).

Os métodos empírico-mecanicistas trazem muitos benefícios no dimensionamento, pois permitem prever os danos que podem ocorrer no pavimento ao longo de sua vida de projeto. O seu uso ainda traz uma maior confiabilidade nos projetos de pavimentação, melhorando a escolha e utilização dos materiais de acordo com as suas características, além de otimizar a previsão de falhas provocadas na estrutura (MATTOS, 2014; PEREIRA e PAIS, 2017).

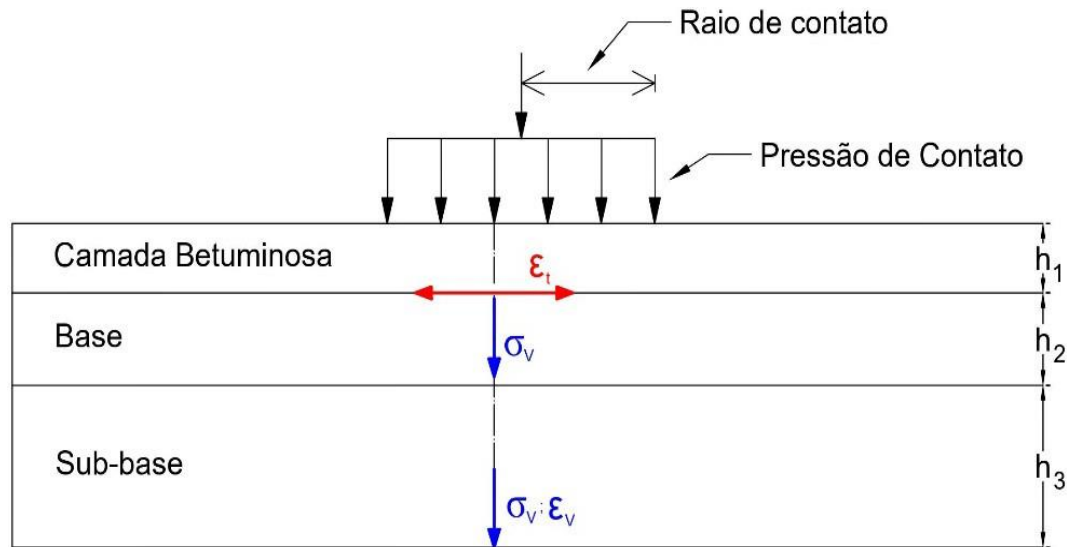
Outra vantagem do uso dos métodos empírico-mecanicistas é que podem ser completados por análises que considerem a ruptura por fadiga das camadas betuminosas a partir do uso de modelos mecanicistas de cálculo com a previsão de desempenho (FONTES, 2009). O DNIT (2006) em seu Manual de Pavimentação recomenda o uso complementar dos métodos empírico-mecanicistas no dimensionamento para prever a ruptura por fadiga das camadas asfálticas.

O objetivo principal do dimensionamento embasado neste método é obter uma estrutura viável, em termos econômicos, com um nível satisfatório de serventia durante o período estabelecido em projeto. O pavimento é considerado como um sistema de múltiplas camadas e são obtidas respostas (tensões e deformações) em função das cargas aplicadas, por meio destas respostas é possível estimar o desempenho do pavimento por meio de funções de transferência (MATTOS, 2014).

Os principais parâmetros avaliados na análise empírico-mecanicista, representados na Figura 2, são:

- i) deformação de tração ( $\epsilon_t$ ) na fibra inferior da camada asfáltica, para controle do trincamento por fadiga;
- ii) estado de tensão no topo da camada de base, importante nas estruturas que possuem revestimentos delgados para se controlar a ruptura por cisalhamento;
- iii) tensão ( $\sigma_v$ ) ou deformação vertical ( $\epsilon_v$ ) no topo do solo de fundação (subleito) para controle da deformação permanente (FONTES, 2009).

Figura 2 – Parâmetros avaliados na análise empírico-mecanicista.



Subleito

Fonte: Adaptado de FONTES, 2009.

A metodologia empírico-mecanicista traz diversos desafios em termos de investimento em ensaios laboratoriais, coletas de dados em campo e pesquisas experimentais, exigindo uma crítica análise de custo-benefício entre os custos de pesquisa e a qualidade do projeto que será gerado. (PEREIRA & PAIS, 2017).

Nos métodos empírico-mecanicistas o dimensionamento ou a verificação de um dimensionamento são realizados com o auxílio de *software*, pois permite a calibração e validação com dados de campo (HAAS et al., 2007).

Em termos de eficiência estrutural, esta metodologia permite o uso de materiais cujo desempenho de campo não é conhecido pela falta de experiência. Além disto, considera os efeitos das condições de tráfego e clima no dimensionamento, variáveis não analisadas nos métodos empíricos utilizados no Brasil (FRANCO, 2007).

## 2.4 MÉTODO DE DIMENSIONAMENTO NACIONAL DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS (MEDINA)

O Método de Dimensionamento Nacional de Pavimentos (MeDiNa) faz uso de um *software* que realiza a verificação e o dimensionamento de estruturas de pavimentos mecanístico-empírico, desenvolvido entre o Instituto de Pesquisas Rodoviárias - IPR e o Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, da Universidade Federal do Rio de Janeiro - COPPE, bem como da

colaboração do Centro de Pesquisas da Petrobrás - CENPES e de diversas Universidades do Brasil, no ano de 2015 a 2018. (IPR, 2020).

O programa MeDiNa exige um conjunto vasto, completo e preciso de informações referentes ao subleito, a todos os materiais naturais disponíveis para utilização em bases, sub-bases e reforço do subleito, provenientes de jazidas, pedreiras ou areais, em que as suas propriedades de Módulo e de Deformação permanente devem ser obtidas através de ensaios laboratoriais. Todas as informações devem ser muito bem conhecidas para que os resultados do programa sejam obtidos de forma confiável (IPR, 2020).

- **HIPÓTESES E CONSIDERAÇÕES FUNDAMENTAIS**

Segundo manual do MeDiNa, as hipóteses fundamentais do programa estão fundamentadas na solução de problemas de elasticidade linear em sistemas de multicamadas e contínuos, que são:

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

A calibração dos danos por fadiga em termos de área trincada foi realizada com base no trabalho de Fritzen (2016) e atualizada posteriormente para funcionamento no MeDiNa. Na função de transferência, a evolução da área trincada é representada por uma curva sigmoideal. Os coeficientes da Curva de Calibração

da Área Trincada e da curva de ajuste de erro encontram-se na Aba Modelagem do programa MeDiNa.

## 2.5 CORRELAÇÕES ENTRE PARÂMETROS

O *Software* MeDiNa já conta com uma base de dados com um conjunto de diferentes tipos de materiais que podem ser utilizados em cada uma das camadas do pavimento que será projetado, além de possibilitar a inserção de novos materiais. Dentro do programa, cada tipo de material apresenta um modelo próprio de cálculo das suas propriedades mecânicas, e, portanto, necessita de parâmetros específicos para o seu modelo. Entretanto alguns desses parâmetros, como o módulo de resiliência (MR), não estão presentes nos estudos de caracterização dos materiais empregados nos atuais projetos de pavimentação.

- Módulo de Resiliência e Coeficiente de Poisson

Segundo CUNTO (1998), os procedimentos laboratoriais para a determinação de parâmetros como o módulo de resiliência necessitam de equipamentos ainda dispendiosos e capacitação técnica elevada para a sua realização. Esses dois problemas, equipamentos caros e pessoal especializado, aliados ao crescente interesse da comunidade rodoviária na aplicação de relações mecânicas que incluam aspectos do comportamento resiliente dos materiais de pavimentação, justificaram pesquisas para levantar relações empíricas entre o módulo de resiliência e os resultados de ensaios de execução mais simples e expedita.

MEDINA & PREUSSLER (1980) estudaram possíveis relações entre MR e CBR para solos arenosos e argilosos encontrados em algumas rodovias brasileiras. Os autores comprovaram não haver relação explícita entre os dois parâmetros no caso dos solos arenosos.

Para solos de comportamento argiloso, foi possível uma expressão matemática (eq. 1) entre o módulo de resiliência e o CBR na tensão desvio de 2 kgf/cm<sup>2</sup> (200 kPa) e corpos de prova moldados na umidade igual ou superior à ótima.

$$M_R = 326 + 67.CBR \quad (1)$$

Onde:

MR – Módulo de resiliência (kgf/cm<sup>2</sup>)

CBR – Índice de suporte California (%) e  
 Coeficiente de correlação  $r^2 = 0,67$ .

CARDOSO (1988) propôs uma expressão para a determinação do módulo de resiliência onde estão presentes o CBR, o primeiro invariante de tensão e a tensão principal maior (eq. 2). O estudo foi desenvolvido para solos lateríticos de Brasília. Na pesquisa, o autor realizou ensaios triaxiais dinâmicos e de determinação do CBR e efetuou análises de regressão múltipla com 6 níveis de CBR (19%, 29%, 39%, 44%, 72% e 93%), totalizando uma amostragem de 149 pontos, sendo que para a expressão estabelecida encontrou-se  $r^2 = 0,92$ .

$$M_R = \frac{179,0412 \cdot (CBR)^{1,08774} \cdot (\theta)^{1,43833}}{\sigma_1^{1,18598}} \quad (2)$$

Onde:

MR – Módulo de resiliência em psi;

$\theta$  – primeiro invariante de tensão em psi e

$\sigma_1$  - Tensão principal maior em psi.

BALBO (2007) disponibiliza formulações que utilizam apenas o valor CBR do material e faixas de valores tabelados que podem ser assumidos de acordo com o tipo de material empregado em cada camada do pavimento (Tabela 1). Estas formulações estão presentes nos procedimentos e recomendações fundamentais para a verificação estrutural de pavimentos dimensionados pelos métodos recomendados pela Prefeitura Municipal de São Paulo (PMSP), assim como pelo DER – SP.

Nesse mesmo estudo, BALBO (2007) também reúne faixas de valores de coeficientes de Poisson considerados típicos de materiais que podem ser usados nas diferentes camadas do pavimento, conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 1 – Valores estimados para Módulo de Resiliência de diferentes materiais.

Camada	Material	Valores de MR sugeridos para estudos e projetos (MPa)
Subleitos	LATERÍTICO (LA' E LG')	MR = 22,0 (CBR) <sup>0,8</sup>
	NÃO LATERÍTICO (NS' E NG')	MR = 18,0 (CBR) <sup>0,64</sup>
	ARENOSO POUCO OU NÃO COESIVO (LA', NA E NA')	MR = 14,0 (CBR) <sup>0,7</sup>
Reforço	LATERÍTICO (LA' E LG')	MR = 22,0 (CBR) <sup>0,8</sup>
	NÃO LATERÍTICO (NS' E NG')	MR = 18,0(CBR <sub>REF</sub> ) <sup>0,64</sup> * $\sqrt[3]{\frac{3CBR_{SL}}{CBR_{REF}}}$
Sub-base	GRANULAR	MR = 18,0(CBR <sub>SB</sub> ) <sup>0,64</sup> * $\sqrt[3]{\frac{3CBR_{SL}}{CBR_{SB}}}$
Base	GRANULAR	100 ≤ MR ≤ 500
	BETUMINOSA	800 ≤ MR ≤ 1.000
	CIMENTADA (BGTC)	5.000 ≤ MR ≤ 15.000
Revestimentos asfálticos	CONCRETO ASFÁLTICO (C.A.)	3.000 ≤ MR ≤ 5.000
	PRÉ-MISTURADO A QUENTE (PMQ)	2.000 ≤ MR ≤ 2.500
	BINDER	1.400 ≤ MR ≤ 1.800
	PRÉ-MISTURADO A FRIO (PMF) OU MACADAME BETUMINOSO SELADO	1.000 ≤ MR ≤ 1.400

Fonte: BALBO, 2007.

Tabela 2 – Faixas de valores para coeficiente de Poisson.

Material	Faixa de variação
Concretos asfálticos	0,32 - 0,38
Concreto de cimento Portland	0,15 – 0,20
Brita Graduada Simples (BGS), Macadame Hidráulico (MH), Bica Corrida (BC)	0,35 – 0,40
Concreto Compactado em Rolo (CCR), Brita Graduada Tratada com Cimento (BGTC)	0,15 - 0,20
Solo-Cimento (SC), Solo Melhorado com Cimento (SMC)	0,20 – 0,30
Solo-Cal (SCA)	0,25 – 0,30
Solos arenosos	0,30 – 0,35
Areias compactadas	0,35 - 0,40
Solos finos	0,40 – 0,45

Fonte: Adaptado de BALBO (2007).

É importante notar que a utilização da Tabela 1 para estimar o módulo de resiliência do subleito, base e sub-base, depende da classificação dos solos que serão utilizados como material de cada uma dessas camadas. Diferentemente do método do DNER que utiliza a classificação de solos TRB para a caracterização dos materiais, o método MeDiNa trabalha com a classificação MCT (por ser mais indicada para caracterizar solos tropicais, como é o caso do Brasil). Portanto, isto cria a necessidade de uma compatibilização entre as duas classificações, observando semelhanças entre os valores de parâmetros que são comuns entre as duas metodologias (granulometria, índice de plasticidade, limite de liquidez, etc.).

- Coeficientes de Regressão ( $\Psi_1$ ,  $\Psi_2$ ,  $\Psi_3$  e  $\Psi_4$ )

Para o MeDiNa, a deformação permanente total do pavimento é a soma da contribuição das deformações de cada camada de solo. A deformação nessas camadas é avaliada por uma modelagem de cálculo proposta por Guimarães (2009) a partir da avaliação de um padrão de relação entre deformação permanente, estado de tensões e repetições de aplicação da tensão desviadora. Dentro dessa modelagem estão presentes os coeficientes de regressão, que são requeridos pelo MeDiNa como dados de entrada para que o programa execute as análises e os dimensionamentos.

A Tabela 3 apresenta alguns valores de coeficientes de regressão que foram extraídos de solos com diferentes classificações MCT. Esses valores podem ser utilizados de forma estimada após a identificação do tipo de material e inseridos no MeDiNa para preencher o campo desses parâmetros dentro do *software*.

Além da tabela, o MeDiNa conta com um banco de dados que pode ser utilizado como consulta para estimar ou assumir os valores desses coeficientes e de outros parâmetros através de uma compatibilização entre os materiais que constarão no estudo de caso ou projeto a ser executado, com os materiais de referência disponíveis no programa.

Tabela 3 – Coeficiente de Regressão para diferentes classificações de solo.

Material	Classificação	$\Psi_1$	$\Psi_2$	$\Psi_3$	$\Psi_4$
Laterita Acre	Pedregulho	0,105	0,839	-0,014	0,041
Brita Graduada Chapecó	Pedregulho	0,079	-0,598	1,243	0,081
Cascalho Corumbaíba	Pedregulho	0,180	-0,212	0,840	0,443
Laterita de Porto Velho	Pedregulho	0,180	0,470	0,336	0,047
Argila de Ribeirão Preto	LG'	0,206	-0,24	1,34	0,038
Areia Argilosa do ES	LG'	0,643	0,093	1,579	0,055
Solo Papucaia	NS'/NA'	0,244	0,419	1,309	0,069
Areia Fina de Campo Azul/MG	NA	0,050	-1,579	1,875	0,064
Tabatinga Acre	NG'	Não recomendado			

Fonte: Adaptado de GUIMARÃES, 2009.

## 2.6 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

Segundo AGUIAR et al. (2010), análise de sensibilidade é uma avaliação que procura estimar o resultado gerado por mudanças nos parâmetros ou nas atividades de um procedimento, desse modo, medindo o grau de sensibilidade do processo perante uma alteração. Ou seja, são testadas diversas variáveis diferentes, separadamente, para se entender o efeito que cada uma produz no final do processo.

Para CLARKE (2001), a análise de sensibilidade também é usada para avaliar o grau de confiança dos resultados em situações de decisões incertas, ou suposições sobre os dados e resultados usados.

### 2.6.1 Utilização da análise de sensibilidade em estudos sobre desempenho dos pavimentos flexíveis

Para verificar a influência da pressão de inflação dos pneus e da carga dos veículos comerciais na degradação dos pavimentos asfálticos, BUENO et al. (2017) realizaram uma análise de sensibilidade através de conjuntos criados com a variação das espessuras das camadas e módulos de resiliência, combinados a três diferentes

valores de pressão de inflação de pneus e seis carregamentos distintos de Eixo Simples de Rodas Duplas (ESRD), totalizando 7.776 simulações.

Através do estudo, foi constatado que o aumento do módulo de resiliência ou da espessura de qualquer uma das camadas, também gera um aumento nas tensões admissíveis para fadiga e afundamento de trilha de roda. Percebeu-se que espessura e módulo de resiliência máximos do concreto asfáltico tornam a estrutura menos sensível à variação da pressão de inflação dos pneus, e mais da carga aplicada pelo eixo no pavimento. Além disso, observou-se que em espessuras delgadas de revestimento asfáltico, o aumento da pressão de inflação dos pneus causa um impacto na redução da tensão admissível de fadiga maior do que o carregamento de eixo.

No âmbito internacional, Schwartz et al. (2013) focou na análise global de sensibilidade de pavimentos flexíveis para dados de projeto do MEPDG (*Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide*) sob cinco condições climáticas e três níveis de tráfego. Os resultados encontrados apontam para o fato de que um dos dados de projeto mais consistentes nas categorias de sensibilidade para todos os defeitos foi a espessura do revestimento asfáltico. As trincas por fadiga e as longitudinais também apresentaram sensibilidade com relação à espessura da base.

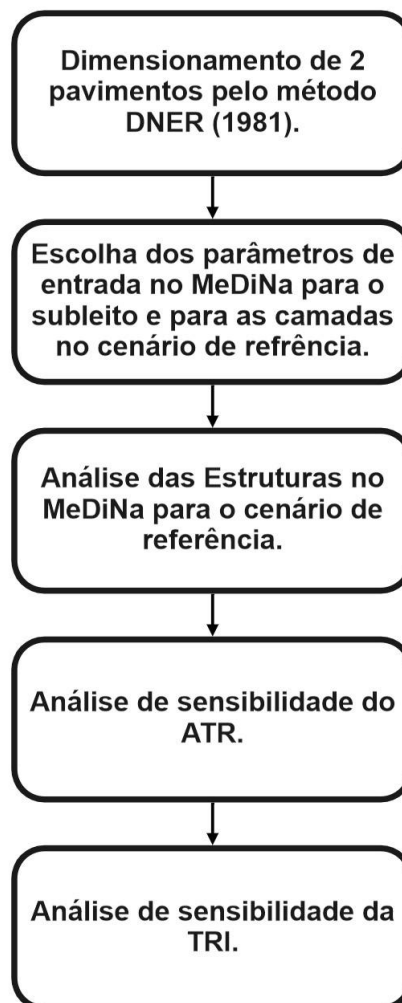
Shahji (2006) também avaliou a sensibilidade dos parâmetros de dimensionamento de pavimentos flexíveis e rígidos com base nos resultados do MEPDG. A análise foi realizada, alterando um parâmetro de cada vez, mantendo todos os outros constantes. Em sua pesquisa, o autor variou os parâmetros de projeto por ele considerados (tráfego, espessuras e módulos de elasticidade). A partir disso, ele verificou que houve uma maior influência da variação das espessuras do revestimento para a ocorrência dos defeitos. Foi observado também que as trincas por fadiga do tipo *bottom-up* são mais influenciadas pelos parâmetros de tráfego (VDMA) e espessura do revestimento asfáltico e têm pouco efeito pelos outros parâmetros de projeto, como espessura da sub-base e módulo de elasticidade do subleito. A deformação permanente nas trilhas de rodas na camada de revestimento é mais influenciada pelo volume de tráfego e pela espessura do mesmo.

E, de forma surpreendente, os resultados da pesquisa de Shahji (2006) levaram à conclusão que as mudanças nas propriedades da base, sub-base e subleito não têm muito impacto na deformação do pavimento, o que o autor salienta como “não muito realista”. Com relação à deformação permanente total do pavimento, foi percebido que a maior influência era devido ao tráfego e à espessura da camada asfáltica.

### 3 MÉTODO

Esse capítulo trata do método e dos procedimentos utilizados para alcançar a realização de uma análise de sensibilidade da porcentagem de Área Trincada (TRI) e do Afundamento de Trilha de Roda (ATR) dos pavimentos asfálticos a partir da variação individual dos valores de parâmetros físicos e mecânicos das camadas e do subleito. Na Figura 3 são apresentados os pavimentos flexíveis do estudo de caso, os procedimentos de cálculo e obtenção de parâmetros utilizados nas análises de sensibilidade.

Figura 3 – Fluxograma representando as etapas do método.



Fonte: Elaborado pelos autores.

### 3.1 DIMENSIONAMENTO DE DOIS PAVIMENTOS PELO MÉTODO DNER (1981)

Para o estudo de caso, serão previamente dimensionadas duas estruturas de pavimento pelo método DNER (Estrutura 1 e Estrutura 2). A Estrutura 1 foi dimensionada para suportar um volume de tráfego leve ( $N = 5.10^6$ ), enquanto que a Estrutura 2 foi dimensionada para comportar um volume de tráfego pesado ( $N = 2.10^7$ ), em que ambas serão construídas sobre um subleito com CBR = 10%, para representar o subleito da obra da duplicação da BR-316.

Optou-se pela utilização dos dados da BR-316 visto que os mesmos se encontram disponíveis e são provenientes dos ensaios mais usuais do atual cenário de projetos de pavimentação, além de terem recebido o devido tratamento estatístico requerido pelo DNIT.

### 3.2 SELEÇÃO DOS VALORES DE REFERÊNCIA PARA OS PARÂMETROS DE ENTRADA DO MEDINA

Por meio dos dados provenientes do projeto de duplicação da BR-316, disponíveis no anexo A do trabalho de Barbosa e Silva (2021), foi possível utilizar para a camada de base, sub-base e subleito, os valores de alguns parâmetros de entrada exigidos pelo MeDiNa como Massa Específica e Umidade Ótima, assim apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Dados do projeto da BR-316.

Parâmetros	Camada de base	Camada de sub-base	Subleito
	(JAZIDA 04-A - ÁREA 02)	(JAZIDA 04-B - ÁREA 03)	(SUBLEITO T.B.R. A-6 (ANEXO I))
Massa específica ( $g/cm^3$ )	2,085	1,976	1,79
Umidade ótima (%)	7,8	8,2	12,7

Fonte: Elaborado pelos autores.

O *software* MeDiNa exige parâmetros específicos sobre as propriedades físicas e mecânicas dos materiais que serão inseridos no programa para compor as camadas da estrutura do pavimento. Alguns desses parâmetros não estão presentes nas informações conhecidas sobre os materiais selecionados para os projetos deste estudo. Portanto, foram utilizadas correlações e fórmulas encontradas na revisão

bibliográfica para assumir os valores dos parâmetros necessários para inserir os materiais de cada camada no programa.

A partir dos dados coletados sobre os materiais do projeto, puderam ser estimados os seguintes parâmetros para o subleito, sub-base e base: Módulo de Resiliência, Coeficiente de Poisson, Coeficiente  $c'$  e Índice  $e'$ , e os Coeficientes de Regressão para a deformação permanente dos materiais.

Para tornar isso possível, primeiramente efetuou-se uma compatibilização entre a classificação TRB (utilizada no estudo geotécnico das jazidas do projeto) e a classificação MCT (utilizada no MeDiNa). Isto permitiu a utilização das formulações e tabelas de consulta, visto que dependem da classificação do material e de sua finalidade, para que possam ser usadas. Assim, foram encontrados os valores assumidos em cada parâmetro inserido no *software*.

Nas tabelas 5, 6 e 7 encontra-se o resumo dos valores dos parâmetros necessários para inserir os materiais utilizados nas camadas de base, sub-base e subleito, das estruturas que serão analisadas pelo MeDiNa.

Tabela 5 – Parâmetros de inserção do material da camada de base.

<b>Classificação MCT</b>	NA	BICA, B.; LEON, H.; THOMAS, M.; BUDNY, J. (2020)			
<b>Coeficiente de Poisson</b>	0,35	BALBO (2007)			
<b>Módulo de Resiliência (MPa)</b>	300	BALBO (2007)			
<b>MCT - Coeficiente <math>c'</math></b>	0,25	VERTAMATTI(1988)			
<b>MCT - Índice <math>e'</math></b>	1,67	VERTAMATTI(1988)			
<b>Massa específica (g/cm<sup>3</sup>)</b>	2,085	JAZIDA 04-A - ÁREA 02			
<b>Umidade ótima (%)</b>	7,8	JAZIDA 04-A - ÁREA 02			
<b>Deformação Permanente</b>	$\Psi_1$	$\Psi_2$	$\Psi_3$	$\Psi_4$	GUIMARÃES (2009)
	0,05	-1,579	1,875	0,064	

Fonte: Elaborado pelos autores

Tabela 6 – Parâmetros de inserção do material da camada de sub-base.

<b>CLASSIFICAÇÃO MCT</b>	<b>NA</b>	<b>BICA, B.; LEON, H.; THOMAS, M.; BUDNY, J. (2020)</b>
<b>Coeficiente de Poisson</b>	0,35	BALBO (2007)
<b>Módulo de resiliência (MPa)</b>	166	BALBO (2007)
<b>MCT - Coeficiente c'</b>	0,25	VERTAMATTI(1988)
<b>MCT - Índice e'</b>	1,67	VERTAMATTI(1988)
<b>Massa específica (g/cm³)</b>	1,976	JAZIDA 04-A - ÁREA 02
<b>Umidade ótima (%)</b>	8,2	JAZIDA 04-A - ÁREA 02
<b>Deformação permanente</b>	$\Psi_1$	GUIMARÃES (2009)
	0,27	
	$\Psi_2$	
	-0,14	
	$\Psi_3$	
	1,33	
	$\Psi_4$	
	0,06	

Fonte: Elaborado pelos autores

Tabela 7 – Parâmetros de inserção do material do subleito.

<b>Classificação MCT</b>	<b>NG'</b>	<b>BICA, B.; LEON, H.; THOMAS, M.; BUDNY, J. (2020)</b>
<b>Coeficiente de Poisson</b>	0,45	BALBO (2007)
<b>Módulo de resiliência (MPa)</b>	139	BALBO (2007)
<b>MCT - Coeficiente c'</b>	1,7	VERTAMATTI(1988)
<b>MCT - Índice e'</b>	0,9	VERTAMATTI(1988)
<b>Massa específica (g/cm³)</b>	1,79	SUBLEITO T.B.R. A-6 (ANEXO I)
<b>Umidade ótima (%)</b>	12,7	SUBLEITO T.B.R. A-6 (ANEXO I)
<b>Deformação permanente</b>	$\Psi_1$	GUIMARÃES (2009)
	0,643	
	$\Psi_2$	
	0,093	
	$\Psi_3$	
	1,579	
	$\Psi_4$	
	0,055	

Fonte: Elaborado pelos autores

A camada de revestimento requer uma quantidade maior de parâmetros, cuja maior parte deles não foi possível ser estimada através de correlações, dados da BR-316, ou outros artifícios. Portanto, para as estruturas de pavimento deste estudo, optou-se por utilizar o material do banco de dados do MeDiNa, intitulado “RJ CAP 50/70 #12,5mm Sepetiba”, conforme é mostrado na Tabela 8.

Tabela 8 – Parâmetros de inserção do material da camada de revestimento.

<b>Camada de revestimento</b>		<b>Referência</b>
<b>Coeficiente de Poisson</b>	0,30	Banco de dados MeDiNa
<b>Módulo de Resiliência (MPa)</b>	8289	Banco de dados MeDiNa
<b>Massa Específica (g/cm<sup>3</sup>)</b>	2,4	Banco de dados MeDiNa
<b>Resistência à tração (MPa)</b>	1,91	Banco de dados MeDiNa
<b>Teor de asfalto (%)</b>	6,0	Banco de dados MeDiNa
<b>Volume de vazios (%)</b>	5,0	Banco de dados MeDiNa
<b>Abrasão Los Angeles (%)</b>	40,0	Banco de dados MeDiNa
<b>Fadiga – Coef. de regressão (K1)</b>	3e-13	Banco de dados MeDiNa
<b>Fadiga – Coef. de regressão (k2)</b>	-3,78	Banco de dados MeDiNa
<b>Classe de fadiga</b>	1	Banco de dados MeDiNa
<b>FFM - Fator de Fadiga da Mistura (100<math>\mu</math> A 250<math>\mu</math>)</b>	0,73	Banco de dados MeDiNa

Fonte: Elaborado pelos autores

Após todas as definições, as tabelas acima constam os valores dos parâmetros de entrada do Medina que constituem o cenário de referência para cada estrutura.

### 3.3 ANÁLISE DAS ESTRUTURAS NO MEDINA PARA O CENÁRIO DE REFERÊNCIA

A Estrutura 1 (tráfego leve) e a Estrutura 2 (tráfego pesado), são analisadas pelo MeDiNa para se calcular os valores de afundamento de trilha de roda (ATR) e área trincada (TRI) de acordo com o cenário de referência.

O MeDiNa além de analisar a estrutura proposta, também pode dimensioná-la. O *software* calcula a espessura necessária para a camada selecionada suportar o tráfego imposto, de acordo com os materiais e espessuras das outras camadas que foram pré-dimensionadas até que sejam atendidos os critérios de parada do dimensionamento, listados na Tabela 9. Para este trabalho, será assumido como referência para valores limites de área trincada e afundamento de trilha de roda, o tipo de via Sistema arterial Principal.

Tabela 9 – Critérios de parada de dimensionamento do MeDiNa.

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

Fonte: DNIT, 2020.

### 3.4 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DO ATR

Para a análise de sensibilidade do afundamento de trilha de roda, os parâmetros como Módulo de Resiliência (MR), Coeficiente de Poisson, Massa Específica (M.E.), Umidade Ótima, Resistência à Tração (RT), Teor de Asfalto (TA), Volume de Vazios (Vv), Abrasão Los Angeles (ALA), espessura da camada e Coeficientes de Regressão da deformação permanente ( $\Psi_i$ ,  $K_i$ ), serão variados em  $\pm 25\%$  sob seus respectivos valores de referência, para assim aferir o percentual de variação do ATR em relação ao cenário de referência para cada estrutura.

Nas Tabelas 10 e 11 estão apresentados os valores alcançados após a variação de  $\pm 25\%$  sob os valores de referência dos parâmetros físicos e mecânicos dos materiais que compõem o subleito, sub-base, base e revestimento da Estrutura 1 e da Estrutura 2, respectivamente.

O coeficiente de regressão  $K_2$ , específico da camada de revestimento, não pôde ser alterado, ele permaneceu fixo, pois o mesmo altera a classe de fadiga do pavimento, que é um parâmetro que o MeDiNa não permite que o usuário faça nenhuma alteração.

Não foi possível analisar alguns parâmetros no MeDiNa depois da variação de  $\pm 25\%$ . O *software* não aceitou alguns valores gerados pela variação dos valores de referência, como no Coeficiente de Poisson, que o limite máximo para este dado de entrada é até 0,49. Da mesma forma ocorreu com a espessura da base e sub-base, cujos limites mínimos de espessura para essas camadas são de 15 cm, e na camada de revestimento é de 5 cm. Portanto, para seguir com a análise optou-se por usar, nesses casos, os valores limites que o *software* aceita conforme estão assinalados entre parênteses nas Tabela 10 e 11.

Tabela 10 – Variação dos parâmetros na Estrutura 1.

<b>Subleito</b>									
Variação (%)	Parâmetro								Esp. (mm)
	MR (MPa)	Poisson	M.E. (g/cm <sup>3</sup> )	Um. Ótima (%)	ψ1	ψ2	ψ3	ψ4	
- 25%	104	0,34	1,343	9,5	0,482	0,070	1,184	0,041	-
referência	139	0,45	1,790	12,7	0,643	0,093	1,579	0,055	-
+ 25%	174	0,56 (0,49)	2,238	15,9	0,804	0,116	1,974	0,069	-
<b>Sub-base</b>									
Variação (%)	Parâmetro								Esp. (cm)
	MR (MPa)	Poisson	M.E. (g/cm <sup>3</sup> )	Um. Ótima (%)	ψ1	ψ2	ψ3	ψ4	
- 25%	124,5	0,26	1,482	6,2	0,20	-0,18	1,00	0,05	15,0
referência	166	0,35	1,976	8,2	0,27	-0,14	1,33	0,06	20,0
+ 25%	207,5	0,44	2,470	10,3	0,34	-0,11	1,66	0,08	25,0
<b>Base</b>									
Variação (%)	Parâmetro								Esp. (cm)
	MR (MPa)	Poisson	M.E. (g/cm <sup>3</sup> )	Um. Ótima (%)	ψ1	ψ2	ψ3	ψ4	
- 25%	375	0,26	1,564	5,9	0,04	-1,974	1,406	0,048	11,3 (15,0)
referência	300	0,35	2,085	7,8	0,05	-1,579	1,875	0,064	15,0
+ 25%	225	0,44	2,606	9,8	0,06	-1,184	2,344	0,080	18,8
<b>Revestimento</b>									
Variação (%)	Parâmetro								Esp. (cm)
	MR (MPa)	Poisson	M.E. (g/cm <sup>3</sup> )	RT (MPa)	TA (%)	Vv (%)	ALA (%)	K1	
- 25%	6217	0,23	1,8	1,43	4,5	3,8	30,0	2,25e-13	3,8 (5,0)
referência	8289	0,30	2,4	1,91	6,0	5,0	40,0	3,0e-13	5,0
+ 25%	10361	0,38	3,0	2,39	7,5	6,3	50,0	3,75e-13	6,3

Fonte: Elaborado pelos autores

Tabela 11 – Variação dos parâmetros na Estrutura 2.

<b>Subleito</b>									
Variação (%)	Parâmetro								Esp. (cm)
	MR (MPa)	Poisson	M.E. (g/cm <sup>3</sup> )	Um. Ótima (%)	Ψ1	Ψ2	Ψ3	Ψ4	
- 25%	104	0,34	1,343	9,5	0,482	0,070	1,184	0,041	-
referência	139	0,45	1,790	12,7	0,643	0,093	1,579	0,055	-
+ 25%	174	0,56 (0,49)	2,238	15,9	0,804	0,116	1,974	0,069	-
<b>Sub-base</b>									
Variação (%)	Parâmetro								Esp. (cm)
	MR (MPa)	Poisson	M.E. (g/cm <sup>3</sup> )	Um. Ótima (%)	Ψ1	Ψ2	Ψ3	Ψ4	
- 25%	124,5	0,26	1,482	6,2	0,20	-0,18	1,00	0,05	11,3 (15,0)
referência	166	0,35	1,976	8,2	0,27	-0,14	1,33	0,06	15,0
+ 25%	207,5	0,44	2,470	10,3	0,34	-0,11	1,66	0,08	18,8
<b>Base</b>									
Variação (%)	Parâmetro								Esp. (cm)
	MR (MPa)	Poisson	M.E. (g/cm <sup>3</sup> )	Um. Ótima (%)	Ψ1	Ψ2	Ψ3	Ψ4	
- 25%	375	0,26	1,564	5,9	0,04	-1,974	1,406	0,048	11,3 (15,0)
referência	300	0,35	2,085	7,8	0,05	-1,579	1,875	0,064	15,0
+ 25%	225	0,44	2,606	9,8	0,06	-1,184	2,344	0,080	18,8
<b>Revestimento</b>									
Variação (%)	Parâmetro								Esp. (cm)
	MR (MPa)	Poisson	M.E. (g/cm <sup>3</sup> )	RT (MPa)	TA (%)	Vv (%)	ALA (%)	K1	
- 25%	6217	0,23	1,8	1,43	4,5	3,8	30,0	2,25e-13	7,5
referência	8289	0,30	2,4	1,91	6,0	5,0	40,0	3,0e-13	10,0
+ 25%	10361	0,38	3,0	2,39	7,5	6,3	50,0	3,75e-13	12,5

Fonte: Elaborado pelos autores

A variação individual dos parâmetros Volume de vazios ( $V_v$ ), Abrasão Los Angeles (ALA), Umidade Ótima, Resistência à Tração (RT), Teor de Asfalto (TA) e coeficiente de regressão K1 não surtiu nenhum efeito no resultado de afundamento de trilha de roda, portanto esses parâmetros não constarão nos gráficos de ATR.

No subleito e nas camadas de sub-base e base, os parâmetros Coeficiente  $c'$  e Índice  $e'$  não estão presentes nas tabelas pelo fato de terem apenas caráter informativo. Eles servem apenas para indicar a classificação MCT do material e, por essa razão, não foi necessária a variação desses parâmetros.

### 3.5 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DA ÁREA TRINCADA

Para efetuar a análise de sensibilidade da área trincada nas Estruturas 1 e 2, serão variados individualmente em  $\pm 25\%$  todos os respectivos valores de referência dos parâmetros: Módulo de Resiliência (MR), Coeficiente de Poisson, Massa Específica (M.E.), Umidade Ótima, Resistência à Tração (RT), Teor de Asfalto (TA), Volume de Vazios ( $V_v$ ), Abrasão Los Angeles (ALA), espessura da camada e Coeficientes de Regressão da deformação permanente ( $\Psi_i$ ,  $K_i$ ), para assim aferir o percentual de variação de área trincada em relação ao cenário de referência de cada estrutura. Os valores gerados pela variação de  $\pm 25\%$ , assim como os valores de referência de cada parâmetro das camadas das Estruturas 1 e 2, estão indicados nas Tabelas 10 e 11 no item 3.4.

A variação de alguns desses parâmetros não gerou alteração na porcentagem de área trincada em nenhuma das estruturas analisadas, são eles: Volume de Vazios ( $V_v$ ), Abrasão Los Angeles (ALA), Massa Específica (M.E.), Umidade Ótima, Resistência à Tração (RT), Teor de Asfalto (TA.) e os Coeficientes de Regressão da deformação permanente ( $\Psi_i$ ).

Consequentemente, esses parâmetros que não manifestaram influência na TRI dos pavimentos do presente estudo de caso, não constarão nos respectivos gráficos gerados para esta análise.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos com base nos procedimentos descritos no capítulo 3, de maneira que estão elencados da seguinte forma: dimensionamento das estruturas por meio do método DNER (1981), análise MeDiNa das estruturas dimensionadas e por fim uma análise de sensibilidade do desempenho do após a variação individual dos parâmetros.

### 4.1 DIMENSIONAMENTO PELO MÉTODO DO DNER

A seguir são apresentados os resultados obtidos por meio dos dados disponíveis no projeto executivo para o dimensionamento da Estrutura 1 e Estrutura 2, do estudo de caso, através do método do DNER (1981).

#### 4.1.1 Dimensionamento da Estrutura 1

▪ Definição do índice de suporte do subleito: o índice foi determinado com o valor do CBR do subleito e do índice de grupo, indicados nos estudos geotécnicos. Portanto, temos:

$$\text{CBR} = 10\%, \text{ logo } \text{IS}_{\text{CBR}} = 10$$

$$\text{IG} = 0, \text{ logo } \text{IS}_{\text{IG}} = 20$$

Tabela 12 – Determinação do índice de suporte para o índice de grupo.

Índice de Grupo (IG)	Índice de Suporte (IS <sub>IG</sub> )
0	20
1	18
2	15
3	13
4	12
5	10
6	9
7	8
8	7
9 a 10	6
11 a 12	5
13 a 14	4

Fonte: Adaptado de SOUZA, (1981, p. 7).

$$IS_{subleito} = \frac{ISC_{BR} + ISIG}{2}$$

$$IS_{subleito} = \frac{10 + 20}{2}$$

$$IS_{subleito} = 15$$

Logo,  $IS_{Subleito} = 10$  (quando  $IS_{Subleito}$  é maior que o CBR, adota-se o valor do CBR).

- Definição do tipo e espessura da camada de revestimento: com base nas características definidas para o projeto, tem-se:

$$N = 5,0 \times 10^6$$

Conforme a Figura 4, a Estrutura 1 vai necessitar de um revestimento de concreto betuminoso com 5,0 cm de espessura.

Figura 4 – Determinação do tipo e espessura da camada de revestimento.

<b>N</b>	<b>Espessura Mínima de Revestimento Betuminoso</b>
<b><math>N \leq 10^6</math></b>	Tratamentos superficiais betuminosos
<b><math>10^6 &lt; N \leq 5 \times 10^6</math></b>	Revestimentos betuminosos com 5,0 cm de espessura
<b><math>5 \times 10^6 &lt; N \leq 10^7</math></b>	Concreto betuminoso com 7,5 cm de espessura
<b><math>10^7 &lt; N \leq 5 \times 10^7</math></b>	Concreto betuminoso com 10,0 cm de espessura
<b><math>N &gt; 5 \times 10^7</math></b>	Concreto betuminoso com 12,5 cm de espessura

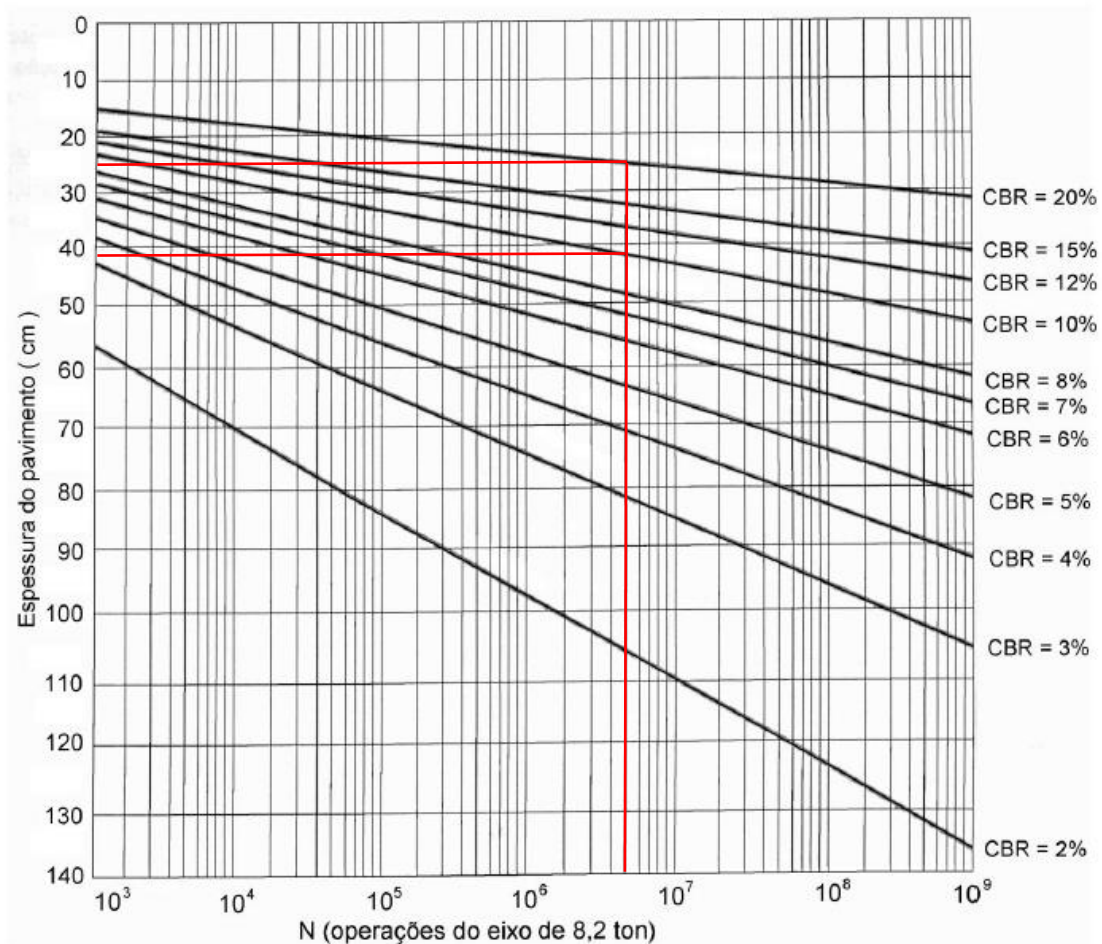
Fonte: SOUZA (1981, p. 16).

Após isso, o procedimento segue com a utilização do ábaco para determinação das espessuras. O gráfico (Figura 5) determina a espessura total do pavimento em função do número N e do CBR. Marcando-se o valor de N no eixo das abscissas, segue-se uma linha vertical até encontrar a reta do CBR correspondente, em seguida é feita uma linha horizontal até encontrar a espessura do pavimento sobre a camada no eixo das ordenadas.

- Determinação das espessuras utilizando o ábaco:

A seguir as espessuras totais das camadas da estrutura serão obtidas a partir do ábaco da Figura 5, do número N e dos valores de CBR das camadas.

Figura 5 – Utilização do ábaco para determinação das espessuras.



Fonte: Elaborado pelos autores.

$N = 5,0 \times 10^6$  e  $CBR_{SL} = 10 \rightarrow$  Ábaco:  $H_{10} = 42$  cm

$N = 5,0 \times 10^6$  e  $CBR_{SB} = 20 \rightarrow$  Ábaco:  $H_{20} = 25$  cm

- Determinação do coeficiente de equivalência estrutural das camadas, temos:

Em seguida, os coeficientes de equivalência estrutural  $K_R$  e  $K_B$ , respectivamente das camadas revestimento e base, serão admitidos de acordo com a Tabela 13. O coeficiente estrutural  $K_s$ , referente à camada de sub-base, será calculado de acordo com a eq. 3.

Tabela 13 – Coeficiente de equivalência estrutural.

Componentes do pavimento	Coeficiente K
Base ou Revestimento de concreto betuminoso	2,00
Base ou Revestimento PM Quente, graduação Densa	1,70
Base ou Revestimento PM Frio, graduação Densa	1,40
Base ou Revestimento por penetração	1,20
Camadas Granulares	1,00
Solo-cimento de resistencia baixa	1,70
Solo-cimento de resistencia intermediária	1,40
Solo-cimento de resistencia alta	1,20

Fonte: SOUZA (1981, p. 15)

Com base na tabela acima e com o auxílio da equação disponível, os coeficientes estruturais que serão utilizados para a determinação das espessuras das camadas da Estrutura 1 foram obtidos e estão dispostos a seguir:

$$K_R = 2,00$$

$$K_B = 1,00$$

$$KS = \left( \frac{CBRSB}{3 \times I_{Ssubleito}} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (3)$$

$$KS = \left( \frac{20}{3 \times 10} \right)^{\frac{1}{3}}$$

$$KS = 0,87$$

Portando,  $K_S = 0,87$ .

- Cálculo das espessuras das camadas:

$$RK_R + BK_B \geq H_{20}$$

$$5,0 * 2 + B * 1 \geq 25$$

$$B \geq 15 \text{ cm}$$

Logo  $B = 15 \text{ cm}$  (espessura da base, mínimo para a camada).

$$RK_R + BK_B + h_{20}KS \geq H_n$$

$$5,0 * 2 + 15,0 * 1 + h_{20} * 0,87 \geq 42$$

$$h_{20} \geq 19,54 \text{ cm}$$

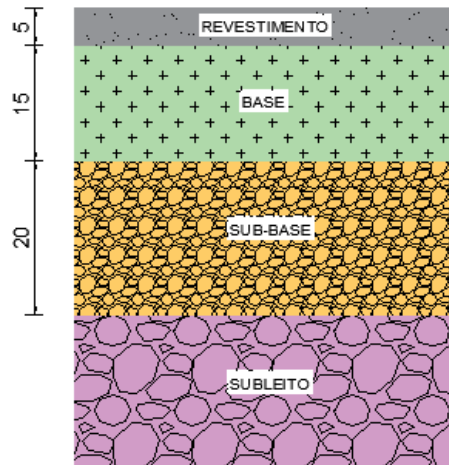
$$\text{Logo } h_{20} = 20 \text{ cm}$$

- Estrutura final:

➤ Revestimento = 5,0 cm

- Base = 15 cm
- Sub-base = 20 cm

Figura 6 – Espessuras das camadas do Estrutura 1.



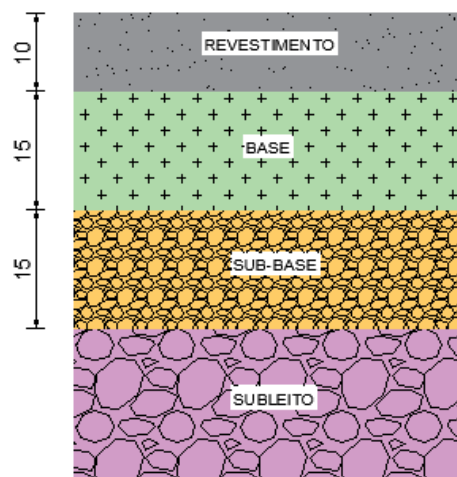
Fonte: Elaborado pelos autores.

#### 4.1.2 Dimensionamento da Estrutura 2

Para o dimensionamento das espessuras das camadas da Estrutura 2, foi realizado o mesmo procedimento de cálculo, pelo método do DNER, da Estrutura 1, em que se obteve 5 cm a mais na espessura da camada de revestimento e uma redução 5 cm na camada de sub-base, conforme mostra a Figura 7.

- Estrutura final:
  - Revestimento = 10,0 cm
  - Base = 15cm
  - Sub-base = 15cm

Figura 7 – Espessuras das camadas da Estrutura 2



Fonte: Elaborado pelos autores.

## 4.2 ANÁLISE DAS ESTRUTURAS NO MEDINA

Primeiramente se inseriu os dados de tráfego para determinar o número N, foram inseridos os valores finais de número N obtidos através do método DNER, para a Estrutura 1 e para a Estrutura 2, conforme as Figuras 8 e 9.

Figura 8 – Dados de tráfego da Estrutura 1.

+ EIXO PADRÃO RODOVIÁRIO	
- DADOS DO TRÁFEGO	
Tipo de Via:	Sistema Arterial Principal
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: *Software MeDiNa*.

Figura 9 – Dados de tráfego da Estrutura 2.

+ EIXO PADRÃO RODOVIÁRIO	
- DADOS DO TRÁFEGO	
Tipo de Via:	Sistema Arterial Principal
VMD (1º ano):	5479
FV:	1,000
N anual (1º ano):	2,00e+06
% Veículos na faixa de projeto:	100
N Anual da faixa:	2,00e+06
Taxa de crescimento (%):	0,0
Período de projeto (anos):	10
N Total:	2,00e+07

Fonte: *Software MeDiNa*.

Por conseguinte foram adicionados dos dados referentes aos materiais e espessuras das camadas constituintes da estrutura, através das correlações feitas utilizando outras literaturas como mostra a Tabela 5, 6, 7 e 8.

Foram inseridas as informações referentes às camadas na tabela da estrutura, conforme o apresentado na Figura 10, para a Estrutura 1, e na Figura 11, para a Estrutura 2.

Figura 10 – Dados da Estrutura 1.

CAMADA	DESCRIÇÃO DO MATERIAL	TIPO	ESPESSURA (cm)	MÓDULO (MPa)	COEFICIENTE DE POISSON
>> 1 <<	CONCRETO ASFÁLTICO	RJ CAP 50/70 #12,5mm Sepetiba	5,0	8289	0,30
2	SOLO FINO, SILTOSO OU ARGILOSO	Areia Siltosa - TRB A-2-4 (JAZIDA 04-A)	15,0	300	0,35
3	SOLO FINO, SILTOSO OU ARGILOSO	Areia Siltosa - TRB A-2-4 (JAZIDA 04-B)	20,0	166	0,35
SL	SUBLEITO	Solo Argiloso LG' - TRB A-6	0,0	139	0,45

Fonte: *Software* MeDiNa.

Figura 11 – Dados da Estrutura 2.

CAMADA	DESCRIÇÃO DO MATERIAL	TIPO	ESPESSURA (cm)	MÓDULO (MPa)	COEFICIENTE DE POISSON
>> 1 <<	CONCRETO ASFÁLTICO	RJ CAP 50/70 #12,5mm Sepetiba	10,0	8289	0,30
2	SOLO FINO, SILTOSO OU ARGILOSO	Areia Siltosa - TRB A-2-4 (JAZIDA 04-A)	15,0	300	0,35
3	SOLO FINO, SILTOSO OU ARGILOSO	Areia Siltosa - TRB A-2-4 (JAZIDA 04-B)	15,0	166	0,35
SL	SUBLEITO	Solo Argiloso LG' - TRB A-6	0,0	139	0,45

Fonte: *Software* MeDiNa.

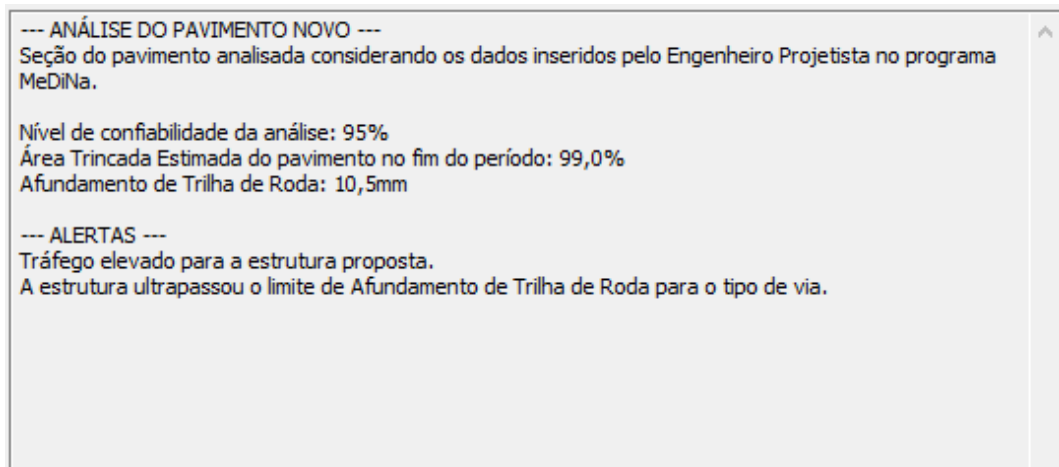
Com as devidas estruturas modeladas, as análises foram executadas no *software* e verificados os resultados para Área Trincada Estimada (TRI) e Afundamento de Trilha de Roda (ATR) dos pavimentos até o final da vida útil de projeto. Dessa forma, os resultados estão expostos na Figura 12, para a Estrutura 1, e na Figura 13 para a Estrutura 2.

Figura 12 – Resultados da análise da Estrutura 1.

<p>--- ANÁLISE DO PAVIMENTO NOVO ---  Seção do pavimento analisada considerando os dados inseridos pelo Engenheiro Projetista no programa MeDiNa.</p> <p>Nível de confiabilidade da análise: 95%  Área Trincada Estimada do pavimento no fim do período: 90,9%  Afundamento de Trilha de Roda: 17,4mm</p> <p>--- ALERTAS ---  Tráfego elevado para a estrutura proposta.  A estrutura ultrapassou o limite de Afundamento de Trilha de Roda para o tipo de via.</p>
---

Fonte: *Software* MeDiNa.

Figura 13 – Resultados da análise da Estrutura 2.



Fonte: *Software MeDiNa.*

Para as duas estruturas, o MeDiNa prevê a ruptura do pavimento antes do período de projeto, evidenciando que no fim do período a área trincada da Estrutura 1 e da Estrutura 2 é de 90,9% e 99,0% respectivamente. Em relação ao afundamento de trilha de roda a análise resultou em 17,4 mm para a Estrutura 1 e 10,5 mm para a Estrutura 2, esses também ultrapassaram o limite do critério de parada para o tipo de via que é de 10 mm.

A elevada porcentagem de área trincada e o alto valor do afundamento de trilha de roda ratifica o quanto o dimensionamento pelo método do DNER é ineficaz, isso demonstra que o método DNER falha quanto aos efeitos da fadiga e não protege o subleito contra a deformação plástica do pavimento.

O MeDiNa também gera os resultados de dados mensais no qual é possível determinar em quantos meses se atingirá o limite de área trincada e o avanço do afundamento de trilha de roda (ATR). Na aba “Resultados>>Danos Mensais”, observa-se o resultado de um detalhamento mensal no qual é possível determinar em quantos meses se atingirá o limite de área trincada e afundamento de trilha de roda para a Estrutura 1 na Figura 14, e para a Estrutura 2 na Figura 15.

Para a Estrutura 1 este limite será atingido no 51º mês e para a Estrutura 2 o limite de área trincada será no 26º mês. Isso demonstra que em poucos meses os pavimentos irão atingir sua vida útil e não em 120 meses como no projetado.

Figura 14 – Resultados dos danos mensais da Estrutura 1.

Danos Mensais			
ATR		Bacias de campo	Completo
Mês	N equiv	ÁREA TRINCADA (%)	ATR (mm)
25	4,167e+06	28,82%	9,56
26	4,333e+06	30,34%	9,58
27	4,500e+06	31,90%	9,60
28	4,667e+06	33,49%	9,63
29	4,833e+06	35,12%	9,65
30	5,000e+06	36,78%	9,66
31	5,167e+06	38,47%	9,68
32	5,333e+06	40,19%	9,70
33	5,500e+06	41,93%	9,72
34	5,667e+06	43,70%	9,74
35	5,833e+06	45,49%	9,75
36	6,000e+06	47,30%	9,77
37	6,167e+06	49,13%	9,79
38	6,333e+06	50,97%	9,80
39	6,500e+06	52,82%	9,82
40	6,667e+06	54,67%	9,83
41	6,833e+06	56,54%	9,85
42	7,000e+06	58,40%	9,86
43	7,167e+06	60,26%	9,87
44	7,333e+06	62,12%	9,89
45	7,500e+06	63,98%	9,90
46	7,667e+06	65,82%	9,91
47	7,833e+06	67,65%	9,93
48	8,000e+06	69,47%	9,94
49	8,167e+06	71,28%	9,95
50	8,333e+06	73,06%	9,96
51	8,500e+06	74,82%	9,97
52	8,667e+06	76,56%	9,99
53	8,833e+06	78,28%	10,00
54	9,000e+06	79,97%	10,01

Fonte: Software MeDiNa.

Figura 15 - Resultados dos danos mensais da Estrutura 2

Danos Mensais			
ATR			
Bacias de campo			
Completo			
Mês	N equiv	ÁREA TRINCADA (%)	ATR (mm)
25	1,042e+06	13,59%	15,89
26	1,083e+06	14,10%	15,92
27	1,125e+06	14,61%	15,96
28	1,167e+06	15,14%	15,99
29	1,208e+06	15,67%	16,03
30	1,250e+06	16,22%	16,06
31	1,292e+06	16,77%	16,09
32	1,333e+06	17,34%	16,12
33	1,375e+06	17,92%	16,15
34	1,417e+06	18,51%	16,18
35	1,458e+06	19,11%	16,21
36	1,500e+06	19,72%	16,23
37	1,542e+06	20,34%	16,26
38	1,583e+06	20,98%	16,28
39	1,625e+06	21,62%	16,31
40	1,667e+06	22,28%	16,33
41	1,708e+06	22,95%	16,36
42	1,750e+06	23,62%	16,38
43	1,792e+06	24,31%	16,40
44	1,833e+06	25,01%	16,43
45	1,875e+06	25,73%	16,45
46	1,917e+06	26,45%	16,47
47	1,958e+06	27,18%	16,49
48	2,000e+06	27,92%	16,51
49	2,042e+06	28,68%	16,53
50	2,083e+06	29,44%	16,55
51	2,125e+06	30,22%	16,57
52	2,167e+06	31,00%	16,59
53	2,208e+06	31,80%	16,61
54	2,250e+06	32,60%	16,63
55	2,292e+06	33,41%	16,64
56	2,333e+06	34,23%	16,66

Fonte: Software MeDiNa.

Baseado nos resultados que o MeDiNa apresentou, as estruturas são consideradas bem abaixo do ideal para o nível de tráfego esperado, o que resultará em manutenções em pouco tempo após a conclusão das vias.

#### 4.3 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DO ATR

Para aferir os parâmetros de entrada (MR, espessura,  $\mu$ , dentre outros) que mais influenciam no resultado do afundamento de trilha de roda, tanto na Estrutura 1, quanto na Estrutura 2, foi realizada uma análise de sensibilidade variando cada parâmetro em  $\pm 25\%$ , mantendo as demais variáveis em seus valores de referência, conforme indicado nas Tabelas 10 e 11 do Capítulo 3.

#### 4.3.1 Análise de sensibilidade do ATR na Estrutura 1

A apresentação dos gráficos que exprimem a análise de sensibilidade realizada serão mostrados por camada da estrutura (de cima para baixo) e por fim o subleito. Portanto, a ordem obedecida será: revestimento, base, sub-base e por fim o subleito. Nos gráficos, os parâmetros de entrada analisados estão representados por retas cujo nível de inclinação indica o quanto o afundamento de trilha de roda é suscetível à variação de determinado parâmetro.

Após as análises gráficas referentes ao comportamento do defeito perante a variação dos parâmetros, serão calculados os percentuais de variação do ATR e os mesmos estarão dispostos nas tabelas 14 e 15.

##### **Revestimento**

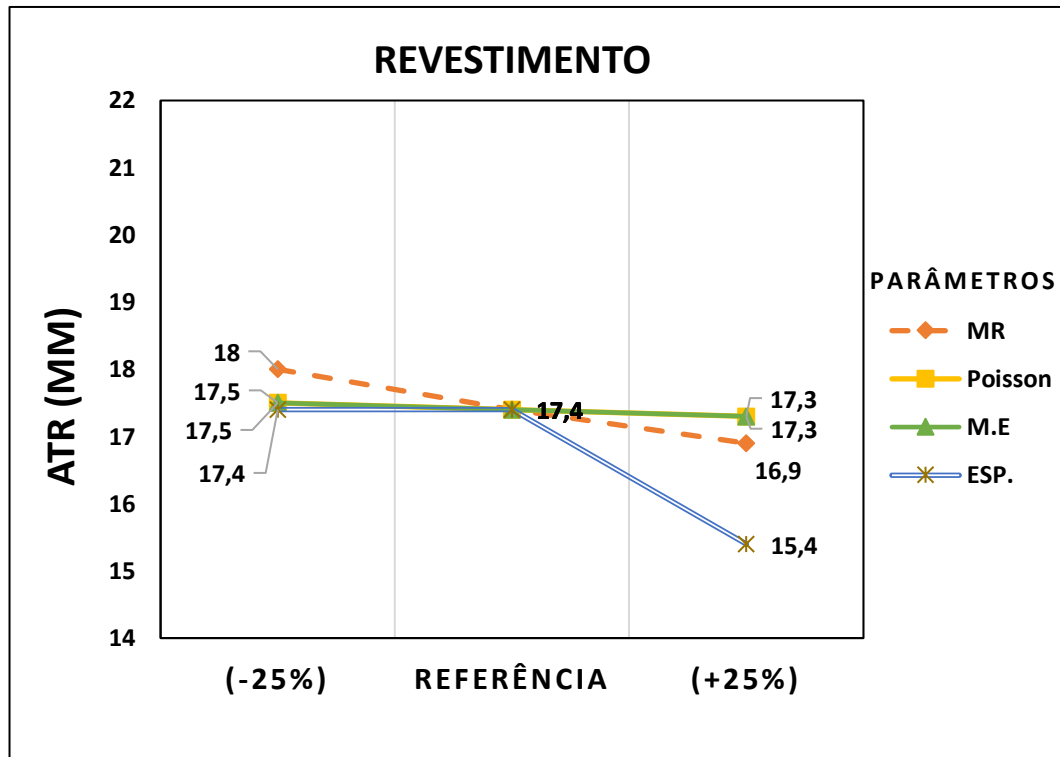
O revestimento do pavimento não proporcionou grande modificação no afundamento de trilha de roda quando foram variadas suas propriedades tais como MR, espessura, dentre outros. O ATR não apresentou relação diretamente proporcional com nenhum dos parâmetros que puderam ser variados na análise dentro dessa camada.

A espessura foi o único parâmetro que se destacou, e assim como os demais parâmetros que puderam ser analisados nessa camada, apresentou um comportamento de variação inversamente proporcional ao ATR, ou seja, quando os parâmetros foram aumentados, o valor do ATR reduziu. Esse comportamento foi similar ao observado na pesquisa de Shaji (2006), quando apontou que o afundamento de trilha de roda na camada de revestimento foi mais afetado pelas variações de espessura da mesma.

O módulo de resiliência foi o segundo parâmetro mais importante dentro do revestimento, porém com um efeito (baixa inclinação da linha) muito inferior ao observado com a variação da espessura.

O coeficiente de Poisson e a massa específica foram os parâmetros que menos causaram alteração no afundamento de trilha de roda, o que pode ser percebido pela inclinação quase nula de suas retas no gráfico, conforme é observado na Figura 16.

Figura 16 - Sensibilidade do ATR na camada de revestimento da Estrutura 1.



Fonte: Elaborado pelos autores.

### Base

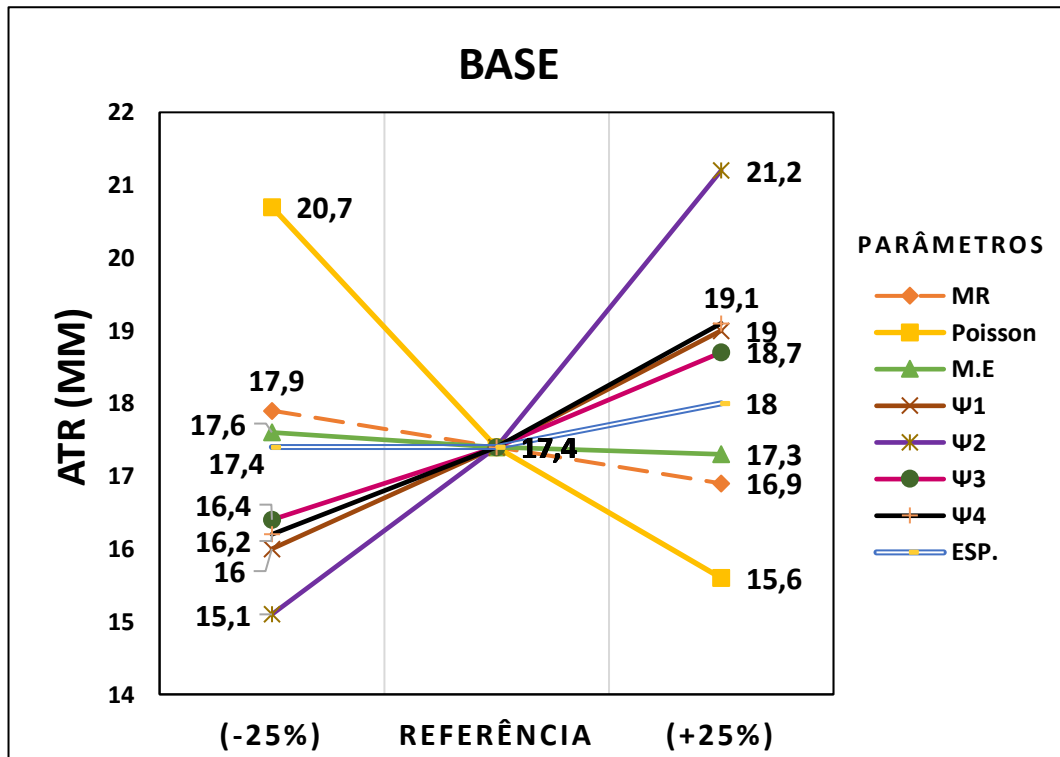
Observa-se que na base houve grande modificação no afundamento de trilha de roda quando foram variadas as suas propriedades. O coeficiente de regressão  $\Psi_2$  demonstrou ser o parâmetro que mais influenciou o ATR (inclinação de reta muito acentuada), e o seu aumento foi proporcional ao aumento do defeito analisado. O coeficiente de regressão  $\Psi_4$  foi o segundo parâmetro diretamente proporcional ao afundamento de trilha de roda que mais se destacou no gráfico pela inclinação acentuada de sua reta.

O coeficiente de Poisson foi o principal parâmetro a apresentar um comportamento inversamente proporcional ao ATR, gerando uma inclinação de reta muito acentuada e similar à do coeficiente de regressão  $\Psi_2$ .

Espessura e massa específica foram os parâmetros que menos afetaram o afundamento de trilha de roda, notado pelas retas com inclinações muito discretas nessa camada, conforme podemos observar na Figura 17.

A base demonstrou ser a camada mais importante dentro do pavimento quanto ao controle do ATR, visto a grande sensibilidade mostrada por esse defeito às variações da maioria dos parâmetros de entrada dessa camada.

Figura 17 - Sensibilidade do ATR na camada de base da Estrutura 1.



Fonte: Elaborado pelos autores.

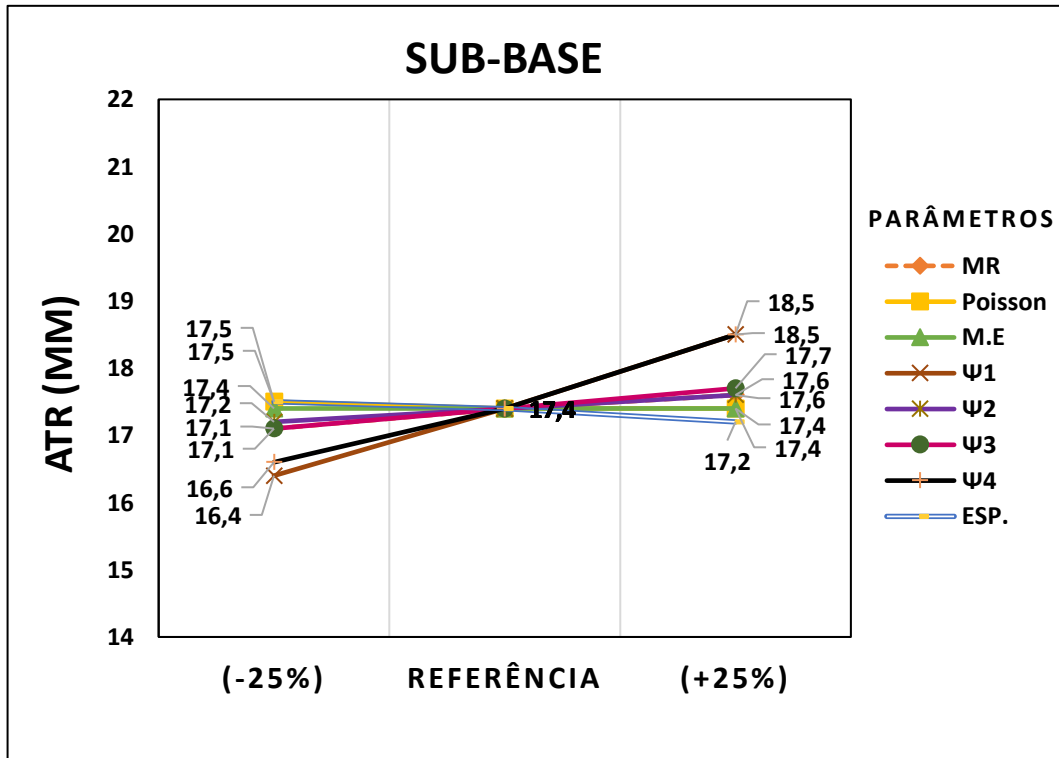
### Sub-base

A camada de sub-base foi a que menos influenciou o valor de ATR quando foram variadas suas propriedades. O coeficiente de regressão  $\Psi_1$  e coeficiente de regressão  $\Psi_4$  foram os parâmetros que mais afetaram o ATR nessa camada, tendo o coeficiente de regressão  $\Psi_1$  uma inclinação de reta ligeiramente maior, em que o aumento de ambos se mostrou diretamente proporcional ao defeito analisado.

Espessura e coeficiente de Poisson foram os parâmetros inversamente proporcionais mais relevantes dentro da camada, porém apresentando pouco efeito no ATR, o que pode ser notado observando as retas ligeiramente inclinadas.

O coeficiente de regressão  $\Psi_2$  e a massa específica foram os parâmetros que menos influenciaram o defeito analisado, conforme pode-se notar nas inclinações quase nulas presentes no gráfico da Figura 18.

Figura 18 - Sensibilidade do ATR na camada de sub-base da Estrutura 1.



Fonte: Elaborado pelos autores.

### Subleito

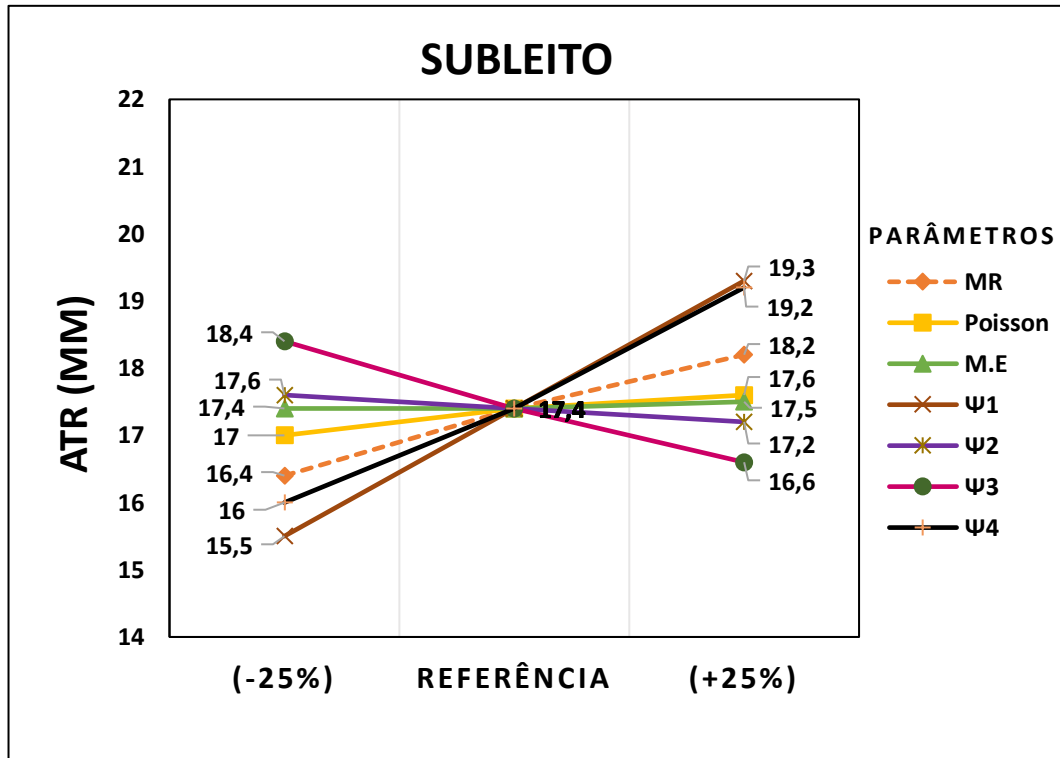
O subleito produziu notável modificação do afundamento de trilha de roda quando houve variação de suas propriedades. Mais uma vez o coeficiente de regressão  $\Psi_1$  foi o parâmetro que mais afetou o ATR, acompanhado pelo coeficiente de regressão  $\Psi_4$ , em que o defeito analisado teve seu aumento diretamente proporcional ao aumento desses parâmetros.

O coeficiente de regressão  $\Psi_3$  foi o parâmetro inversamente proporcional ao ATR que mais teve destaque, apresentando uma notável inclinação na sua reta.

Coeficiente de Poisson e massa específica foram os parâmetros que menos causaram influência no ATR de referência, como pode ser observado nas retas com inclinação quase nula presentes no gráfico da Figura 19.

O subleito foi a segunda camada em que o afundamento de trilha de roda demonstrou mais sensibilidade às variações realizadas nos parâmetros.

Figura 19 - Sensibilidade do ATR no subleito da Estrutura 1.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Após as análises gráficas os percentuais de variação do ATR de referência causados por cada parâmetro em todas as camadas foram calculados e estão dispostos na Tabela 14 e 15, onde estão apresentados os três maiores e os três menores percentuais de variação do ATR encontrados na análise de sensibilidade.

Tabela 14 – Maiores variações diretamente proporcionais de ATR na Estrutura 1

<b>Variações diretamente proporcionais</b>			
Parâmetro	Camada	Redução percentual do ATR, quando o parâmetro reduz em 25%	Aumento percentual do ATR, quando o parâmetro aumenta em 25%
ψ <sub>2</sub>	base	13,2%	21,8%
ψ <sub>1</sub>	subleito	10,9%	10,9%
ψ <sub>4</sub>	subleito	8,0%	10,3%
MR	sub-base	1,1%	1,7%
ψ <sub>2</sub>	sub-base	1,1%	1,1%
M.E.	subleito	0,0%	0,6%

Fonte: Elaborado pelos autores.

Tabela 15 - Maiores variações inversamente proporcionais de ATR na Estrutura 1.

<b>Variações inversamente proporcionais</b>			
<b>Parâmetro</b>	<b>Camada</b>	<b>Redução percentual do ATR, quando o parâmetro aumenta em 25%</b>	<b>Aumento percentual do ATR, quando o parâmetro reduz em 25%</b>
Poisson	base	10,3%	19,0%
Espessura	revestimento	11,5%	-
$\Psi_3$	subleito	4,6%	5,7%
Espessura	sub-base	1,1%	0,6%
Poisson M.E.	revestimento	0,6%	0,6%
Poisson	sub-base	0,6%	0,0%

\*Não foi possível reduzir a espessura do revestimento, pois esta já se encontrava no limite mínimo de 5,0 cm exigido pelo *software* MeDiNa.

Fonte: Elaborado pelos autores.

As tabelas acima evidenciam que o coeficiente de regressão  $\Psi_2$ , quando variado em  $\pm 25\%$  na camada de base, foi o parâmetro que resultou no maior aumento (21,8%) e também na maior redução (13,2%) de ATR na Estrutura 1 de forma diretamente proporcional. Ou seja, a variação desse parâmetro na base tende a causar grandes alterações no ATR de pavimentos com estruturas e volumes de tráfego semelhantes ao da Estrutura 1.

Outro parâmetro importante dentro da análise foi o coeficiente de Poisson, que quando reduzido em 25% (também na base) resultou em aumento inversamente proporcional de 19,0% no ATR. Porém, curiosamente também foi o parâmetro que resultou nas menores variações de ATR (0,6% de redução) na estrutura quando variado em duas camadas diferentes (sub-base e revestimento).

A massa específica foi mais outro parâmetro que gerou pouquíssima variação no ATR. Quando variado na sub-base, esse parâmetro gerou de forma inversamente proporcional uma redução e também um aumento de 0,6% no defeito analisado, e quando variado no subleito não causou nenhuma redução e gerou um aumento de 0,6%, dessa apresentando um comportamento diretamente proporcional.

#### 4.3.2 Análise de sensibilidade do ATR na Estrutura 2

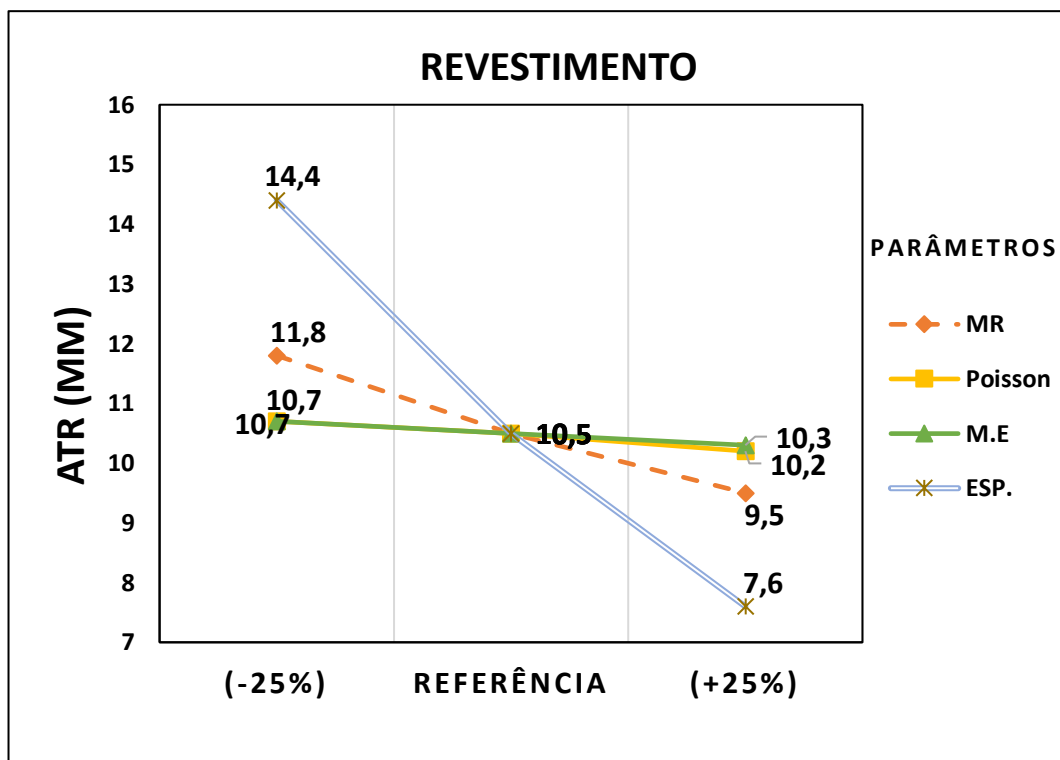
##### Revestimento

A partir da Figura 20 observa-se que no revestimento a maioria dos parâmetros

não apresentou grandes efeitos no ATR (gráfico marcado por retas com inclinação quase nula). Entretanto, a espessura apresentou uma acentuada inclinação na sua reta revelando que o ATR mostrou-se muito sensível às variações desse parâmetro dentro da camada.

A espessura, assim como os demais parâmetros que puderam ser analisados, apresentou uma relação inversamente proporcional ao ATR, ou seja, todos os parâmetros que aumentaram provocaram uma diminuição do defeito.

Figura 20 - Sensibilidade do ATR na camada de revestimento da Estrutura 2.



Fonte: Elaborado pelos autores.

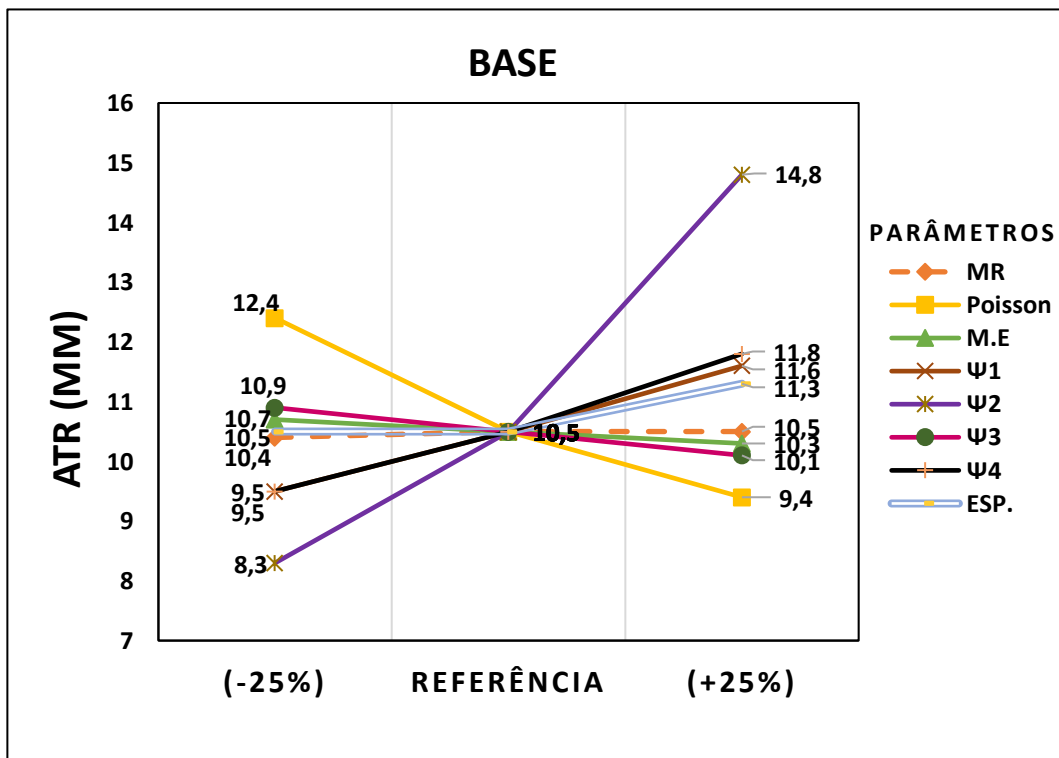
### Base

A base mais uma vez produziu grandes modificações no ATR quando foram variados os parâmetros nessa camada. O coeficiente de regressão  $\Psi_2$  foi o parâmetro que mais provocou alteração no ATR, evidenciado pela acentuada inclinação da sua reta. O parâmetro mostrou possuir uma relação diretamente proporcional ao defeito analisado, porém observa-se que o aumento e diminuição do parâmetro não alteram o ATR na mesma proporção (a inclinação da reta quando se diminui o parâmetro é menor que a inclinação da reta quando se aumenta o mesmo). Ou seja, o coeficiente de regressão  $\Psi_2$  tende a aumentar o ATR numa proporção maior do que tende a diminuí-lo quando se varia esse parâmetro na base.

O coeficiente de Poisson foi o parâmetro inversamente proporcional ao ATR que mais gerou variação nesse defeito, porém com uma inclinação de reta inferior a apresentada pelo coeficiente de regressão  $\Psi_2$ .

A massa específica, e curiosamente o módulo de resiliência, foram os parâmetros que geraram retas com inclinação quase nula, ou seja, apresentaram quase nenhuma influência no ATR após serem variados na base. Isto difere dos resultados de BUENO et al. (2017) em que a pesquisa aponta para uma perceptível redução do ATR quando o módulo de resiliência é aumentado em qualquer camada do pavimento.

Figura 21 - Sensibilidade do ATR na camada de base da Estrutura 2.



Fonte: Elaborado pelos autores.

### Sub-base

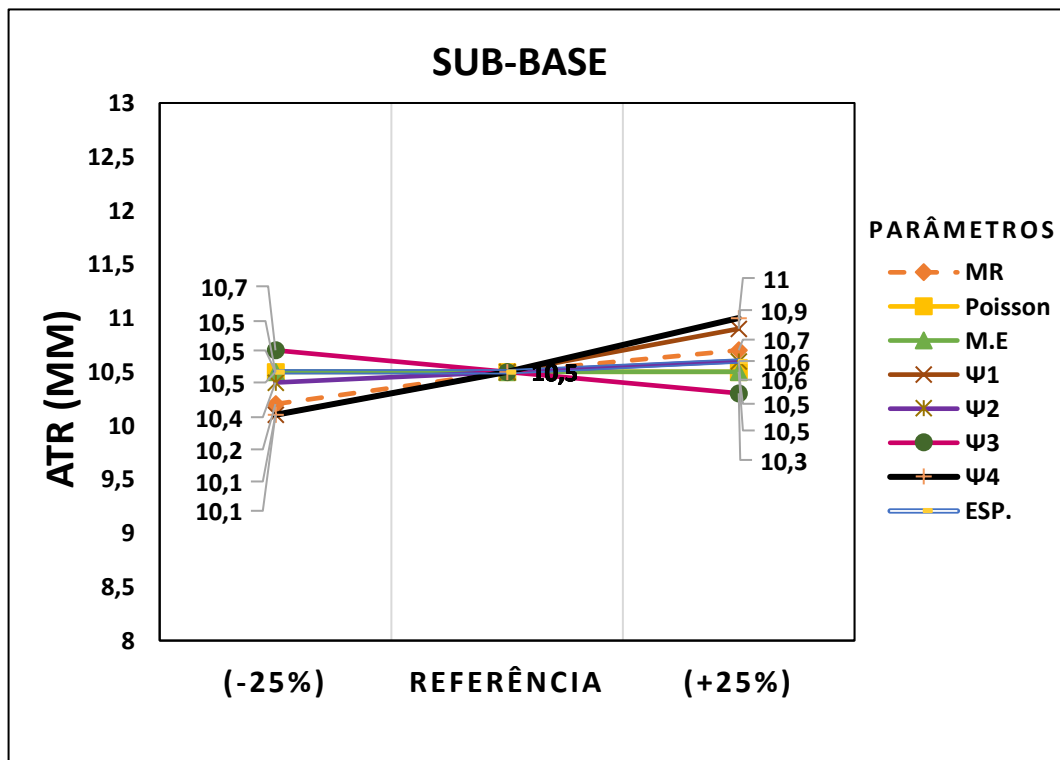
A camada sub-base, assim como na Estrutura 1, mais uma vez demonstrou ser a camada em que o ATR é menos sensível às variações dos parâmetros analisados. Diretamente proporcional ao ATR, o coeficiente de regressão  $\Psi_4$  novamente foi o parâmetro que teve maior influência no defeito (mesmo com muitas retas próximas umas das outras, a reta mais inclinada foi a desse parâmetro) acompanhado pelo coeficiente de regressão  $\Psi_1$  que também apresentou relação diretamente proporcional às variações de ATR.

O único parâmetro inversamente proporcional a registrar alteração no ATR foi o coeficiente de regressão  $\Psi_3$ .

As menores alterações causadas ao ATR foram através das variações no coeficiente de regressão  $\Psi_2$  e na espessura da camada.

A sensibilidade na sub-base foi tão inferior às demais que a escala do gráfico necessitou ter seu intervalo diminuído de 7 – 16 mm para 8 – 13 mm, e assim permitir a identificação dos parâmetros.

Figura 22 - Sensibilidade do ATR na camada de sub-base da Estrutura 2.



Fonte: Elaborado pelos autores.

### Subleito

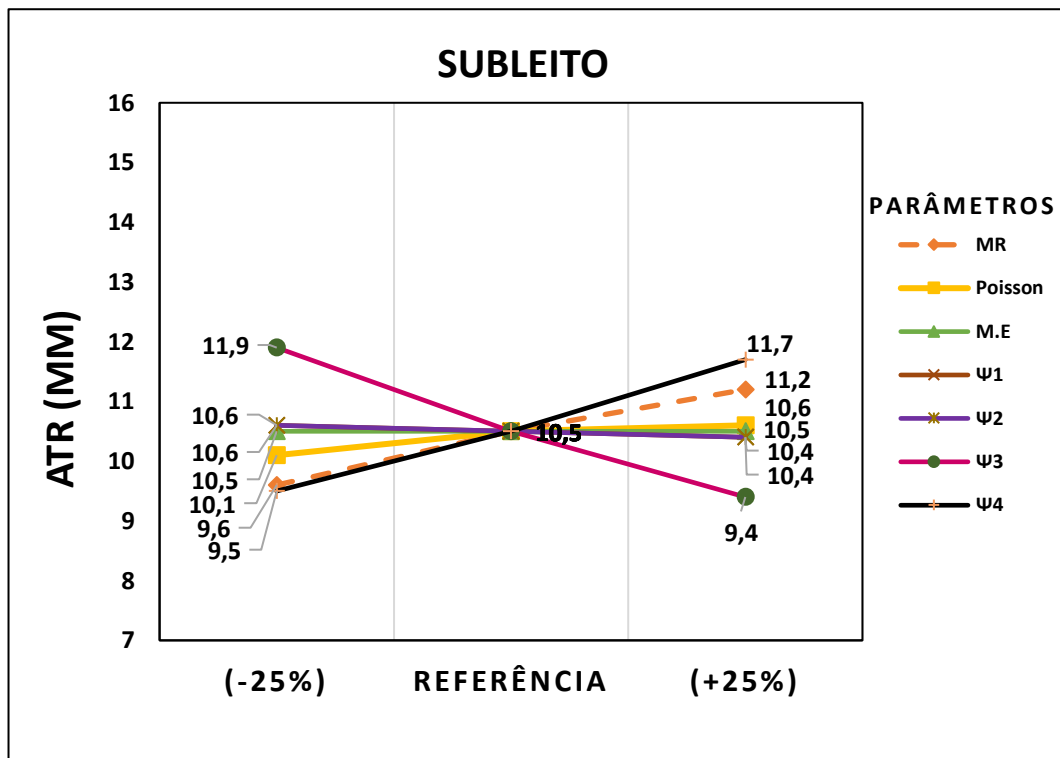
Na Estrutura 2, o subleito apresentou um comportamento similar ao observado no pavimento 1. O ATR teve como principal parâmetro diretamente proporcional o coeficiente de regressão  $\Psi_4$ , em seguida o módulo de resiliência (retas mais inclinadas entre os parâmetros que causaram variação diretamente proporcional ao ATR).

O parâmetro inversamente proporcional que mais se destacou no gráfico foi o coeficiente de regressão  $\Psi_3$ , onde também apresentou o maior nível de inclinação entre as retas, e portanto foi o parâmetro que mais gerou alteração no ATR.

Os parâmetros que apresentaram as menores alterações no defeito analisado foram o coeficiente de regressão  $\Psi_1$  e o coeficiente de regressão  $\Psi_2$  com inclinações

mínimas de reta conforme pode ser observado na Figura 23.

Figura 23 - Sensibilidade do ATR no subleito da Estrutura 2.



Fonte: Elaborado pelos autores.

A seguir serão reunidos os principais percentuais de variação do ATR gerados após as variações dos parâmetros de entrada do subleito e das camadas da Estrutura 2 conforme estão apresentadas nas Tabelas 16 e 17.

Tabela 16 - Maiores variações diretamente proporcionais de ATR na Estrutura 2.

Variações diretamente proporcionais			
Parâmetro	Camada	Redução percentual do ATR, quando o parâmetro reduz em 25%	Aumento percentual do ATR, quando o parâmetro aumenta em 25%
$\Psi_2$	base	21,0%	41,0%
$\Psi_4$	base	9,5%	12,4%
$\Psi_4$	subleito	9,5%	11,4%
Poisson	subleito	3,8%	1,0%
$\Psi_2$	sub-base	1,0%	1,0%
Poisson	sub-base	0,0%	1,0%

Fonte: Elaborado pelos autores.

Tabela 17 - Maiores variações inversamente proporcionais de ATR na Estrutura 2.

<b>Variações inversamente proporcionais</b>			
<b>Parâmetro</b>	<b>Camada</b>	<b>Redução percentual do ATR, quando o parâmetro aumenta em 25%</b>	<b>Aumento percentual do ATR, quando o parâmetro reduz em 25%</b>
espessura	revestimento	27,6%	37,1%
poisson	base	10,5%	18,1%
$\Psi_3$	subleito	10,5%	13,3%
$\Psi_1$	subleito	1,0%	1,0%
MR	base	1,0%	0,0%
M.E.	sub-base	0,0%	0,0%
	subleito		

Fonte: Elaborado pelos autores.

As tabelas acima mostram que na Estrutura 2 o principal parâmetro causador de variação no ATR de referência foi o coeficiente de regressão  $\Psi_2$ , que quando variado em  $\pm 25\%$  na camada de base, gerou de forma diretamente proporcional um aumento de 41,0% e uma redução de 21,0% do defeito analisado. Ou seja, esse parâmetro quando é modificado na base tende a gerar grandes impactos no ATR de pavimentos com estruturas e volumes de tráfego semelhantes aos da Estrutura 2.

O segundo parâmetro que mais causou alteração no ATR foi a espessura, que quando variada em  $\pm 25\%$  gerou (dessa vez de forma inversamente proporcional) um aumento de 37,1% e uma redução de 27,6% no defeito analisado. O coeficiente de Poisson também vale ser mencionado pois de forma inversamente proporcional gerou um aumento de 18,1% no ATR (quase o dobro do que produziu de redução, 10,5%).

Entretanto, quando variado em  $\pm 25\%$  gerou apenas na sub-base, causou de forma diretamente proporcional um dos menores percentuais de variação do ATR (1,0% de aumento e nenhuma redução). A massa específica foi outro parâmetro que apresentou nenhuma redução de ATR na Estrutura 2 (e também nenhum aumento), fato ocorrido duas vezes (no subleito e na sub-base).

Nessa mesma estrutura, curiosamente o coeficiente de regressão  $\Psi_2$  apresentou dois comportamentos totalmente distintos, sendo o parâmetro que causou a maior variação de ATR na Estrutura 2, foi também um dos que causou um dos menores percentuais de variação do defeito (1,0% de redução e 1,0% de aumento) de forma diretamente proporcional ao ser variado em  $\pm 25\%$  na sub-base.

Ao comparar os resultados entre Estrutura 1 e Estrutura 2, através das Tabelas

14, 15, 16 e 17 verifica-se que o parâmetros diretamente proporcionais que mais causaram impactos no ATR das duas estruturas foram os mesmos, sendo coeficiente de regressão  $\Psi_2$  o que se destacou entre eles. O mesmo ocorreu em relação aos parâmetros inversamente proporcionais, quando coeficiente de Poisson e espessura (do revestimento) foram os que causaram maior impacto no ATR das duas estruturas. Isto mostra que os ensaios mais importantes para minimizar os danos causados por ATR, nessas duas estruturas, são os ensaios referentes à determinação dos coeficientes de regressão da deformação permanente, e do coeficiente de Poisson.

#### 4.4 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DA TRI

Para aferir os parâmetros de entrada (MR, espessura,  $\mu$ , dentre outros) que mais influenciam no resultado de área trincada, tanto na Estrutura 1, quanto na Estrutura 2, foi realizada uma análise de sensibilidade variando cada parâmetro em  $\pm 25\%$ , mantendo as demais variáveis em seus valores de referência, conforme indicado nas Tabelas 10 e 11 do Capítulo 3.

##### 4.4.1 Análise de sensibilidade da TRI na Estrutura 1

A apresentação de gráficos e tabelas será feita forma análoga à realizada para o afundamento de trilha de roda (ATR) do item anterior.

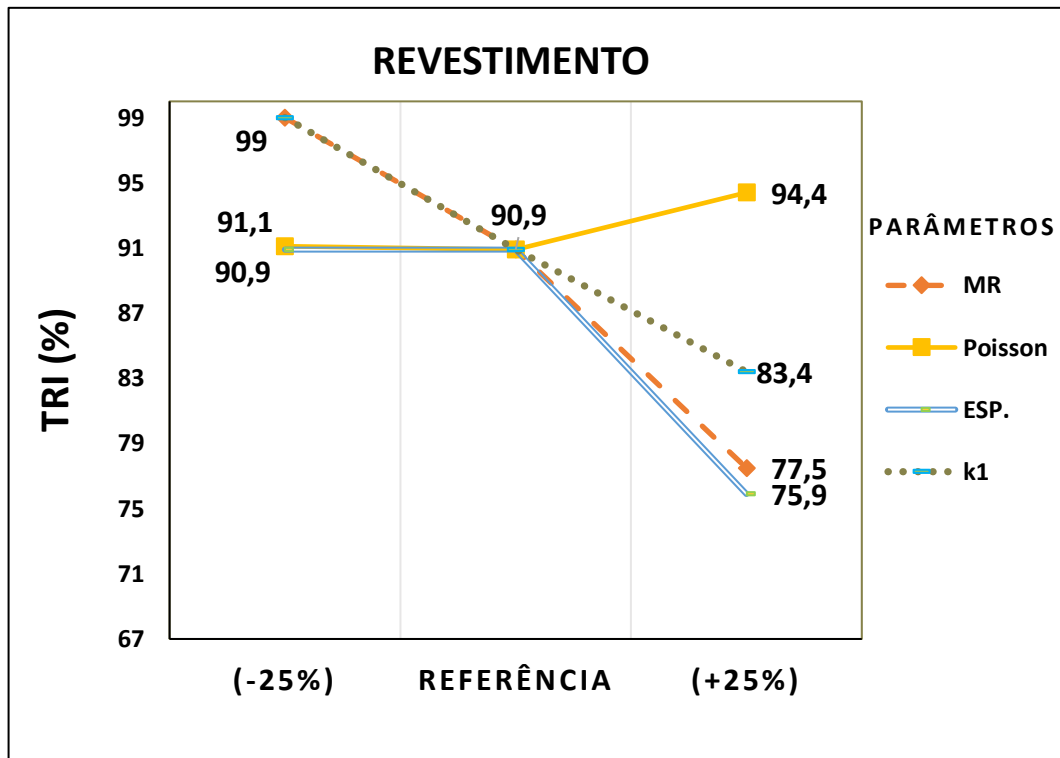
##### **Revestimento**

Para a análise na camada de revestimento, foi gerado um gráfico (Figura 24), que ilustra que o parâmetro que apresentou maior influência na TRI foi a espessura da camada quando modificado para  $+25\%$  do valor de referência, pois o mesmo obteve maior inclinação no gráfico, seguido do MR e do Coeficiente de regressão K1. Esses parâmetros são inversamente proporcionais ao efeito de área trincada no pavimento.

Já o coeficiente de Poisson, foi o parâmetro que gerou o menor resultado para TRI quando variado nessa camada e se mostrou diretamente proporcional ao percentual de área trincada do pavimento.

Diante desses resultados, as retas íngremes na camada de revestimento indicam que a TRI é fortemente suscetível à variação dos parâmetros Módulo de Resiliência, Coeficiente de Poisson, Coeficiente de regressão K1 e espessura, o que conseqüentemente torna essa camada a mais importante.

Figura 24 - Sensibilidade da TRI na camada de revestimento da Estrutura 1.



Fonte: Elaborado pelos autores.

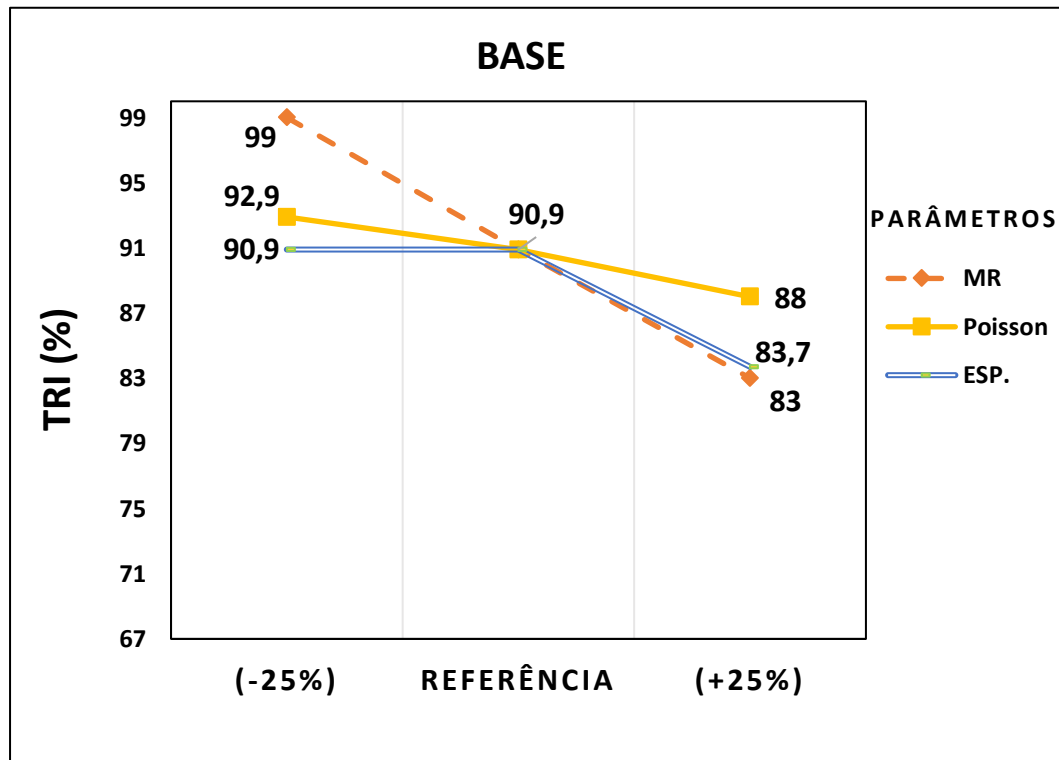
## Base

Na camada de base, o módulo de resiliência e a espessura da camada se mostraram bastante relevantes na TRI, pois causaram as maiores variações no resultado de área trincada, destacando as retas com maior inclinação que se demonstraram inversamente proporcionais à TRI.

Outro parâmetro que também modificou o resultado da porcentagem de área trincada foi coeficiente de Poisson, contudo continuou apresentando uma pequena variação, e, nesta camada, mostrou-se como inversamente proporcional.

O resultado da variância desses parâmetros no percentual de área trincada, como ilustra a Figura 25, torna a camada de base como a segunda mais importante para essa estrutura.

Figura 25 - Sensibilidade da TRI na camada de base da Estrutura 1.

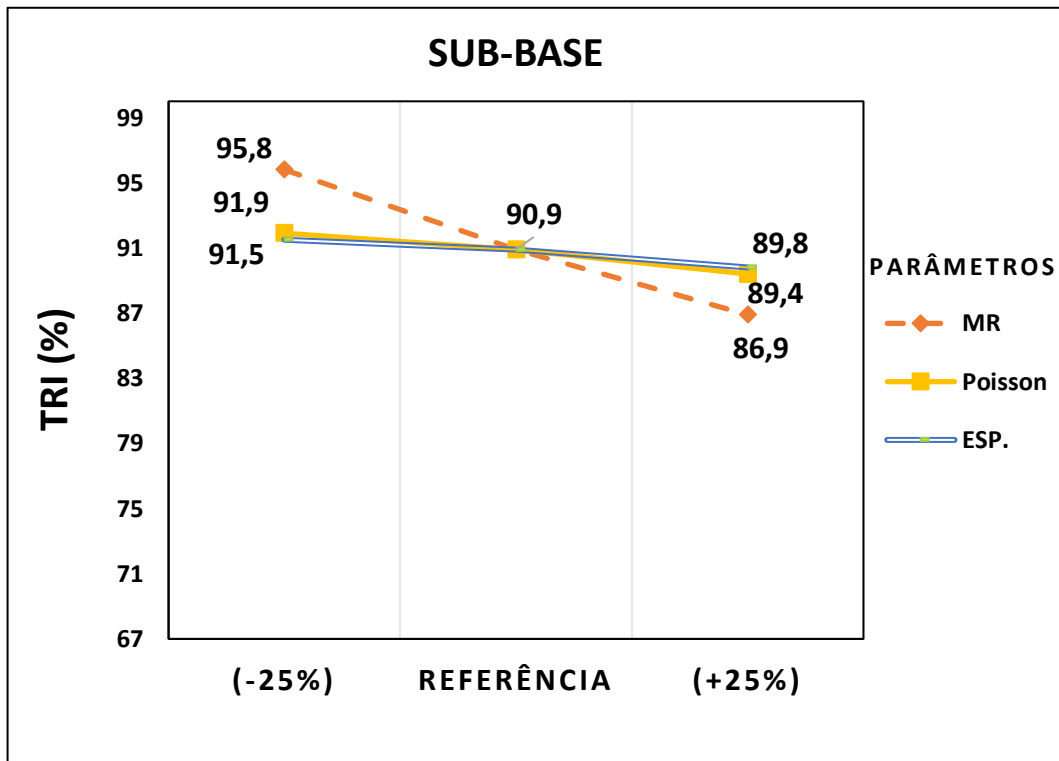


Fonte: Elaborado pelos autores.

### Sub-Base

Na camada de sub-base, os parâmetros MR, coeficiente de Poisson e espessura da camada se mostraram inversamente proporcionais ao valor percentual de área trinacada do pavimento. O módulo de resiliência foi o que mais se destacou, pois demonstrou uma reta mais íngreme em relação às demais. O coeficiente de Poisson, continuou com uma pequena variância comum as outras camadas, como mostra a Figura 26, o que torna como o parâmetro menos importante da camada.

Figura 26 - Sensibilidade da TRI na camada de sub-base da Estrutura 1.



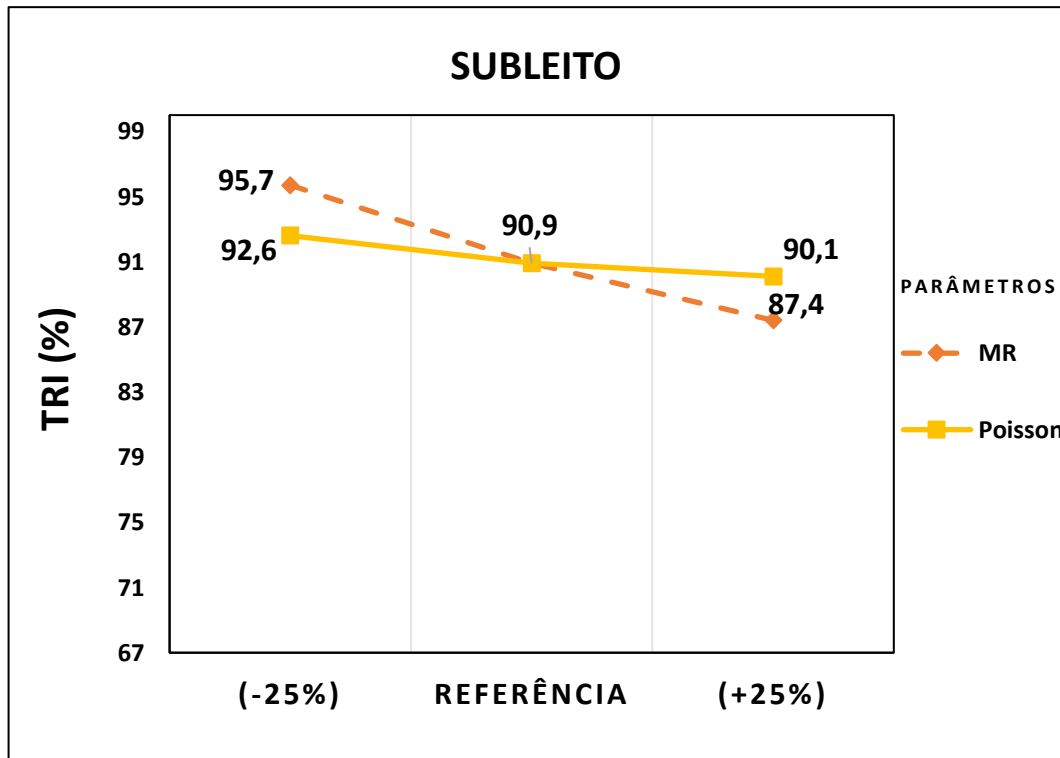
Fonte: Elaborado pelos autores.

### Subleito

Para o subleito, constatou-se que o MR e o coeficiente de Poisson foram os únicos parâmetros que demonstraram influência na área trincada, apresentando uma pequena variação, sendo que o módulo de resiliência continuou causando a maior variação entre os parâmetros. O MR e Poisson continuam demonstrando serem inversamente proporcionais à TRI do pavimento.

Diante disso, o subleito se configura ser o menos importante em função de sua pouca influência no resultado percentual de área trincada para essa estrutura.

Figura 27 - Sensibilidade da TRI no subleito da Estrutura 1.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Após os resultados exibidos acima, a Tabela 18 sintetiza os valores numéricos das variações percentuais mais e menos expressivas da TRI da Estrutura 1. Os parâmetros mais significativos como espessura da camada, módulo de resiliência, K1 e coeficiente de Poisson demonstraram ser inversamente proporcionais à TRI e que a camada mais influente é a camada de revestimento, por apresentar que a maioria dos parâmetros tiveram variações mais expressiva nessa camada.

Tabela 18 - Maiores variações inversamente proporcionais de TRI na Estrutura 1

<b>Variações inversamente proporcionais</b>			
Parâmetro	Camada	Redução percentual da TRI, quando o parâmetro aumenta em 25%	Aumento percentual da TRI, quando o parâmetro reduz em 25%
Espessura	Revestimento	16,5%	-
MR	Revestimento	14,7%	8,9%
K1	Revestimento	8,3%	8,9%
Poisson	Base	3,2%	2,2%
Poisson	Sub-base	1,7%	1,1%
Espessura	Sub-base	1,2%	0,7%

\*Não foi possível reduzir a espessura do revestimento, pois esta já se encontrava no limite mínimo de 5,0 cm exigido pelo *software* MeDiNa.

Fonte: Elaborado pelos autores.

O aumento da espessura da camada de revestimento em +25%, apresentou uma redução no percentual na área trincada de 16,5% , o que ratifica a influência e a importância desse parâmetro na TRI nesta camada. O módulo de resiliência, na mesma camada, quando variado em +25% de seu valor de referência, apresenta uma redução de quase 15% no valor de área trincada, isso ocorre devido a esse parâmetro estar diretamente ligado aos danos causados por fadiga no pavimento.

Outro parâmetro influente foi o coeficiente de regressão K1, que define a curva de fadiga do revestimento, a variação foi de 8,3% do valor de referência para o valor maior em 25% e de 8,9% do valor de referência para o valor menor em 25%.

O coeficiente de Poisson em todas camadas apresentou pequenas variações e na camada de base e sub-base essa variação foi mais sobressalente, causando na TRI um aumento de 2,2% e uma redução de 3,2% e um aumento de 1,1% e uma redução de 1,7%, respectivamente.

A espessura da camada de sub-base, em relação a todos os parâmetros, apresentou as menores variações na TRI, o que ratifica que a espessura da sub-base possui pouquíssima influência na área trincada do pavimento.

#### **4.4.2 Análise de sensibilidade da TRI na Estrutura 2**

Inicialmente, na análise realizada pelo *software* MeDiNa, todos os parâmetros da camada de revestimento, da camada de base, da camada de sub-base e do subleito dessa estrutura, não apresentaram nenhuma variação no valor percentual de área trincada, que permaneceu em 99%, ou seja, o rompimento do pavimento é previsto antes do período de projeto. Este elevado resultado de área trincada fomenta o quanto o dimensionamento pelo método DNER é ineficiente quanto aos efeitos da fadiga no pavimento. À vista disso, foi verificado os dados mensais, que o MeDiNa disponibiliza, para analisar o mês em que atinge-se esse valor do total de 10 anos e mostrou que foi no mês 68, como mostra a Figura 28. Logo, para obter melhores resultados o mês 68 será usado como referência para realizar a análise de sensibilidade na Estrutura 2, ou seja, ao invés de se olhar a TRI no final da vida útil, a mesma será olhada no mês 68.

Figura 28 – Dados mensais da Estrutura 2.

ESTRUTURA		MODELAGEM		RESULTADOS			
Danos Mensais		ATR		Bacias de campo		Completo	
Mês	N equiv	ÁREA TRINCADA (%)	ATR (mm)				
59	9,833e+06	87,95%	10,06				
60	1,000e+07	89,45%	10,07				
61	1,017e+07	90,91%	10,08				
62	1,033e+07	92,33%	10,09				
63	1,050e+07	93,72%	10,10				
64	1,067e+07	95,07%	10,11				
65	1,083e+07	96,37%	10,12				
66	1,100e+07	97,64%	10,13				
67	1,117e+07	98,87%	10,14				
68	1,133e+07	99,00%	10,15				
69	1,150e+07	99,00%	10,16				
70	1,167e+07	99,00%	10,16				
71	1,183e+07	99,00%	10,17				
72	1,200e+07	99,00%	10,18				
73	1,217e+07	99,00%	10,19				
74	1,233e+07	99,00%	10,20				

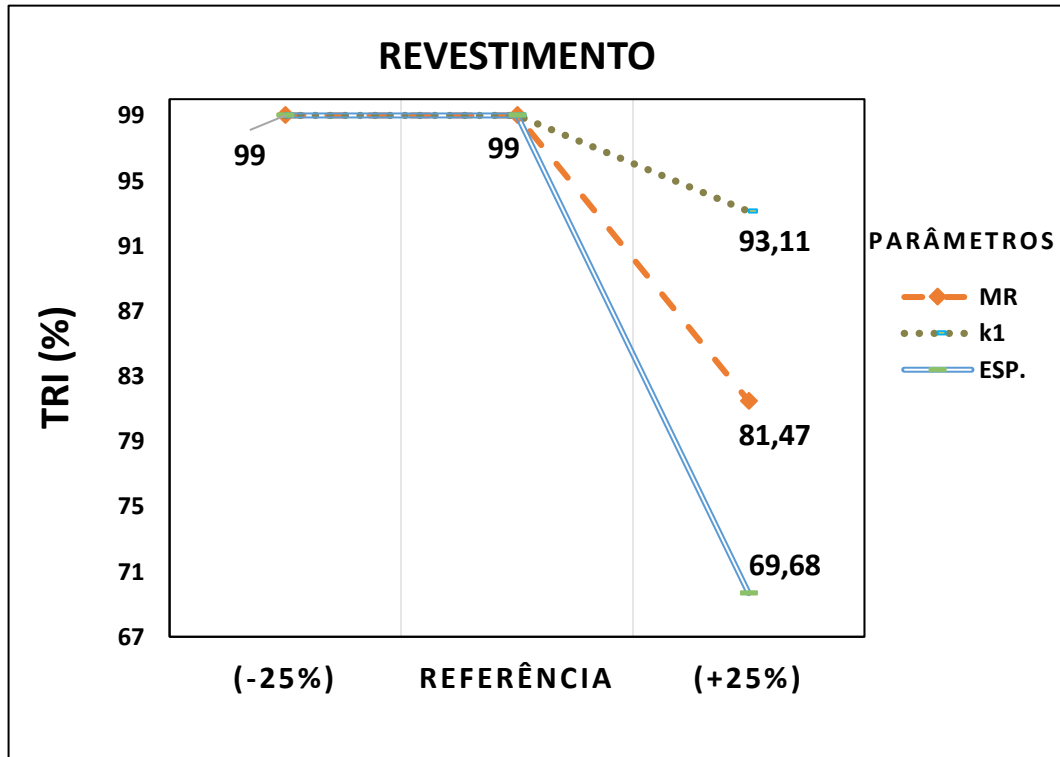
Fonte: Software MeDiNa.

## Revestimento

Feito isso, a camada de revestimento apresentou a espessura da camada, o módulo de resiliência e o coeficiente de regressão K1 como os únicos parâmetros que influenciam na TRI, e ainda apresentaram as maiores variações quando modificados +25% do valor de referência e se demonstraram inversamente proporcionais ao resultado percentual de área trincada.

Por esta razão, semelhantemente a Estrutura 1, a camada de revestimento é a mais importante nessa estrutura, por esses parâmetros conterem as retas mais íngremes, ou seja, são mais sensíveis por gerarem maiores variações no resultado final de área trincada do pavimento. Logo esses parâmetros indispensa a realização de seus ensaios para a sua definição.

Figura 29 - Sensibilidade da TRI na camada de revestimento da Estrutura 2



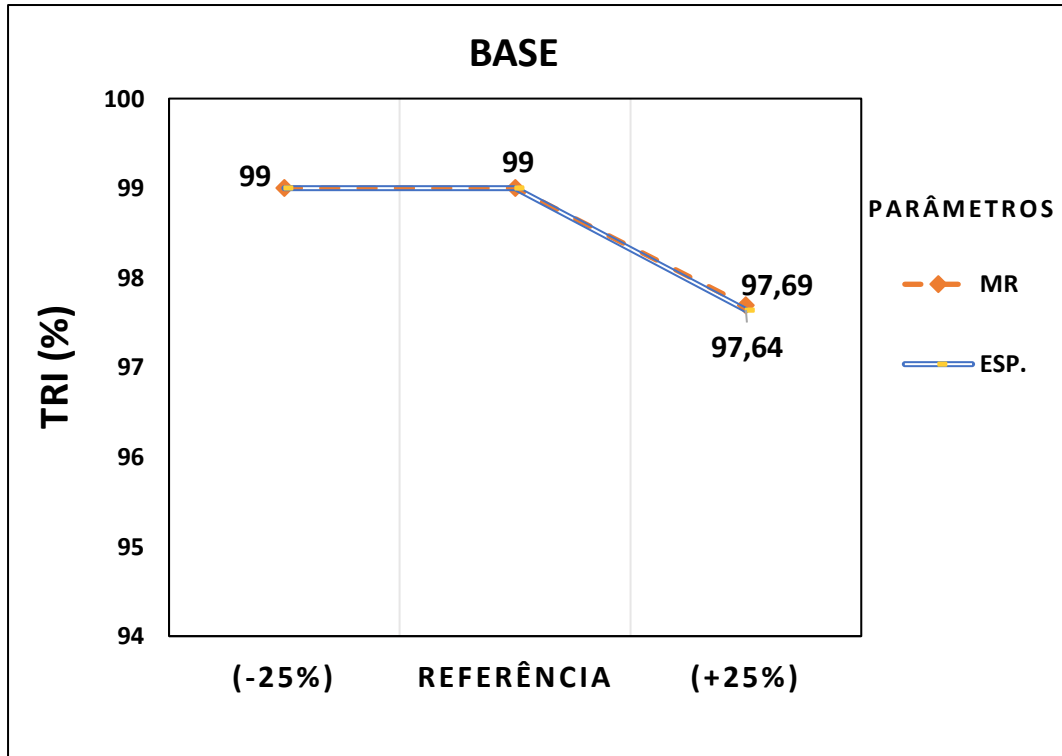
Fonte: Software MeDiNa.

### Base

Na camada de base, apenas o MR e a espessura da camada em questão demonstraram influência na área trincada com a variação para +25%, conforme ilustra a Figura 30. Apesar da pequena variação, ainda sim, esse fatores continuaram demonstrando serem inversamente proporcionais a TRI.

Nessa estrutura, depois da camada de revestimento, a camada de base pode ser considerada a mais importante por apresentar influência no resultado final de área trincada.

Figura 30 - Sensibilidade da TRI na camada de base da Estrutura 2.



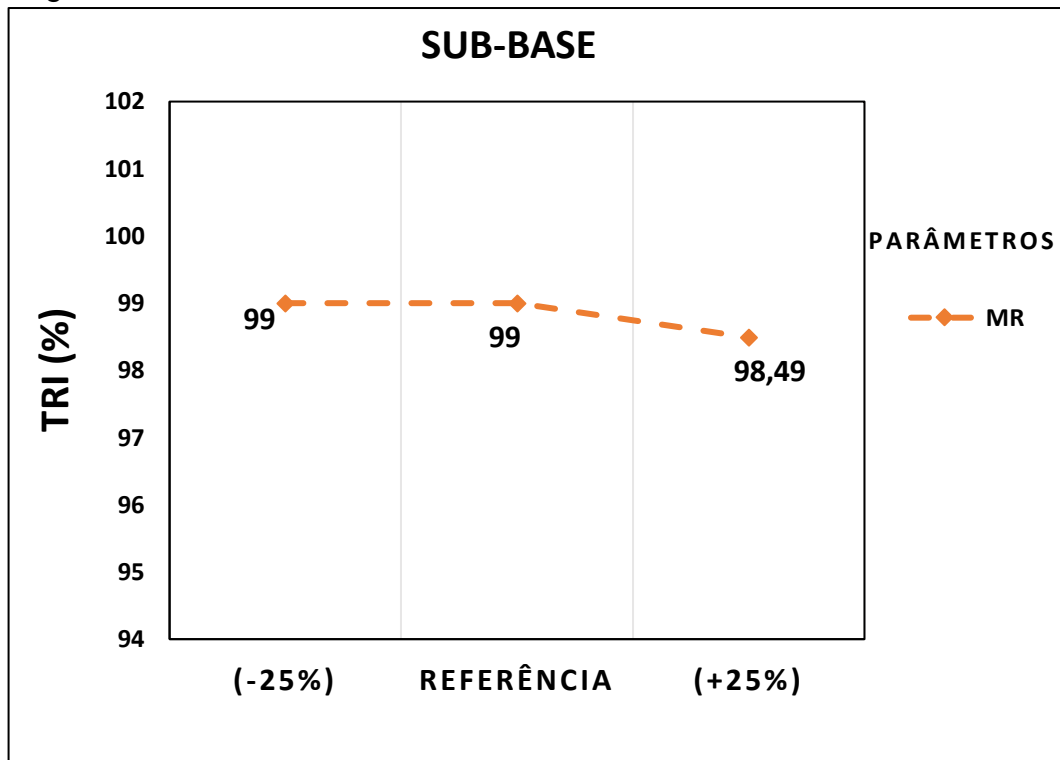
Fonte: Elaborado pelos autores.

### Sub-Base

Na camada de sub-base, o módulo Resiliente foi o único parâmetro que resultou em uma leve variância na TRI quando variado para +25%, o que ressalta a importância desse parâmetro em relação a sua influência no resultado de área trincada. O mesmo, semelhante as outras camadas, se demonstrou como inversamente proporcional ao efeito de fadiga no pavimento.

Contudo, pelo baixíssimo valor variado na TRI, conforme mostra a Figura 31, essa camada apresentou ser a menos importante pela baixa influência no resultado percentual de área trincada.

Figura 31 – Sensibilidade da TRI da camada de sub-base da Estrutura 2.

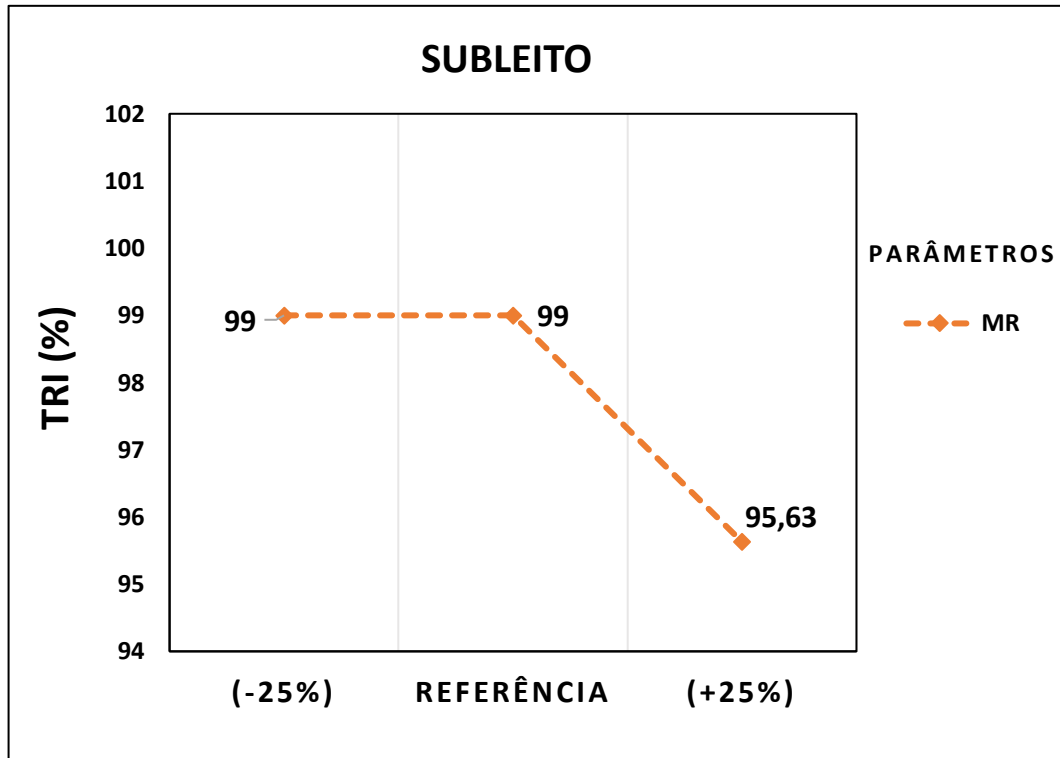


Fonte: Elaborado pelos autores.

### Subleito

No subleito, assim com na sub-base, continuou apresentando o módulo de resiliência como único parâmetro que obteve variação, ou seja, foi o único que apresentou influência no resultado percentual de área trincada, quando variado em +25%. Para variação de -25% continuou atingindo-se o valor máximo de área trincada de 99%. O MR se mostrou como inversamente proporcional à TRI.

Figura 32 - Sensibilidade da TRI do subleito da Estrutura 2.



Fonte: Elaborado pelos autores.

A seguir, a Tabela 19 consolida os valores numéricos das variações percentuais mais e menos expressivas da TRI da Estrutura 2.

Tabela 19 - Maiores variações inversamente proporcionais de TRI na Estrutura 2.

Variações inversamente proporcionais			
Parâmetro	Camada	Redução percentual da TRI, quando o parâmetro aumenta em 25%	Aumento percentual da TRI, quando o parâmetro reduz em 25%
Espessura	Revestimento	29,62%	-
MR	Revestimento	17,7%	-
K1	Revestimento	5,94%	-
Poisson	Base	1,4%	-
Poisson	Sub-base	1,3%	-
Espessura	Sub-base	0,5%	-

\*Não foi possível aferir o aumento percentual da TRI, pois a área trincada no cenário de referência já estava em 99,0% (limite máximo de resultado no *software* MeDiNa).

Fonte: Elaborado pelos autores.

A camada de revestimento foi a mais importante nessa estrutura, destacando-se os parâmetros espessura da camada, MR, e coeficiente de regressão K1, que demonstraram ser inversamente proporcional em todas as camadas da TRI. O fato de o revestimento ser a camada de maior influência, pode estar relacionado ao tráfego

pesado usado na Estrutura 2, pois o mesmo é a camada mais afetada pelos danos causados por fadiga no pavimento.

O módulo de resiliência na camada de sub-base reduziu apenas em 5% a TRI e na camada de base em apenas 1,3%, isso comprova pouca sensibilidade do MR no resultado de área trincada do pavimento nessas camadas.

Nenhum parâmetro conseguiu variar quando modificado para -25%, pois aumentaria o percentual de TRI e o MeDiNa não consegue variar para valores maiores que 99%, que o valor de referência de área trincada nessa estrutura.

Semelhantemente a Estrutura 1, a Estrutura 2 manteve a camada de revestimento bastante relevante no pavimento para resultados de área trincada, com variação dos mesmos parâmetros, tais como espessura, MR e K1.

A espessura da camada é o parâmetro mais importante, pois, com a sua modificação, foi a que mais reduziu o valor de TRI com uma diferença percentual de redução da Estrutura 2 para a Estrutura 1 de 13,1%.

O MR é o segundo mais importante parâmetro, pois obteve variação em todas as camadas das duas estruturas, destacando as maiores variações de área trincada na camada de revestimento.

O coeficiente de regressão K1, predominante da camada de revestimento, também se mostrou sensível no resultado final de área trincada nas duas estruturas.

Já o coeficiente de Poisson, só demonstrou sensibilidade à área trincada na Estrutura 1, mas ainda sim com resultados poucos influentes por apresentar baixas variações percentuais na TRI. A maior variação obteve-se na camada de base da Estrutura 1, reduzindo a TRI em apenas 3,2%.

Em suma, os parâmetros módulo de resiliência, coeficiente de Regressão K1 (que define a curva de fadiga), e a espessura da camada de revestimento foram as que demonstraram maior importância para a TRI nas duas estruturas, e necessitam de especial atenção do projetista para evitar possíveis excessos de trincas nos pavimentos antes de atingirem sua vida útil de projeto.

#### 4.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho pretendeu realizar uma análise de sensibilidade acerca das respostas de desempenho dos pavimentos flexíveis quando são variados os seus parâmetros de entrada no *software* MeDiNa, para dar mais segurança ao projetista na

inserção de dados que precisaram ser estimados a partir de correlações existentes na literatura técnica. A pesquisa alcançou os objetivos específicos ao identificar a quais parâmetros o afundamento de trilha de roda (ATR) e a área trincada estimada do pavimento (TRI) são mais sensíveis.

A técnica de análise de sensibilidade permitiu visualizar o comportamento de dois tipos de pavimento que foram objeto do presente estudo, e permitiu identificar diferenças e semelhanças entre eles. Foi possível verificar que para o ATR, os gráficos gerados foram muito parecidos em todas as camadas dos dois pavimentos, coincidindo a maioria dos parâmetros mais relevantes. Entretanto, pode-se perceber que apesar de possuir uma camada de revestimento mais espessa (10 cm de espessura) o pavimento 2 teve resultados de ATR muito mais severos do que o pavimento 1 (5 cm de espessura), o que pode ser justificado pelos principais parâmetros que afetaram esse defeito (coeficientes de regressão  $\Psi_i$  – deformação permanente) estarem diretamente ligados ao número N. Portanto, pavimentos com volume de tráfego elevado como é o caso do pavimento 2 ( $N = 2 \cdot 10^7$ ), tendem a apresentar maiores valores de deformação permanente nas trilhas de roda. Nas duas estruturas, a espessura da camada de revestimento mostrou ter a maior influência para a área trincada, sendo que essas grandezas são inversamente proporcionais. Em um segundo nível de importância, também com comportamento inversamente proporcional à TRI, ainda na camada de revestimento, destacam-se o MR e o parâmetro K1, que vem do ensaio de fadiga de misturas asfálticas.

O levantamento dos principais percentuais de variação do ATR e da TRI causados pelas variações dos parâmetros possibilitou elencar os principais ensaios a serem realizados para o uso de dados confiáveis no dimensionamento MeDiNa. O coeficiente de regressão  $\Psi_2$  e o coeficiente de Poisson foram os principais parâmetros a afetar o ATR das duas estruturas quando variados na camada de base (aumento de 41,0% no ATR da Estrutura 2, e aumento de 19,0% no ATR da Estrutura 1), evidenciando a necessidade da realização dos ensaios de determinação da deformação permanente de solos (DNIT 178/2019-IE) e determinação do módulo de resiliência (DNIT 134/2018-ME), para o solo a ser utilizado na camada de base. Na análise da TRI, os ensaios fundamentais para serem realizados são os ensaios de determinação do módulo de resiliência (DNIT 134/2018-ME) e ensaio de fadiga por compressão diametral à tensão controlada (DNIT 183/2018-ME), ambos nas misturas asfálticas que compõem os revestimentos asfálticos, visto que os parâmetros MR e

K1 foram os parâmetros que mais influenciaram nos valores de TRI.

Por outro lado, se houver desconhecimento sobre os parâmetros do material utilizado na camada de sub-base, as correlações podem substituir os ensaios devido à baixa sensibilidade do ATR e da TRI às variações dos parâmetros ocorridas nessa camada dentro deste presente estudo.

É importante ressaltar que as considerações desse estudo se aplicam apenas a estruturas semelhantes em termos de número e espessuras de camadas e não podem ser extrapoladas para estruturas de pavimento com mais camadas, como por exemplo: estruturas com reforço de subleito, estruturas com presença de camadas rígidas, ou mesmo estruturas com camadas muito espessas da ordem de 30 cm.

## 5 CONCLUSÃO

A presente pesquisa tem por objetivo realizar uma análise de sensibilidade do desempenho dos pavimentos asfálticos a partir da variação dos parâmetros físicos e mecânicos dos materiais das camadas que o compõem, tendo em vista a atual transição do Método DNER (1981) para o mais moderno Método de Dimensionamento Nacional (MeDiNa) que se baseia em dados de ensaios ainda pouco utilizados. Os resultados dessa pesquisa tendem a ajudar os projetistas a entenderem melhor a importância de cada parâmetro dentro do dimensionamento, e assim, poderem selecionar os dados que irão ser utilizados no programa com maior segurança. Para isso, foram aproveitados os dados de projeto da duplicação da rodovia federal BR-316/PA, além da escolha de dois cenários distintos de tráfego.

Dentro das informações alcançadas, as principais conclusões foram:

- As elevadas porcentagens de área trincada e os valores de afundamento de trilha de roda muito acima do limite máximo (10 mm), demonstram o quanto o dimensionamento pelo método DNER foi considerado inadequado pelo MeDiNa;

Sobre a sensibilidade do afundamento de trilha de roda (ATR):

- O ATR apresentou maior sensibilidade às variações dos coeficientes de regressão  $\Psi_i$  em todas as camadas nos dois cenários de tráfego, especialmente através do coeficiente de regressão  $\Psi_2$  da camada de base, que provocou um aumento de 41,0% do ATR da Estrutura 2, além de outro aumento de 21,0% na Estrutura 1;
- O módulo de resiliência não apresentou influência muito expressiva no ATR após a variação desse parâmetro nas camadas e nos subleitos dos dois pavimentos analisados (todos os percentuais de variação do ATR para este parâmetro estiveram abaixo de 10,0%, e registrou apenas um resultado próximo disso quando gerou um aumento de 9,5% quando variado no revestimento da Estrutura 2);
- O coeficiente de Poisson gerou significativas variações de ATR após sua alteração na camada de base em ambos os pavimentos, demonstrando ser um parâmetro que requer maior cuidado nessa parte da estrutura do pavimento, sendo preferível a utilização de ensaios para a determinação desse parâmetro, ao invés do uso de correlações empíricas (aumento de 19,0% no ATR da Estrutura 2, e 18,1% na Estrutura 1) ;
- A espessura apresentou uma variação significativa de ATR (41,0% de aumento no ATR na Estrutura 2, e redução de 11,5% na Estrutura 1), quando variada na camada

de revestimento nas duas estruturas, principalmente na Estrutura 2 que possui um tráfego muito elevado ( $N = 2.10^7$ );

- O ATR mostrou-se ser mais suscetível às variações dos parâmetros feitas nas camadas de base em ambos os pavimentos, evidenciando essa como a camada mais delicada para o dimensionamento da estrutura. Assim, a ordem de importância para o ATR nos dois pavimentos foi: base, subleito, revestimento e sub-base;
- A sub-base mostrou-se ser a camada que menos apresenta influência no ATR após variação de seus parâmetros, possibilitando a utilização das correlações sem grandes ressalvas;

Sobre a sensibilidade da área trincada (TRI):

- A porcentagem de área trincada do pavimento foi mais sensível às variações da espessura da camada com seu maior valor de redução na Estrutura 2 (29,6%), do MR com seu maior valor de redução na Estrutura 2 (17,7%) e do Coeficiente de Regressão K1, com seu maior valor de redução na Estrutura 1 (8,9%).
- Nas duas estruturas, a espessura da camada é o parâmetro que apresentou maior influência para o resultado de área trincada, por apresentar as maiores variações na camada de revestimento, com 16,5% de redução na TRI na Estrutura 1 e de 29,6% de redução na TRI na Estrutura 2;
- Na Estrutura 1, a TRI demonstrou pouca sensibilidade à variação do coeficiente de Poisson, com 0,7% de aumento na camada de sub-base e na Estrutura 2  $\mu$  não provocou nenhuma variação em TRI;
- Nas duas estruturas, a camada que mais impactou a TRI foi a camada de revestimento, pois nesta camada os parâmetros produziram as maiores variações no resultado percentual de área trincada como MR com 17,7% na Estrutura 2, espessura com 29,6% na Estrutura 2 e K1 com 8,9% na Estrutura 1.
- Todos os parâmetros variados, tais como MR, espessura da camada, coeficiente de regressão K1 e coeficiente de Poisson se demonstraram inversamente proporcionais à área trincada do pavimento, com exceção do Poisson, na camada de revestimento da Estrutura 1, que se mostrou diretamente proporcional.

Por fim, essas conclusões apontam que para pavimentos que possuem estruturas semelhantes em termos de número e espessura de camadas, materiais utilizados, e volumes de tráfego que foram adotados no presente estudo; é indispensável a realização de alguns dos ensaios que são requeridos pelo método

MeDiNa. Os altos percentuais de variação no ATR e na TRI alertam para que o uso de correlações empíricas na substituição de ensaios específicos não oferece confiança e segurança ao projetista especialmente no lançamento de dados de entrada na camada de base, (no caso do ATR) e na camada de revestimento, (no caso da TRI). Mesmo diante do alto custo dos ensaios requeridos pelo MeDiNa, é muito importante realizar os ensaios de módulo de resiliência e de fadiga por compressão diametral à tensão controlada para definição do MR e K1, respectivamente, na camada de revestimento, agregando maior segurança às análises sobre TRI. E na camada de base, é essencial o ensaio triaxial para definir o coeficiente de Poisson e o ensaio de deformação permanente para definir os coeficientes de regressão ( $\Psi_i$ ), e assim reduzir as incertezas nas análises sobre o ATR.

## 5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Diante dos resultados obtidos, e buscando uma continuidade e complementação da pesquisa, sugere-se que os próximos estudos abordem novos cenários de tráfego e considerem outros tipos de materiais em suas pesquisas com o intuito de aumentar a quantidade de avaliações das correlações empíricas contribuindo para uma futura avaliação geral acerca da utilização em substituição aos ensaios específicos de determinação dos parâmetros de entrada do MeDiNa. Além disso, o acréscimo de novos parâmetros a esse tipo de estudo como “pressão de inflação de pneus” e “carga por eixo”, podem agregar gerar resultados relevantes devido às mudanças que esses parâmetros vêm sofrendo nos últimos anos com a evolução dos veículos e maior utilização da malha rodoviária. Outro ponto a ser analisado é que se façam estudos de análise de sensibilidade em pavimentos com estrutura mais esbelta (revestimento + base) e em pavimentos com estrutura mais espessa (revestimento + base + sub-base + reforço do subleito).

## 6 REFERÊNCIAS

AGUIAR, Gilberto; ALVES, Custodio da Cunha; HENNING, Elisa. **GERENCIAMENTO DE PROJETOS: SIMULAÇÃO DE MONTE CARLO VIA A FERRAMENTA SIMULAR**, [s. l.], p. 1-13, 12 out. 2010.

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

BARBOSA, D. S.; SILVA, D. C. **ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE O NOVO MÉTODO DE DIMENSIONAMENTO NACIONAL DE PAVIMENTOS – MEDINA E O MÉTODO DO DNER**. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Civil, Instituto de Tecnologia – ITEC, Universidade Federal do Pará. Belém do Pará, Pará, 2021. Disponível em: <https://bdm.ufpa.br:8443/jspui/handle/prefix/3428>. Acesso em: 16/03/2022.

BERNUCCI, Liedi Bariani; MOTTA, Laura Maria Goretti da; CERATTI, Jorge Augusto Pereira; SOARES, Jorge Barbosa. **Pavimentação asfáltica: Formação básica para engenheiros**. 3. ed. Rio de Janeiro: Petrobras: Abeda, 2010.

BRITO, LÉLIO A. T.; GRAEFF, ÂNGELA G. **Métodos de dimensionamento de pavimentos – metodologias e seus impactos nos projetos de pavimentos novos e restaurações**. Porto Alegre: Prime Engenharia e Consultoria Ltda., 2009.

BUENO, L. D.; PEREIRA, D. S.; SPECHT, L. P.; OLIVEIRA, M. F. 2017. **Influência da pressão de inflação dos pneus e da carga dos veículos comerciais na degradação dos pavimentos**. Revista Pavimentação, Ano XII, nº 44, p. 38 – 57. 2017. ISSN 1809 – 1865.

CARDOSO, S. H. (1988). **Estudo de deformações resilientes de solos lateríticos da região de Brasília**. In: Reunião Anual de Pavimentação, 23, Florianópolis, 1988, Anais. v. 1; p.203-219.

CHIARELLO, Gabriéli Pires et al. **Avaliação estrutural e financeira de pavimento flexível dimensionado pelo método do DNER (1981) e MeDiNa (2019): Estudo de caso da duplicação da BR 287 - Trecho Santa Cruz do Sul à Tabai/RS**. In: 33º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte, ANPET, 2019, Balneário Camboriú. Anais Eletrônicos. p. 1-12.

Clarke M.; Oxman, A. D. (2001), **“Assessment of study quality”**, *Cochrane Reviewers Handbook, 4.1.2 Section 6. In: The Cochrane Library, Oxford: Update Software, Issue 2.*

COUTINHO, João Camilo Penna. **Dimensionamento de pavimento asfáltico: comparação do método DNER com um método mecanístico-empírico aplicada a um trecho.** Ouro Preto, Minas Gerais, 2011. 214 p. Dissertação (Mestrado) Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Núcleo de Geotecnia.

CUNTO, F. J. C. **Determinação do módulo de resiliência através de ensaios triaxiais dinâmicos e a sua estimativa a partir de ensaios de compressão simples: estudo de três solos do nordeste brasileiro.** Dissertação (Mestrado em Transportes).p49 - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1998.

DNIT inicia as obras de duplicação de 45 quilômetros da BR-316/PA. **DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES, 2020.** Disponível em: < DNIT inicia as obras de duplicação de 45 quilômetros da BR-316/PA — Português (Brasil) ([www.gov.br](http://www.gov.br))> Acesso em 20 de abril de 2022.

FERNANDES JÚNIOR, J. L. **Investigação dos Efeitos das Solicitações do Tráfego sobre o Desempenho de Pavimentos.** 1994. 293 f. Tese (Doutorado) – Pós-graduação em Engenharia Civil – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, São Paulo, 1994.

Fernandes Júnior, J. L., Pais, J. C., & Pereira, P. A. A. (2007). **Avaliação dos efeitos das solicitações do tráfego sobre o desempenho de pavimentos flexíveis portugueses e brasileiros.** *Revista Pavimentação*, Ano II, 5, 28-38. Rio de Janeiro: ABPv.

FONTENELE, B. H. **Representação do Tráfego de Veículos Rodoviários de Carga através de Espectros de Carga por Eixo e seu Efeito no Desempenho dos Pavimentos.** 2011. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo.

FONTES, Liseane Padilha Thives da Luz. **Optimização do desempenho de misturas betuminosas com betume modificado com borracha para reabilitação**

**de pavimentos.** Tese (Doutorado) - Universidade do Minho, Escola de Engenharia, Minho, 2009.

FRANCO, Filipe Augusto Cinque de Proença. **Método de dimensionamento mecanístico-empírico de pavimentos asfálticos – SisPav.** Tese de Doutorado. Rio de Janeiro: Coppe/UFRJ, 2007.

FRITZEN, Marcos Antonio, **Desenvolvimento e Validação de Função de Transferência para Previsão do Dano por Fadiga em Pavimentos Asfálticos.** Tese (Doutorado em ciências em engenharia civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, 2016.

GRACIANO, Márcio Lucas. **Transporte: fator de desenvolvimento econômico e social.** Rio de Janeiro: Cia Brasileira, 1971.

GUIMARÃES, A. C. R. **Um Método Mecanístico Empírico para a Previsão da Deformação Permanente em Solos Tropicais Constituintes de Pavimentos.** Tese de D.Sc. COPPE/UFRJ Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2009.

HAAS, Ralph et al. **Mechanistic-empirical pavement design: evolution and future challenges.** Annual Conference Transportation Association of Canada. Saskatoon, Canada, 2007.

Leon H, Thomas M, Oliveira Bica B, Budny J. **DETERMINAÇÃO DE DOSAGENS PARA A ESTABILIZAÇÃO DE UM SOLO LATERÍTICO ATRAVÉS DO MÉTODO FÍSICO-QUÍMICO.** SIEPE 2020, 7.

MOTTA, Laura Maria Goretti da. **Método de dimensionamento de pavimentos flexíveis: critério de confiabilidade e ensaio de cargas repetidas.** Rio de Janeiro, 1991. 366p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE.

PELISSON, N. D.; FERNANDES JÚNIOR, J. L.; SILVA JÚNIOR, C. A. P.; FONTENELE, H. B. **Avaliação de Desempenho pelo MEPDG: o Efeito da Variação de Espessuras de Pavimentos Flexíveis.** Journal of Transport Literature, v. 9, n. 1, p. 20-24, 2015.

PREUSSLER, E. S.; MOTTA, L.M.G.; MEDINA, J. (1980). **Aplicação do Cálculo de Deformação Resiliente no Aperfeiçoamento do Dimensionamento de**

**pavimentos Flexíveis.** In: XV Reunião Anual de Pavimentação, 1980, Belo Horizonte, MG, 1980.

ROCHA, Cristine Fursel. **O transporte de cargas no Brasil e sua importância para a economia.** Trabalho de Conclusão de Curso em Ciências Econômicas, Departamento de Ciências Administrativas, Contábeis, Econômicas e da Comunicação – DACEC, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul. Ijuí, Rio Grande do Sul, 2015.

SCHMIDT, Elcio Luís. **O sistema de transporte de cargas no Brasil e sua influência sobre a Economia.** Florianópolis: 2011. 88p. Monografia (Graduação em Ciências Econômicas) – Departamento de Ciências Econômicas – Universidade de Santa Catarina. 2011.

SCHWARTS, W. C.; LI, R.; CEYLAN, H.; KIM, S.; GOPALAKRISHNAN, K. **Global Sensitivity Analysis of Mechanistic-Empirical Performance Predictions for Flexible Pavements.** *Transportation Research Board. TRB 2013 Annual Meeting CD-ROM. Washington, D. C. 2013.*

SHAJHI, S. **Sensitivity Analysis of AASHTO's 2002 Flexible and Rigid Pavement Design Methods.** 2006. *Master of Science in the Department of Civil & Environmental Engineering – College of Engineering and Computer Science – University of Central Florida. Orlando, Florida, 2006.*

SOUZA, Murillo Lopes de. **Método de Projeto de Pavimentos Flexíveis.** Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. IPR. Rio de Janeiro, RJ, 1981.

Vertamatti, E. (1988). **Contribuição ao conhecimento geotécnico de solos da amazônia com base na investigação de aeroportos e metodologias MCT e resiliente.** Divisão de Pós-Graduação do Instituto Tecnológico de Aeronáutica. São José dos Campos, SP.