



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA AGROALIMENTAR
UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA AMBIENTAL
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

LEONARDO RODRIGUES GUEDES

**ESTUDO DE SEGMENTO NA RODOVIA BR-230/PB COM APLICAÇÃO DO NOVO
MÉTODO DE DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS - MeDiNa**

**POMBAL- PB
2021**

LEONARDO RODRIGUES GUEDES

ESTUDO DE SEGMENTO NA RODOVIA BR-230/PB COM APLICAÇÃO DO NOVO
MÉTODO DE DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS - MeDiNa

Monografia apresentada à Unidade Acadêmica de Ciências e Tecnologia Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Engenheiro Civil.

Orientador: Dr. Leovegildo Douglas Pereira de Souza

Coorientador: Dr. Fabiano Pereira Cavalcante

POMBAL- PB

2021

G924e

Guedes, Leonardo Rodrigues.

Estudo de segmento na Rodovia BR-230?PB com aplicação do novo método de dimensionamento de pavimentos asfálticos - MeDiNa / Leonardo Rodrigues Guedes. - Pombal, 2021.

102 f. : il. Color

Monografia (Bacharelado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia Agroalimentar, 2021.

"Orientação: Prof. Dr. Leovegildo Douglas Pereira de Souza, Prof. Dr. Fabiano Pereira Cavalcante".

Referências.

1. Engenharia de Pavimentos. 2. Análise Mecânica-empírica. 3. Avaliação Estrutural. 4. Software MeDiNa. 5. Retroanálise. I. Souza, Leovegildo Douglas Pereira de. II. Cavalcante, Fabiano Pereira. III. Título.

CDU 693.7.(043)

LEONARDO RODRIGUES GUEDES
**ESTUDO DE SEGMENTO NA RODOVIA BR-230/PB COM APLICAÇÃO DO NOVO
MÉTODO DE DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS – MeDiNa**

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado a Universidade Federal de Campina Grande – UFCG Campus Pombal, como parte das exigências para a obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil.

Aprovada em: 07 de Outubro de 2021

BANCA EXAMINADORA

LEOVEGILDO DOUGLAS PEREIRA DE SOUZA:08419377457
Assinado digitalmente por LEOVEGILDO DOUGLAS PEREIRA DE SOUZA:08419377457
Rabbit: Eu sou o autor deste documento
Localização: Pombal - PB
Data: 2021.09.23 19:00:49 -03'00'
Foxit Reader Versão: 10.1.1

Leovegildo Douglas Pereira de Souza
Orientador(a)

Prof. D. Sc. Leovegildo Douglas Pereira de Souza
Orientador

UACTA/UFCG

FABIANO PEREIRA CAVALCANTE:91039266407
Assinado de forma digital por FABIANO PEREIRA CAVALCANTE:91039266407
Data: 2021.10.19 09:11:35 -03'00'

Prof. D. Sc. Fabiano Pereira Cavalcante
Coorientador
UFPB

Larissa Santana Batista

Prof.ª M. Sc. Larissa Santana Batista
Examinador Interno
UACTA/UFCG

Prof. D. Sc. John Kennedy Guedes Rodrigues
Examinador Externo
CTRN/UFCG

DEDICATÓRIA

AGRADECIMENTOS

À Deus, por me conceder o dom da vida e ter sido meu apoio e fonte de maior força para enfrentar todos os obstáculos em minha vida.

Aos meus Pais, Onaldo Guedes Rodrigues e Maria do Socorro Rodrigues Pereira, o qual sempre me ensinaram e me deram forças, e aos meus irmãos Rafael Rodrigues Guedes e Mateus Rodrigues Guedes, por companheirismo e carinho.

À Paloma Lívia Almeida de Lucena pelo carinho, incentivo, amparo. Obrigado pela compreensão, pela força para seguir em frente e por sua parceria durante todos esses anos.

Aos meus familiares que contribuíram de alguma forma para meu crescimento pessoal e acadêmico, em especial ao meu tio John Kennedy Guedes Rodrigues grande engenheiro, e minhas tias, Ramonildes Alves Gomes, Solange Rodrigues, Maria das Dores Rodrigues e Marinalva Rodrigues.

Ao meus orientadores M. Sc. Valter Ferreira de Sousa e D. Sc. Leovegildo Douglas Pereira de Souza por todos os ensinamentos, oportunidades e conselhos ao longo de toda a minha vida acadêmica até aqui.

Ao meu coorientador D.Sc. Fabiano Pereira Cavalcante, a quem sou grato pela orientação, pelo apoio e discussões.

A Conrado Cesar Vitorino Pereira da Silva, a quem sou grato pela orientação, partilha do conhecimento e pelos ensinamentos para a vida.

A todos os professores que tive ao longo da vida que contribuíram para minha formação e que sem eles eu não teria conseguido chegar até aqui.

Aos grandes amigos que a UFCG me apresentou, em especial Arthur Nóbrega de Sousa, Ian Marques de Oliveira Batista, Filipe Trigueiro Pereira, Glacyelle Kawanna de Sousa Lira, Ana Leticia Ramos Bezerra, Adla Jamilly Vieira Felipe, Thayse Bezerra Da Silva, Helton Rijkaard Lima de Sousa, William Dantas de Medeiros e Pedro Henrique Gomes da Silva. Por todo companheirismo e por proporcionar lembranças inesquecíveis das madrugadas de estudo.

A todos da JBR Engenharia, local onde aprendi muito sobre engenharia e sobre a vida, em especial à Carmem, Oswaldo, Ênio, Lucieudes, Ricardo e Flavio.

E a todos que colaboram direta e indiretamente para obtenção do título de Engenheiro Civil.

Muito Obrigado!

Não tenho eu te ordenado? Sê forte e de boa coragem; não temas, tampouco fiques desanimado pois o Senhor teu Deus é contigo, por onde quer que fores." (Josué 1: 9)

RESUMO

É notório que as avaliações estruturais periódicas são necessárias para uma melhor gestão e priorização de investimentos na manutenção e recuperação das vias. Essas avaliações podem ser realizadas com base em levantamentos não destrutivos que, após cuidadosa análise, permitem a elaboração de projetos de recuperação e reforço das vias. Atualmente, estas análises nas condições estruturais de pavimentos são feitas por retroanálise dos módulos de resiliência por meio das bacias de deflexão medidas no campo em distintos pontos da via. A retroanálise é fundamentada em modelos matemáticos baseados na teoria da elasticidade e estão implementadas em programas computacionais, que auxiliam na engenharia de pavimentos. A presente pesquisa teve como objetivo analisar o desempenho estrutural de Três trechos homogêneos da BR-230, entre Campina Grande e Ingá, a fim de obter os módulos de resiliência e fazer uma análise acerca dos resultados. Na pesquisa foram utilizados os softwares BackMedina e o MeDiNa, os quais são programas de retroanálise dos módulos de resiliência por meio das bacias de deflexão determinadas no ensaio normalizado de *Falling Weight Deflectometer* (FWD) e dimensionamento de um pavimento novo ou dimensionamento de reforço, respectivamente. Por meio da avaliação realizada nos segmentos escolhidos, verificou-se que a principal causa da deterioração é a incompatibilidade da rigidez da estrutura. A intervenção de reforço analisada pelo MeDiNa se mostrou ineficiente quando utilizado o CAP 50/70, visto que o programa não conseguiu realizar o dimensionamento pois passou do limite de 15cm de espessura. Já a solução reforço com utilização do AMP 55/75-E se mostrou satisfatória, satisfazendo os requisitos funcionais para o período de projeto.

Palavras-chave: Mecânica-empírica, Avaliação estrutural, MeDiNa, Retroanálise.

ABSTRACT

It is clear that periodic structural assessments are necessary for better management and prioritization of investments in road maintenance and restoration. These assessments can be carried out based on non-destructive surveys that, after careful analysis, allow the elaboration of recovery and reinforcement projects for the roads. Currently, these analyzes in the structural conditions of pavements are made by retro-analysis of the resilience modules through deflection basins measured in the field at different points of the road. Retro-analysis is based on mathematical models based on the theory of elasticity and is implemented in computer programs that help in pavement engineering. This research aimed to analyze the structural performance of three homogeneous stretches of the BR-230, between Campina Grande and Ingá, in order to obtain the resilience modules and analyze the results. In the research, the software BackMedina and MeDiNa were used, which are programs for the retro-analysis of the resilience modules through the deflection basins determined in the standard Falling Weight Deflectometer (FWD) test and sizing of a new pavement or reinforcement sizing, respectively. Through the evaluation carried out in the chosen segments, it was verified that the main cause of deterioration is the incompatibility of the structure's rigidity. The reinforcement intervention analyzed by MeDiNa proved to be inefficient when the CAP 50/70 was used, as the program was unable to perform the dimensioning as it exceeded the 15cm thickness limit. The reinforcement solution using the AMP 55/75-E proved to be satisfactory, satisfying the functional requirements for the design period.

Keywords: Mecanistics-empirical, Structural evaluation, MeDiNa, Retroanalysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1-Estrutura típica do pavimento rígido	24
Figura 2-Estrutura típica do pavimento flexível.....	24
Figura 3-Estrutura típica do pavimento flexível.....	25
Figura 4-Granulometria por peneiramento.	30
Figura 5-Distribuição de cargas no pavimento rígido e flexível.	32
Figura 6-Escala de valores de serventia atual.....	34
Figura 7- Demonstração de fendas no pavimento.	39
Figura 8- Demonstração de Afundamento no pavimento.....	39
Figura 9- Demonstração de corrugações no pavimento.	40
Figura 10- Demonstração de exsudação no pavimento.....	40
Figura 11- Demonstração de Desgaste no pavimento.	41
Figura 12- Demonstração de panela no pavimento.	41
Figura 13- Demonstração de remendo no pavimento.....	42
Figura 14- Remoção de corpo de prova.....	44
Figura 15- Abertura de poço de inspeção para investigação do solo.	44
Figura 16- FWD KUAB.	47
Figura 17- Vista geral do FWD.	47
Figura 18- Ilustração de ensaio por FDW.	48
Figura 19- Dados necessários para realização da retroanálise.	49
Figura 20- Comparativo das bacias de deflexão obtida em campo e retroanalisada.	51
Figura 21- Variáveis para determinação da profundidade da camada rígida.	54
Figura 22- Fluxograma de dimensionamento Mecanístico empírico.	56
Figura 23- Classes de misturas asfálticas.	57
Figura 24- Fases da vida de um pavimento.	58
Figura 25- Localização do estado da Paraíba e seus limites.....	60
Figura 26- Ilustração da BR230.....	61
Figura 27- Trecho Campina Grande – Ingá.....	62
Figura 28- Trecho Campina Grande – Ingá.....	63
Figura 29- Ilustração do trecho estudado.	64
Figura 30- Ilustração esquemática das camadas do pavimento.....	68
Figura 31- Ilustração esquemática da localização de realização do ensaio das bacias Deflectométricas.....	70
Figura 32 - Tela inicial do software BackmeDiNa.....	72
Figura 33 – Planilha Excel modelo para entradas de dados.	73
Figura 34 - Tela de resultado da retroanálise pelo software BackmeDiNa.	74
Figura 35 - Tela do software MeDiNa projeto pavimento novo.	76
Figura 36 - Tela inicial do modo Reforço do MeDiNa.	77
Figura 37 - Tela de caracterização da camada de revestimento existente no pavimento do modo Reforço do MeDiNa.	78
Figura 38 - Tela de caracterização das camadas de base e subleito existentes no pavimento do modo Reforço do MeDiNa.	79

Figura 39 – Tela de início do software MeDiNa após configuração da estrutura – SH 07 faixa da esquerda.	87
Figura 40 - Tela de resultado da análise da estrutura para o SH-07 faixa da esquerda.	88
Figura 41 - Configuração da camada existente de CBUQ do SH-07.	89
Figura 42 - Configuração da camada de reforço do revestimento de CBUQ com CAP 50/70.	90
Figura 43 - Configuração da camada de reforço do revestimento de CBUQ com AMP 55/75-E.	91
Figura 44 - Tela de início do software MeDiNa após configuração da estrutura para projeto de Reforço.	92
Figura 45- Tela de resultado do dimensionamento do reforço para o SH-07.....	93
Figura 46- Tela de resultado da análise da estrutura proposta do reforço para o SH-07.....	94
Figura 47- Tela de resultado de dimensionamento da estrutura proposta do reforço para o SH-07.	95
Figura 48- Tela de resultado de dimensionamento da estrutura proposta do reforço para o SH-08.	95
Figura 49- Tela de resultado de dimensionamento da estrutura proposta do reforço para o SH-09.	96

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Classificação dos solos pelo diâmetro.....	27
Tabela 2-Classificação dos CAPs por penetração.	31
Tabela 3-Fatores para cálculo de IGGE.	35
Tabela 4-Conceito e valor de ICPF.	36
Tabela 5-Conceito e valor de IES.....	36
Tabela 6- Fatores de ponderação.	43
Tabela 7- Classificação das condições do pavimento pelo IGG.	43
Tabela 8- Correlações entre Viga e FDW.	48
Tabela 9- Coeficientes de Poisson.....	50
Tabela 10- Propostas de intervenção com base no critério de deflexão.....	59
Tabela 11-Segmentos homogêneos.	65
Tabela 12-Volume médio diário medido em julho de 2004.....	66
Tabela 13- Volume médio diário anual.	66
Tabela 14- Volume médio diário corrigido.	66
Tabela 15- Evolução do tráfego e cálculo do número N de projeto.	67
Tabela 16- Resumo do Levantamento dos defeitos de superfície – Faixa Direita.	69
Tabela 17- Resumo do Levantamento dos defeitos de superfície – Faixa Esquerda.	69
Tabela 18- Valores de desvio padrão em função do número de amostras.	71
Tabela 19- Critérios de parada e confiabilidade das análises realizadas pelo MeDiNa.	77

LISTA DE QUADROS

Quadro 01- Resumo deflexões faixa da esquerda	80
Quadro 02- Resumo deflexões faixa da direita	80
Quadro 03- Resumo das deflexões características de FDW e de Viga da faixa da esquerda...	81
Quadro 04- Resumo das deflexões características de FDW e de Viga da faixa da direita	81
Quadro 05- Bacias deflectométricas de campo e retroanalizadas no BackmeDiNa-Faixa da esquerda.....	82
Quadro 06- Bacias deflectométricas de campo e retroanalizadas no BackmeDiNa-Faixa da direita.....	83
Quadro 07- Módulos retroanalizados faixa da esquerda.	83
Quadro 08- Módulos retroanalizados faixa da direita.	83
Quadro 09- Módulos retroanalizados corrigidos faixa da esquerda	84
Quadro 10- Módulos retroanalizados corrigidos faixa da direita	84
Quadro 11- Relação modular faixa da esquerda.....	86
Quadro 12- Relação modular faixa da direita.....	86
Quadro 13- Tabela resumo de dimensionamento do reforço no pavimento pelo MeDiNa.....	96

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 01- Deflexão da Viga Benkelman obtidas por correlação com FWD e admissíveis pelo PRO11/79	82
Gráfico 02- Módulo de resiliência da faixa da esquerda	84
Gráfico 03- Módulo de resiliência da faixa da direita	85

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A - Afundamento
AASHTO - American Association of State Highway Officials
AC - Afundamento por consolidação
AEMC - Análise Elástica de Múltiplas Camadas
ALC - Afundamento localizado por consolidação
ALP - Afundamentos localizado plásticos
AMP - asfalto modificado por polímeros
AP - Afundamentos plásticos
ATC - Afundamento de trilhas de roda por consolidação
ATP - Afundamentos longitudinal nas trilhas de roda
ATR - Afundamento na trilha de roda
CAP - Cimento Asfáltico de Petróleo
CBUQ - Concreto Usinado a Quente
CNT - Confederação Nacional do Transporte
D - Desgaste ou desagregação
 D_{adm} - Deflexão admissível
 D_c - Deflexão Característica
 D_{FWD} - Deflexão obtida pelo FWD
 D_m - Deflexão média
 D_{max} - Deflexão máxima
 D_{min} - Deflexão mínima
DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
EX – Exsudação
F - Fendas
FI - Fissura
Foap - Frequência do conjunto de deformações
Fp - Fator de ponderação
Fpr - Frequência do conjunto de painéis e remendos
Fr - Frequência relativa
Ft - Frequência do conjunto de trincas t
FV - Fator de Veículo
FWD - Falling Weight Deflectometer
ICPF - Índice de Condição dos Pavimentos Flexíveis
IES - Índice de Estado de Superfície
IG - Índice de Grupo
IGG - Índice de Gravidade Global
IGGE - Índice de Gravidade Global Expedito
IGI - Índice de Gravidade Individual
IPR - Instituto de Pesquisas Rodoviárias
IRI - International Roughness Index
J - Trincas tipo couro de jacaré
JE - Trincas tipo couro de jacaré com erosão

LL-Limite de Liquidez
LP - Limite de Plasticidade
LVC - Levantamento Visual Continuo
MR - Módulo de Resiliência
N - Número de aplicações de carga na ruptura, no fim do ensaio.
NBR - Normas Técnicas Brasileiras
O - Corrugação e ondulações transversais
P - Panela ou buraco
PCI - Pavement Concdition
PCS - *Pavimento* de concreto simples
PMA - Polymer modified asphalts
PMF - Pré-Misturado a Frio
PSI - Pavement Service Index
R - Remendos
SH - Segmento Homogêneo
TB - Trincas de bloco
TBE - Trincas de bloco com erosão
TCU - Tribunal de Contas da União
TLC - Trincas longitudinais curtas
TLL - Trincas longitudinais longas
TRR - Trincas de retração
TTC - Trincas transversais curtas
TTL - Trincas transversais longas
UFCG - Universidade Federal de Campina Grande
UFRJ - Universidade Federal do Rio de Janeiro
USACE - United States of America Corp of Enineers
VMD - Volume Médio Diário
VMDA - Volume Médio Diário Anual
VSA - Valor de Serventia Atual

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	18
2 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA	21
3 OBJETIVOS	22
3.1 Objetivo geral	22
3.2 Objetivos específicos	22
4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
4.1 História da pavimentação	23
4.2 Pavimento	24
4.3 Estrutura do pavimento flexível	25
4.3.1 Subleito.....	25
4.3.2 Reforço do subleito.....	25
4.3.3 Sub-base	26
4.3.4 Base	26
4.3.5 Revestimento asfáltico.....	26
4.4 Materiais empregados na pavimentação	26
4.4.1 Solo.....	27
4.4.2 Agregado	28
4.4.2.1 Quanto a natureza.....	28
4.4.2.2 Quanto ao tamanho.....	29
4.4.2.3 Quanto a sua distribuição	29
4.4.3 Betume.....	31
4.5 Carregamentos em pavimentos flexíveis.....	32
4.6 Avaliação de pavimentos flexíveis	33
4.6.1 Avaliação subjetiva.....	34
4.6.3 Avaliação objetiva	36
4.6.3.1 Índice de avaliação superficial	37
4.6.3.2 Causas dos defeitos	37
4.6.3.3 Tipos de defeitos	38
4.6.4 Avaliação estrutural dos pavimentos.....	43
4.6.5 Avaliação estrutural por ensaios destrutivos	44
4.6.6 Avaliação estrutural por ensaios não destrutivos	45

4.6.7	Equipamento por impacto <i>Falling Weight Deflectometer</i> (FWD)	45
4.7	Correlação entre FWD e Viga Benkelman	48
4.8	Módulo de resiliência(MR)	49
4.9	Retroanálise	49
4.9.1	Métodos de retroanálise.....	51
4.9.1.1	Fatores que influenciam no processo de retroanálise.....	52
4.9.1.2	Efeitos dos dados de entrada	52
4.9.1.3	Efeitos das variações nas espessuras das camadas do pavimento.....	53
4.9.1.4	Efeito do comportamento de não linearidade.....	53
4.9.1.5	Oxidação e deterioração das camadas do revestimento asfáltico.....	53
4.9.1.6	Camada rígida	54
4.9.1.7	Efeito da sucção e do grau de saturação.....	55
4.10	Métodos mecanísticos-empíricos	55
4.10.1	MeDiNa – Método de Dimensionamento Nacional.....	55
4.11	Dimensionamento de reforços no pavimento	58
5	MATERIAIS E MÉTODOS.....	60
5.1	Características da região da rodovia.....	60
5.1.1	Localização.....	60
5.1.2	Localização da BR230.....	60
5.2	Características da rodovia estudada.....	61
5.2.1	Localização do Trecho.....	62
5.2.2	Divisão dos segmentos homogêneos	65
5.2.3	Tráfego.....	66
5.2.4	Características dos materiais utilizados na pavimentação.....	68
5.2.5	Característica dos defeitos no trecho estudado.....	68
5.2.6	Levantamento Deflectométrico com o <i>Falling Weight Deflectometer</i>	69
5.3	METODOLOGIA.....	70
5.3.1	Ajuste das Bacias Deflectométricas	701
5.3.2	Retroanálise	72
5.3.3	Correção dos Módulos de Resiliência com Relação a Temperatura	74
5.3.4	Análise Mecanística-empírica da Estrutura do Pavimento Retroanalisado.....	75
5.3.5	Proposta de reforço do pavimento existente.....	76
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES	80

6.1	Avaliação das deflexões obtidas.....	80
6.2	Retroanálise das camadas do pavimento	82
6.3	Análise Mecânica-empírica da Estrutura do Pavimento Retroanalisado.....	87
6.4	Proposta de Reforço do Pavimento Existente.....	88
7	CONCLUSÕES	97
	REFERÊNCIAS	98

1 INTRODUÇÃO

Atualmente verifica-se que de 1.720.700 km das rodovias brasileiras, apenas 213.453 km são pavimentados, correspondendo a 12,4% das rodovias federais e os principais trechos estaduais no Brasil. Tendo 59% da sua extensão com problemas nos pavimentos da rodovia, deficiência essa que são percebidas antes mesmo do tempo máximo de duração estabelecida pelo projeto (BECKERT, 2020).

Os danos mais perceptíveis em pavimentos flexíveis são o trincamento e o afundamento na trilha de roda (ATR) (SILVA, 2021). Esses defeitos são predominantes devido ao método de dimensionamento empregado, denominado método do DNIT, que é fundamentada na capacidade do solo do subleito para limitar a deformação da estrutura como um todo (CAVALCANTE, 2005).

A engenharia de pavimentos busca melhores formas de solucionar esses defeitos, através de avaliação estrutural das suas camadas, descrevendo dessa forma o comportamento mecânico da estrutura e verificando a integridade dos materiais que constituem as camadas. Este procedimento pode ser realizado por meio de processos destrutivos e não destrutivos (MARTINS, 2018).

Os ensaios não destrutivos provocam menos interrupções no tráfego que ensaios destrutivos, além de não causarem danos na estrutura existente do pavimento. Esses processos são baseados na determinação da deformação elástica a partir de uma simulação dinâmica do tráfego característico (BUENO, 2016).

Em conjunto com a avaliação estrutural, tem-se a avaliação da superfície. No Brasil, são adotadas técnicas subjetivas e objetivas de avaliação funcional de pavimentos, que incluem levantamentos visuais e catálogo de defeitos (VITORINO PEREIRA, 2021).

Para averiguar as condições de uma camada estrutural constituinte de um pavimento é importante o conhecimento da sua rigidez. Desta forma, destaca-se o controle em campo da deformação elástica frente à ação do carregamento do tráfego, representada pelo deslocamento vertical na superfície. Chamada de deflexão, varia ao longo da vida útil do pavimento e intensificada com o tempo e com as passagens dos veículos (COSTA, 2017).

Os ensaios não destrutivos podem ser realizados por uma variedade de equipamentos, que possibilitam a medição dos deslocamentos *in-situ* proporcionados pela simulação do tráfego. No Brasil, um equipamento comumente utilizado é o *Falling Weight Deflectometer* (FWD), o qual é aplicado para obtenção das medidas deflectométricas para determinação dos

módulos de elasticidade retroanalizados, que são critérios de conferência ou de concepção de projetos (PANDOLFO, 2016).

Com o FWD, podem ser obtidos os seguintes parâmetros: deflexão máxima, raio de curvatura e bacia de deflexão. De forma simplificada, a deflexão máxima é bastante utilizada para verificar a compactação e drenagem adequadas das camadas estruturais do pavimento, o raio de curvatura é utilizado para análise da qualidade estrutural do pavimento e a bacia de deflexão permite analisar as condições de rigidez de todas as camadas presentes na configuração do pavimento (PANDOLFO, 2016).

Com dados obtidos através desse ensaio e mediante retroanálises, é possível descrever por meio de processos interativos, uma bacia deflectométrica teórica. Desta forma é possível obter o módulo de resiliência das camadas do pavimento estudado, o qual permite analisar as condições de rigidez de todas as camadas presentes na configuração do pavimento (COSTA, 2017).

A retroanálise é um processo e pode variar com a interpretação dos resultados. Com isso foram desenvolvidos programas, tornando o processo de análise mais preciso e prático, para ajuste das curvas medidas e calculadas. Dentre estes programas, destacam-se os mais difundidos BAKFAA e Evercalc, além do recente BackMeDiNa (MARTINS, 2018).

Após a avaliação é ponderado se deve haver intervenção no pavimento, seja ela, uma restauração ou reconstrução. Os pavimentos são projetados para atenderem um certo período de duração, que se inicia numa condição operacional “ótima”, e ao longo da sua vida útil há um decréscimo desta condição, o qual se denomina deterioração (VITORINO PEREIRA, 2021).

A intervenção serve para recuperar a serventia do pavimento, até onde não seja mais possível a recuperação, momento em que é sugerido uma reconstrução. A determinação das espessuras das camadas, seja ele de reforço ou de reconstrução, é feita por métodos de dimensionamento, o qual visa garantir que o pavimento não venha a romper durante seu tempo de serventia (VITORINO PEREIRA, 2021).

Atualmente o método mecanístico-empírico nacional de dimensionamento de pavimentos (MeDiNa – Método de dimensionamento Nacional), vem tomando maior enfoque por ser um método que propõe avaliar o comportamento mecânico em função do carregamento e da resistência dos materiais, além de levar em consideração as diferentes condições climáticas do Brasil e as condições de umidade (PITANGUI, 2019).

Neste contexto, o objetivo do presente trabalho foi realizar a retroanálise, para isso, utilizou-se o software BackMeDiNa, de bacias de deflexão obtidas na base de um trecho experimental de rodovia utilizando o FWD, visando estimar os módulos de resiliência das

camadas, propondo assim uma solução de intervenção, com o auxílio do método dimensionamento nacional, que venha a solucionar os problemas constatado no pavimento.

2 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA

Diversos problemas apresentados pelos pavimentos podem estar relacionados com a incompatibilidade de rigidez das camadas do pavimento. A existência de trechos deficientes na maior parte das rodovias deixa evidente a necessidade de grandes volumes de investimentos para recuperação adequada das rodovias existentes.

Segundo um relatório realizado pelo TCU (Tribunal de Contas da União) em 2013, o qual avaliou a qualidade de serviço em rodovias sob a gerência do DNIT (Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte), 9 de 11 rodovias apresentaram algum defeito na sua estrutura. Vale ressaltar que essas rodovias só tinham 7 meses de uso, e já apresentavam deformações permanentes, trincas e fissuras (CNT,2017).

Desse modo, esse trabalho visa realizar análise de um trecho rodoviário e avaliar pela metodologia mecanístico-empírico das camadas do pavimento a fim de solucionar problemas prematuros, que acabam por vir a diminuir a vida útil do pavimento, com isso propor uma solução de intervenção caso necessário.

3 OBJETIVOS

3.1 Objetivo geral

Avaliar influência dos módulos de resiliência das camadas do pavimento de três trechos homogêneos da rodovia BR-230, por meio de uma avaliação estrutural, e propor uma solução para reestabelecer as condições do pavimento estudado, utilizando metodologia mecanístico-empírico dimensionamento de reforço e de pavimentos novos com enfoque no MeDiNa - Método de Dimensionamento Nacional.

3.2 Objetivos específicos

- Avaliar as deflexões obtidas por ensaio FWD;
- Determinar os módulos de resiliência das camadas do pavimento e subleito por meio de retroanálise das bacias de deflexões obtidas no levantamento de campo;
- Comparar os módulos de resiliência das faixas da direita e esquerda de rolamento, verificando também a relação modular entre revestimento e a camada de base;
- Proceder avaliação mecanístico-empírico do pavimento a partir dos módulos de resiliência obtidos por meio da retroanálise;
- Propor solução de intervenção que garanta o adequado desempenho da estrutura em termos funcional e estrutural.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 História da pavimentação

O primeiro acesso pavimentado foi construído pelos egípcios, cerca de 2500 a.C. O propósito era contribuir nas construções das grandes pirâmides. Entre 300 a. C e 200 d.C os romanos desenvolveram melhorias nas construções de estradas enfatizando ações militares e comerciais, e construíram cerca de 87.000,00 km de vias pavimentadas pela Europa e Bretanha (COUTINHO, 2011).

Assim como os romanos, outros povos também desenvolveram técnicas de construção de estradas objetivando o transporte de cargas e locomoção de pedestres. Dentre essas nações é importante fazer destaque a China, que criou a conhecida estrada da seda, hoje considerada por estudiosos como a estrada de rota comercial mais antiga e importante para a cultura asiática (PITANGUI, 2019).

Uma estrada que merece ser citada é a chamada via Ápia, criada em 312 a.C, que tinha como objetivo principal ligar Roma a Cápua, permitindo o acesso rápido ao exército romano a *Campania e Samnium* (PITANGUI, 2019).

Depois dos romanos a França começou a reconhecer os efeitos do transporte no comércio, dando importância a velocidade das viagens, voltando-se novamente para a construção e conservação das estradas. A partir disto, países, como Inglaterra a observar os efeitos das construções das estradas pelos franceses, conseguiram desenvolver vias mais cômodas, duráveis e velozes da Europa (MEZZOMO, 2015).

Acerca do Brasil, relatos indicam que as primeiras estradas construídas datam do início de 1560, e tratava-se de um caminho que ligava São Vicente ao Planalto Piratininga, ficando conhecida como a Estrada do Mar. O aprimoramento veio para suprir a necessidade de melhoria do transporte de café e do ouro das minas, favorecendo ainda a ligação por terra entre os estados de São Paulo, Rio de Janeiro e Minas Gerais (PITANGUI, 2019).

Com o desenvolvimento tecnológico na pavimentação pelo mundo, em 1940, observado durante a 2ª Guerra Mundial, instigou melhorias também no Brasil, que passou a estudar os métodos de dimensionamentos de pavimentos desenvolvidos e as melhores técnicas construtivas para a construção de vias pavimentadas (BERNUCCI *et al.*, 2006).

Ainda vale ressaltar que no ano de 1946, foi criado o Fundo Rodoviário Nacional (FRN), que teve a destinação específica de recursos para o desenvolvimento de estradas, somando a

isso também a criação da Petrobras disponibilizando diversos materiais para execução de pavimentos (PITANGUI, 2019).

4.2 Pavimento

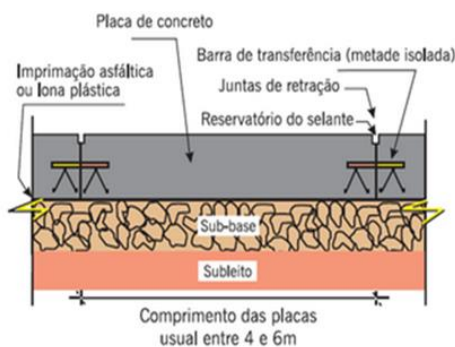
A estrutura do pavimento é composta por camadas de espessuras finitas, construída sobre a superfície final de terraplenagem. Tem como principal finalidade de resistir aos esforços oriundos do tráfego de veículos e do clima, propiciando aos usuários melhoria nas condições de rolamento, com conforto, economia e segurança (SILVA, 2018).

O pavimento pode ser classificado como: rígido, semirrígido e flexível. O pavimento rígido é aquele em que o revestimento é constituído por placas de concreto de cimento Portland (PCS), podendo ter armação ou não com barras de aço (Figura 1). Geralmente a estrutura das camadas disposta é subleito, sub-base e a placa de concreto. O dimensionamento da camada leva em conta esforços de tração na base da placa e atrito na superfície, o pavimento rígido pode apresentar uma duração de até 30 anos (SILVA, 2018).

Já o pavimento semirrígido tem uma estrutura composta por: revestimento, base cimentada, sub-Base granular, reforço do subleito e subleito, que são solicitados a tração. Diferente do pavimento flexível, no semirrígido o ligante asfáltico está presente em sua base, como o objetivo de alcançar maior rigidez que seja suficiente para as cargas de tráfego (SOUSA, 2020).

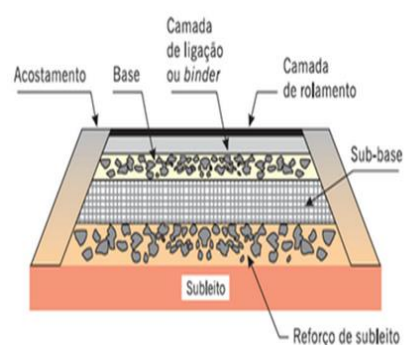
O pavimento flexível, segundo o manual de pavimentação do DNIT, são aqueles composto por uma camada superficial asfáltica (Figura 2). Esse pavimento geralmente é constituído por quatro camadas principais: revestimento asfáltico, base, sub-base e reforço do subleito. Tais camadas repousam sobre o subleito, que diz respeito ao terreno final a camada terraplanagem (FILHO, 2018).

Figura 1-Estrutura típica do pavimento rígido



Fonte: Bernucci *et al.*, 2006.

Figura 2-Estrutura típica do pavimento flexível.



Fonte: Bernucci *et al.*, 2006

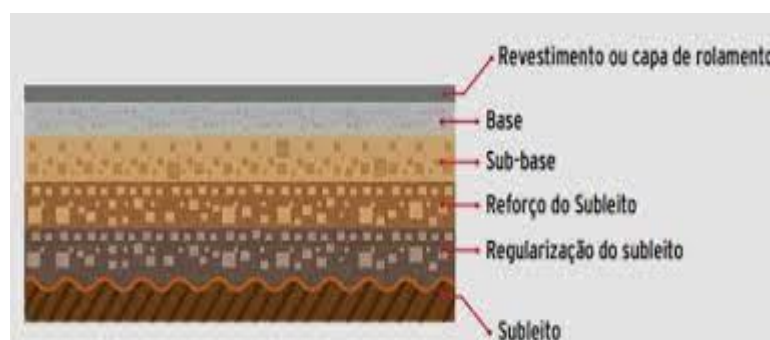
4.3 Estrutura do pavimento flexível

Os pavimentos flexíveis são aqueles que sofrem deformação elástica significativa gradativa ao longo das camadas, decorrente da carga do tráfego que se distribui em parcelas aproximadamente equivalentes entre as camadas. Portanto, as camadas do pavimentos são mais espessas a fim de proteger o subleito, para suportar a flexão gerada pelo carregamento (SILVA, 2020).

O dimensionamento de um pavimento tem como objetivo a distribuição das cargas aplicadas nas camadas, de modo a suavizar as pressões que chegam as camadas inferiores, tendo a diminuição da pressão aplicada pelo tráfego quanto mais profunda a camada. As camadas intermediárias são de qualidade inferior em comparação à qualidade das camadas superiores (MACCARINI; SILVA, 2020).

Pode-se classificar as camadas de pavimento em regularização do subleito, subleito, reforço do subleito, sub-base, base e revestimento asfáltico. A Figura 3 a seguir expõe o supracitado.

Figura 3-Estrutura típica do pavimento flexível.



Fonte: CNT, 2017.

4.3.1 Subleito

O subleito é o terreno natural de fundação em que é apoiado o pavimento, quando o terreno não oferece uma resistência adequado é realizada uma substituição desse material por um mais resistente. Tem como principal função absorver as cargas estática e dinâmicas do tráfego de veículos, onde é formado por material natural compactado, ou por material de empréstimo compactado (MEZZOMO, 2015).

4.3.2 Reforço do subleito

É uma camada opcional, que fica acima do subleito, que tem como função de complemento de sub-base. Tem sua aplicação quando o subleito não tem capacidade suficiente para atender o dimensionamento, faz seu uso por questões econômicas pois quando empregados exigem camadas menos peças de base e sub-base que geralmente tem custos mais elevados. Vale ressaltar ainda que este material deve atender condições mínimas de qualidade, possuindo características superiores ao material empregado no subleito (SOUSA, 2020).

4.3.3 Sub-base

Camada corretiva do subleito, ou complementar à base. Os materiais dessa camada, podem ser os mesmos empregados na base desde que possuam características superiores às do material de reforço e inferiores às do material da base. Exerce função complementar da base, resistindo e distribuindo os esforços verticais, também pode desempenhar papel importante na drenagem superficial dos pavimentos (CNT, 2017).

4.3.4 Base

É uma camada destinada a resistir a esforços verticais do tráfego, dessa forma sua capacidade estrutural está relacionada às propriedades de resistência e rigidez dos materiais empregados. Pode ser executada de brita graduada simples e brita corrida, macadame hidráulico e a seco, brita graduada com cimento, dentre outros (MEZZOMO, 2015).

4.3.5 Revestimento asfáltico

É a camada que recebe diretamente a ação do rolamento dos veículos, sendo geralmente impermeável. É constituído por materiais betuminosos usinados a quente (CBUQ), pré misturado a quente (PMA) pré misturados a frio (PMF), dentre outros e tem como finalidade proporcionar, de forma econômica, condições de rolamento quanto a comodidade e segurança (SILVA, 2020).

4.4 Materiais empregados na pavimentação

Como contextualizado no tópico anterior, pavimentos são formados por camadas que interagem entre si garantindo as características estruturais solicitadas pelo tráfego de veículos.

Desta forma se faz necessário uma maior atenção na concepção dos materiais que serão utilizados na construção dos mesmos, a fim de se assegurar a eficiência e o correto funcionamento de acordo com o seu objetivo.

Cita-se enquanto materiais utilizados, os solos. À estes é ajuizado a possibilidade o suporte de cargas do tráfego de veículos. Os solos tanto podem ser aplicados na construção de base e sub-base, as quais compõe camadas do pavimento, sendo por isso pertinente estudos que viabilizem a utilização destes de construção de pavimentos (MEZZOMO, 2015).

O agregado também é um material constituinte do pavimento. Este material compõe-se de minerais inertes e pode ser utilizando tanto na sua forma bruta para compor as camadas de base e sub-base, assim como ligantes para a finalidade de compor as camadas mais nobres (SENÇO, 1997).

Como o agregado mineral compõe aproximadamente 95% de peso dos materiais constituintes de uma mistura betuminosa, resulta que as propriedades do agregado é o que implicará no comportamento e qualidade do produto final. Desta forma os agregados utilizados para compor o pavimento deve ter características tais que permitam suportar pressões provenientes do tráfego de veículos, sem sofrer danos que venham a comprometer a vida útil do pavimento (MEDEIROS, 2006).

Por fim, atuando como aglutinante, o betume que é aplicado como ligante na composição de revestimentos. É um material que apresenta propriedades flexíveis, impermeabilizantes e também uma boa aderência com os agregados (MEZZOMO, 2015).

4.4.1 Solo

Solo é qualquer material depositado, resultante da ação do intemperismo, degradação de rochas ou ainda da decomposição de vegetais. Podendo ser citados os sedimentos (pedregulhos, areias, siltes ou argilas), turfas, depósitos de calcários, entre outros (BALBO, 2007).

Os solos podem ser classificados de acordo com a definição dos limites granulométricos, ou seja quanto ao diâmetro dos grãos, tratando-se de uma classificação arbitrária que procura estabelecer padrões entre os solos (BALBO, 2011).

Tabela 1- Classificação dos solos pelo diâmetro.

Fração	Subdivisões	Diâmetro limite
Pedras		>76
	Graúdo	19 a 76

Pedregulhos	Miúdo	4,76 a 19
	Grossa	2 a 4,76
Areias	Media	0,42 a 2
	Fina	0,074 a 0,42
Siltes		0,074 a 0,002
Argilas		<0,002

Fonte: Balbo, 2007.

Para classificação do solo, com fins rodoviários, é utilizada a classificação HRB-AASHTO. É o sistema de classificação mais conhecido mundialmente, baseia-se na granulometria do solo, nos índices físicos, Limite de Liquidez (LL), Limite de Plasticidade (LP) e no Índice de Grupo (IG) (SASSO, 2018).

4.4.2 Agregado

Podem ser determinados como conjunto de grãos minerais que apresentam determinada dimensão. O qual podem ser classificados como natural ou artificial, britados ou não britados, são amplamente utilizados na construção civil para fabricação de argamassas, concreto asfáltico, misturas estabilizadas com ligante, entre outras (MEZZOMO, 2015).

As propriedades dos agregados dependem da composição geológica da rocha de origem. Desta forma tornasse importante caracterizar o material quanto a composição mineralógica, composição química, granulometria, seu grau de alteração, sua tendência de degradação, abrasão e o potencial de adesão do ligante asfáltico em sua superfície (BERNUCCI *et al.*, 2006).

A classificação dos agregados quanto a uso em pavimentação podem ser classificados em três grandes grupos, segundo sua natureza, tamanho e distribuição de grãos (BERNUCCI *et al.*, 2006).

4.4.2.1 Quanto a natureza

- **Natural:** são obtidos por processos convencionais de desmonte, escavação e dragagem. São exemplos pedregulhos, britas, seixos, as areias, entre outros. Resumindo, os agregados naturais são empregados na pavimentação na forma e tamanho que são encontrados na natureza, ou podem passar por processamento como a britagem (SILVA 2012).

- **Artificial:** são resíduos do processo industriais, tais como a escória de alto-forno e de aciaria. Podem também ser fabricados especificamente com o objetivo de alto desempenho, como argila calcinada e a argila expandida. O agregado mais comumente usados em pavimentação são do tipo escórias subprodutos da indústria do aço (SILVA 2012).
- **Reciclado:** são obtidos pelo reuso de materiais diversos. Por exemplo destaca-se a utilização de resíduo de construção civil em locais com ausência de agregados pétreos ou mesmo em áreas urbanas que possuam pedreiras, também podemos citar a reciclagem de revestimentos asfálticos existentes em alguns países, o qual já é a fonte principal de agregados (FERNANDES, 2004).

4.4.2.2 Quanto ao tamanho

A classificação quanto a tamanho do agregado, pode ser dividida em 4 denominações, graúdo, miúdo e o material de enchimento ou filer (DNIT, 2004).

- **Graúdo** - é o material com dimensões maiores do que 2,0mm, ou seja, retido na peneira no 10. Como exemplos, cita-se as britas, cascalhos e seixos.
- **Miúdo** - é o material com dimensões maiores que 0,075mm e menores que 2,0mm. É o material que é retido na peneira de no 200, mas que passa na de abertura no 10. São exemplos as areias e o pó de pedra.
- **Material de enchimento (fíler)** - é o material onde pelo menos 65% das partículas é menor que 0,075mm, correspondente à peneira de no 200, e.g., São exemplos a cal hidratada e o cimento Portland.

4.4.2.3 Quanto a sua distribuição

A forma como é distribuída a granulometria dos agregados é uma das principais características de comportamento dos revestimentos asfálticos. Para as misturas asfálticas, tem-se a ciência de que a granulometria do agregado resulta diretamente em características como rigidez, estabilidade, durabilidade e permeabilidade. Além disso, influencia também na resistência à fadiga, na deformação, e conseqüentemente na resistência por umidade (BERNUCCI et al., 2006).

A faixa granulométrica dos agregados é determinada por meio do processo de peneiramento. Nesse processo uma amostra de agregado é fracionada através de uma série de peneiras com aberturas de malha progressivamente menores, conforme ilustrado na Figura 4. Uma vez que uma porcentagem de partículas retida em cada peneira é determinada faz-se a comparação com a massa total da amostra, a distribuição é expressa como porcentagem de massa retida em cada malha (CUNHA, 2004).

Figura 4-Granulometria por peneiramento.



Fonte: Dynapac, 2021. Disponível em: <http://dynapac.blog/manual-de-compactacao-pavimentacao-e-fresagem/granulometria-consistencia-e-sedimentacao-o-que-voce-precisa-conhecer-para-obter-melhores-resultados-na-compactacao/?lang=pb>

Vista a importância da distribuição granulométrica dos agregados nas características físicas, a subdivisão da graduação em algumas classes auxilia na distinção de tipos de misturas asfálticas, como visualiza-se a seguir:

- Agregado de graduação densa ou bem-graduada é aquele que apresenta distribuição granulométrica contínua, próxima à de densidade máxima;
- Agregado de graduação aberta é aquele que apresenta distribuição granulométrica contínua, mas com insuficiência de material fino (menor que 0,075mm) para preencher os vazios entre as partículas maiores, resultando em maior volume de vazios. Nas frações de menor tamanho a curva granulométrica é abatida e próxima de zero;

- Agregado de graduação uniforme é aquele que apresenta a maioria de suas partículas com tamanhos em uma faixa bastante estreita. A curva granulométrica é bastante íngreme;
- Agregado com graduação com degrau ou descontínua é aquele que apresenta pequena porcentagem de agregados com tamanhos intermediários, formando um patamar na curva granulométrica correspondente às frações intermediárias. São agregados que devem ser adequadamente trabalhados quando em misturas asfálticas, pois são muito sensíveis à segregação (BERNUCCI *et al.*, 2006).

4.4.3 Betume

É um material amplamente utilizado na pavimentação de rodovias, proveniente da destilação do petróleo. É um material bastante complexo com uma grande variedade de compostos orgânicos e que tem a propriedade de ser um adesivo termoviscoplastico, impermeável à água e pouco reativo. Apesar da baixa reatividade química a muitos agentes, não evita que esse material possa sofrer um processo de envelhecimento por oxidação lenta pelo contato com o ar e a água (MENDONÇA *et al.*, 2020).

No Brasil utiliza-se a denominação CAP (Cimento Asfáltico de Petróleo) para designar esse produto semi-sólido a temperaturas baixas, viscoelástico à temperatura ambiente e líquido a altas temperaturas. Que se enquadra em limites de consistência para determinadas temperaturas estabelecidas, que estão especificadas na Tabela2 (BERNUCCI *et al.*, 2006).

Tabela 2-Classificação dos CAPs por penetração.

PAÍS	DUROS	MEDIOS	MOLES
Brasil	CAP 30/45	CAP 50/70, CAP 85/100	CAP 150/200
França	CAP 20/30	CAP 40/50, CAP 85/100	CAP 180/220
Eua	CAP 40/50	CAP 60/70, CAP 85/100	CAP 120/150, CAP 200/300

Fonte: Balbo, 2007.

A característica de termoviscoelasticidade desse material manifesta-se no comportamento mecânico, sendo suscetível à velocidade, ao tempo e à intensidade de carregamento, e à temperatura de serviço. O comportamento termoviscoelástico é mais comumente assumido do

que o termoviscoplastico, com suficiente aproximação do real comportamento do material (MENDONÇA *et al.*, 2020).

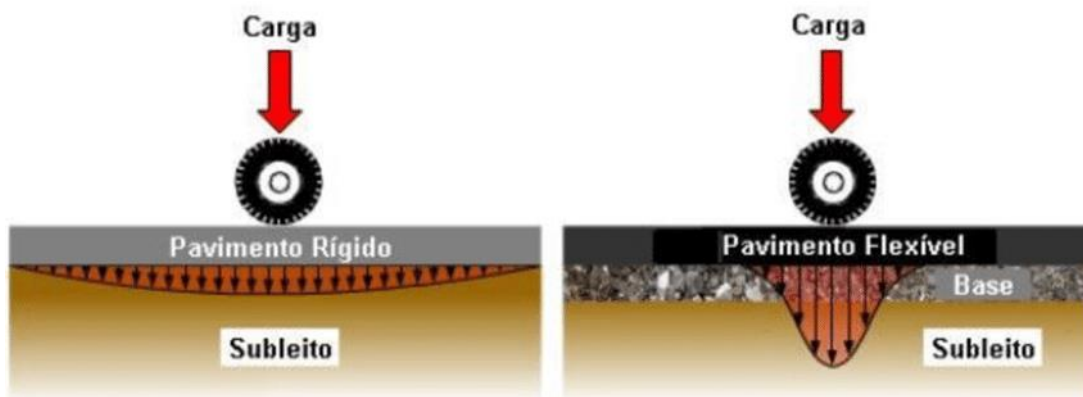
O CAP é um material quase totalmente solúvel em benzeno, tricloroetileno ou em bissulfeto de carbono, propriedade que será utilizada como um dos requisitos de especificação.

4.5 Carregamentos em pavimentos flexíveis

Um fator importante a ser considerado no dimensionamento de pavimentos é qual o carregamento empregado sobre a rodovia. São cargas móveis que desenvolvem na estrutura tensões cisalhantes, de compressão e de tração, geradas pela passagem dos eixos dos veículos (ZIEGLER, 2021).

A forma de distribuição dos carregamentos na estrutura difere nos pavimentos rígidos e flexíveis. Enquanto no rígido, devido sua elevada rigidez do revestimento em relação as demais camadas, possuem cargas de superfície distribuídas em uma grande área em relação a área de contato do pneu com o pavimento. Já nos pavimentos flexíveis, a rigidez do revestimento em relação as demais camadas não é tão elevada, dessa forma proporcionando uma maior transmissão das cargas para as camadas inferiores (BERNUCCI *et al.*, 2006).

Figura 5-Distribuição de cargas no pavimento rígido e flexível.



Fonte: Bernucci *et al.*, 2006.

Devido à maior distribuição de esforços entre as diferentes camadas dos pavimentos asfálticos, existe uma maior preocupação em definir as deflexões que propiciem uma melhor interação entre as mesmas. Esta metodologia é chamada de compatibilização de camadas e é amplamente utilizado para o dimensionamento dos pavimentos flexíveis nos dias atuais (ZIEGLER, 2021).

Para conhecimento do tipo de carregamento que atua no pavimento é necessário conhecer o tráfego. O processo de determinação do efeito do tráfego é um processo complexo, pois os

veículos apresentam diferentes tipos de configuração de eixo, a variação nos valores de carga por eixo e da pressão de inflação dos pneus, a variação de velocidades dos veículos, o efeito das condições ambientais e o comportamento dos materiais nas camadas do pavimento e do subleito (CAVALCANTE, 2005).

Segundo o Departamento Nacional de Estradas de Rodagem A avaliação de tráfego precisa da contabilização dos volumes de tráfegos, o qual considera um progressão da série histórica de veículos em transito na via em análise, a projeção futura de tráfego, o período de projeto e a taxa de crescimento.

O valor característico resultante da contagem de veículos, por tipo, é o Volume Médio Diário Anual (VMD ou VMDA). Juntos, os parâmetros de volume e tipificação da frota, VMD e FV, respectivamente, geram um dado importante para o dimensionamento de estruturas de pavimentos: o número N que, conceitualmente, representa o número de repetições de carga do eixo padrão de 8,2 tf e pode ser expresso de acordo com a Equação 23 (DNIT, 2006):

$$N = 365 \times VMD \times FV$$

Onde:

N = nº de repetições da carga do eixo padrão de 8,2 t por ano considerado equivalente aos eixos dos veículos comerciais da frota circulante

VMD = Volume Médio Diário dos Veículos Comerciais por ano em um só sentido

FV = Fator de Veículo (Veículos Comerciais)

4.6 Avaliação de pavimentos flexíveis

As condições de conforto e segurança de um pavimento, está diretamente ligada a qualidade da superfície, portanto, a caracterização dos defeitos da superfície se tornar imprescindível para definição de mecanismos de manutenção, restauração ou reconstrução a serem adotados (MEDINA, 1994).

Assim, sabe-se que para se elaborar intervenções voltadas ao pavimento, se faz necessário o conhecimento das condições, e estas condições são obtidas por avaliações funcionais e estruturais, pelas quais consegue-se aferir conforto, segurança, custo do usuário, influência do meio ambiente e aspectos estáticos, além da resistência e deformabilidade das camadas do pavimento e subleito (VITORINO PEREIRA, 2021).

A avaliação funcional na superfície do pavimento é dividida em avaliação subjetiva e objetiva. A avaliação subjetiva é baseada nas ideias ou preferencias pessoais, relativas as condições de conforto e segurança ao trafego de uma rodovia, enquanto a avaliação objetiva é

o levantamento das ocorrências de defeitos aparentes na superfície do pavimento e a medida das deformações permanentes nas trilhas de roda (DNIT, 2006).

4.6.1 Avaliação subjetiva

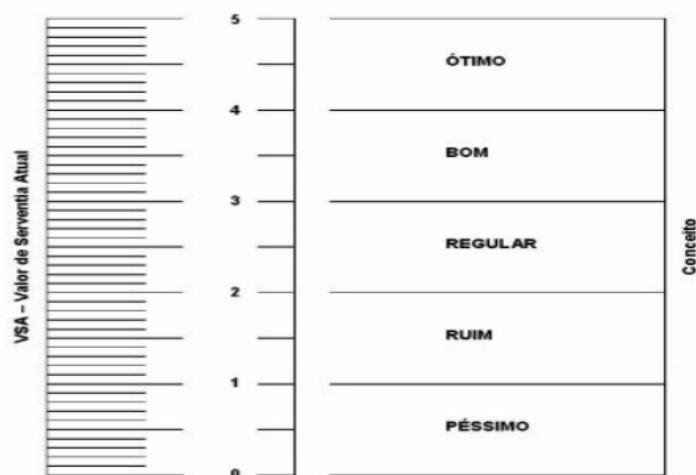
Para essa avaliação foram determinado 5 passos, segundo Carey & Irick (1960) que foram os precursores deste tipo de avaliação. São eles:

1. Estabelecimento de comitê de classificação.
2. Escolha das características da rodovia a serem consideradas.
3. Avaliação do campo amostral - número de seções de estrada que incluem uma ampla gama de cada uma das características selecionadas (isto é, muito a muito suave, sulcos profundos a não sulcos etc.)
4. Medições objetivas dos recursos considerados.

4.6.2 Determinação de um índice de capacidade de manutenção.

No Brasil, é adotado a norma DNIT 009/2003-PRO, o qual determina que um grupo de usuários constantes, previamente orientados e preparados para a avaliação, quantifique, em escala de 0 a 5, um Valor de Serventia Atual (VSA), conforme observado na Figura 6.

Figura 6-Escala de valores de serventia atual.



Fonte: DNIT 009/2003-PRO

A norma DNIT 009/2003-PRO ainda preconiza uma avaliação técnica subjetiva, o qual institui a metodologia de Levantamento Visual Continuo (LVC) para avaliação de pavimentos

flexíveis e semirrígidos. Esse procedimento, se baseia em realização do trajeto no interior de um veículo, com velocidade média de 30 a 40 km/h, registrando as irregularidades.

O produto desta avaliação é o Índice de Estado de Superfície (IES), calculado a partir do Índice de Gravidade Global Expedito (IGGE) e Índice de Condição dos Pavimentos Flexíveis (ICPF). Para a obtenção do IGGE, procede-se o cálculo conforme a equação abaixo.

$$IGGE = (F_t \times P_t) + (P_{oap} \times F_{oap}) + (P_{pr} \times F_{pr})$$

Onde:

Ft, Pt = Frequência e Peso do conjunto de trincas t;

Foap, Poap = Frequência e Peso do conjunto de deformações;

Fpr, Ppr = Frequência (quantidade por km) e Peso do conjunto de panelas e remendos.

Tabela 3-Fatores para cálculo de IGGE.

Panelas (P) e Remendos (R)			
Frequência	Fator Fpr		Gravidade
	Quantidade/k m		
A - ALTA	>5		3
M - MÉDIA	2 - 5		2
B - BAIXA	≤ 2		1
Demais defeitos (trincas, deformações)			
Frequência	Fator Ft e Foap		Gravidade
A - ALTA	>50		3
M - MÉDIA	50 -10		2
B - BAIXA	≤ 10		1
Pesos			
Gravidade	Pt	Poap	Ppr
3	0,65	1	1
2	0,45	0,7	0,8
1	0,3	0,6	0,7

Fonte: Adaptado de DNIT 009/2003-PRO

O ICPF é realizado conforme a avaliação visual do pavimento, onde varia de excelente a péssimo. Este índice se assemelha ao PSI adotado pela AASHTO e ao VSA adotado pela metodologia de avaliação subjetiva da norma DNIT 009/2003 – PRO (CAVALCANTE, 2005).

Tabela 4-Conceito e valor de ICPF.

Conceito	Descrição	ICPF
Excelente	Necessita apenas de conservação rotineira	4,5 - 5,0
Bom	Aplicação de micro revestimento - Desgaste superficial, trincas não muito severas em áreas não muito extensas	3,5 - 4,0
Regular	Correção de pontos localizados ou recapeamento - pavimento trincado com "painelas" pouco frequentes e com irregularidade longitudinal e/ou transversal	2,5 - 3,0
Mau	Recapeamento com correções prévias - defeitos generalizados com correções prévias em áreas localizadas - remendos superficiais profundos	1,5 - 2,0
Péssimo	Reconstrução - defeitos generalizados com correções prévias em toda a extensão. Deterioração do revestimento e das demais camadas - infiltração de água e descompactação	0,0 - 1,0

Fonte: Adaptado de DNIT 009/2003-PRO

Já o IES, apresentada pela norma DNIT 008/2003, o valor varia de 0 a 10 e cresce à medida em que se aumenta a ocorrência dos danos na superfície do segmento, como podemos analisar na Tabela 5 abaixo.

Tabela 5-Conceito e valor de IES.

DESCRIÇÃO	IES	CÓDIGO	CONCEITO
$IGGE \leq 20$ e $ICPF > 3,5$	0	A	Ótimo
$IGGE \leq 20$ e $ICPF \leq 3,5$	1	B	Bom
$20 \leq IGGE \leq 40$ e $ICPF > 3,5$	2		
$20 \leq IGGE \leq 40$ e $ICPF \leq 3,5$	3	C	Regular
$40 \leq IGGE \leq 60$ e $ICPF > 2,5$	4		
$40 \leq IGGE \leq 60$ e $ICPF \leq 2,5$	5	D	Ruim
$60 \leq IGGE \leq 90$ e $ICPF < 2,5$	7		
$60 \leq IGGE \leq 90$ e $ICPF \leq 2,5$	8	E	Péssimo
$IGGE > 90$	10		

Fonte: Adaptado de DNIT 008/2003

4.6.3 Avaliação objetiva

Os defeitos presentes na superfície do pavimento asfáltico são danos que podem ser identificados a olho nu e classificados seguindo a terminologia da norma do DNIT (DNIT

005/2003-TER-DNIT, 2003). Tal levantamento tem como finalidade avaliar o estado de conservação da superfície do pavimento para que seja aplicado um diagnóstico que venha a solucionar adequadamente os defeitos presentes (SILVA FILHO, 2019).

No Brasil o procedimento para avaliação objetiva é descrita pela norma DNIT 007/2003 – PRO. Define subtrechos homogêneos como segmentos de 100 m, para fins de avaliação de superfície, delimitada pelas bordas da faixa de tráfego e por duas seções transversais.

São avaliados defeitos tais como trincas, desgaste, panelas, remendos, escorregamentos, exsudação e corrugação. As flechas nas trincas são mensuradas e os afundamentos são classificados em plásticos ou de consolidação, em trilhas de roda ou locais (VITORINO PEREIRA, 2021).

4.6.3.1 Índice de avaliação superficial

Sabe-se da complexidade de classificação dos dados quando se fala em uso de índices para avaliação de danos de pavimentos, assim como detém-se do conhecimento sobre a importância em se aplicar melhores soluções de intervenção nos pavimentos.

Dentre esses índices podem ser citados o *Pavement Condition Index* (PCI), o *International Roughness Index* (IRI) ou Índice de Irregularidade Longitudinal, o *Pavement Service Index* (PSI), Índice de Gravidade Individual (IGI) e Índice de Gravidade Global (IGG), também são índices utilizados na avaliação objetiva de pavimentos (ALBUQUERQUE, 2017).

4.6.3.2 Causas dos defeitos

São diversos motivos que podem levar ao acontecimento de defeitos no pavimento, dentre eles destacam-se os seguintes fatores: erros ou inadequações construtivas; erros de projeto; erros ou inadequações nas alternativas de conservação e manutenção (SILVA FILHO, 2019).

Muitos erros de projeto estão relacionadas as dificuldades de prever o tráfego que atuará no período determinado do projeto. Também tem-se os erros na seleção de materiais para a dosagem e problemas no dimensionamento estrutural, tais como incompatibilidade estrutural entre as camadas gerando fadiga precoce do pavimento (BERNUCCI *et al.*, 2006).

Já os erros relacionados aos problemas construtivos, destacam-se as espessuras das camadas menores que as previstas em projeto. Além deste problemas, cita-se a compactação inadequada ou ainda a ausência da compactação das camadas. A compactação da mistura asfáltica em

temperaturas inadequadas também pode resultar em problemas, assim como erros nas taxas de imprimação ou de pintura de ligação (BERNUCCI *et al.*, 2006).

A inadequação da conservação e manutenção também podem causar novos defeitos, dentre essa relação podemos citar o uso de reforço de revestimento asfáltico com rigidez elevada sobre um pavimento muito trincado, provocando a reflexão de trincas precocemente, restauração com revestimentos permeáveis em áreas já trincadas, entre outros (SILVA FILHO, 2019).

4.6.3.3 Tipos de defeitos

A identificação dos defeitos presentes na superfície do pavimento são indicadores para cálculo de qualidade do pavimento (IGG) são as fendas (F); afundamento (A); corrugação e ondulações transversais (O); exsudação (EX); desgaste ou desagregação (D); panela ou buraco (P); e remendos (R).

As fendas são aberturas na superfície asfáltica e podem ser classificadas como fissuras, quando a abertura é perceptível a olho nu apenas a distância inferior a 1,5m, ou como trincas, quando a abertura é superior à da fissura (Figura 7). Pode ser classificada com relação a sua gravidade, como sendo, classe 1 (fendas com abertura não superior a 1mm), classe 2 (fendas com abertura superior a 1mm), e classe 3 (fendas com abertura superior a 1mm e desagregação ou erosão junto as bordas) (BERNUCCI *et al.*, 2006).

Quanto à tipologia, as trincas isoladas podem ser: transversais curtas (TTC) ou transversais longas (TTL), longitudinais curtas (TLC) ou longitudinais longas (TLL), ou ainda de retração (TRR). As trincas interligadas são subdivididas em: trincas de bloco (TB) quando tendem a uma regularidade geométrica, ou ainda (TBE) quando as trincas de bloco apresentam complementarmente erosão junto às suas bordas; ou trincas tipo couro de jacaré (J) quando não seguem um padrão de reflexão geométrico de trincas como as de bloco e são comumente derivadas da fadiga do revestimento asfáltico, ou ainda (JE) quando as trincas tipo couro de jacaré apresentam complementarmente erosão junto às suas bordas (BERNUCCI *et al.*, 2006).

Figura 7- Demonstração de fendas no pavimento.



Fonte: Dynatest,2004

O afundamento ocorre em decorrência das deformações permanentes no revestimento asfáltico ou em suas camadas inferiores (Figura 8). São classificados como, afundamento por consolidação (AC), quando as depressões ocorrem por densificação diferencial, podendo ser localizado (ALC) quando a extensão não supera 6m, ou longitudinal nas trilhas de roda (ATC) no caso que exceda 6m de extensão; ou afundamentos plásticos (AP), quando as depressões são decorrentes principalmente da fluência do revestimento asfáltico, podendo ser localizado (ALP) ou longitudinal nas trilhas de roda (ATP) (CNT, 2017).

Figura 8- Demonstração de Afundamento no pavimento.



Fonte: Espíndola, 2017.

A corrugações e ondulações (O) são deformações transversais ao eixo da pista de caráter plástico e permanente (Figura 9). A diferença entre as deformações está na diferença no comprimento de onda entre duas cristas da ordem de metros, geralmente causadas pela instabilidade da mistura asfáltica ou pelo excesso de umidade nas camadas, (SILVA,2005).

Figura 9- Demonstração de corrugações no pavimento.



Fonte: Canteiro de Engenharia, 2021. Disponível em: <https://canteirodeengenharia.com.br/2019/07/03/defeitos-em-pavimentos/>

A exsudação (EX) é causada pelo o excesso de ligante betuminoso na superfície, no qual ocorre migração do ligante produzindo manchas escurecidas (Figura 10) (SILVA, 2005).

Figura 10- Demonstração de exsudação no pavimento.



Fonte: Canteiro de Engenharia, 2021. Disponível em: <https://canteirodeengenharia.com.br/2019/07/03/defeitos-em-pavimentos/>

O Desgaste (D) é o desprendimento progressivo do agregado do pavimento, é causado pelo esforços do tráfego e pelo intemperismo (Figura 11) (DNIT, 2003).

Figura 11- Demonstração de Desgaste no pavimento.



Fonte: Bernardes, 2015.

A panela (P) é uma cavidade formada inicialmente no revestimento asfáltico, podendo ou não atingir camadas inferiores (Figura 12). É um defeito que ocorre devido à falta de aderência entre camadas, também podendo ser causada pela evolução de outros defeitos como trincas, afundamentos e desgastes no pavimento (DNIT, 2003).

Figura 12- Demonstração de panela no pavimento.



Fonte: Gomes, 2018.

O remendo (R) são preenchimentos de panelas ou depressões, é um tipo de defeito, que apesar de estar relacionado a uma conservação da superfície, aponta um local de fragilidade e também provoca desconforto ao rolamento (Figura 13) (CNT, 2017).

Figura 13- Demonstração de remendo no pavimento.



Fonte: Gomes, 2018.

Estes defeitos são quantificados, como frequência absoluta e, em seguida, relativizados em função do número de estações inventariadas, conforme equação abaixo.

$$fr = \frac{fa \times 100}{n}$$

Onde:

fr – frequência relativa

fa – frequência absoluta

n – número de estações inventariadas

Para os defeitos é atribuído um fator de ponderação por tipo, para enfatizar aqueles que mais afetam o desempenho do pavimento. Estes fatores, cujos valores são apresentados na tabela abaixo, são aplicados na equação, que trata do cálculo do Índice de Gravidade Individual, explicitado abaixo.

Tabela 6- Fatores de ponderação.

GRUPO	SÍMBOLO	FP
1	FI, TTC, TTL, TLC, TU, TLL, TRR (FC-1)	0,2
2	J (Couro de jacaré), TB (Trincas em bloco) (FC-2)	0,5
3	JE, TBE (FC-3)	0,8
4	ALP (Afundamento plástico local), ATP (trilha de roda)	0,9
5	O (Corrugação), P (Panela)	1
6	EX (Exsudação)	0,5
7	D (Desgaste)	0,3
8	R (Remendo Superficial ou profundo)	0,6

Fonte: Adaptado de DNIT 006/2003 – PRO

$$IGI = fr \times fp$$

Sendo:

fr – a frequência relativa obtida por meio da equação (i)

fp – fator de ponderação.

O IGG é, portanto, o somatório dos IGI's, que classifica a condição do pavimento do conceito que vai de ótimo a péssimo, como está definido na Tabela 7 abaixo.

Tabela 7- Classificação das condições do pavimento pelo IGG.

CONCEITO	LIMITES
Ótimo	$0 < IGG \leq 20$
Bom	$20 < IGG \leq 40$
Regular	$40 < IGG \leq 80$
Ruim	$80 < IGG \leq 160$
Péssimo	$IGG > 160$

Fonte: Adaptado de DNIT 006/2003 – PRO

4.6.4 Avaliação estrutural dos pavimentos

A avaliação estrutural é uma descrição objetiva do comportamento, em face das cargas do tráfego e ambientais, que caracteriza devidamente a capacidade das camadas do pavimento de resistir às deformações elásticas e plásticas. O comportamento da estrutura do pavimento depende das espessuras das camadas, do material e como essas camadas interagem entre si (COSTA, 2017).

4.6.5 Avaliação estrutural por ensaios destrutivos

Métodos de ensaios destrutivos baseiam-se na retirada de uma amostra, executado com auxílio de abertura de trincheira ou poços de sondagem, para que sejam realizados ensaios laboratoriais que demonstrem a capacidade de carga *in loco* (SILVA, 2020).

Essa avaliação pode ser realizada por meio de processos mecânicos ou manuais, onde permite também a verificação das espessuras, condições dos materiais, possíveis deformações entre camadas e condições de umidade, obtendo uma caracterização completa da estrutura do pavimento (BERNUCCI *et al.*, 2006).

Figura 14- Remoção de corpo de prova.



Fonte: Bernucci *et al.*, 2006.

Figura 15- Abertura de poço de inspeção para investigação do solo.



Fonte: Bernucci *et al.*, 2006.

4.6.6 Avaliação estrutural por ensaios não destrutivos

Métodos de ensaio não destrutivos em sua totalidade são baseados na aplicação de uma carga que simulem o tráfego, sejam carregamentos estáticos ou dinâmicos, a fim de obter as deformações recuperáveis de estrutura do pavimento. Esse método é caracterizado por possibilitar a avaliação das condições estruturais do pavimento sem danificá-lo e sem demandar muito tempo ou mão de obra, tornando-o o método mais adequado para ser feita em grandes extensões da rodovia (NASCIMENTO, 2017).

Os equipamentos mais utilizados para medição das deflexões podem ser divididos como: carregamento quase-estático, carregamento vibratório e carregamento por impacto. Dentre os equipamentos mais utilizados no Brasil, pode ser citado a *Viga Benkelman* e *Falling Weight Deflectometer*, com esses equipamentos podem ser realizadas medições dos parâmetros abaixo conforme Costa (2017) ensina.

1. Deflexão máxima: deslocamento sob o centro da carga (FWD) ou sob o centro das rodas duplas de um eixo simples (*viga Benkelman*), sendo a deflexão normalmente expressa em 10-2mm (d0).
2. Raio de curvatura: círculo ou arco de parábola que passa por dois pontos da deformada (*viga Benkelman*), normalmente sob a carga e a 25cm do centro da mesma (d0 e d25).
3. Deformada, bacia de deformação ou bacia deflectométrica: medidas dos deslocamentos elásticos ou recuperáveis em vários pontos a partir do centro do carregamento (d0, d25, d50 etc.)

4.6.7 Equipamento por impacto *Falling Weight Deflectometer* (FWD)

É um equipamento dinâmico que funciona por impacto, de forma resumida, ocorre por uma queda de um peso a uma certa altura, sobre amortecedores que transmitiram a força aplicada a uma placa contendo geofones, apoiada sobre uma superfície do pavimento (SILVA, 2020).

O FWD também é um equipamento totalmente automatizado, que é rebocado por um veículo que carrega parte do sistema de aquisição de dados realizadas por computador, conectado aos sensores instalados na parte rebocada (NASCIMENTO, 2017).

As deflexões dos pavimentos asfálticos ensaiado varia muito com as características da estrutura, o tipo de revestimento, o nível de trincamento, as condições climáticas, entre outros. Com a obtenção das bacias deflectométricas obtidas por meio do equipamento FWD, pode-se estimar os módulos de elasticidade das camadas.

Vale ressaltar que esse equipamento é amplamente utilizado para concepção de projetos de restauração de pavimentos rodoviários, urbanos e aeroportuários. A partir disso pode ver a importância para controle de qualidade e implantação de sistemas de análise do comportamento dos pavimentos durante sua vida útil (CAVALCANTE 2005). Isto é possível através da técnica chamada de retroanálise, que será discutida no próximo tópico.

Segundo Bernucci *et al.*, (2006), o FWD possui as seguintes vantagens em relação à viga Benkelmen convencional:

- acurácia nas medições;
- possibilidade de aplicação de vários níveis de carga;
- maior produtividade (mais pontos levantados por dia);
- ensaio não influenciado pelo operador;
- registro automático de temperatura e de distâncias dos pontos de ensaio.

Algumas desvantagens para Bernucci *et al.*, (2006), são:

- custo do equipamento;
- necessidade de calibrações mais sofisticadas;
- diferenças de resultados entre marcas.

Figura 16- FWD KUAB.

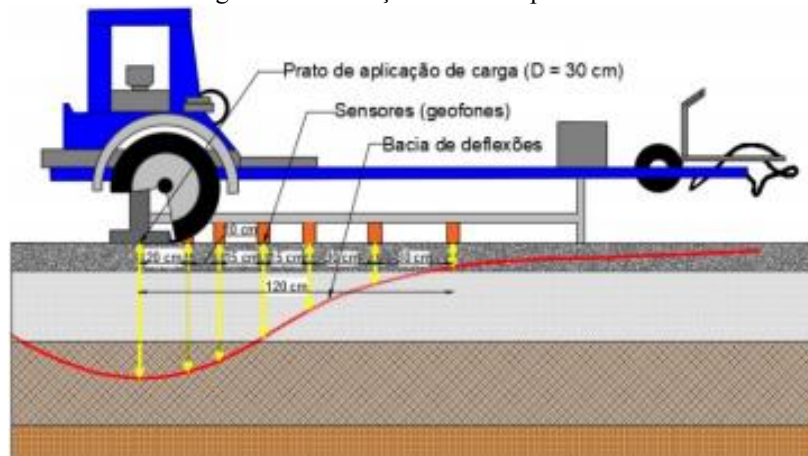


Fonte: Cavalcante, 2005.

Figura 17- Vista geral do FWD.

Fonte: Bernucci *et al.*, 2006.

Figura 18- Ilustração de ensaio por FDW.



Fonte: Balbo, 2007.

4.7 Correlação entre FWD e Viga Benkelman

Mesmo que a forma de obtenção dos levantamentos deflectométricos tenham evoluído, os procedimentos de avaliação estrutural de pavimentos flexíveis não acompanharam essa evolução para determinação de deflexões admissíveis medidas com viga Benkelman (ECHEVERRIA,2011).

Diante disto, se faz necessário a criação de correlações entre deflexões recuperáveis medidas por ensaios com Viga e com FDW, pois é possível a validação de medidas de deflexão do ensaio de FDW, nos métodos atuais de projeto de restauração, nos sistemas de gerência de pavimentos e no modelo HDM (Highway Development and Management) proposto pelo Banco Mundial (BORGES, 2001).

Por meio de correlações de dados de projetos realizados pelo DNIT, das determinações do sistema de gerenciamento de pavimentos do IPR – DNIT, dos ensaios realizados no trecho Torres o Osório da BR-101/RS pela Dynatest e ECL para o DNIT e dos estudos de Pinto (1991); foram adotadas no Manual de Restauração de Pavimentos (DNIT, 2006). As Equações obtidas e os coeficientes de significância constam na Tabela 8.

Tabela 8- Correlações entre Viga e FDW.

AUTOR	EQUAÇÃO	R ²	
Himeno et al. (1989)	$D_{FWD} = 0,309D_{VB} + 0,280$	0,57	
Pinto (1991)	$D_{VB} = -5,73 + 1,396D_{FWD}$	0,94	
Fabício et al. (1996)	$P/D_{FWD} < 85 \times 10^{-2} \text{ mm}$	$D_{VB} = 20,645(D_{FWD} - 19)^{0,351}$	0,952
	$P/D_{FWD} > 85 \times 10^{-2} \text{ mm}$	$D_{VB} = 8,964(D_{FWD} - 60)^{0,715}$	0,933

4.8 Módulo de resiliência(MR)

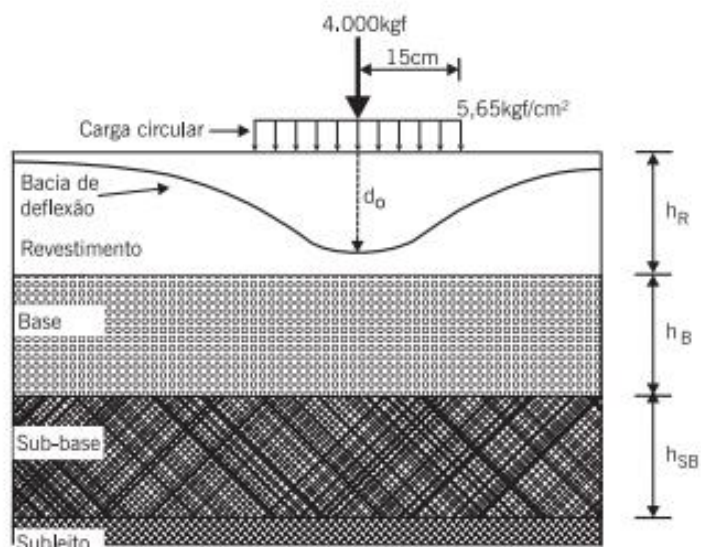
O módulo de resiliência pode ser descrito como a razão entre a tensão aplicada(σ) em um material e sua deformação recuperável(ϵ). Para misturas asfálticas, pode ser obtido pelo ensaio de compressão diametral e em materiais das subcamadas por meio do ensaio triaxial dinâmico (SOARES,2003). Outra forma de obtenção dos MRs é por meio da retroanálise mais discutido no tópico a seguir.

4.9 Retroanálise em Pavimentação

A retroanálise é um processo que permite a determinação dos módulos de resiliência das camadas do pavimento e do subleito nas condições reais, pela interpretação da magnitude e forma das bacias deflectométricas. Essa técnica leva em consideração as espessuras das camadas, os coeficientes de poisson e os módulos de elasticidade inicial dos materiais empregados (CAVALCANTE 2005).

Em termos práticos, a obtenção dos módulos de elasticidade das camadas do pavimento e do subleito, por meio da técnica de retroanálise, permite um melhor entendimento das condições estruturais do pavimento in situ. Auxiliando dessa forma verificações de qualidade para liberações de serviços de pavimentação, melhores diagnósticos para manutenção e restaurações (NASCIMENTO, 2017).

Figura 19- Dados necessários para realização da retroanálise.



Fonte: Bernucci *et al.*, 2006.

Tabela 9- Coeficientes de Poisson.

Material	Coeficientes(μ)	Adotado
CBUQ	0,15 a 0,45	0,30
Base e Sub-base granular	0,30 a 0,40	0,35
Subleito	0,30 a 0,50	0,45

Fonte: Brasil, 2006 (p. 272).

Segundo Albernaz *et al.*, (1996) e Preussler *et al.*, (2000), a retroanálise dos módulos de resiliência de um pavimento apresenta as seguintes vantagens em relação a outros processos de avaliação:

- Representação do estado real da estrutura;
- A necessidade de se obter os módulos elásticos dos materiais nas reais condições de campo, de difícil reprodução em laboratório;
- Rapidez e acurácia na caracterização das propriedades elástica das camadas do pavimento;
- Eliminar ou pelo menos, minimizar a necessidade de onerosas e perigosas coletas de amostras na pista (avaliação destrutiva);
- Redução de gastos.

Segundo Bernucci *et al.*, (2006), as desvantagens de obtenção dos módulos de elasticidade por retroanálise são:

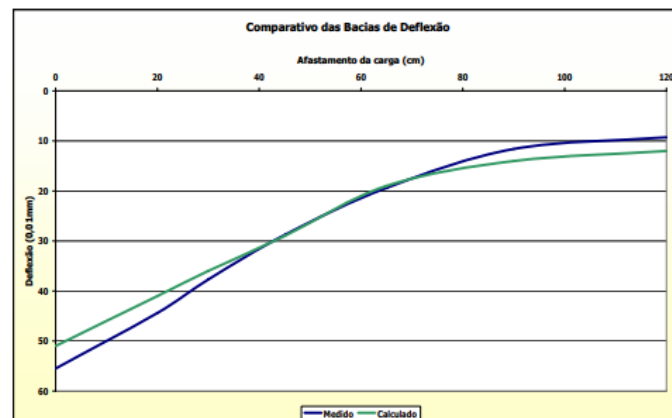
- A sensibilidade do cálculo dos valores dos módulos de elasticidade aos valores das bacias deflectométricas que possuem uma imprecisão inerente aos levantamentos de campo;
- A confiabilidade dos instrumentos e dos procedimentos operacionais de medição das deflexões deve ser continuamente verificada;
- Os módulos de elasticidade retroanalizados não representam necessariamente os módulos reais dos materiais das camadas e sim “módulos equivalentes” (igualdade depende de diversos fatores, como por exemplo número de camadas, grau de trincamento, homogeneidade de material e regularidade de espessura);
- O conjunto de módulos retroanalizados não é único, depende do programa utilizado para obtê-los, das hipóteses simplificadoras, dos níveis de ajustes atingidos etc.

4.9.1 Métodos de retroanálise

Os métodos de retroanálisesão divididos em iterativos e simplificados. Os métodos iterativos são baseados na obtenção dos módulos de todas as camadas constituintes do pavimento, definidos com o auxílio de programas computacionais (CAVALCANTE, 2005). Onde compara os dados referentes as deflexões medidas em campo com as entre bacia de deflexões teórica (calculada) Para a obtenção dos módulos de cada uma das camadas (PREUSSLER *et al.*, 2000).

De forma simplificada, quando a coincidência de bacias ou quanto mais próximos, pode-se dizer que os módulos retroanalizados sejam os módulos de resiliência em resposta ao carregamento de sistemas estruturados, pois a deformação total da estrutura é composta basicamente pelos deslocamentos particulares de cada material constituinte da estrutura, relacionada às características de rigidez das mesmas (PREUSSLER *et al.*, 2000).

Figura 20- Comparativo das bacias de deflexão obtida em campo e retroanalisada.



Fonte: Preussler *et al.*, 2000.

Já os métodos simplificados os módulos são determinados pela aplicação direta de equações, tabelas, gráficos e entre outros transformando a estrutura real em uma estrutura equivalente mais simplificada. Este método baseia-se na Teoria da Elasticidade aplicada aos meios homogêneos, isotrópicos e linearmente elásticos (SILVA, 2020).

O procedimento usual é converter um sistema multicamadas em um sistema equivalente mais simples, geralmente duas ou três camadas, incluindo o subleito da estrada. Essa simplificação faz com que haja perda de precisão, mas tem um processamento aprimorado, principalmente para pesquisas preliminares e pré-projetos. Os métodos de Aashto (1993),

Noureldin (1993), Fabrício *et al.*, (1994) e Albernaz (1997) são exemplos simplificados (NASCIMENTO, 2017).

4.9.1.1 Fatores que influenciam no processo de retroanálise

Para a obtenção dos módulos de resiliência, por meio de retroanálise, é preciso, que as medições das deflexões recuperáveis do pavimento sejam feitas com exatidão. Contudo, isso não garante uma boa estimativa na determinação dos módulos de resiliência das camadas do pavimento (NASCIMENTO, 2017).

Por isto, é essencial o conhecimento dos profissionais da área para a consideração de fatores que possam vir a influenciar as medições de retroanálise (CAVALCANTE, 2005).

Segundo Preussler *et al.*, (2000) os fatores que interferem na determinação dos módulos de resiliência por meio de retroanálise são:

- Dados de entrada;
- Modelagem matemática;
- Não consideração da elasticidade;
- Espessura das camadas;
- Oxidação e deterioração das camadas asfálticas;
- Natureza dos materiais constituintes da estrutura;64
- Presença e profundidade de camadas rígidas;
- Ponto de aplicação e tipo de carregamento;
- Confinamento das camadas;
- Teor de umidade; e
- Granulometria.

A seguir, segue de forma mais descritiva acerca de alguns fatores que podem influenciar no processo de retroanálise.

4.9.1.2 Efeitos dos dados de entrada

Esse efeito se dar por a grande abrangência de dados e combinações que podem ser adotados para uma determinada bacia deflectométrica. Pois para a identificar a bacia de deformação mais à medida em campo, é necessário introduzir dados de entrada nos programas computacionais, que incluem: o coeficiente de Poisson, o módulo de elasticidade inicial e os

seus limites inferiores e superiores, além das espessuras das camadas, número de iterações e critérios de convergência (NASCIMENTO, 2017).

4.9.1.3 Efeitos das variações nas espessuras das camadas do pavimento

Para realização da retroanálise deve-se conhecer a espessura do pavimento. Mesmo o pavimento apresente uma mesma seção-tipo, podem ocorrer pequenas variações devido a tolerância na fase de execução, por isso, apesar de uma estimativa correta da espessura das camadas, os valores obtidos na retroanálise podem conter erros devido a essa variação de espessura (MARQUES, 2017).

4.9.1.4 Efeito do comportamento de não linearidade

A fim de simplificações de cálculos, geralmente, a interpretação das medidas de deflexões do pavimento são baseados na solução elástica-linear, não levando em consideração a possível existência de não linearidades (CAVALCANTE, 2005).

Isso ocorre da modelagem incorreta da resposta deflectométrica do pavimento, um exemplo típico de não linearidade, é quando os módulos das camadas do subleito e do revestimento asfáltico são maiores que aqueles esperados para o material, enquanto que o módulo da camada de base é muito baixo (NASCIMENTO, 2017).

Diante disso a fim de diminuir os erros é recomendado uma modelagem não linear. Os softwares mais utilizados que adotam esse modelo são: ELMOD, MODCOMP3, EVERCALC e BOUSDEF.

4.9.1.5 Oxidação e deterioração das camadas do revestimento asfáltico

Com o envelhecimento do Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP), o revestimento do pavimento tende a ficar duro e quebradiço. Além também da deterioração do pavimento são fatores que influenciam diretamente a retroanálise.

O processo de deterioração acarreta em elevados graus de fissuração no revestimento asfáltico, por consequência os resultados apresentam baixos módulos de elasticidade. Já Para o processo de oxidação apresenta resultados contrários a deterioração, pois sua estrutura enrijece diminuindo as bacias deflectométricas e aumentando dessa forma os módulos de elasticidade (PITTA e BALBO,1998).

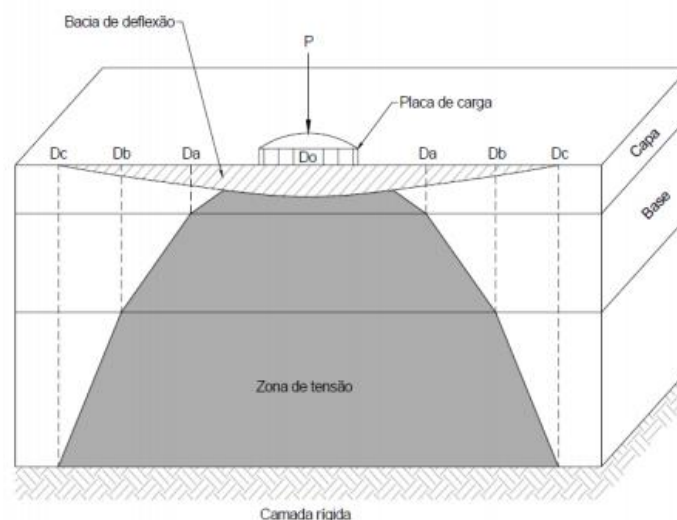
Dessa forma a evitar erros e preciso realizar as medições em áreas do pavimento em que não apresente trincas. Caso não seja possível a realização do ensaio em áreas sem presença de trincas, deve-se realizar a retroanálise que levem em conta a influência das trincas (NASCIMENTO, 2017).

4.9.1.6 Camada rígida

Esse efeito é quando uma camada apresenta uma camada rígida, ou seja contribui pouco ou não contribui para as deflexões na superfície. Essas camadas são divididas em reais, que é quando é constituído de material rochoso ou material muito rígido, ou aparentes, que é no caso de camadas apresentam elevado grau de saturação do solo, aumentando dessa forma sua rigidez (NASCIMENTO, 2017).

Devido a característica de apresentar uma camada rígida, seja ela real ou aparente, o qual não contribui para as deflexões medidas na superfície, pode-se estimar a profundidade de ocorrência desta camada. Rohde *et al.*, (1990) propôs um método para estimar a profundidade da camada rígida, que consiste na análise das deflexões medidas na superfície do pavimento devido a um carregamento o qual resulta no conjunto de deformações verificadas em vários pontos no interior da zona de tensão, desta forma a profundidade na qual ocorre deflexão nula, está diretamente relacionada a distância entre o ponto de aplicação da carga e o ponto onde não ocorre deslocamento na superfície conforme apresentado na Figura 21 (MARQUES, 2017).

Figura 21- Variáveis para determinação da profundidade da camada rígida.



Fonte: Mahoney *et al.*, 1993.

4.9.1.7 Efeito da sucção e do grau de saturação

Esse efeito se dar pela queda de sucção, que é quando a camada de subleito apresenta um elevado grau de saturação. A umidade tem influência direta no módulo de elasticidade das camadas granulares e no subleito, pois como o aumento da umidade ocorre a diminuição dos valores dos módulos.

4.10 Métodos mecanísticos-empíricos

4.10.1 MeDiNa – Método de Dimensionamento Nacional

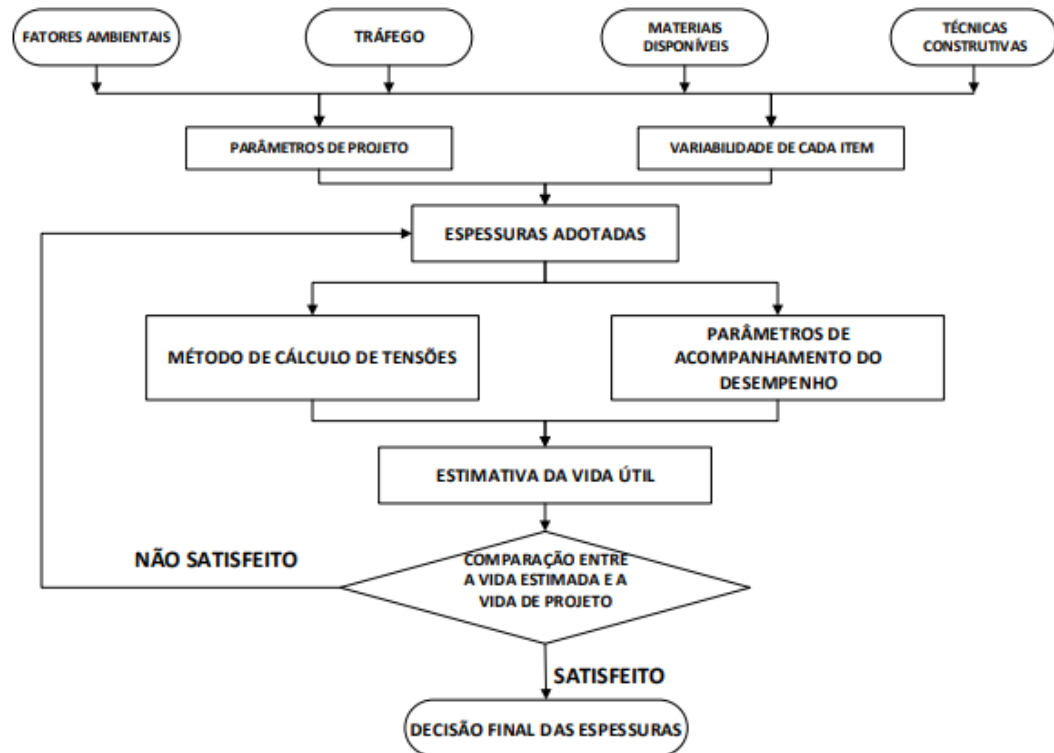
Segundo o DNIT, o MEDINA teve sua origem em 2014, por meio do Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR), do próprio DNIT, e da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Tem como principal objetivo aumentar a confiabilidade nos projetos e reduzir custo de manutenção.

O MEDINA leva em consideração as tensões e deslocamentos de toda a estrutura do pavimento e avalia os danos causados pelo efeito do tráfego. Esses danos são representados pela área de trincamento na superfície do revestimento e afundamentos de trilha de roda em cada camada subjacente. Esse método mecanístico considera como um dos principais parâmetros, o Módulo de Resiliência dos materiais (SILVA, 2018).

Para aplicação desse método mecanístico, foi desenvolvido um *software*, específico para essa finalidade, conhecido também como MeDiNa. Em conjunto com esse software também foram desenvolvidos dois programas, o AEMC (Análise Elástica de Múltiplas Camadas), o qual calcula tensões e deformações em estruturas de pavimentos sob carregamento de rodas do tipo eixo padrão rodoviário e aplica modelos de fadiga e deformação permanente para ajustar as espessuras das camadas e o programa BackmeDiNa, que realiza a retroanálise de bacias de deflexão obtidas com ensaio de FWD e por um processo interativo obtém os módulos de resiliência das camadas asfálticas (VITORINO PEREIRA, 2021).

O procedimento padrão para qualquer método mecanístico-empírico segue o fluxograma da Figura 22. A variação no procedimento entre métodos mecanísticos empíricos, pode diferir na técnica de análise de tensão-deformação, nos critérios de desempenho adotados, fatores campo-laboratório, entre outros (MOTTA; MEDINA, 2005)

Figura 22- Fluxograma de dimensionamento Mecanístico empírico.



Fonte: Motta; Medina, 2005.

Franco (2007) resume um processo de dimensionamento, onde têm-se:

- Reunir os dados referentes aos materiais de pavimentação, embora o programa possua uma base de dados de materiais pré-inseridos, é recomendável, dados ensaiados, de um laboratório, dos materiais que serão utilizados;
- Reunir dados de tráfego e as condições ambientais;
- Correlacionar os dados de resistência dos materiais e tráfego em função das épocas sazonais e o comportamento dos materiais em função do tipo de carregamento;
- Escolher espessuras das camadas e calcular as tensões e deformações considerando as diversas correlações obtidas;
- Relacionar os valores críticos de tensões e deformações com danos que a repetição das cargas pode causar ao pavimento por meio de modelos de previsão;
- Verificar se as espessuras escolhidas satisfazem as condições impostas no dimensionamento.

O dimensionamento com o software MeDiNa adota critérios de fadiga e deformação permanente. Ao adicionar os dados de estrutura e de tráfego, o programa dimensiona a estrutura,

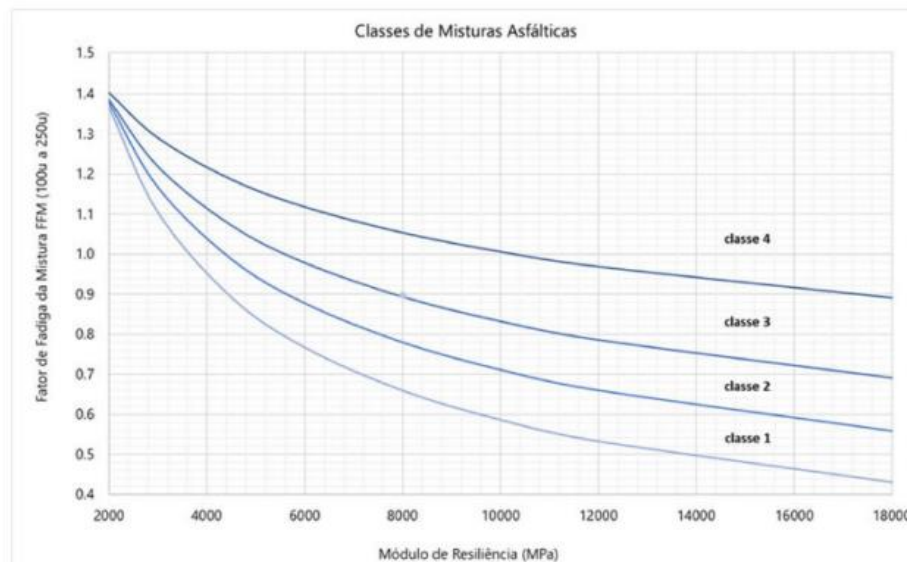
inicialmente, avaliando a fadiga e caso não seja atendido, dá início a interações que aumentam a espessura da camada até que a estrutura atenda ao critério (FRANCO; MOTTA, 2020).

O programa Medina também avalia a estrutura quanto a deformação permanente. Caso o critério da deformação permanente não seja atendido, o programa MeDiNa aumenta gradativamente a espessura da camada marcada, em intervalos fixos (0,5cm em camadas asfálticas e 1cm nas demais camadas), até o critério em questão ser atendido (MOTTA, 2018).

O MeDiNa apresenta uma metodologia de seleção de misturas asfálticas, com base nos valores de módulo de resiliência e de desempenho a fadiga :o agrupamento em classes de fadiga. As classes foram determinadas, considerando estruturas que suportariam até 30% de ATR, com 85% de confiabilidade (VITORINO PEREIRA, 2021), e separadas conforme o que se segue:

- As misturas que não atingiram $4,5 \times 10^6$ repetições do eixo padrão, não servem para aplicação de campo, por trincarem muito rapidamente.
- Classe 1: atendem entre $4,5 \times 10^6$ e $6,0 \times 10^6$ repetições do eixo padrão;
- Classe 2: atendem entre $6,0 \times 10^6$ e $7,5 \times 10^6$ repetições do eixo padrão;
- Classe 3: atendem entre $7,5 \times 10^6$ e $1,0 \times 10^7$ repetições do eixo padrão;
- Classe 4: atendem mais que $1,0 \times 10^7$ repetições do eixo padrão.

Figura 23- Classes de misturas asfálticas.

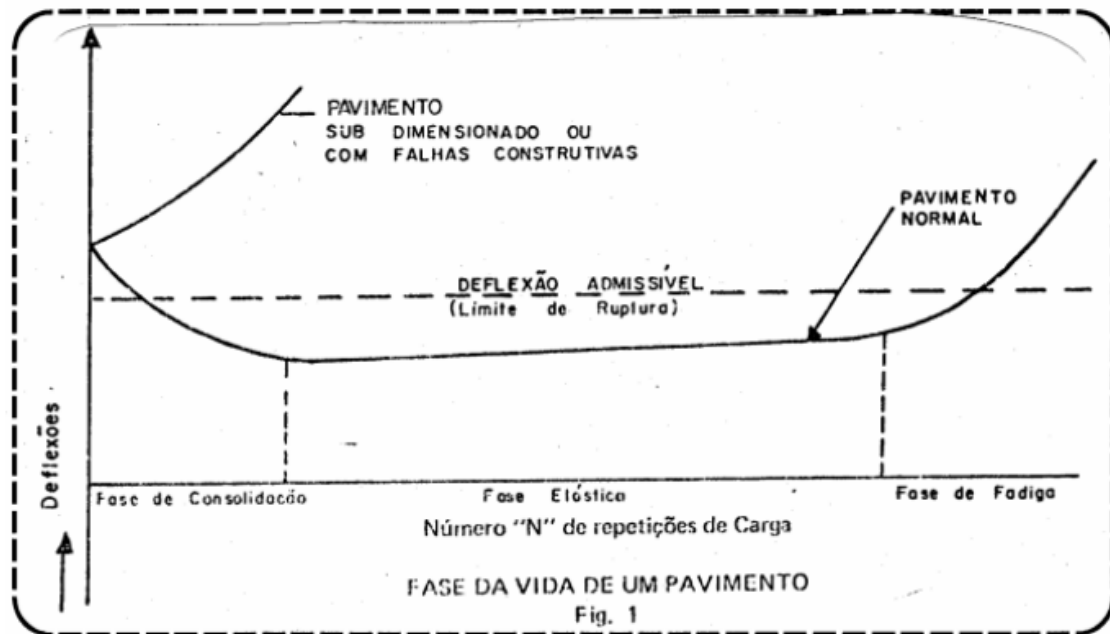


Fonte: Franco; Motta, 2020.

4.11 Dimensionamento de reforços no pavimento

O pavimento sofre ao longo do seu período de vida solicitações do tráfego e do clima. Segundo a metodologia do DNIT-PRO 011/79, pode-se dividir a vida do pavimento em fase de consolidação, elástica e fase de fadiga (SERRAGLIO, 2014).

Figura 24- Fases da vida de um pavimento.



Fonte: DNIT-PRO 011/79.

O projeto de reforço baseia-se na condição em que o pavimento se encontra ou a vida remanescente do pavimento existente, obtidas pelas avaliações superficiais e estrutural do pavimento (VITORINO PEREIRA, 2021).

É verificado o nível de deflexão admissível para a nova camada de revestimento, tendo em vista o tráfego previsto, para que, a deflexão atinja o nível de serviço que suporte o tráfego e atenda o tempo de projeto sem que haja fissuração por fadiga (SERRAGLIO, 2014).

A deflexão admissível sobre a camada de reforço do pavimento é calculada pela equação segundo (BALBO, 2007),

$$D_{adm} = 10^{3,01 - 0,176 \times \log N}$$

Onde N é o número de repetições de um eixo padrão de 8,2 t.

A norma DNIT-PRO 10/79 e 11/79 dispõem de técnicas para facilitar a tomada de decisão na intervenção, conhecida como “Árvores de Decisão” como indicada na Tabela 10, que caracterizasse como estratégia de indicação de reforço, em níveis de projeto (VITORINO PEREIRA, 2021).

Tabela 10- Propostas de intervenção com base no critério de deflexão.

Hipótese	Dados Deflectométricos Obtidos	Qualidade Estrutural	Necessidade de Estudos Complementares	Critério Para Cálculo de Reforço	Medidas Corretivas
I	$D_p \leq D_{adm}$ $R \geq 100$	BOA	NÃO	-	Apenas correções de superfície
II	$D_p > D_{adm}$ $R \geq 100$	SE $D_p \leq 3D_{adm}$ REGULAR	NÃO	Deflectométrico	Reforço
		SE $D_p > 3D_{adm}$ MÁ	SIM	Deflectométrico e Resistência	Reforço ou Reconstrução
III	$D_p \leq D_{adm}$ $R < 100$	REGULAR PARA MÁ	SIM	Deflectométrico e Resistência	Reforço ou Reconstrução
IV	$D_p > D_{adm}$ $R < 100$	MÁ	SIM	Resistência	Reforço ou Reconstrução
V	-	MÁ O pavimento apresenta deformação plásticas e rupturas generalizadas (IGG > 180)	SIM	Resistência	Reconstrução

Fonte: Adaptado de Albuquerque, 2007.

5 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo será descrita a área estudada e todos os procedimentos metodológicos utilizados para o desenvolvimento do trabalho.

As informações sobre localização, características da rodovia estudada, divisão em segmentos homogêneos, tráfego, caracterização de defeitos e características dos materiais empregados contidas neste capítulo foram extraídas da dissertação de Cavalcante (2005).

5.1 Características da região da rodovia

5.1.1 Localização

A Paraíba está situada no extremo oriental do Continente, entre os paralelos de $6^{\circ} 02' 12''$ e $8^{\circ} 19' 18''$ de latitude Sul e os meridianos $34^{\circ} 45' 54''$ e $38^{\circ} 45' 45''$ de longitude a oeste de Greenwich. A Paraíba é um estado brasileiro localizado na Região Nordeste. Dispõe de um litoral atlântico, onde se localiza a sua capital, João Pessoa. Ao norte, o território paraibano faz fronteira com o Rio Grande do Norte; a oeste, com o Ceará; e ao sul, com Pernambuco.

Figura 25- Localização do estado da Paraíba e seus limites.



Fonte: Google Maps, 2021.

5.1.2 Localização da BR230

A BR-230, também conhecida como Rodovia Transamazônica, é uma rodovia federal transversal do Brasil, com extensão implantada de 4 260 km (5662,60 km incluindo os trechos

não construídos). A BR230-PB constitui o principal eixo da ligação entre o litoral e o sertão do estado. Interliga cidades de notória importância como Patos, Souza, Pombal e Cajazeiras e une as principais cidades da região: João Pessoa e Campina Grande.

Figura 26- Ilustração da BR230.



Fonte: Trans – Amazonia, 2021. Disponível em: <https://transamazonia.files.wordpress.com>

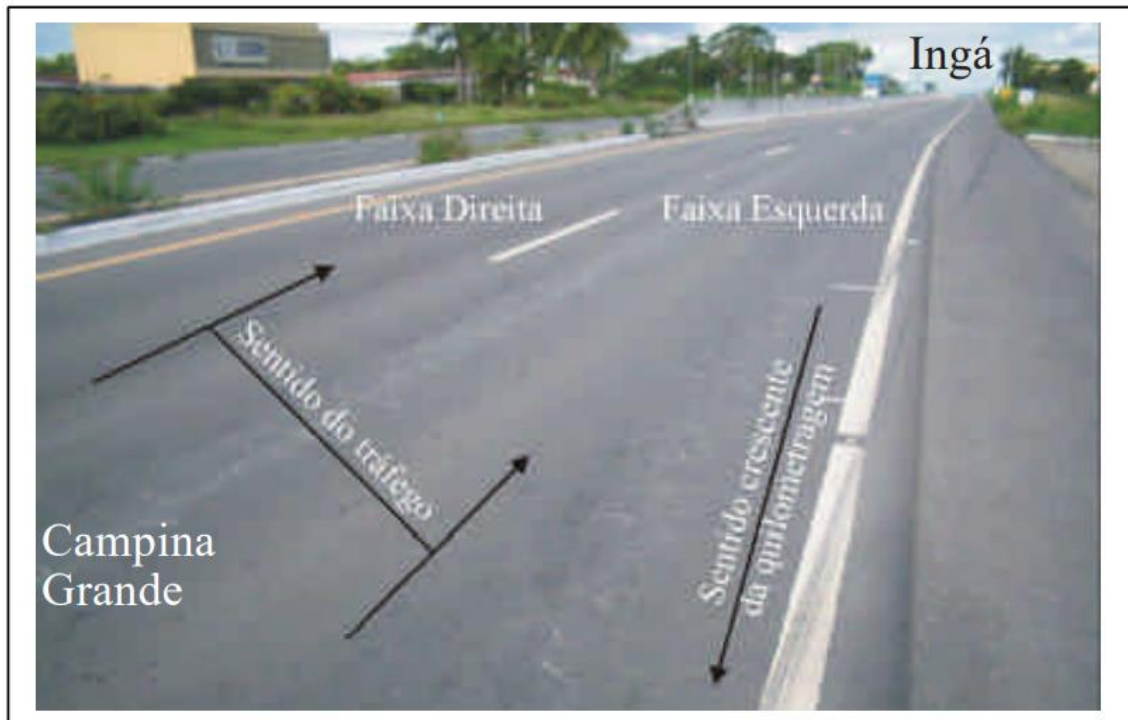
5.2 Características da rodovia estudada

Os dados obtidos nesse tópico foram obtidos da dissertação de Cavalcante (2005), resultante do Projeto Final de Engenharia para a Duplicação e Restauração da BR-230/PB (DER/PB,1999).

O trecho estudado foi o acesso a cidade de Ingá – Campina Grande (km 117,3 – km 147,9) duplicado no ano de 2000, tendo sua inauguração em 2001. Além da duplicação também foram executados serviços de restauração na pista já existente. Foi utilizado no projeto da rodovia pavimento do tipo flexível.

O sentido do tráfego na pista duplicada é contrário ao estaqueamento (Campina Grande – Ingá), desta forma, os levantamentos realizados com o FWD, avaliação objetiva da superfície do pavimento e o Levantamento Visual, seguiram o sentido do tráfego. Porém, para o desenvolvimento da pesquisa, Cavalcante (2005) adotou o sentido crescente da quilometragem para uma melhor adequação com o Projeto Final de Engenharia para a Duplicação e Restauração, conforme Figura 27.

Figura 27- Trecho Campina Grande – Ingá.



Fonte: Cavalcante, 2005.

5.2.1 Localização do Trecho

O trecho estudado possui as seguintes características:

Rodovia: BR-230/PB

Trecho: Cabedelo – Divisa PB/CE

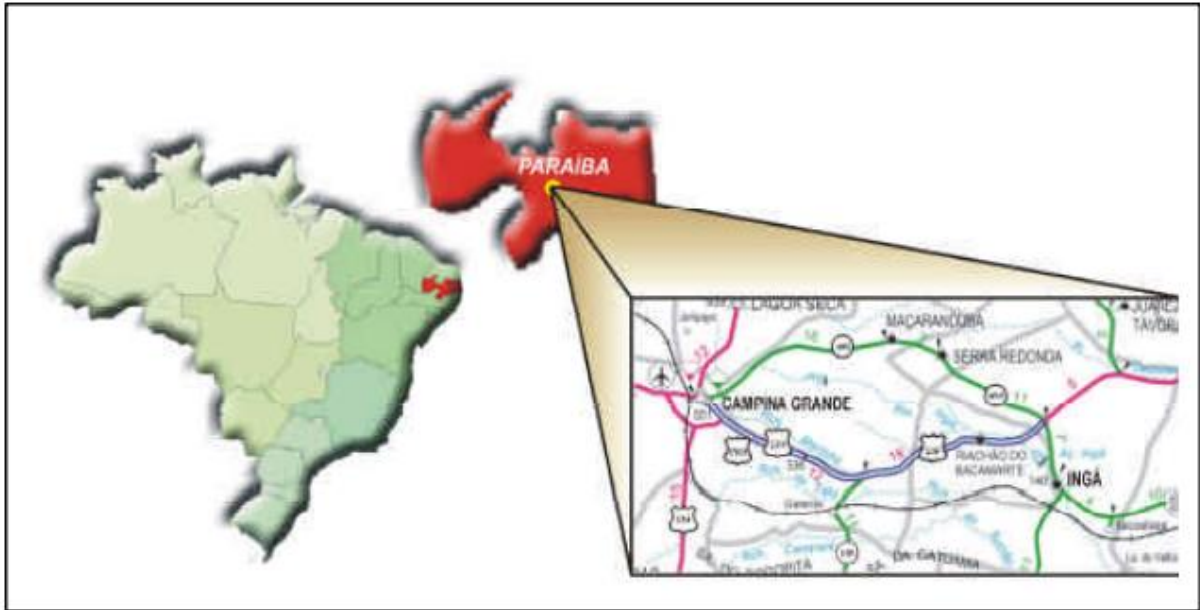
Lote: III

Subtrecho: Entr. BR-408/PB-090/PB095 / Entr. BR-104 (A)/PB-408/B/PB-095 (Campina Grande)

Segmento: km 117,3 – km 147,9

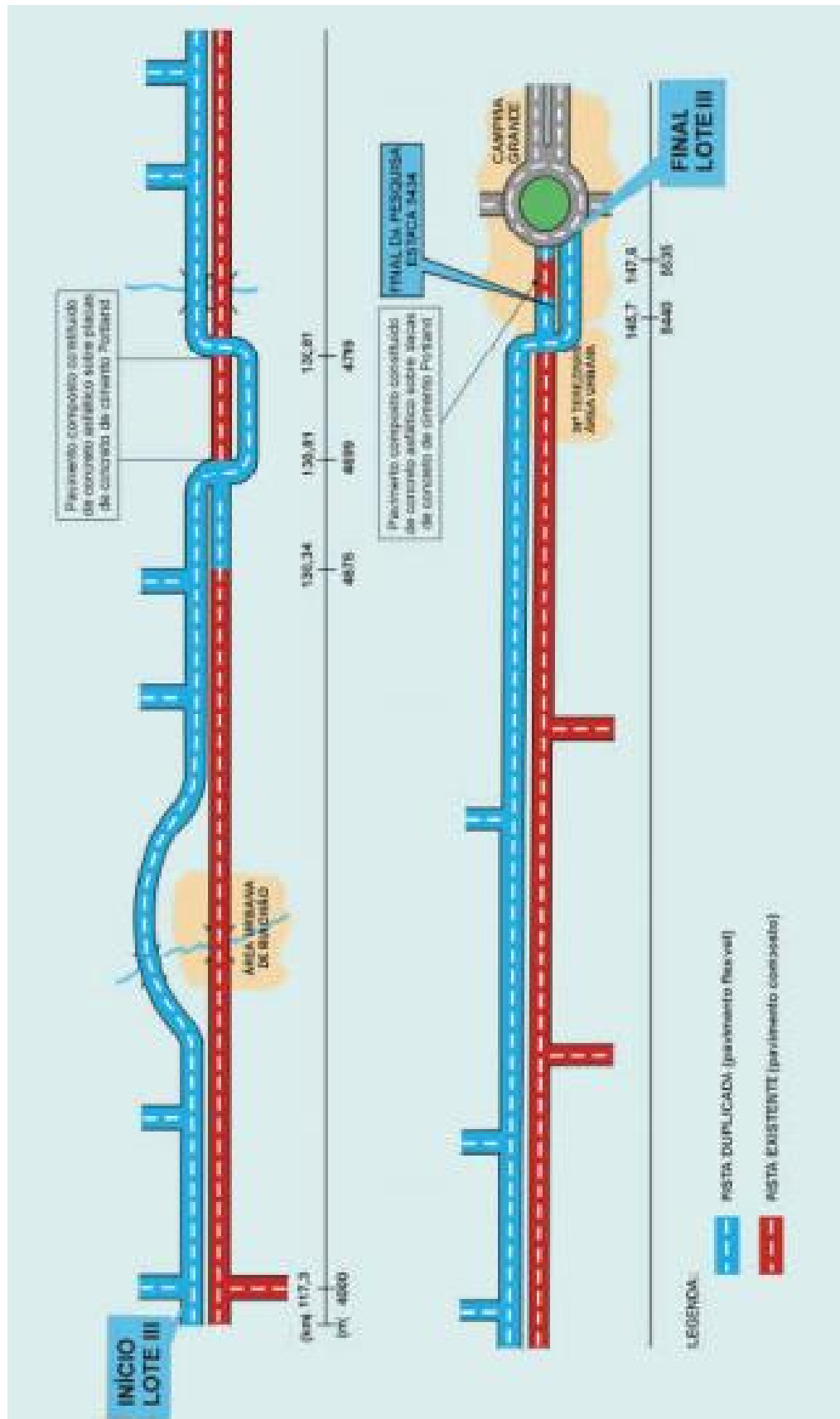
Extensão: 30,6 km PNV: 210 e 220

Figura 28- Trecho Campina Grande – Ingá.



Fonte: Cavalcante, 2005.

Figura 29- Ilustração do trecho estudado.



Fonte: Cavalcante, 2005.

5.2.2 Divisão dos segmentos homogêneos

Para subsidiar a análise desenvolvida na presente pesquisa foi utilizada a segmentação homogênea constante na pesquisa de Cavalcante (2005). Os segmentos que apresentam características semelhantes foram agrupados, utilizando o método denominado “Método das Diferenças Acumuladas” (*Analysis Unit Delineation by Acumulative Differences*) preconizado pela AASHTO (1993). O trecho está dividido em 20 segmentos homogêneos partindo da estaca 4000 e indo até à estaca 5434. O presente trabalho se limitou por analisar os trechos SH 07, SH 08 E SH09 como expõe a Tabela 11 a seguir.

Tabela 11-Segmentos homogêneos.

Segmento Homogêneo	Estaca		Extensão(m)
	Inicial	Final	
SH 01	4000	4120	2400
SH 02	4120	4152	640
SH 03	4152	4240	1760
SH 04	4240	4344	2080
SH 05	4344	4368	480
SH 06	4368	4492	2480
SH 07	4492	4564	1440
SH 08	4564	4648	1680
SH 09	4648	4800	1000
SH 10	4800	4986	3720
SH 11	4986	5034	960
SH 12	5034	5098	1280
SH 13	5098	5142	880
SH 14	5142	5166	480
SH 15	5166	5202	720
SH 16	5202	5286	1680
SH 17	5286	5330	880
SH 18	5330	5362	640
SH 19	5362	5410	960
SH 20	5410	5434	480

Fonte: Cavalcante, 2005.

5.2.3 Tráfego

Um aspecto essencial para entender a deterioração de um pavimento é a caracterização do tráfego a que está sendo solicitado. Diante disto, esse tópico apresenta os dados de contagem volumétrica e classificatória de tráfego para a via em estudo, bem como o número N utilizado. A contagem volumétrica classificatória foi obtida da dissertação de Cavalcante (2005), o qual foi realizada no período de 72 horas, no período compreendido entre os dias 7, 8 e 9 de julho (quarta, quinta e sexta-feira), do ano de 2004.

Tabela 12-Volume médio diário medido em julho de 2004.

TIPOS	AUTO	ÔNIBUS	2C	3C	nSi	OUTROS	TOTAL	V.H.M	V.H.P
VMD	2449	134	282	328	143	221	3557	274	7,70%
%	68,9	3,8	7,9	9,2	4	6,2	100		

Fonte: Cavalcante, 2005.

A pesquisa realizada foi corrigida sazonalmente com os dados coletados no site do DNIT. Os dados estão apresentados na Tabela 13 e geraram o coeficiente C1 que serviu para corrigir mensalmente a pesquisa (Tabela 14) realizada no mês de julho.

Tabela 13- Volume médio diário anual.

COORDENAÇÃO			PNV		ANO			VMD ANUAL		km	
13 ^a			230BPP0220		1998			5919		143,8	
JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
6384	5948	5355	5651	5442	6084	5795	5677	6171	6805	-	-

$C1 = \text{VMDanual}/\text{VMDjulho} = 5919 = 1,021$

Fonte: Cavalcante, 2005.

Tabela 14- Volume médio diário corrigido.

TIPOS	AUTO	ÔNIBUS	2C	3C	nSi	OUTROS	TOTAL
VMD	2449	134	282	328	143	221	3557
C1							1,021
VMD CORRIGIDO	2501	136,8	289	334,9	146	225,6	3634

Fonte: Cavalcante, 2005.

Os fatores de veículos foram baseados na “lei da balança”, para as diversas categorias de veículos, logo o fator de veículo médio utilizado foi de 7,06 para obtenção do crescimento do tráfego optou-se por adotar uma taxa de crescimento de 3% ao ano, compatível com o crescimento econômico observado na região.

Tendo os valores de fator de veículos, projeção de tráfego, calcula-se o número N pelas metodologias do “USACE” e da “AASHTO”, utilizando a equação na sequência.

$$N_{anual} = 365 \times k \times \sum (VMD \times FVi)$$

Onde:

k = fator de carregamento para a faixa de projeto (para pistas simples: 0,50 = 50% do tráfego dos dois sentidos alocado na faixa de projeto; para pistas duplas: 80% do tráfego = 0,40 do tráfego nos dois sentidos);

VMD = volume médio diário de cada categoria de veículo comercial;

FVi = fator de veículo médio de cada categoria de veículo comercial.

Tabela 15- Evolução do tráfego e cálculo do número N de projeto.

DETERMINAÇÃO DO NÚMERO N										
ANO	AUTO	ÔNIBUS	CAM.+ REB.+ SEMI- REB.	TOTAL (Comercial)	NÚMERO "N"					
					AASHTO			USACE		
					FV m	ANUAL	ACUM.	FVm	ANUAL	ACUM.
2006	2664	141	809	950	1,64	2,27E+05		7,06	9,79E+05	
2007	2744	145	833	979	1,64	2,34E+05	2,34E+05	7,06	1,01E+06	1,01E+06
2008	2826	150	858	1008	1,64	2,41E+05	4,76E+05	7,06	1,04E+06	2,05E+06
2009	2911	154	884	1038	1,64	2,49E+05	7,24E+05	7,06	1,07E+06	3,12E+06
2010	2998	159	911	1069	1,64	2,56E+05	9,80E+05	7,06	1,10E+06	4,22E+06
2011	3088	163	938	1101	1,64	2,64E+05	1,24E+06	7,06	1,14E+06	5,35E+06
2012	3181	168	966	1134	1,64	2,72E+05	1,52E+06	7,06	1,17E+06	6,52E+06
2013	3276	173	995	1168	1,64	2,80E+05	1,80E+06	7,06	1,20E+06	7,73E+06
2014	3375	179	1025	1203	1,64	2,88E+05	2,08E+06	7,06	1,24E+06	8,97E+06
2015	3476	184	1056	1240	1,64	2,97E+05	2,38E+06	7,06	1,28E+06	1,02E+07
TAXAS MÉDIAS DE CRESCIMENTO ANUAL DO TRÁFEGO										
i% =	3,0%	3,0%	3,0%	FATOR DE CARREGAMENTO:			0,40			
(1+i)	1,030	1,030	1,030							
=										

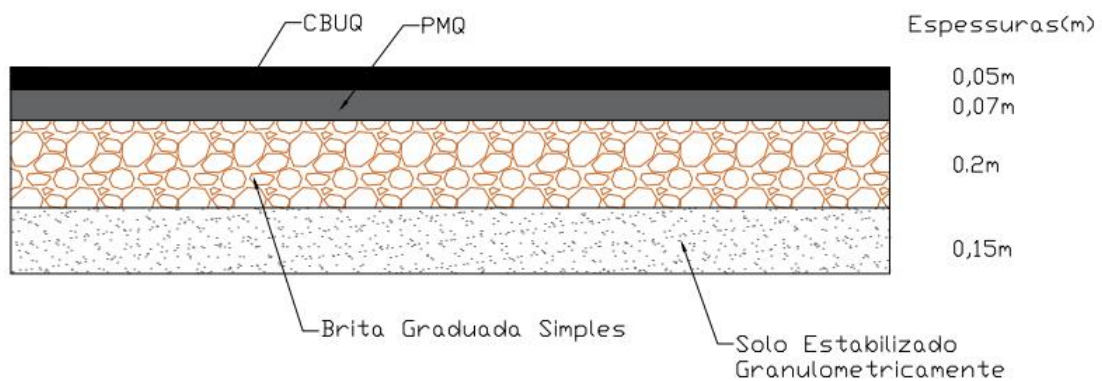
Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Desta forma os valores de “N” são $2,38 \times 10^6$ para a metodologia AASHTO e $1,02 \times 10^7$ para a metodologia USACE. Por questão de adequação com as normativas do DNIT, o número N que foi utilizado nas tratativas desta pesquisa foi valor referente à metodologia USACE ($N = 1,02 \times 10^7$) por ser aquele recomendado pelo DNIT.

5.2.4 Características dos materiais utilizados na pavimentação

Para a camada de sub-base foram utilizados materiais provenientes das Saibreiras: Alegre, Galante, Soares, Pedro e Campos, para camada de base é constituída de brita graduada simples obtida por processo de preparo em usina de agregado com materiais advindos da Pedreira Amorim com características graníticas. O concreto asfáltico é constituído de duas camadas, uma de CBUQ (Concreto Betuminoso Usinado a Quente) na faixa B do DNIT (camada de ligação) e outra de CBUQ na faixa C (camada de rolamento), abaixo está indicado uma indicação das camadas constituintes do pavimento e sua espessura.

Figura 30- Ilustração esquemática das camadas do pavimento.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

A composição do concreto asfáltico é resultado das misturas de areia fina do rio Paraíba, agregado britado, filer e cimento asfáltico. A dosagem foi realizada pelo Método Marshall, asfalto tipo CAP 50/60, nomenclatura que ficou vigente até julho de 2005, sendo substituída nessa pesquisa pelo CAP 50/70.

5.2.5 Característica dos defeitos no trecho estudado

A avaliação funcional baseou-se na norma DNIT-PRO 006/2003, de nome Avaliação Objetiva de Superfície de Pavimentos Flexíveis e Semirrígidos. A seguir segue o resumo da avaliação objetiva desenvolvida por Cavalcante (2005), identificando os defeitos das mais distintas manifestações de degradação ocorrentes na superfície.

Tabela 16- Resumo do Levantamento dos defeitos de superfície – Faixa Direita.

RESUMO DO LEVANTAMENTO DE DEFEITOS DE SUPERFÍCIE- FAIXA DIREITA															
SEGMENTO HOMOGÊNEO	ESTACA		EXTENSÃO (M)	INCIDÊNCIA DOS DEFEITOS NA SUPERFÍCIE - DNIT 006/2003 - PRO									IGG	CONCEITO	
	INICIAL	FINAL		FC-1	FC-2	FC-3	FC-2+F C-3	ALP +AT P	OND+ PAN	Remendo	Desgaste	Flecha			
7	4492	4564	1440	12,7	0	0	0	0	0	0	0	0	0,86	5	ÓTIMO
8	4564	4648	1680	60,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0,2	13	ÓTIMO
9	4648	4698	1000	65,4	0	0	0	0	0	0	0	0	0,19	14	ÓTIMO

Fonte: Cavalcante, 2005.

Tabela 17- Resumo do Levantamento dos defeitos de superfície – Faixa Esquerda.

RESUMO DO LEVANTAMENTO DE DEFEITOS DE SUPERFÍCIE- FAIXA ESQUERDA															
SEGMENTO HOMOGÊNEO	ESTACA		EXTENSÃO (M)	INCIDÊNCIA DOS DEFEITOS NA SUPERFÍCIE - DNIT 006/2003 - PRO									IGG	CONCEITO	
	INICIAL	FINAL		FC-1	FC-2	FC-3	FC-2+F C-3	ALP +AT P	OND+ PAN	Remendo	Desgaste	Flecha			
7	4492	4564	1440	25	50	19,4	69,4	0	0	0	0	0	1,00	47	REGULAR
8	4564	4648	1680	42,5	12,5	2,5	15	0	0	0	0	0	1,27	19	ÓTIMO
9	4648	4698	1020	68	20	4,0	24	0	0	0	0	0	0,60	28	BOM

Fonte: Cavalcante, 2005.

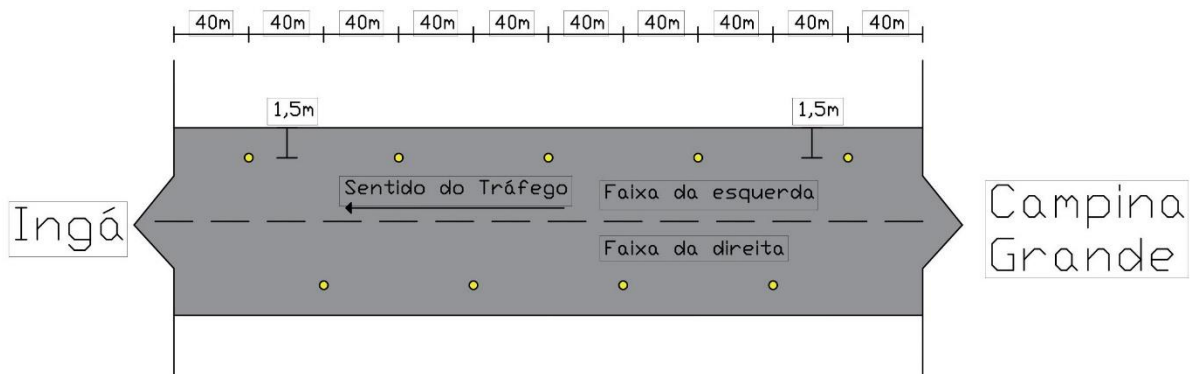
5.2.6 Levantamento Deflectométrico com o *Falling Weight Deflectometer*

Para o levantamento deflectométrico foi utilizado o *Falling Weight Deflectometer*, modelo 8002 FWD equipado com um sistema processador e PC/Impressor 9000. Adotando metodologia de ensaio baseada no DNER PRO-273/96.

Os deslocamentos recuperáveis gerados na superfície do pavimento (bacias de deflexão) foram medidos por sete geofones dispostos ao longo de uma barra metálica com os seguintes espaçamentos: 0; 20; 30; 45; 60; 90 e 150 (centímetros).

O nível de carregamento utilizado foi em torno de 41 KN, correspondente ao semi-eixo padrão rodoviário. A distância de um levantamento deflectométrico para outro é de 40 m, e foi adotado uma distância de 1,5 m do bordo do revestimento, como podemos ver na figura abaixo.

Figura 31- Ilustração esquemática da localização de realização do ensaio das bacias Deflectométricas.



Fonte: Cavalcante, 2005.

5.3 METODOLOGIA

5.3.1 Ajuste das Bacias Deflectométricas

Após a realização do ensaio do FDW a superfície curva-se onde é criada uma bacia de deflexão, esses deslocamentos são dados em μm . De posse dos dados de deflexões obtidos são determinados os seguintes parâmetros:

- Deflexão média - D_m ;
- Desvio padrão - σ ;
- Coeficiente de Variação - (CV);
- Deflexão mínima – (D_{min});
- Deflexão máxima – (D_{max});
- Deflexão Característica – (D_c).

A determinação desses parâmetros segue a sequência a seguir:

- a) Cria-se uma tabela contendo os valores das deflexões recuperáveis, obtidos no ensaio de FDW (D_i);
- b) É realizado o cálculo da média aritmética, D , dos valores individuais (média da amostra);
- c) Calcula-se o desvio padrão da amostra, σ , através da expressão:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum(Y_i - \bar{Y})^2}{n}}$$

d) Estabelece-se o intervalo de aceitação para os valores individuais, definindo-se limites $D \pm Z \times \sigma$, onde Z será estimado em função do número de amostras N, mediante o critério constante na Tabela 18.

Tabela 18- Valores de desvio padrão em função do número de amostras.

N	Z
3	1
4	1,5
5-6	2
7 - 19	2,5
≥ 20	≥ 20

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

As bacias deflectométricas obtidas pelo ensaio do FDW foram corrigidos em relação a carga aplicada pela placa na superfície do pavimento, pois segundo Rocha Filho (1996) mesmo mantendo a configuração do carregamento quanto menor a temperatura da superfície do revestimento maior a rigidez da camada asfáltica, por outro lado, quanto maior a temperatura menor e a rigidez da camada asfáltica. Essa correção foi realizada com uso da equação explicitada abaixo.

$$DN = DM \times \frac{Q1}{Q2}$$

Sendo:

DN – Deflexão normalizada;

DM – Deflexão medida no campo;

Q1 – Carga padrão;

Q2 – Carga medida.

Essa correção é importante, pois mesmo mantendo constante a configuração de aplicação de carregamento do FDW, a carga real aplicada sempre aumenta com a rigidez do pavimento.

5.3.2 Retroanálise

Para a retroanálise dos módulos de resiliência foi utilizado o programa BackMeDiNa. Esse software foi criado para auxiliar na retroanálise de bacias deflectométricas obtidas com levantamentos realizados com FWD.

Inicialmente, é preenchido o modelo de arquivo de bacias, disponibilizado pelo programa, contendo os dados do levantamento deflectométrico, temperatura do ar e pavimento, carga aplicada, raio do carregamento, faixa e localização da rodovia que devem ser importados para o programa. Para o coeficiente de Poisson foram utilizados os valores de referência fornecidos pelo programa de acordo com o material constituinte de cada camada. O cálculo pode ser iniciado após a importação do arquivo com as bacias deflectométricas e o cadastramento da estrutura das camadas do pavimento existente, visando a obtenção de bons resultados é necessário retroanalisar até que o erro se torne constante (Figura 32).

Figura 32 - Tela inicial do software BackmeDiNa.

The screenshot shows the initial screen of the BackMeDiNa software. It features a menu bar with 'Projeto' and 'Ajuda'. Below the menu is a section for 'SEÇÃO HOMOGÊNEA' with a table for data entry. The table has columns for 'BACIA', 'ESTACA', 'FAIXA', and 'TRILHA'. To the right of this table are input fields for 'ENSAIO:' parameters: 'CARGA (kgf):', 'RAIO (cm):', 'DISTÂNCIA (cm):', 'DEFLEXÕES (µm):', 'CALCULADAS (µm):', 'DIFERENÇAS (µm):', and 'ERRO (%)'. There are also fields for 'T. AR:' and 'T. PAV:' in degrees Celsius. Below these fields are buttons for 'ESTRUTURA >>', 'RETROANALISAR', and 'RETROANALISAR TODAS >>'. A table below the buttons lists 'CAMADA', 'MATERIAL', 'ESPESSURA (cm)', 'MÓDULO (MPa)', 'COEF POISSON', and 'ADERÊNCIA'. The first row shows '1' in the 'CAMADA' column. At the bottom, there is a graph titled 'DEFLEXÕES NORMALIZADAS' with a grid and an x-axis labeled 'distância (cm)' ranging from 0 to 180.

Fonte: Dados da pesquisa, 2021.

Com relação a interface do programa, temos, na parte superior esquerda a aba “Projeto”, onde após selecionada aparecem as opções de importar arquivos de bacias, o qual o usuário pode adicionar uma planilha Excel® salva na extensão CSV com os dados a serem retroanalisados.

O programa também permite que o usuário faça a entrada de dados de forma manual, caso opte por não importar um arquivo. Na linha 1 visualiza-se a identificação do programa BackmeDiNa, na linha 2 é inserido o nome da seção homogênea, na linha 3 é indicado o raio

do carregamento aplicado pelo equipamento no pavimento, na linha 4 contêm o título dos dados e a partir da linha 5 são inseridos os dados de até 100 bacias de um mesmo segmento homogêneo.

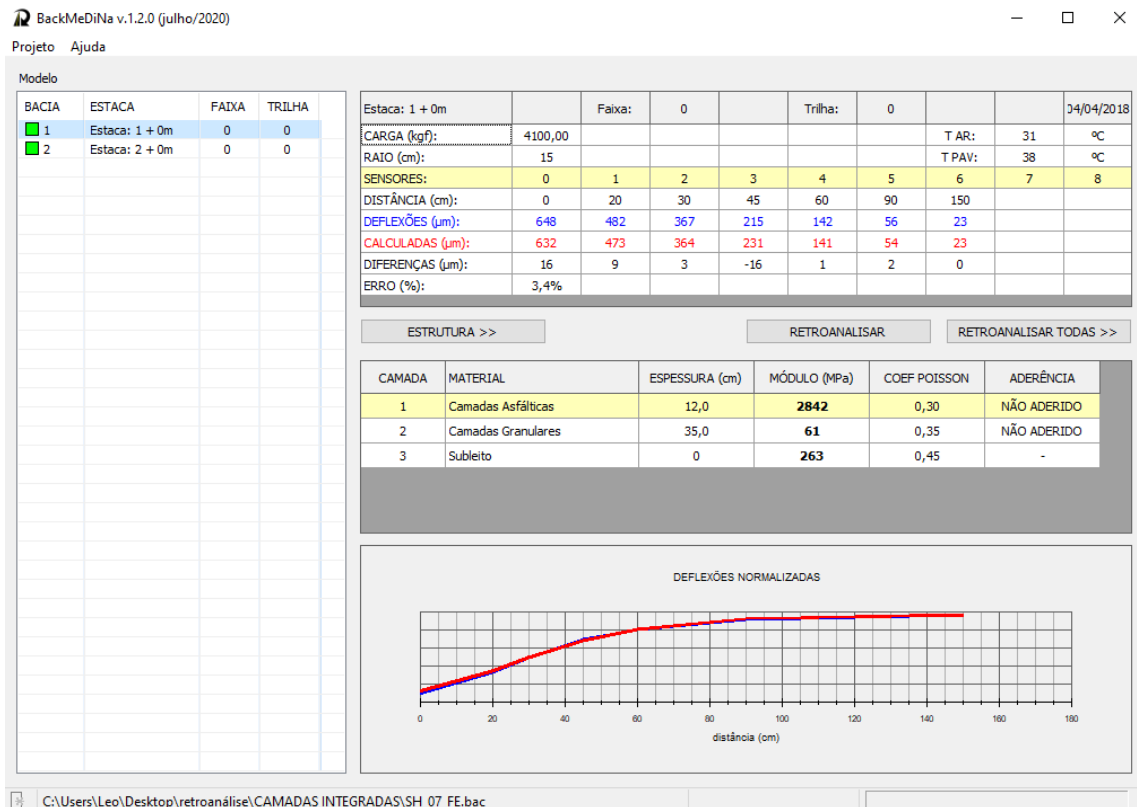
Figura 33 – Planilha Excel modelo para entradas de dados.

Data de E	Temp. Do	Temp. Do	Carga	Estaca D	Estaca D	Estaca D	Estaca D	d0	d20	d30	d45	d60	d90	d150
#####	31	38	4100	1	0	0	0	648	482	367	215	142	56	23
#####	32	42	4100	2	0	0	0	846	645	495	292	193	75	33

Fonte: Dados da pesquisa, 2021.

Após preencher a planilha modelo do programa, foi preenchido a configuração da estrutura do pavimento em questão, para que dessa forma seja dada início a retroanálise e definição da bacia teórica (retroanalizada). O revestimento foi definido como sendo de 12 cm (5 cm de CBUQ faixa C e 7cm de CBUQ faixa B), foi adotado uma camada granular de 35 cm (20 cm de brita graduada simples e 15 cm de solo estabilizado granulometricamente), o subleito com espessura semi-infinita, além de também adicionar os módulos de resiliência iniciais e coeficiente de Poisson, sendo os módulos de 5000 para o revestimento 400 para base granular e 200 para o subleito e coeficientes de Poisson de 0,30 para camadas asfálticas, 0,35 para base e sub-base granular e 0,45 para subleito.

Figura 34 - Tela de resultado da retroanálise pelo software BackmeDiNa.



Fonte: Dados da pesquisa, 2021.

Após o término da rotina do programa é exibido os resultados obtidos, como módulos de resiliência e o erro. As cores indicadas abaixo do ícone Bacia, indicam a compatibilidade da bacia medida em campo com a teórica, onde a cor verde indica erro inferior a 5%, valor considerado excelente; a cor amarela indica erro entre 5 e 10%, sendo considerado aceitável, e a cor vermelha indica erro superior a 10%.

5.3.3 Correção dos Módulos de Resiliência com Relação a Temperatura

Tendo obtido os módulos de resiliência pelo processo de retroanálise, foi feito a correção em relação da temperatura, como foi pontuado na revisão bibliográfica o asfalto é um material termossensível, portanto o módulo de resiliência do revestimento pode variar devido temperatura.

Visando corrigir os módulos de resiliência em função de uma temperatura de referência, com finalidade de regularizar os resultados obtidos na retroanálise para uma temperatura padrão (25°C), as correções dos módulos foi realizada de acordo com a equação experimental desenvolvida por Rodrigues (1991) que relaciona a temperatura com a profundidade no revestimento:

$$T(x) = T_{sup} + (T_{sup} - T_{ar}) \cdot [1 - \exp^{(0,06855x - 0,002633x^2)}]$$

Onde:

T(x) é a temperatura na profundidade x do revestimento, em °C;

Tsup é a temperatura da superfície do revestimento, em °C;

Tar é a temperatura do ar, em °C;

x é a profundidade no revestimento onde se deseja conhecer a temperatura, em cm.

Para o cálculo do módulo corrigido, foi adotado a temperatura no centro da camada como sendo a temperatura média. Adotando a equação definida em laboratório por Pinto (1991) por ensaios por compressão diametral, foi realizada a correção para a temperatura de referência.

$$M_R = e^{0,051(T_C - T_R)M_C}$$

Sendo:

MR é o módulo de resiliência convertido para a temperatura padrão;

MC é o módulo de obtido em campo;

TR é a temperatura de referência, 25 °C;

TC é a temperatura de campo.

5.3.4 Análise Mecânica-empírica da Estrutura do Pavimento Retroanalisado

A análise da estrutura, foi feita utilizando o *software* MeDiNa, onde foi inicialmente informado as propriedades dos materiais que compõe a estrutura de pavimento existente em cada segmento homogêneo obtidos no processo de retroanálise.

O coeficiente de Poisson utilizado foi o mesmo utilizado para obtenção do módulo de resiliência pelo processo de retroanálise das bacias de deflexão de cada segmento. A Área trincada (%) foi obtida por meio da Avaliação objetiva da superfície de pavimentos flexíveis e semirrígidos – DNIT-PRO 006/2003, citada no tópico **5.2.5**. O número N utilizado foi de $1,02 \times 10^7$, como mostrado no tópico **5.2.3**, obtidos na dissertação de Cavalcante (2005).

Figura 35 - Tela do software MeDiNa projeto pavimento novo.

MeDiNa - v.1.1.5.0 - dezembro/2020

Projeto Editar Análise Ajuda

ESTRUTURA MODELAGEM RESULTADOS

RESPONSÁVEL: leonardo rodrigues guedes EMPRESA: ufcg

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

Alterar Estrutura >>

CAMADA	DESCRIÇÃO DO MATERIAL	TIPO	ESPESSURA (cm)	MÓDULO (MPa)	COEFICIENTE DE POISSON
>> 1 <<	CONCRETO ASFÁLTICO	RJ CAP 30/45 #12,5mm Sepetiba	10,0	9000	0,30
2	MATERIAL GRANULAR	Brita Graduada - Gnaisse C5	20,0	381	0,35
3	SOLO FINO, SILTOSO OU ARGILOSO	Solo Argiloso LG(1)	20,0	250	0,45
SL	SUBLEITO	Solo Siltoso NS'	0,0	189	0,45

EIXO PADRÃO RODOVIÁRIO

DADOS DO TRÁFEGO

Tipo de Via:	Sistema Arterial Primário
VMD (1º ano):	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

Projeto novo

Fonte: Dados da pesquisa, 2021.

Após preencher todos os dados, pode-se realizar a análise da estrutura, o usuário pode simplesmente clicar no botão F3 ou ir no menu Análise e clicar na opção “Avaliar a estrutura”. A análise realiza os cálculos e verifica os critérios de área trincada e/ou deformação permanente, sem alterar a espessura da camada selecionada. No final, apresenta um resumo que pode ser avaliado pelo projetista.

5.3.5 Proposta de reforço do pavimento existente

O programa MeDiNa, tem a opção de dimensionamento de Pavimento Novo e Reforço. Na opção de dimensionamento de Reforço entra-se com os dados obtidos na retroanálise e solicita que o programa dimensione a espessura de reforço requerida para atender os critérios da via que está sendo estudada. A Figura 36 ilustra a tela inicial do modo Reforço do programa MeDiNa.

Figura 36 - Tela inicial do modo Reforço do MeDiNa.

MeDiNa - v.1.1.5.0 - dezembro/2020

Projeto Editar Análise Ajuda

ESTRUTURA MODELAGEM RESULTADOS

RESPONSÁVEL: leonardo rodrigues guedes EMPRESA: ufcg

PROJETO: Identificação da via, rodovia, trecho, km, estaca, etc MODO: Projeto de Reforço

Alterar Estrutura >>

CAMADA	DESCRIÇÃO DO MATERIAL	TIPO	ESPESSURA (cm)	MÓDULO (MPa)	COEFICIENTE DE POISSON
>> 1 <<	CONCRETO ASFÁLTICO	RJ CAP 30/45 #12,5mm Sepetiba	5,0	9000	0,30
2	CAMADA ASFÁLTICA EXISTENTE	Camada Asfáltica Superficial	10,0	5000	0,30
3	CAMADA EXISTENTE	Camada Granular	20,0	400	0,35
SL	SUBLEITO	Subleito	0,0	150	0,45

EIXO PADRÃO RODOVIÁRIO

DADOS DO TRÁFEGO

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

Projeto de Reforço MODO REFORÇO

Fonte: Dados da pesquisa, 2021.

O tipo de via e a caracterização de seu tráfego são fatores de grande influência no resultado e condição das análises realizadas pelo programa. Os tipos de via e seus critérios de avaliação no MeDiNa estão apresentados na Tabela 19. Nesta pesquisa a via foi classificada como Sistema Arterial Principal, por ser uma rodovia federal interestadual duplicada de tráfego pesado.

Tabela 19- Critérios de parada e confiabilidade das análises realizadas pelo MeDiNa.

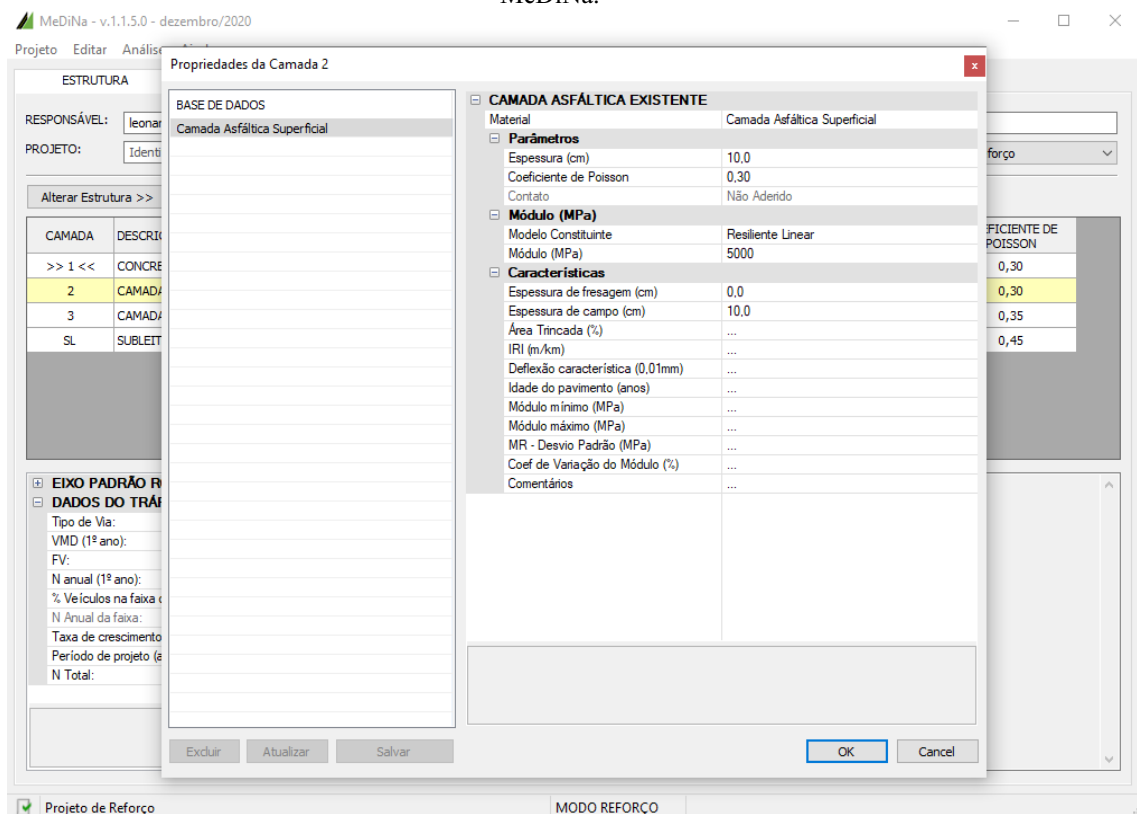
Tipo de Via	Confiabilidade	Área Trincada Máxima	Afundamento Permanente Máximo
Sistema arterial Principal	95%	30%	10mm
Sistema arterial Primário	85%	30%	13mm
Sistema Arterial Secundário	75%	30%	20mm
Sistema Coletor Primário	85%	30%	13mm
Sistema Coletor Secundário	75%	30%	20mm
Sistema Local	65%	30%	20mm

Fonte: Franco, 2020.

Tendo escolhido o tipo de via a ser considerada, deve-se inserir as características do tráfego da via, presente no canto inferior esquerdo da tela inicial, conforme Figura 36. Lá é informado o VMD do primeiro ano do trecho, o FV da frota, considerando esses dados o próprio programa calcula o N do primeiro ano de serviço. Além disso, insere-se a taxa anual de crescimento do tráfego, bem como o período de projeto e com isso é calculado o N de projeto para o trecho.

Posteriormente, foram inseridos os dados das camadas que compõem o pavimento, tanto camadas granulares quanto camada asfáltica. Na aba de caracterização da camada asfáltica, conforme ilustrado na Figura 37, são inseridos no MeDiNa dados do módulo de resiliência obtido na retroanálise, coeficiente de Poisson, espessura da camada, porcentagem de área trincada, deflexão característica, Índice de Irregularidade Longitudinal (IRI), idade do pavimento e espessura de fresagem, caso se opte por sua realização.

Figura 37 - Tela de caracterização da camada de revestimento existente no pavimento do modo Reforço do MeDiNa.

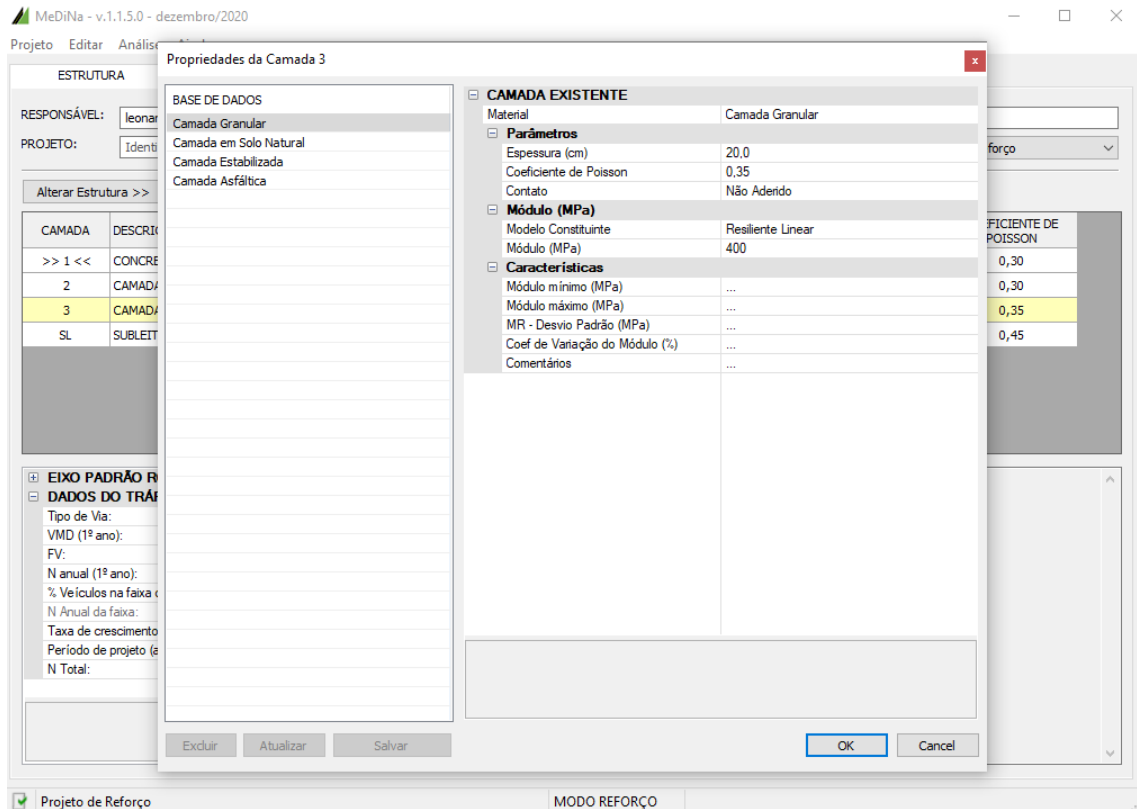


Fonte: Dados da pesquisa, 2021.

A caracterização das camadas de base e subleito existentes no pavimento seguem procedimento semelhante a inserção de dados na camada de revestimento, conforme ilustrado na Figura 38. É realizada a inserção de dados como a espessura da camada, seu coeficiente de Poisson, a condição de contato com outras camadas (aderido ou não aderido), além do módulo

de resiliência retroanalizado. Nesta pesquisa foi considerado que todas as camadas estão não aderidas entre si, o que representa a situação mais desfavorável da análise, ponderando, assim, a favor da segurança.

Figura 38 - Tela de caracterização das camadas de base e subleito existentes no pavimento do modo Reforço do MeDiNa.



Fonte: Dados da pesquisa, 2021.

Quando inseridos todos os dados de caracterização do pavimento, tráfego e tipo de via do projeto, o usuário tem a opção de solicitar que o programa dimensione a espessura necessária de reforço com determinado tipo de material para atender os requisitos contidos na Tabela 19 ou de solicitar que o programa analise uma estrutura determinada pelo usuário, a fim de se saber como ela se comporta frente às solicitações do trecho.

Para proceder com o dimensionamento, o usuário basta clicar no botão F2 ou ir no menu Análise e clicar na função “Dimensionar”. A partir daí o programa realizará cálculos e irá variar a espessura da camada de reforço até convergir para um resultado satisfatório, levando em consideração o critério de Área Trincada e Fadiga. No modo Reforço só é permitida a inserção de uma camada de reforço de, no máximo, 15 cm.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo estão evidenciados os resultados desta pesquisa, tal qual as discussões acerca dos mesmos. Inicialmente está exposto o resultado das avaliações das deflexões obtidas. Em seguida está apresentado os resultados dos módulos de resiliência obtidos pelo processo de retroanálise. Por fim está explicitado a análise do pavimento em questão, bem como a proposta de intervenção de reforço.

6.1 Avaliação das deflexões obtidas

Utilizando as deflexões medidas no levantamento deflectométrico, obtidas pelo ensaio FDW desenvolvido por Cavalcante (2005), foi realizado tratamento estatístico para a eliminação de possíveis dados espúrios. A metodologia utilizada foi a recomendada pelo método do DNIT-PRO 011/79. Foi utilizada a deflexão máxima para a determinação da deflexão característica, uma vez que a deflexão medida no centro de aplicação da carga representa a resposta de todas as camadas do pavimento e subleito. Nos quadros 01 e 02 estão detalhadas as leituras médias e desvio padrão de cada segmento homogêneo, bem como a deflexão característica (Dc) de cada trecho.

Quadro 01- Resumo deflexões faixa da esquerda.

Segmento homogêneo	Temperatura (°C)		Deflexão (10^{-2} mm)		
	Pavimento	Ar	Média	Desvio Padrão	Dc
SH-07	38,2	30,9	64,8	19,9	84,6
SH-08	38,0	30,8	65,3	16,5	81,8
SH-09	39,9	30,1	44,3	10,3	54,6

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Quadro 02- Resumo deflexões faixa da direita.

Segmento homogêneo	Temperatura (°C)		Deflexão (10^{-2} mm)		
	Pavimento	Ar	Média	Desvio Padrão	Dc
SH-07	49,5	38,34	56,4	15,8	72,3
SH-08	47,5	35,14	58,9	17,7	76,5
SH-09	35,6	29,14	43,0	8,0	51,0

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Os métodos vigentes de projetos de reforço de pavimentos flexíveis do DNIT, PRO 269/94 e o PRO 11/79, utilizam deflexões obtidas por meio do ensaio de Viga Belkelman em seus cálculos e, desta forma, foram feitas as correlações entre o ensaio de FDW e o ensaio de Viga. Partindo desta afirmação, foram utilizados os conceitos discutidos no tópico 4.8 e foram realizadas essas correlações, presentes na Tabela 8 desta pesquisa, e os resultados obtidos podem ser observados nos Quadros 03 e 04.

Quadro 03 - Resumo das deflexões características de FWD e de Viga faixa da esquerda.

Segmento Homogêneo	Deflexão Características (10-2mm)		
	Dc FDW	Dc Viga Benkelman	Variação
SH-07	84,6	89,6	5,6%
SH-08	81,8	88,3	7,4%
SH-09	54,6	72,3	24,5%

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

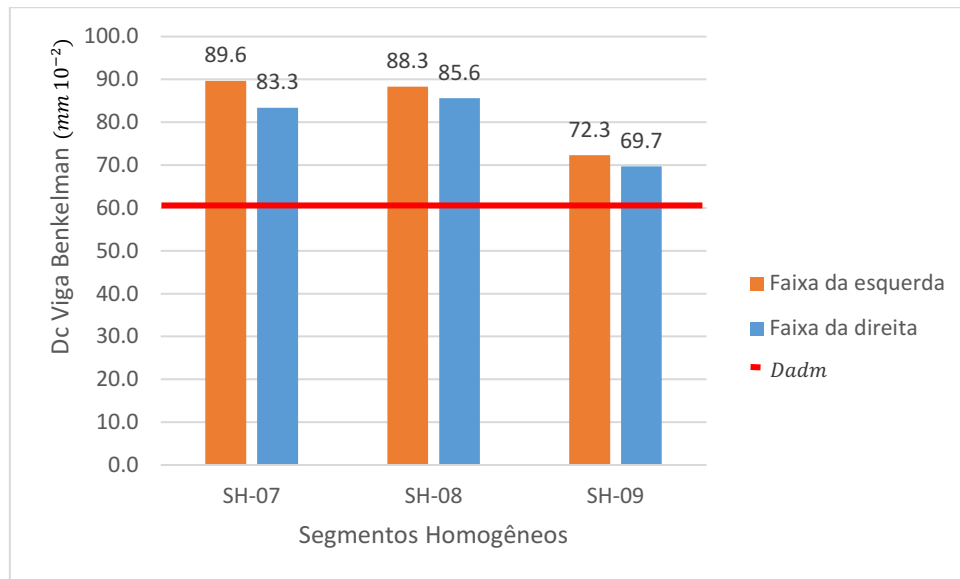
Quadro 04 - Resumo das deflexões características de FWD e de Viga faixa da direita.

Segmento Homogêneo	Deflexão Características (10-2mm)		
	Dc FDW	Dc Viga Benkelman	Variação
SH-07	72,3	83,3	13,2%
SH-08	76,5	85,6	10,6%
SH-09	51	69,7	26,8%

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

A deflexão admissível de um pavimento é função direta do número N representativo do trecho. Desta forma, utilizando-se da metodologia proposta no DNIT-PRO 11/79, foi determinada a deflexão admissível (D_{adm}) igual a 60 centésimos de milímetro (10^{-2} mm) para um número N de projeto para o trecho de $1,02 \times 10^7$. Está ilustrado no Gráfico 1, onde é possível constatar que 100% das deflexões da Viga Belkelman, obtidas por correlação com FDW pelo metodologia PRO11/79, são maiores que a deflexão admissível.

Gráfico 01- Deflexão da Viga Benkelman obtidas por correlação com FWD e admissíveis pelo PRO11/79.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

6.2 Retroanálise das camadas do pavimento e Subleito

Por meio da retroanálise é possível detectar as camadas mais críticas do sistema pavimento-subleito, analisando a magnitude das deflexões da bacia deflectométrica. Os módulos obtidos refletem o estado de tensão em que se encontra a estrutura, permitindo avaliar as camadas do pavimento e diagnosticar como se encontra a estrutura.

A retroanálise foi realizada com auxílio do software BackMeDiNa, utilizando as bacias médias de cada segmento homogêneo. Nos Quadros 05 e 06 estão descritas as bacias deflectométricas médias obtidas em campo e as bacias obtidas por meio da retroanálise, assim como o erro apresentado no processo de retroanálise.

Quadro 05- Bacias deflectométricas de campo e retroanalizadas no BackmeDiNa-Faixa da esquerda.

BACIA		BACIAS DE DEFLEXÃO (μm)							ERRO(%)
SH07	CAMPO	648	482	367	215	142	56	23	3,4
	RETRO	632	473	364	231	141	54	23	
SH08	CAMPO	653	482	357	198	129	50	21	4,9
	RETRO	636	466	352	217	128	47	22	
SH09	CAMPO	443	313	234	135	90	42	20	3,9
	RETRO	432	310	232	144	88	40	21	

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Quadro 06- Bacias deflectométricas de campo e retro analisadas no BackmeDiNa-Faixa da direita.

BACIA		BACIAS DE DEFLEXÃO (μm)							ERRO(%)
SH07	CAMPO	564	411	313	182	119	45	17	4
	RETRO	539	405	312	197	119	43	17	
SH08	CAMPO	589	440	339	203	137	57	24	3,5
	RETRO	575	434	336	217	135	55	24	
SH09	CAMPO	430	338	275	184	133	62	26	1,7
	RETRO	426	337	274	191	130	62	26	

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Os resultados obtidos apresentaram módulos do revestimento asfáltico em média de 3470 MPa. Concretos asfálticos novos apresentam, normalmente, módulos de resiliência em torno de 3500 MPa se estivessem íntegros e acima de 6000 MPa quando estes já apresentam algum nível de oxidação. Os resultados dos módulos retroanalisados para todas as camadas do pavimento estão apresentados nos quadros 07 e 08.

Quadro 07- Módulos retroanalisados faixa da esquerda.

BACIAS	MODULOS DE RESILIÊNCIA RETROANALISADOS(MPa)		
	Revestimento	Base	Subleito
	12	35	
SH 07	2842	61	263
SH 08	2549	64	285
SH 09	3178	131	317

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Quadro 08- Módulos retroanalisados faixa da direita.

BACIAS	MODULOS DE RESILIÊNCIA RETROANALISADOS(MPa)		
	Revestimento	Base	Subleito
	12	35	
SH 07	3426	67	341
SH 08	3198	70	255
SH 09	5625	91	247

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Pelo asfalto ser um material termo viscoelástico, suas propriedades estão diretamente ligadas à sua temperatura. Diante disto, foi feita a correção do módulo de resiliência obtido na retroanálise de acordo com a temperatura padrão de 25 °C, por meio da metodologia citada no

tópico 6.2 desta pesquisa. Os valores corrigidos de MR do CBUQ do pavimento estão apresentados nos Quadros 09 e 10.

Quadro 09- Módulos retroanalizados corrigidos faixa da esquerda.

BACIAS	MÓDULOS DE RESILIÊNCIA RETROANALISADOS(MPa)		
	Revestimento	Base	Subleito
	12	35	
SH 07	4940	61	263
SH 08	4390	64	285
SH 09	5781	131	317

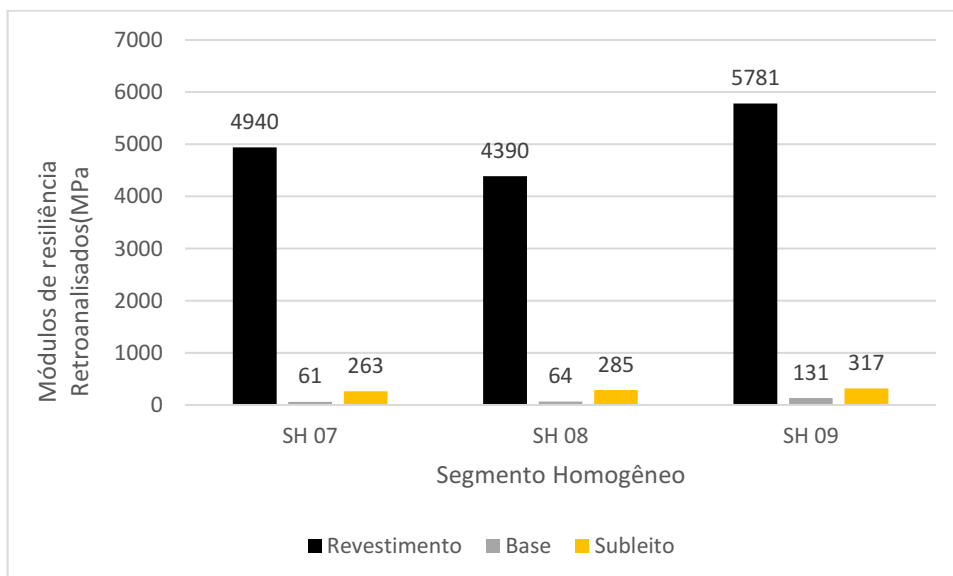
Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Quadro 10- Módulos retroanalizados corrigidos faixa da direita.

BACIAS	MÓDULOS DE RESILIÊNCIA RETROANALISADOS(MPa)		
	Revestimento	Base	Subleito
	12	35	
SH 07	9896	67	341
SH 08	8199	70	255
SH 09	9105	91	247

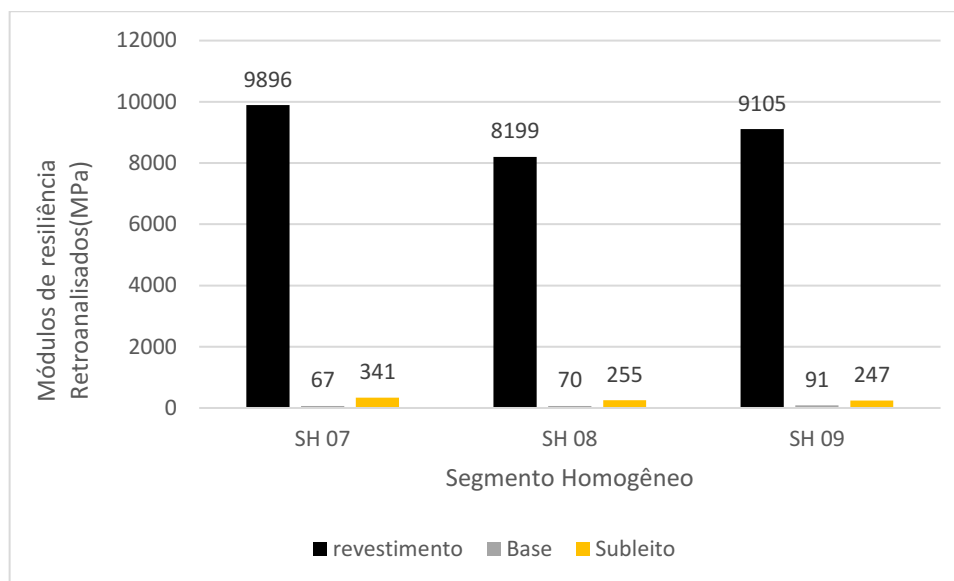
Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Gráfico 02- Módulo de resiliência da faixa da esquerda.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Gráfico 03- Módulo de resiliência da faixa da direita.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

A temperatura tem uma influência menos significativa nas camadas de base e subleito, por serem materiais granulares. Devido a isto, as correções dos módulos mediante a temperatura não foram realizadas.

Os módulos do revestimento da faixa da esquerda foram menores em relação aos da faixa da direita. Isso se justifica devido a faixa da esquerda apresentar um tráfego mais pesado, causando dessa forma uma deterioração maior quando comparada a da faixa da direita.

Os valores dos módulos da camada de base apresentaram, em sua maioria, menores que 100 MPa, que pode ser devido à grande dependência da camada granular da tensão de confinamento. Desta forma, quanto maior o confinamento maior será o módulo, entretanto devido o tráfego sobre o revestimento com espessuras elevadas de CBUQ (>10cm) gerar um estado de tensão, acarretam baixos valores de confinamento, ocasionando dessa forma que a camada granular apresente baixos valores de módulo de resiliência.

Para o subleito observou-se módulo de resiliência maior que a camada subjacente de base esse comportamento se justifica pelo fato do material constituinte do subleito possuir maior dependência da atenção desvio. Logo, quanto menores as tensões no topo do subleito maiores serão os módulos da camada conforme constatou Cavalcante (2005).

Uma importante análise que merece destaque é a relação modular entre as camadas do revestimento asfáltico e a base granular (MR_R/MR_B), quanto maior esta relação maior serão as tensões e deformações na fibra inferior do revestimento, o qual relacionado com um tráfego

pesado, de ordem de $N \geq 10^7$, acarretará em um trincamento prematuro de revestimento asfáltico. A relação modular entre o revestimento e a base está explicitada nos quadros 11 e 12, o qual está variando de 24 a 62. Isso implica que o revestimento chega a ser 62 vezes mais rígido que a base. Vale ressaltar que essa análise modular foi realizada considerando as condições do revestimento nas temperaturas de campo, sem correção de módulo para temperatura ambiente, o que aumentaria o valor do módulo de resiliência da camada asfáltica e, desta forma, aumentaria a relação modular com a camada de base.

Quadro 11- Relação modular faixa da esquerda.

BACIAS	MODULOS DE RESILIÊNCIA RETROANALISADOS(MPa)			Relação Modular (MR_R/MR_B)
	Revestimento	Base	Subleito	
	12	35		
SH 07	2842	61	263	47
SH 08	2549	64	285	40
SH 09	3178	131	317	24

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Quadro 12- Relação modular faixa da direita.

dec	MODULOS DE RESILIÊNCIA RETROANALISADOS(MPa)			Relação Modular (MR_R/MR_B)
	Revestimento	Base	Subleito	
	12	35		
SH 07	3426	67	341	51
SH 08	3198	70	255	46
SH 09	5625	91	247	62

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Por meio destas análises é possível constatar que para o número de solicitação $N = 1,02 \times 10^7$ deste trecho, uma intervenção mantendo-se estrutura constituída de base granular ensejará em ruína do pavimento por fissuramento prematuro. Esse aspecto já aponta para adoção de uma solução de pavimento semirrígido constituído de base cimentada, compatibilizando, assim, rigidez do CBUQ e da base, por exemplo, de BGTC.

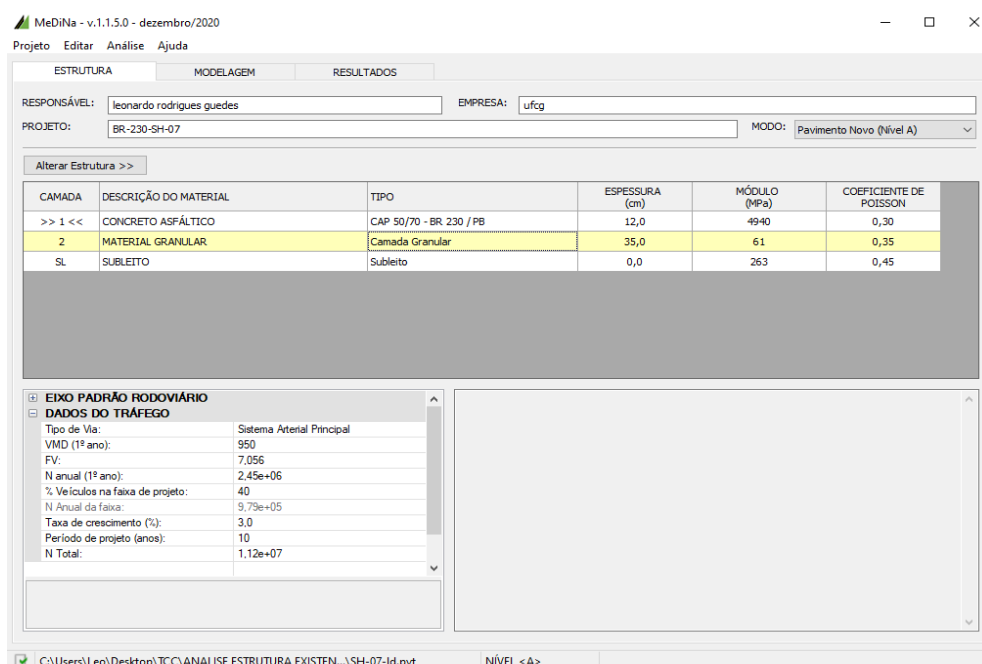
6.3 Análise Mecânica-empírica da Estrutura do Pavimento Retroanalizado

Após obtenção dos módulos de resiliência do trecho estudado, objetivou-se por fazer uma avaliação mecânica-empírica da estrutura existente do pavimento. O qual teve intuito de averiguar as condições estruturais do pavimento em questão e avaliar a necessidade de uma intervenção no mesmo. Procedeu-se com a configuração do software MeDiNa, onde foram adicionadas as propriedades dos materiais constituintes da estrutura de pavimento existente em cada segmento homogêneo, mediante dados obtidos por meio de retroanálise.

O revestimento foi definido como sendo de 12 cm (5 cm de CBUQ faixa C e 7cm de CBUQ faixa B), foi adotado uma camada granular de 35 cm (20 cm de brita graduada simples e 15 cm de solo estabilizado granulometricamente), o subleito com espessura semi-infinita, além de também adicionar os módulos de resiliência obtidos na retroanálise e coeficientes de Poisson de 0,30 para camadas asfálticas, 0,35 para base e sub-base granular e 0,45 para subleito, como indicados na Figura 39.

A inserção dos dados de tráfego seguiu como indicado no tópico 5.2.3, o qual estão indicados no canto inferior esquerdo adotando um VMD de 950, um FV de 7,06, porcentagem de veículos na faixa de projeto de 40%, uma taxa de crescimento de 3%, um período de projeto de 10 anos, com esses dados o programa obteve um número N de $1,12 \times 10^7$, como exposto na Figura 39.

Figura 39 – Tela de início do software MeDiNa após configuração da estrutura – SH 07 faixa da esquerda.



Fonte: Dados da pesquisa, 2021.

Após serem inseridos todos os dados o usuário informa para o programa analisar a estrutura, como pode ser visto na Figura 40. Pode-se perceber, que a estrutura apresenta área trincada de 99% ao final da vida útil do pavimento, tal situação se repetiu para todos os segmentos homogêneos do trecho. Desta forma constata-se a necessidade de uma intervenção no trecho estudado.

Figura 40 - Tela de resultado da análise da estrutura para o SH-07 faixa da esquerda.

The screenshot displays the MeDiNa software interface. At the top, the title bar reads 'MeDiNa - v.1.1.5.0 - dezembro/2020'. Below it, a menu bar contains 'Projeto', 'Editar', 'Análise', and 'Ajuda'. A toolbar shows 'ESTRUTURA', 'MODELAGEM', and 'RESULTADOS'. The main window is divided into several sections:

- Metadata:** 'RESPONSÁVEL: leonardo rodrigues guedes', 'EMPRESA: ufcg', 'PROJETO: BR-230-SH-07', and 'MODO: Pavimento Novo (Nível A)'.
- Table of Layers:**

CAMADA	DESCRIÇÃO DO MATERIAL	TIPO	ESPESSURA (cm)	MÓDULO (MPa)	COEFICIENTE DE POISSON
>> 1 <<	CONCRETO ASFÁLTICO	CAP 50/70 - BR 230 / PB	12,0	4940	0,30
2	MATERIAL GRANULAR	Camada Granular	35,0	61	0,35
SL	SUBLEITO	Subleito	0,0	263	0,45
- EIXO PADRÃO RODOVIÁRIO:**
 - DADOS DO TRÁFEGO:**

Tipo de Via:	Sistema Arterial Principal
VMD (1º ano):	950
FV:	7,056
N anual (1º ano):	2.45e+06
% Veículos na faixa de projeto:	40
N Anual da faixa:	9.79e+05
Taxa de crescimento (%):	3,0
Período de projeto (anos):	10
N Total:	1.12e+07
- ANÁLISE DO PAVIMENTO NOVO:**
 - Seção do pavimento analisada considerando os dados inseridos pelo Engenheiro Projetista no programa MeDiNa.
 - Nível de confiabilidade da análise: 95%
 - Área Trincada Estimada do pavimento no fim do período: 99,0%
 - Afundamento de Trilha de Roda: 4,4mm
 - ALERTAS:** Tráfego elevado para a estrutura proposta.

Fonte: Dados da pesquisa, 2021.

6.4 Proposta de Reforço do Pavimento Existente

Mediante análise realizada no tópico 6.3, foi determinado que o pavimento em questão precisa de uma intervenção para reestabelecer as boas condições funcionais e estruturais. Desta forma partiu-se para a viabilidade de utilização de uma camada de reforço no pavimento para sanar os problemas e reestabelecer as condições mínimas do pavimento. A utilização de reforço baseou-se na metodologia mecanística-empírica do MeDiNa.

Vale ressaltar que o dimensionamento do reforço foi realizado levando em consideração a pior condição em que a pista se encontra. Logo o dimensionamento foi realizado nos três

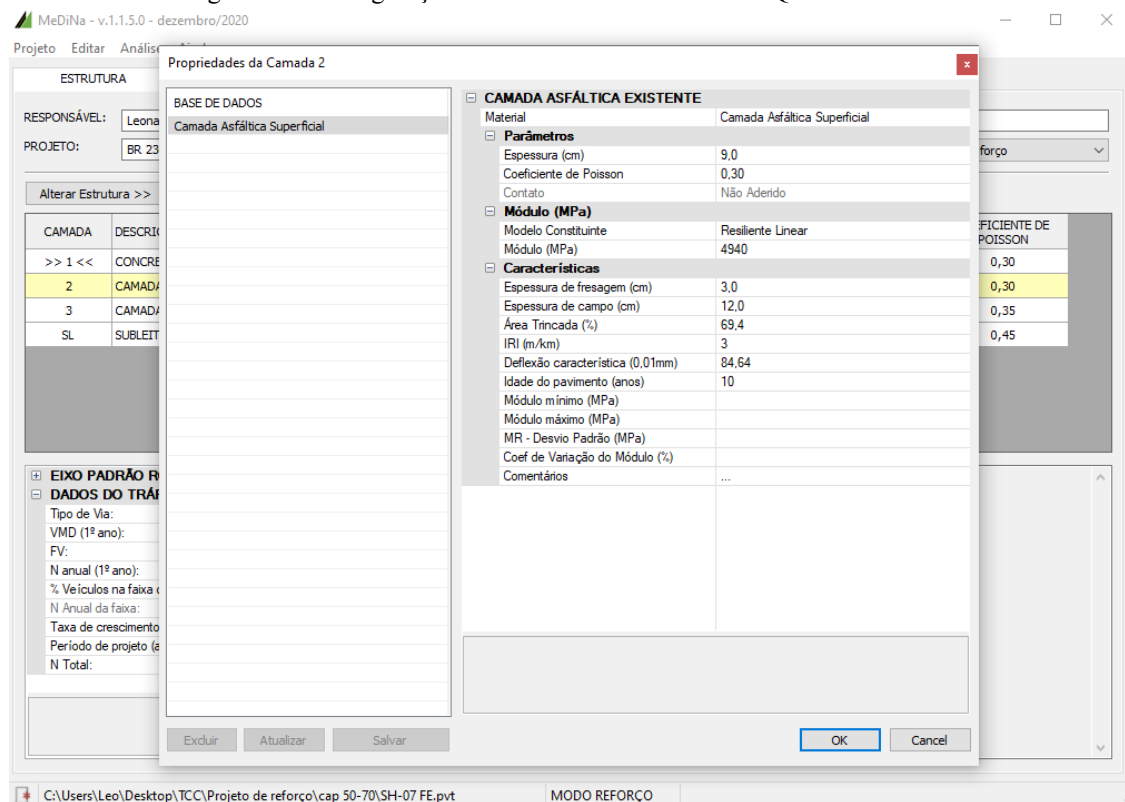
segmentos em questão apenas na faixa da esquerda, pois é a faixa que apresenta uma ocorrência de tráfego mais pesado.

Inicialmente foi selecionado a opção de dimensionamento de reforço no software MeDiNa, na sequência procedeu-se com a configuração do software, inserindo as propriedades dos materiais constituintes da estrutura do pavimento existente, mediante dados obtidos por meio de retroanálise.

O revestimento foi definido como sendo de 12 cm (5 cm de CBUQ faixa C e 7cm de CBUQ faixa B) no software MeDiNa, o projetista opta por fresar ou não a camada de revestimento, levando em consideração fatores como segurança do usuário e drenagem de águas pluviais, por exemplo. Visando a segurança do usuário, é recomendado que o degrau (diferença de nível) entre pista e acostamento não seja muito elevado, onde valores de degrau até 5cm são satisfatórios no meio rodoviário.

Desta forma, foi indicada uma fresagem de 3cm, tendo a espessura remanescente da camada existente de revestimento asfáltico de 9 cm, conforme indicado na Figura 41. O dimensionamento do reforço do SH-07 está apresentado como exemplo, tendo em vista que o procedimento é igual para os demais segmentos.

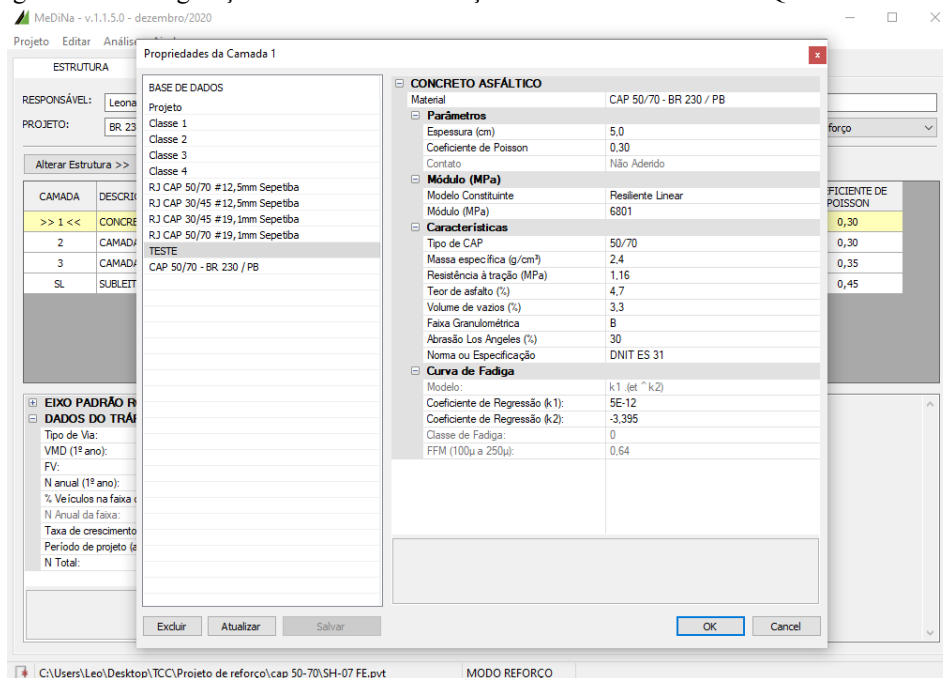
Figura 41 - Configuração da camada existente de CBUQ do SH-07.



Fonte: Dados da pesquisa, 2021.

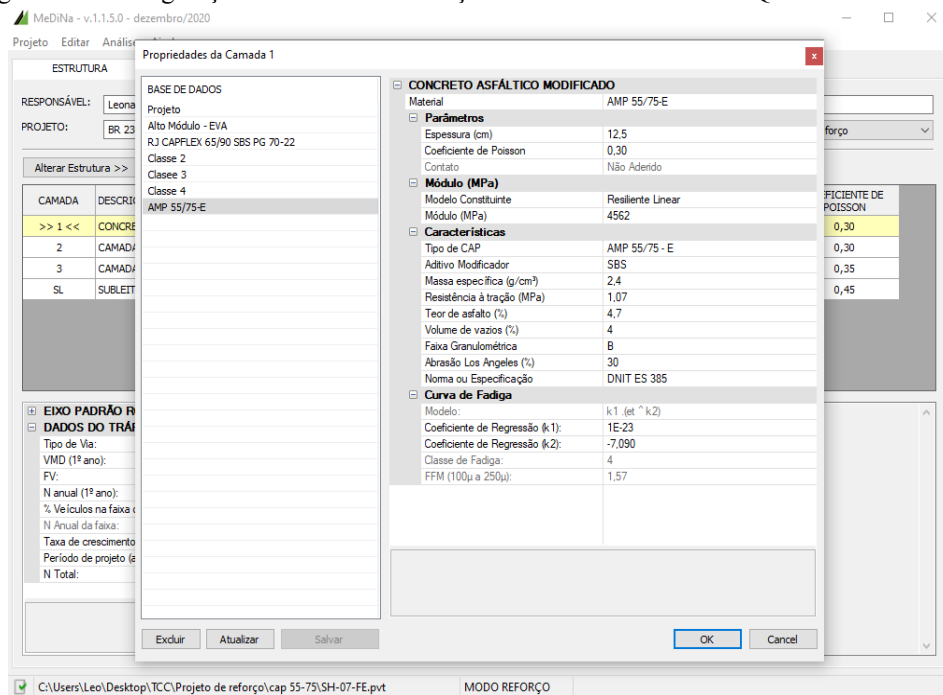
Depois de configuração dos materiais existentes nas camadas do pavimento, procedeu-se com a inserção das propriedades de CBUQ constituinte da camada de reforço a ser dimensionada. Foram feitas duas avaliações de reforço, tanto em CBUQ com CAP 50/70 como com CBUQ com AMP 55-75-E, tendo em vista que o segundo, por se um ligante asfáltico modificado com polímero SBS, de acordo com Gama (2016), aumenta significativamente a resistência a fadiga e a deformação permanente da mistura asfáltica. Abaixo está ilustrada as telas de configuração dos materiais do reforço de CBUQ com CAP 50/70 e de CBUQ com AMP 55-75-E respectivamente

Figura 42 - Configuração da camada de reforço do revestimento de CBUQ com CAP 50/70.



Fonte: Dados da pesquisa, 2021.

Figura 43 - Configuração da camada de reforço do revestimento de CBUQ com AMP 55/75-E.



Fonte: Dados da pesquisa, 2021.

Todas as propriedades físicas e mecânicas dos CBUQ's utilizadas como opção de reforço foram as mesmas obtidas por Cavalcante (2016) que realizou dosagem e caracterização das massas asfálticas com agregados da região do trecho em estudo desta pesquisa. Vale ressaltar que o CBUQ com CAP 50/70, apresentou classe de fadiga 0, que indica a situação mais desfavorável, ou seja, para atender os critérios de fadiga o MeDiNa propõe espessuras de revestimento maiores que em comparação a outras misturas com classe de fadiga mais favorável, entretanto o CBUQ com AMP 55/75-E apresentou classe de fadiga 4, que corresponde a melhor situação possível de fadiga, logo o programa dimensionara o reforço com espessuras menores. Finalizando a inserção de todos os valores, procedeu-se com o dimensionamento da espessura da camada asfáltica de reforço, como ilustrado na Figura 44.

Figura 44 - Tela de início do software MeDiNa após configuração da estrutura para projeto de Reforço.

MeDiNa - v.1.1.5.0 - dezembro/2020

Projeto Editar Análise Ajuda

ESTRUTURA MODELAGEM RESULTADOS

RESPONSÁVEL: Leonardo Rodrigues Guedes EMPRESA: UFCCG

PROJETO: BR 230 - SH 07 FE MODOS: Projeto de Reforço

Alterar Estrutura >>

CAMADA	DESCRIÇÃO DO MATERIAL	TIPO	ESPESSURA (cm)	MÓDULO (MPa)	COEFICIENTE DE POISSON
>> 1 <<	CONCRETO ASFÁLTICO	CAP 50/70 - BR 230 / PB	5,0	6801	0,30
2	CAMADA ASFÁLTICA EXISTENTE	Camada Asfáltica Superficial	9,0	4940	0,30
3	CAMADA EXISTENTE	Camada Granular	35,0	61	0,35
SL	SUBLEITO	Subleito	0,0	263	0,45

EIXO PADRÃO RODOVIÁRIO

DADOS DO TRÁFEGO

Tipo de Via:	Sistema Arterial Primário
VMD (1º ano):	950
FV:	7,074
N anual (1º ano):	2,45e+06
% Veículos na faixa de projeto:	40
N Anual da faixa:	9,81e+05
Taxa de crescimento (%):	3,0
Período de projeto (anos):	10
N Total:	1,12e+07

VMD (1º ano):
Volume Médio Diário no ano de abertura do tráfego

C:\Users\Leo\Desktop\TCC\Projeto de reforço\cap 50-70\SH-07 FE.pvt MODO REFORÇO

Fonte: Dados da pesquisa, 2021.

A opção por um reforço com CBUQ com CAP 50/70 mostrou-se ineficiente para as condições de tráfego do trecho, bem como para os limites impostos como parâmetros da metodologia do MeDiNa, como, por exemplo, porcentagem da área trincada ao final da vida útil do pavimento (10 anos) inferior a 30%. Ao tentar dimensionar o reforço adequado às solicitações, o software informa que a espessura máxima para a camada de reforço foi atingida, que é de 15 cm. Em outras palavras, um reforço máximo de 15 cm de CBUQ com CAP 50/70 na estrutura existente é ineficaz para atender os critérios de qualidade solicitados, conforme ilustra a Figura 45.

Figura 45- Tela de resultado do dimensionamento do reforço para o SH-07.

MeDiNa - v.1.1.5.0 - dezembro/2020

Projeto Editar Análise Ajuda

RESPONSÁVEL: Leonardo Rodrigues Guedes EMPRESA: UFCG

PROJETO: BR 230 - SH 07 FE MODO: Projeto de Reforço

Alterar Estrutura >>

CAMADA	DESCRIÇÃO DO MATERIAL	TIPO	ESPESSURA (cm)	MÓDULO (MPa)	COEFICIENTE DE POISSON
>> 1 <<	CONCRETO ASFÁLTICO	CAP 50/70 - BR 230 / PB	15,0	6801	0,30
2	CAMADA ASFÁLTICA EXISTENTE	Camada Asfáltica Superficial	9,0	4940	0,30
3	CAMADA EXISTENTE	Camada Granular	35,0	61	0,35
SL	SUBLEITO			263	0,45

MeDiNa

A espessura da camada selecionada atingiu o limite superior previsto!
Reveja a estrutura.

OK

EIXO PADRÃO RODOVIÁRIO

DADOS DO TRÁFEGO

Tipo de Via:	Sistema Arterial Primário
VMD (1º ano):	950
FV:	7,074
N anual (1º ano):	2,45e+06
% Veículos na faixa de projeto:	40
N Anual da faixa:	9,81e+05
Taxa de crescimento (%):	3,0
Período de projeto (anos):	10
N Total:	1,12e+07

VMD (1º ano):
Volume Médio Diário no ano de abertura do tráfego

C:\Users\Leo\Desktop\TCC\Projeto de reforço\cap 50-70\SH-07 FE.pvt MODO REFORÇO

Fonte: Dados da pesquisa, 2021.

Outra ferramenta do software MeDiNa é a de analisar uma estrutura qualquer. Desta forma, foi informado ao programa uma estrutura com reforço de CBUQ com CAP 50/70 na espessura de 15 cm, por ser o máximo suportado pelas análises de fadiga e deformação do software. Conforme ilustrado na Figura 46, tal estrutura apresenta área trincada de 99% ao final da vida útil do pavimento, além do alerta de que o tráfego é demasiadamente pesado para a estrutura proposta. Tal situação se repetiu para todos os segmentos homogêneos do trecho, quando considerado a opção do dimensionamento do reforço com CBUQ com CAP 50/70. Sendo assim, partiu-se para a avaliação do reforço com CBUQ com asfalto modificado por polímero SBS.

Figura 46- Tela de resultado da análise da estrutura proposta do reforço para o SH-07.

MeDiNa - v.1.1.5.0 - dezembro/2020

Projeto Editar Análise Ajuda

ESTRUTURA MODELAGEM RESULTADOS

RESPONSÁVEL: Leonardo Rodrigues Guedes EMPRESA: UFCG

PROJETO: BR 230 - SH 07 FE MODO: Projeto de Reforço

Alterar Estrutura >>

CAMADA	DESCRIÇÃO DO MATERIAL	TIPO	ESPESSURA (cm)	MÓDULO (MPa)	COEFICIENTE DE POISSON
>> 1 <<	CONCRETO ASFÁLTICO	CAP 50/70 - BR 230 / PB	5,0	6801	0,30
2	CAMADA ASFÁLTICA EXISTENTE	Camada Asfáltica Superficial	9,0	4940	0,30
3	CAMADA EXISTENTE	Camada Granular	35,0	61	0,35
SL	SUBLEITO	Subleito	0,0	263	0,45

EIXO PADRÃO RODOVIÁRIO

DADOS DO TRÁFEGO

Tipo de Via:	Sistema Arterial Primário
VMD (1º ano):	950
FV:	7,074
N anual (1º ano):	2,45e+06
% Veículos na faixa de projeto:	40
N Anual da faixa:	9,81e+05
Taxa de crescimento (%):	3,0
Período de projeto (anos):	10
N Total:	1,12e+07

VMD (1º ano):
Volume Médio Diário no ano de abertura do tráfego

--- ANÁLISE DO REFORÇO DO PAVIMENTO ---
Seção do pavimento analisada considerando os dados inseridos pelo Engenheiro Projetista no programa MeDiNa.

Nível de confiabilidade da análise: 85%
Área Trincada Estimada do pavimento no fim do período: 99,0%

--- ALERTAS ---
Tráfego elevado para a estrutura proposta.

ATENÇÃO:
A análise não considera a reflexão de trincas do pavimento existente!

Dados da estrutura existente para auxiliar o projetista:
- Área Trincada: 69,4%
>> Considerar a adoção de medidas para evitar a reflexão de trincas
- Condição de tráfego: REGULAR (IRI = 3,0 m/km)
- Deflexão característica: $dc = 84,6$ (0,01mm)
- Camada de base: Considerar a adoção de medidas para reconstrução ou reciclagem

C:\Users\Leo\Desktop\TCC\Projeto de reforço\cap 50-70\SH-07 FE.pvt MODO REFORÇO

Fonte: Dados da pesquisa, 2021.

O dimensionamento do reforço de CBUQ com AMP 55-75-E, se deu de forma satisfatória, o dimensionamento apontou espessuras variáveis em cada segmento, expressando uma área de trincamento satisfatória ao final da vida útil do pavimento. O relatório gerado pelo programa, que consta na seção anexos, informa a evolução da área trincada a cada 6 meses do início ao final da vida útil do pavimento, bem como informa acerca do tráfego do trecho e também indica um controle de deflexão após a execução do serviço. Abaixo está ilustrada os resultados dos dimensionamentos em cada segmento homogêneo.

Figura 47- Tela de resultado de dimensionamento da estrutura proposta do reforço para o SH-07.

MeDiNa - v.1.1.5.0 - dezembro/2020

Projeto Editar Análise Ajuda

ESTRUTURA MODELAGEM RESULTADOS

RESPONSÁVEL: Leonardo Rodrigues Guedes EMPRESA: UFCG

PROJETO: BR 230 - SH 07 FE MODO: Projeto de Reforço

Alterar Estrutura >>

CAMADA	DESCRIÇÃO DO MATERIAL	TIPO	ESPESSURA (cm)	MÓDULO (MPa)	COEFICIENTE DE POISSON
>> 1 <<	CONCRETO ASFÁLTICO MODIFICADO	AMP 55/75-E	9,2	4562	0,30
2	CAMADA ASFÁLTICA EXISTENTE	Camada Asfáltica Superficial	9,0	4940	0,30
3	CAMADA EXISTENTE	Camada Granular	35,0	61	0,35
SL	SUBLEITO	Subleito	0,0	263	0,45

EIXO PADRÃO RODOVIÁRIO

DADOS DO TRÁFEGO

Tipo de Via: Sistema Arterial Principal

VMD (1º ano): 950

FV: 7,074

N anual (1º ano): 2,45e+06

% Veículos na faixa de projeto: 40

N Anual da faixa: 9,81e+05

Taxa de crescimento (%): 3,0

Período de projeto (anos): 10

N Total: 1,12e+07

VMD (1º ano):
Volume Médio Diário no ano de abertura do tráfego

--- DIMENSIONAMENTO DO REFORÇO DO PAVIMENTO ---
Seção do pavimento dimensionada considerando os dados inseridos pelo Engenheiro Projetista no programa MeDiNa.

Nível de confiabilidade da análise: 95%
Área Trincada Estimada do pavimento no fim do período: 28,6%

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

ATENÇÃO:
A análise não considera a reflexão de trincas do pavimento existente!

Dados da estrutura existente para auxiliar o projetista:

- Área Trincada: 69,4%
- > Considerar a adoção de medidas para evitar a reflexão de trincas
- Condição de tráfego: REGULAR (IRI = 3,0 m/km)
- Deflexão característica: dc = 84,6 (0,01mm)
- Camada de base: Considerar a adoção de medidas para reconstrução ou reciclagem

C:\Users\Leo\Desktop\TCC\Projeto de reforço\cap 55-75\SH-07-FE.pvt MODO REFORÇO

Fonte: Dados da pesquisa, 2021.

Figura 48- Tela de resultado de dimensionamento da estrutura proposta do reforço para o SH-08.

MeDiNa - v.1.1.5.0 - dezembro/2020

Projeto Editar Análise Ajuda

ESTRUTURA MODELAGEM RESULTADOS

RESPONSÁVEL: Leonardo Rodrigues Guedes EMPRESA: UFCG

PROJETO: BR 230 - SH 08 FE MODO: Projeto de Reforço

Alterar Estrutura >>

CAMADA	DESCRIÇÃO DO MATERIAL	TIPO	ESPESSURA (cm)	MÓDULO (MPa)	COEFICIENTE DE POISSON
>> 1 <<	CONCRETO ASFÁLTICO MODIFICADO	AMP 55/75-E	9,7	4562	0,30
2	CAMADA ASFÁLTICA EXISTENTE	Camada Asfáltica Superficial	9,0	4390	0,30
3	CAMADA EXISTENTE	Camada Granular	35,0	64	0,35
SL	SUBLEITO	Subleito	0,0	285	0,45

EIXO PADRÃO RODOVIÁRIO

DADOS DO TRÁFEGO

Tipo de Via: Sistema Arterial Principal

VMD (1º ano): 950

FV: 7,074

N anual (1º ano): 2,45e+06

% Veículos na faixa de projeto: 40

N Anual da faixa: 9,81e+05

Taxa de crescimento (%): 3,0

Período de projeto (anos): 10

N Total: 1,12e+07

VMD (1º ano):
Volume Médio Diário no ano de abertura do tráfego

--- DIMENSIONAMENTO DO REFORÇO DO PAVIMENTO ---
Seção do pavimento dimensionada considerando os dados inseridos pelo Engenheiro Projetista no programa MeDiNa.

Nível de confiabilidade da análise: 95%
Área Trincada Estimada do pavimento no fim do período: 29,4%

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

ATENÇÃO:
A análise não considera a reflexão de trincas do pavimento existente!

Dados da estrutura existente para auxiliar o projetista:

- Área Trincada: 15,0%
- Condição de tráfego: REGULAR (IRI = 3,0 m/km)
- Deflexão característica: dc = 81,8 (0,01mm)
- Camada de base: Considerar a adoção de medidas para reconstrução ou reciclagem

C:\Users\Leo\Desktop\TCC\Projeto de reforço\cap 55-75\SH-08-FE.pvt MODO REFORÇO

Fonte: Dados da pesquisa, 2021.

Figura 49- Tela de resultado de dimensionamento da estrutura proposta do reforço para o SH-09.

MeDiNa - v.1.1.5.0 - dezembro/2020

Projeto Editar Análise Ajuda

ESTRUTURA MODELAGEM RESULTADOS

RESPONSÁVEL: Leonardo Rodrigues Guedes EMPRESA: UFGG

PROJETO: BR 230 - SH 09 MODO: Projeto de Reforço

Alterar Estrutura >>

CAMADA	DESCRIÇÃO DO MATERIAL	TIPO	ESPESSURA (cm)	MÓDULO (MPa)	COEFICIENTE DE POISSON
>> 1 <<	CONCRETO ASFÁLTICO MODIFICADO	AMP 55/75-E	5,0	4562	0,30
2	CAMADA ASFÁLTICA EXISTENTE	Camada Asfáltica Superficial	9,0	5781	0,30
3	CAMADA EXISTENTE	Camada Granular	35,0	131	0,35
SL	SUBLEITO	Subleito	0,0	317	0,45

EIXO PADRÃO RODOVIÁRIO

DADOS DO TRÁFEGO

Tipo de Via:	Sistema Arterial Principal
VMD (1º ano):	950
FV:	7,074
N anual (1º ano):	2,45e+06
% Veículos na faixa de projeto:	40
N Anual da faixa:	9,81e+05
Taxa de crescimento (%):	3,0
Período de projeto (anos):	10
N Total:	1,12e+07

Taxa de crescimento (%):
Taxa de crescimento do tráfego

--- DIMENSIONAMENTO DO REFORÇO DO PAVIMENTO ---
Seção do pavimento dimensionada considerando os dados inseridos pelo Engenheiro Projetista no programa MeDiNa.

Nível de confiabilidade da análise: 95%
Área Trincada Estimada do pavimento no fim do período: 4,8%
Análise encerrou por haver atingido a espessura mínima da camada.

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

ATENÇÃO:
A análise não considera a reflexão de trincas do pavimento existente!

Dados da estrutura existente para auxiliar o projetista:
- Área Trincada: 24,0%
- Condição de tráfego: REGULAR (IRI = 3,0 m/km)
- Deflexão característica: dc = 54,6 (0,01mm)
- Camada de base: Considerar a adoção de medidas para reconstrução ou reciclagem

C:\Users\Leo\Desktop\TCC\Projeto de reforço\cap 55-75\SH-09-FE.pvt MODO REFORÇO

Fonte: Dados da pesquisa, 2021.

Quadro 13- Tabela resumo de dimensionamento do reforço no pavimento pelo MeDiNa.

SEGMENTO HOMOGENEO	Projeto de Reforço		Área Trincada
	CBUQ com CAP 50/70 (cm)	CBUQ com AMP 55/75-E (cm)	(%)
SH-07	-	9,2	28,6
SH-08	-	9,7	29,4
SH-09	-	5	4,8

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

7 CONCLUSÕES

Com base nos resultados apresentados nesta pesquisa e na análise dos resultados obtidos, pode-se concluir:

- A análise das deflexões, obtidas pelo ensaio de FWD, apresentaram deflexões características superiores a deflexão admissível, efeito que pode ser atribuído por o pavimento estar apresentando defeitos na superfície.
- O software BackMeDiNa se mostrou uma ferramenta prática para obtenção dos módulos de resiliência das camadas do pavimento. Sendo uma das suas limitações a não consideração da influência da temperatura do pavimento na metodologia de retroanálise.
- A avaliação mecânica-empírica realizada verificou que a incompatibilidade de rigidez principalmente da base com o revestimento frente ao número de solicitações na qual a estrutura é submetida foi um dos fatores primordiais para a ocorrência de defeitos no pavimento.
- A intervenção do tipo reforço com AMP 55/75-E se mostrou eficaz para reestabelecer as condições estruturais do pavimento pela metodologia MeDiNa. Tendo os segmentos SH-07 com uma espessura de 9,2 cm, SH-8 com 9,7 cm e SH-9 com 5 cm, todos satisfizeram a condição de área trincada ao final do tempo de projeto < 30%.
- O método MeDiNa é um avanço em relação ao dimensionamento de pavimentos no Brasil, pois a metodologia considera os efeitos do trincamento por fadiga como critério de desempenho do pavimento como também o critério de afundamento de trilha de roda. Vale ressaltar a possibilidade de utilização de materiais alternativos na concepção do pavimento, como asfaltos borracha e asfaltos modificados com polímeros, é de grande valia pois a concepção de materiais vem ficando cada vez mais diversificada nos últimos anos. Outra vantagem do programa é o acompanhamento da evolução dos defeitos do pavimento ao longo dos meses.

REFERÊNCIAS

AASHTO (1993). **Guide for Design of Pavement structures**. Washington.

ALBUQUERQUE, T.P. **Índice de condição baseado em defeitos superficiais para gerência de pavimentos urbanos**. Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal da Paraíba, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre, 2017. 140f.

BUENO, L.D **Avaliação Deflectométrica e de Rigidez: Estudo de caso em três trechos monitorados em Santa Maria/RS**. Dissertação apresentado ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Área de Concentração em Construção Civil e Preservação Ambiental, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), com requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, 2016, 471f.

BERNUCCI, L.B; MOTTA, L.M.G; CERATTI, J.A.P; et al. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**. Rio de Janeiro: Petrobras: ABEDA, 2006.

BORGES, C. B. S. **Estudo Comparativo Entre Medidas de Flexão Com Viga Benkelman e Fwd em Pavimentos da Malha Rodoviária Estadual de Santa Catarina**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina. Santa Catarina. 2001.

BRAGA, C. W. C. **Dimensionamento de pavimento flexível: aplicação de materiais como camadas de pavimento pelo método empírico de dimensionamento do DNIT**. Trabalho de Conclusão de Curso II (TCC II) apresentado à Universidade Federal do Maranhão (UFMA), como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil, 2018. 105f.

BECKERT, K. E. K. **Comparação entre o novo método de dimensionamento e a avaliação dos pavimentos flexíveis das Estradas brasileiras**. Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Comissão de Graduação do Curso de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheira Civil, 2020. 48f.

CUNHA, M.B. **Avaliação do método Bailey de seleção granulométrica de agregados para misturas asfálticas**. Dissertação apresentada à escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil – Área de Concentração: Transportes, 2004. 118f.

COSTA, T.C; PEREIRA, D.A; DEON, K.C.A. **Retroanálise das Bacias Deflectométricas para Obtenção dos Módulos de Resiliência das Camadas de Pavimentação da Rodovia BR-163/PA, Brasil**. In: *Proceedings CLME2017/VCEM, Maputo*. 8º Congresso Luso-Moçambicano de Engenharia, Maputo. 2017.

COUTINHO, J. C. P. **Dimensionamento de pavimento asfáltico: comparação do método do DNER com um método mecanístico-empírico aplicada a um trecho**. Dissertação apresentada ao Mestrado Profissional em Engenharia Geotécnica do Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, como parte integrante dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Geotecnia, 2011. 214f.

CNT. **Transporte rodoviário: por que os pavimentos das rodovias do Brasil não duram?** –Brasília. 2017.

CNT. **Transporte rodoviário: desempenho do setor, infraestrutura e investimentos.** – Brasília. 2017.

CNT. **O transporte move o Brasil: resumo das propostas da CNT ao país.** – Brasília. 2019.

CNT. **Transporte rodoviário: pesquisa CNT de rodovias** – Brasília. 2019

CAVALCANTE, F. P. **Avaliação das características funcionais e estruturais da Rodovia BR-230 Lote III.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Pernambuco. Recife - PE. 2005.

_____. DNIT-PRO – 10/79. **Procedimento – Avaliação Estrutural dos Pavimentos Flexíveis – Procedimento A.** Rio de Janeiro. 1979a.

_____. DNIT-PRO – 11/79. **Procedimento – Avaliação Estrutural dos Pavimentos Flexíveis – Procedimento B.** Rio de Janeiro. 1979b.

_____. DNIT 005/2003-TER. **Defeitos nos pavimentos flexíveis e semi-rígidos – Terminologia.** Rio de Janeiro. 2003.

_____. DNIT 006/2003-PRO. **Avaliação objetiva da superfície de pavimentos flexíveis e semi-rígidos - Procedimento.** Rio de Janeiro. 2003

_____. DNIT 007/2003-PRO. **Levantamento para avaliação da condição de superfície de subtrecho homogêneo de rodovias de pavimentos flexíveis e semi-rígidos para gerência de pavimentos e estudos e projetos - Procedimento.** Rio de Janeiro. 2003.

_____. DNIT 008/2003-PRO. **Levantamento visual contínuo para avaliação da superfície de pavimentos flexíveis e semi-rígidos.** Rio de Janeiro. 2003

_____. DNIT 009/2003-PRO. **Avaliação subjetiva de superfície de pavimentos flexíveis e semi-rígidos - Procedimento.** Rio de Janeiro. 2003. 168

_____. DNIT 031/2006-ES. **Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico – Especificação de Serviço.** Rio de Janeiro. 2006.

ECHEVERRIA, J. A. S. **Avaliação do efeito de restaurações com fresagem e recapeamento nas condições funcional e estrutural de pavimentos com volume de tráfego médio.** Dissertação (Mestrado). Universidade federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre - RS. 2011.

FRANCO, F. A. C. P. **Método de dimensionamento mecanístico-empírico de pavimentos asfálticos–SisPav.** COPPE. Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação de Engenharia da Universidade Federal do Rio De Janeiro para a obtenção do grau de doutor em ciências em Engenharia Civil, 2007. 315f.

FRANCO, F. A. C. P.; MOTTA, L. M. G. **Manual de Utilização do programa MeDiNa.** p. 1–78. 2020.

MARTINS, M. F; BUENO, L.C; SPECHT, L.P; et al. Avaliação da não linearidade de módulos de resiliência retroanalizados de materiais granulares de base de pavimentos obtidos durante o controle tecnológico da duplicação de uma rodovia no RS. **Revista CIATEC**, v.10, n., p.31-42, 2018.

MACCARINI, R.S SILVA, F.O.F. **Recuperação de pavimento flexível com elevada degradação a partir de soluções de manutenção rodoviária: estudo de caso.** Engenharia Civil-Pedra Branca, 2020.

MACÊDO, J. A. G. **Interpretação de ensaios deflectométricos para avaliação estrutural de pavimentos flexíveis.** 1996. 478 p. Tese (doutorado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. COPPE/UFRJ. Programa de Engenharia de Transportes. Rio de Janeiro/RJ.

MARQUES, J.R.F. **Dimensionamento de reforço mediante retroanálise de avaliações estruturais não-destrutivas.** Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil- Área de Transportes, 2017. 2015f.

MENDONÇA, A.M.G.D. **Contribuições ao estudo das propriedades de misturas asfálticas produzidas com ligante modificado por adição de lignina.** Tese apresentada à coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos da Universidade Federal de Campina Grande, como requisito para obtenção do título de Doutor.2020. 184f.

MEDEIROS, SAYONARA ANDRADE DE. **Incorporação do lodo de tanque séptico como matéria-prima de uma mistura asfáltica.** Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação, em Engenharia Sanitária, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2006. 105f.

MEZZOMO, H. **Análise comparativa entre um pavimento de concreto simples e um flexível para a duplicação da rodovia BR-386/RS.** Monografia apresentada na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II, do Curso de Engenharia Civil, do Centro Universitário Univates, como parte da exigência para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil, 2015. 126f.

MEDINA, J; MOTTA, L. M. G. **Mecânica dos Pavimentos.** Rio de Janeiro, RJ. Editora Interciência. 3ª ed., 638 p. 2015.

NASCIMENTO, M.H.A. **Análise da incompatibilidade de rigidez entre camadas de revestimentos asfálticos na ocorrência de slippage em pavimento aeroportuário.** Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e ambiental, do Centro de Tecnologia e Recursos Naturais da Universidade Federal de Campina Grande, 2017. 235f.

PANDOLFO, D.K. **Variação da estimativa de vida útil de um pavimento flexível restaurado com espessuras de reforço analisadas mecanicamente a partir dos módulos obtidos por diferentes métodos e softwares de retroanálise.** Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Civil apresentado à Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Civil, 2016. 103f.

PITANGUI, L. C. **Análise comparativa do método do DNER com o método mecanístico-empírico MeDiNa**. Monografia submetida ao departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade De Brasília como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de bacharel em Engenharia Civil, 2019. 93f.

PINTO, S. **Estudo do Comportamento à Fadiga de Misturas Betuminosas e Aplicação na Avaliação Estrutural de Pavimentos**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro - RJ. 1991.

PITTA, D.M., BALBO, J.T. (1998). **Estudo de Caso de Retroanálise de Superfícies Deformadas em Pavimentação**. V.2 pp.815-834, São Paulo, SP, Brasil.

RODRIGUES, R.M. **Estudo dos Trincamentos dos Pavimentos**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro - RJ. 1991.

ROCHA FILHO, N. R.; RODRIGUES, R. M. **A Avaliação Estrutural dos Pavimentos por Meio de Levantamento Deflectométricos**. In: 30ª Reunião Anual de Pavimentação. v. 3 pp.1119-1146. Salvador – BA. 1996.

SERRAGLIO, D. **Análise de projeto de restauração com uso da técnica de reciclagem de pavimento flexível como base para revestimento de asfalto borracha**. Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2014. 109f.

SOARES, J.B; SOUZA, F.V. Considerações sobre módulo resiliente e módulo dinâmico em misturas asfálticas com base na teoria da viscoelasticidade. **In: XII Congresso Ibero-Latinoamericano do Asfalto, Quito**[In Portuguese]. 2003.

SILVA, P.B. **Estudo em laboratório e em campo de misturas asfálticas SMA 0/8S**. Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do Título de Mestre em Engenharia, 2005. 158f.

SILVA FILHO, M.J.A. **Técnica de recuperação de patologias em pavimento asfáltico- estudo de caso: rua São João em Pau dos Ferros-RN**. Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade Federal Rural do Semi-Árido – UFERSA, Campus Pau dos Ferros, para a obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Civil, 2019. 58f.

SILVA, G.A. **Diagnóstico do setor de agregados para construção civil na região metropolitana de natal**. MS thesis. Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral da Universidade Federal de Pernambuco, 2012. 285f.

SILVA, J. E. G. **Método nacional de dimensionamento de pavimentos-medina, avaliação da duplicação da AL-145**. Trabalho apresentado ao curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Alagoas como requisito para obtenção do título de Engenheiro Civil, 2018. 79f.

SASSO, L.F. **Uso de geocélula preenchida com material granular para reforço de solos destinados a fundações diretas.** Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Civil apresentado como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Civil, 2018. 123f.

SOUSA, M. N. **Dimensionamento de estruturas de pavimento: Aplicação do método DNER(1981) e do método MeDiNa.** Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Civil, 2020. 99f.

ANEXOS

I – RELATÓRIO MeDiNa (Reforço)

Dimensionamento do reforço do pavimento

Empresa: **UFCG**

Nome do Projeto: **BR 230 - SH 07 FE**

Responsável pelo projeto: **Leonardo Rodrigues Guedes**

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

Tipo de via: **Sistema Arterial Principal**

Nível de confiabilidade: **95%**

Período de projeto: **10** anos.

Análise realizada em **30/08/2021 às 23:07:45** no modo: **Projeto de Reforço**

Área trincada prevista no pavimento no fim do período: **28,6%**

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

*Portanto, **a responsabilidade pelo projeto é exclusivamente do engenheiro projetista**, que deve entender e avaliar criteriosamente os resultados gerados pelo programa, antes de aprovar o projeto para a execução no campo.*

Estrutura do pavimento

Cam	Material	Espessura (cm)	Módulo de Resiliência	Coef de Poisson
1	CONCRETO ASFÁLTICO MODIFICADO AMP 55/75-E	9,2	Resiliente Linear MR = 4562 MPa	0,30
2	CAMADA ASFÁLTICA EXISTENTE Camada Asfáltica Superficial	9,0	Resiliente Linear MR = 4940 MPa	0,30
3	CAMADA EXISTENTE Camada Granular	35,0	Resiliente Linear MR = 61 MPa	0,35
4	SUBLEITO Subleito	SL	Resiliente Linear MR = 263 MPa	0,45

Materiais

1 - CONCRETO ASFÁLTICO MODIFICADO: AMP 55/75-E

Propriedades

Modelos

Propriedades

Tipo de CAP = AMP 55/75 - E
Aditivo Modificador = SBS
Massa específica (g/cm³) = 2,4
Resistência à tração (MPa) = 1,07
Teor de asfalto (%) = 4,7
Volume de vazios (%) = 4
Faixa Granulométrica = B
Abrasão Los Angeles (%) = 30
Norma ou Especificação = DNIT ES 385

Modelos

Ensaio de Fadiga
-Modelo: **k1 .(et ^ k2)**
-Coeficiente de Regressão (k1): **≥ 1E-23**
-Coeficiente de Regressão (k2): **≥ -7,090**
-Classe de Fadiga: **≥ 4**
-FFM (100μ a 250μ): **≥ 1,57**
Flow Number Mínimo
- Condição de Tráfego Normal: **≥ 298** ciclos
- Condição de Tráfego Severa: **≥ 804** ciclos

2 - CAMADA ASFÁLTICA EXISTENTE: Camada Asfáltica Superficial

Propriedades

Espessura de fresagem (cm) = 3,0
Espessura de campo (cm) = 12,0
Área Trincada (%) = 69,4
IRI (m/km) = 3
Deflexão característica (0,01mm) = 84,64
Idade do pavimento (anos) = 10
Módulo mínimo (MPa) =
Módulo máximo (MPa) =
MR - Desvio Padrão (MPa) =
Coef de Variação do Módulo (%) =
Comentários = ...

Modelos

3 - CAMADA EXISTENTE: Camada Granular

Propriedades

Módulo mínimo (MPa) = ...
Módulo máximo (MPa) = ...
MR - Desvio Padrão (MPa) = ...
Coef de Variação do Módulo (%) = ...
Comentários = ...

Modelos

4 - SUBLEITO: Subleito

Propriedades

Módulo mínimo (MPa) =
Módulo máximo (MPa) =
MR - Desvio Padrão (MPa) =
Coef de Variação do Módulo (%) =
Comentários = ...

Modelos

Definição do tráfego

Volume Médio Diário no ano de abertura do tráfego: VMD (1º ano) = **950**
Fator de veículo no ano de abertura do tráfego: FV = **7,07**
Número de passagens anual do eixo padrão (1º ano): **2,45e+06**

% Veículos na faixa de projeto: **40%**

Número de passagens anual do eixo padrão na faixa de projeto: **9,81e+05**

Taxa de crescimento do tráfego: **3,0%**

Número Equivalente total de passagens do eixo padrão na faixa de projeto: N Eq = **1,12e+07**

Eixo	Tipo	FE	Carga (ton)	FC	FVi
1	Eixo simples de roda dupla	10%	10,00	3,289	0,329
2	Dois eixos simples (direcional)	10%	12,00	10,288	1,029
3	Dois eixos simples (direcional)	10%	12,00	10,288	1,029
4	Dois eixos simples (direcional)	10%	12,00	10,288	1,029
5	Dois eixos duplos em tandem	10%	17,00	8,549	0,855
6	Três eixos duplos em tandem	10%	25,50	9,300	0,930
7	Dois eixos duplos	10%	15,00	4,303	0,430
8	Dois eixos duplos em tandem	10%	17,00	8,549	0,855
9	Eixo Simples	10%	6,00	0,278	0,028
10	Eixo Simples	10%	6,00	0,278	0,028
11	Eixo Simples	10%	6,00	0,278	0,028
12	Eixo Simples	10%	6,00	0,278	0,028
13	Eixo Simples	10%	6,00	0,278	0,028
14	Eixo Simples	10%	6,00	0,278	0,028
15	Eixo Simples	10%	6,00	0,278	0,028
16	Eixo Simples	10%	6,00	0,278	0,028
17	Eixo Simples	10%	6,00	0,278	0,028
18	Eixo Simples	10%	6,00	0,278	0,028
19	Eixo Simples	10%	6,00	0,278	0,028
20	Eixo Simples	10%	6,00	0,278	0,028
21	Eixo Simples	10%	6,00	0,278	0,028
22	Eixo Simples	10%	6,00	0,278	0,028
23	Eixo Simples	10%	6,00	0,278	0,028
24	Eixo Simples	10%	6,00	0,278	0,028
25	Eixo Simples	10%	6,00	0,278	0,028
26	Eixo Simples	10%	6,00	0,278	0,028
27	Eixo Simples	10%	6,00	0,278	0,028
28	Eixo Simples	10%	6,00	0,278	0,028
29	Eixo Simples	10%	6,00	0,278	0,028

Evolução dos danos no pavimento

Mês	N Equiv	Área Trincada
1	8,066e+04	1,76%
6	4,870e+05	3,38%
12	9,812e+05	4,53%
18	1,483e+06	5,51%
24	1,992e+06	6,43%
30	2,508e+06	7,34%
36	3,033e+06	8,28%

Mês	N Equiv	Área Trincada
42	3,565e+06	9,24%
48	4,105e+06	10,25%
54	4,653e+06	11,32%
60	5,209e+06	12,45%
66	5,774e+06	13,65%
72	6,347e+06	14,93%
78	6,928e+06	16,29%
84	7,518e+06	17,75%
90	8,117e+06	19,30%
96	8,725e+06	20,95%
102	9,342e+06	22,70%
108	9,968e+06	24,57%
114	1,060e+07	26,54%
120	1,125e+07	28,63%

Controle por Deflexões

As bacias foram calculadas considerando as camadas aderidas e um fator de segurança, após avaliados dados de campo comparativos entre FWD e Viga Benkelman. Os resultados apresentados estão a favor do dimensionamento.

Deflexões esperadas (0,01 mm) no topo da camada: CONCRETO ASFÁLTICO MODIFICADO - AMP 55/75-E

Equipamento	Sensor 1 0 cm	Sensor 2 20 cm	Sensor 3 30 cm	Sensor 4 45 cm	Sensor 5 60 cm	Sensor 6 90 cm	Sensor 7 120 cm	Sensor 8 150 cm	Sensor 9 180 cm
Viga Benkelman Raio = 10,8 cm Carga = 8,2 ton	48	40	33	23	16	8	5	4	4
FWD Raio = 15,0 cm Carga = 4,0 ton	52	41	33	22	14	6	3	2	2

Dimensionamento do reforço do pavimento

Empresa: **UFCG**

Nome do Projeto: **BR 230 - SH 08 FE**

Responsável pelo projeto: **Leonardo Rodrigues Guedes**

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

Tipo de via: **Sistema Arterial Principal**

Nível de confiabilidade: **95%**

Período de projeto: **10** anos.

Análise realizada em **31/08/2021 às 09:23:24** no modo: **Projeto de Reforço**

Área trincada prevista no pavimento no fim do período: **29,4%**

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

*Portanto, **a responsabilidade pelo projeto é exclusivamente do engenheiro projetista**, que deve entender e avaliar criteriosamente os resultados gerados pelo programa, antes de aprovar o projeto para a execução no campo.*

Estrutura do pavimento

Cam	Material	Espessura (cm)	Módulo de Resiliência	Coef de Poisson
1	CONCRETO ASFÁLTICO MODIFICADO AMP 55/75-E	9,7	Resiliente Linear MR = 4562 MPa	0,30
2	CAMADA ASFÁLTICA EXISTENTE Camada Asfáltica Superficial	9,0	Resiliente Linear MR = 4390 MPa	0,30
3	CAMADA EXISTENTE Camada Granular	35,0	Resiliente Linear MR = 64 MPa	0,35
4	SUBLEITO Subleito	SL	Resiliente Linear MR = 285 MPa	0,45

Materiais

1 - CONCRETO ASFÁLTICO MODIFICADO: AMP 55/75-E

Propriedades

Modelos

Propriedades

Tipo de CAP = AMP 55/75 - E
Aditivo Modificador = SBS
Massa específica (g/cm³) = 2,4
Resistência à tração (MPa) = 1,07
Teor de asfalto (%) = 4,7
Volume de vazios (%) = 4
Faixa Granulométrica = B
Abrasão Los Angeles (%) = 30
Norma ou Especificação = DNIT ES 385

Modelos

Ensaio de Fadiga
-Modelo: **$k_1 \cdot (et \wedge k_2)$**
-Coeficiente de Regressão (k1): **≥ 1E-23**
-Coeficiente de Regressão (k2): **≥ -7,090**
-Classe de Fadiga: **≥ 4**
-FFM (100μ a 250μ): **≥ 1,57**
Flow Number Mínimo
- Condição de Tráfego Normal: **≥ 298** ciclos
- Condição de Tráfego Severa: **≥ 804** ciclos

2 - CAMADA ASFÁLTICA EXISTENTE: Camada Asfáltica Superficial

Propriedades

Espessura de fresagem (cm) = 3,0
Espessura de campo (cm) = 12,0
Área Trincada (%) = 15
IRI (m/km) = 3
Deflexão característica (0,01mm) = 81,78
Idade do pavimento (anos) = 10
Módulo mínimo (MPa) =
Módulo máximo (MPa) =
MR - Desvio Padrão (MPa) =
Coef de Variação do Módulo (%) =
Comentários = ...

Modelos

3 - CAMADA EXISTENTE: Camada Granular

Propriedades

Módulo mínimo (MPa) = ...
Módulo máximo (MPa) = ...
MR - Desvio Padrão (MPa) = ...
Coef de Variação do Módulo (%) = ...
Comentários = ...

Modelos

4 - SUBLEITO: Subleito

Propriedades

Módulo mínimo (MPa) =
Módulo máximo (MPa) =
MR - Desvio Padrão (MPa) =
Coef de Variação do Módulo (%) =
Comentários = ...

Modelos

Definição do tráfego

Volume Médio Diário no ano de abertura do tráfego: VMD (1º ano) = **950**
Fator de veículo no ano de abertura do tráfego: FV = **7,07**
Número de passagens anual do eixo padrão (1º ano): **2,45e+06**

% Veículos na faixa de projeto: **40%**

Número de passagens anual do eixo padrão na faixa de projeto: **9,81e+05**

Taxa de crescimento do tráfego: **3,0%**

Número Equivalente total de passagens do eixo padrão na faixa de projeto: N Eq = **1,12e+07**

Eixo	Tipo	FE	Carga (ton)	FC	FVi
1	Eixo simples de roda dupla	10%	10,00	3,289	0,329
2	Dois eixos simples (direcional)	10%	12,00	10,288	1,029
3	Dois eixos simples (direcional)	10%	12,00	10,288	1,029
4	Dois eixos simples (direcional)	10%	12,00	10,288	1,029
5	Dois eixos duplos em tandem	10%	17,00	8,549	0,855
6	Três eixos duplos em tandem	10%	25,50	9,300	0,930
7	Dois eixos duplos	10%	15,00	4,303	0,430
8	Dois eixos duplos em tandem	10%	17,00	8,549	0,855
9	Eixo Simples	10%	6,00	0,278	0,028
10	Eixo Simples	10%	6,00	0,278	0,028
11	Eixo Simples	10%	6,00	0,278	0,028
12	Eixo Simples	10%	6,00	0,278	0,028
13	Eixo Simples	10%	6,00	0,278	0,028
14	Eixo Simples	10%	6,00	0,278	0,028
15	Eixo Simples	10%	6,00	0,278	0,028
16	Eixo Simples	10%	6,00	0,278	0,028
17	Eixo Simples	10%	6,00	0,278	0,028
18	Eixo Simples	10%	6,00	0,278	0,028
19	Eixo Simples	10%	6,00	0,278	0,028
20	Eixo Simples	10%	6,00	0,278	0,028
21	Eixo Simples	10%	6,00	0,278	0,028
22	Eixo Simples	10%	6,00	0,278	0,028
23	Eixo Simples	10%	6,00	0,278	0,028
24	Eixo Simples	10%	6,00	0,278	0,028
25	Eixo Simples	10%	6,00	0,278	0,028
26	Eixo Simples	10%	6,00	0,278	0,028
27	Eixo Simples	10%	6,00	0,278	0,028
28	Eixo Simples	10%	6,00	0,278	0,028
29	Eixo Simples	10%	6,00	0,278	0,028

Evolução dos danos no pavimento

Mês	N Equiv	Área Trincada
1	8,066e+04	1,77%
6	4,870e+05	3,41%
12	9,812e+05	4,57%
18	1,483e+06	5,57%
24	1,992e+06	6,50%
30	2,508e+06	7,44%
36	3,033e+06	8,39%

Mês	N Equiv	Área Trincada
42	3,565e+06	9,38%
48	4,105e+06	10,42%
54	4,653e+06	11,52%
60	5,209e+06	12,68%
66	5,774e+06	13,92%
72	6,347e+06	15,24%
78	6,928e+06	16,65%
84	7,518e+06	18,15%
90	8,117e+06	19,76%
96	8,725e+06	21,47%
102	9,342e+06	23,28%
108	9,968e+06	25,21%
114	1,060e+07	27,26%
120	1,125e+07	29,42%

Controle por Deflexões

As bacias foram calculadas considerando as camadas aderidas e um fator de segurança, após avaliados dados de campo comparativos entre FWD e Viga Benkelman. Os resultados apresentados estão a favor do dimensionamento.

Deflexões esperadas (0,01 mm) no topo da camada: CONCRETO ASFÁLTICO MODIFICADO - AMP 55/75-E

Equipamento	Sensor 1 0 cm	Sensor 2 20 cm	Sensor 3 30 cm	Sensor 4 45 cm	Sensor 5 60 cm	Sensor 6 90 cm	Sensor 7 120 cm	Sensor 8 150 cm	Sensor 9 180 cm
Viga Benkelman Raio = 10,8 cm Carga = 8,2 ton	46	38	31	22	15	7	4	4	3
FWD Raio = 15,0 cm Carga = 4,0 ton	50	39	31	21	14	5	3	2	2

Dimensionamento do reforço do pavimento

Empresa: **UFCG**

Nome do Projeto: **BR 230 - SH 09**

Responsável pelo projeto: **Leonardo Rodrigues Guedes**

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

Tipo de via: **Sistema Arterial Principal**

Nível de confiabilidade: **95%**

Período de projeto: **10** anos.

Análise realizada em **31/08/2021 às 09:23:34** no modo: **Projeto de Reforço**

Área trincada prevista no pavimento no fim do período: **4,8%**

Análise encerrou por haver atingido a espessura mínima da camada.

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

*Portanto, **a responsabilidade pelo projeto é exclusivamente do engenheiro projetista**, que deve entender e avaliar criteriosamente os resultados gerados pelo programa, antes de aprovar o projeto para a execução no campo.*

Estrutura do pavimento

Cam	Material	Espessura (cm)	Módulo de Resiliência	Coef de Poisson
1	CONCRETO ASFÁLTICO MODIFICADO AMP 55/75-E	5,0	Resiliente Linear MR = 4562 MPa	0,30
2	CAMADA ASFÁLTICA EXISTENTE Camada Asfáltica Superficial	9,0	Resiliente Linear MR = 5781 MPa	0,30
3	CAMADA EXISTENTE Camada Granular	35,0	Resiliente Linear MR = 131 MPa	0,35
4	SUBLEITO Subleito	SL	Resiliente Linear MR = 317 MPa	0,45

Materiais

1 - CONCRETO ASFÁLTICO MODIFICADO: AMP 55/75-E

Propriedades

Modelos

Propriedades

Tipo de CAP = AMP 55/75 - E
Aditivo Modificador = SBS
Massa específica (g/cm³) = 2,4
Resistência à tração (MPa) = 1,07
Teor de asfalto (%) = 4,7
Volume de vazios (%) = 4
Faixa Granulométrica = B
Abrasão Los Angeles (%) = 30
Norma ou Especificação = DNIT ES 385

Modelos

Ensaio de Fadiga
-Modelo: **$k_1 \cdot (et \wedge k_2)$**
-Coeficiente de Regressão (k1): **≥ 1E-23**
-Coeficiente de Regressão (k2): **≥ -7,090**
-Classe de Fadiga: **≥ 4**
-FFM (100μ a 250μ): **≥ 1,57**
Flow Number Mínimo
- Condição de Tráfego Normal: **≥ 298** ciclos
- Condição de Tráfego Severa: **≥ 804** ciclos

2 - CAMADA ASFÁLTICA EXISTENTE: Camada Asfáltica Superficial

Propriedades

Espessura de fresagem (cm) = 3,0
Espessura de campo (cm) = 12,0
Área Trincada (%) = 24
IRI (m/km) = 3
Deflexão característica (0,01mm) = 54,58
Idade do pavimento (anos) = 10
Módulo mínimo (MPa) =
Módulo máximo (MPa) =
MR - Desvio Padrão (MPa) =
Coef de Variação do Módulo (%) =
Comentários = ...

Modelos

3 - CAMADA EXISTENTE: Camada Granular

Propriedades

Módulo mínimo (MPa) = ...
Módulo máximo (MPa) = ...
MR - Desvio Padrão (MPa) = ...
Coef de Variação do Módulo (%) = ...
Comentários = ...

Modelos

4 - SUBLEITO: Subleito

Propriedades

Módulo mínimo (MPa) =
Módulo máximo (MPa) =
MR - Desvio Padrão (MPa) =
Coef de Variação do Módulo (%) =
Comentários = ...

Modelos

Definição do tráfego

Volume Médio Diário no ano de abertura do tráfego: VMD (1º ano) = **950**
Fator de veículo no ano de abertura do tráfego: FV = **7,07**
Número de passagens anual do eixo padrão (1º ano): **2,45e+06**

% Veículos na faixa de projeto: **40%**

Número de passagens anual do eixo padrão na faixa de projeto: **9,81e+05**

Taxa de crescimento do tráfego: **3,0%**

Número Equivalente total de passagens do eixo padrão na faixa de projeto: N Eq = **1,12e+07**

Eixo	Tipo	FE	Carga (ton)	FC	FVi
1	Eixo simples de roda dupla	10%	10,00	3,289	0,329
2	Dois eixos simples (direcional)	10%	12,00	10,288	1,029
3	Dois eixos simples (direcional)	10%	12,00	10,288	1,029
4	Dois eixos simples (direcional)	10%	12,00	10,288	1,029
5	Dois eixos duplos em tandem	10%	17,00	8,549	0,855
6	Três eixos duplos em tandem	10%	25,50	9,300	0,930
7	Dois eixos duplos	10%	15,00	4,303	0,430
8	Dois eixos duplos em tandem	10%	17,00	8,549	0,855
9	Eixo Simples	10%	6,00	0,278	0,028
10	Eixo Simples	10%	6,00	0,278	0,028
11	Eixo Simples	10%	6,00	0,278	0,028
12	Eixo Simples	10%	6,00	0,278	0,028
13	Eixo Simples	10%	6,00	0,278	0,028
14	Eixo Simples	10%	6,00	0,278	0,028
15	Eixo Simples	10%	6,00	0,278	0,028
16	Eixo Simples	10%	6,00	0,278	0,028
17	Eixo Simples	10%	6,00	0,278	0,028
18	Eixo Simples	10%	6,00	0,278	0,028
19	Eixo Simples	10%	6,00	0,278	0,028
20	Eixo Simples	10%	6,00	0,278	0,028
21	Eixo Simples	10%	6,00	0,278	0,028
22	Eixo Simples	10%	6,00	0,278	0,028
23	Eixo Simples	10%	6,00	0,278	0,028
24	Eixo Simples	10%	6,00	0,278	0,028
25	Eixo Simples	10%	6,00	0,278	0,028
26	Eixo Simples	10%	6,00	0,278	0,028
27	Eixo Simples	10%	6,00	0,278	0,028
28	Eixo Simples	10%	6,00	0,278	0,028
29	Eixo Simples	10%	6,00	0,278	0,028

Evolução dos danos no pavimento

Mês	N Equiv	Área Trincada
1	8,066e+04	0,81%
6	4,870e+05	1,47%
12	9,812e+05	1,87%
18	1,483e+06	2,17%
24	1,992e+06	2,41%
30	2,508e+06	2,62%
36	3,033e+06	2,81%

Mês	N Equiv	Área Trincada
42	3,565e+06	2,98%
48	4,105e+06	3,15%
54	4,653e+06	3,30%
60	5,209e+06	3,46%
66	5,774e+06	3,60%
72	6,347e+06	3,74%
78	6,928e+06	3,88%
84	7,518e+06	4,02%
90	8,117e+06	4,15%
96	8,725e+06	4,28%
102	9,342e+06	4,41%
108	9,968e+06	4,54%
114	1,060e+07	4,67%
120	1,125e+07	4,80%

Controle por Deflexões

As bacias foram calculadas considerando as camadas aderidas e um fator de segurança, após avaliados dados de campo comparativos entre FWD e Viga Benkelman. Os resultados apresentados estão a favor do dimensionamento.

Deflexões esperadas (0,01 mm) no topo da camada: CONCRETO ASFÁLTICO MODIFICADO - AMP 55/75-E

Equipamento	Sensor 1 0 cm	Sensor 2 20 cm	Sensor 3 30 cm	Sensor 4 45 cm	Sensor 5 60 cm	Sensor 6 90 cm	Sensor 7 120 cm	Sensor 8 150 cm	Sensor 9 180 cm
Viga Benkelman Raio = 10,8 cm Carga = 8,2 ton	38	29	22	15	10	5	4	3	3
FWD Raio = 15,0 cm Carga = 4,0 ton	43	31	23	14	8	4	3	2	2