



**PROJETO DE REFORÇO PARA O PAVIMENTO  
FLEXÍVEL DO ANEL VIÁRIO DA UFJF BASEADO NO  
NOVO MÉTODO DE DIMENSIONAMENTO  
MECANÍSTICO-EMPÍRICO NACIONAL**

**Thiago Fávero de Oliveira Machado**

Juiz de Fora

2019

Universidade Federal de Juiz de Fora  
Faculdade de Engenharia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

**PROJETO DE REFORÇO PARA O PAVIMENTO  
FLEXÍVEL DO ANEL VIÁRIO DA UFJF BASEADO NO  
NOVO MÉTODO DE DIMENSIONAMENTO  
MECANÍSTICO-EMPÍRICO NACIONAL**

**Thiago Fávero de Oliveira Machado**

Área de concentração: Estruturas e Materiais

Linha de Pesquisa: Materiais e Componentes de Construção

Orientador: Prof. D.Sc. Geraldo Luciano de Oliveira Marques - UFJF

Juiz de Fora

2019

Ficha catalográfica elaborada através do programa de geração automática da Biblioteca Universitária da UFJF, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Machado, Thiago Fávero de Oliveira.

Projeto de reforço para o pavimento flexível do anel viário da UFJF baseado no novo método de dimensionamento mecanístico empírico nacional / Thiago Fávero de Oliveira Machado. -- 2019. 132 f. : il.

Orientador: Geraldo Luciano de Oliveira Marques

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia. Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, 2019.

1. Método mecanístico-empírico. 2. Pavimento flexível. 3. Reforço. 4. Retroanálise. I. Marques, Geraldo Luciano de Oliveira, orient. II. Título.

**PROJETO DE REFORÇO PARA O PAVIMENTO FLEXÍVEL  
DO ANEL VIÁRIO DA UFJF BASEADO NO NOVO MÉTODO  
DE DIMENSIONAMENTO MECANÍSTICO-EMPÍRICO  
NACIONAL**

**Thiago Fávero de Oliveira Machado**

Esta dissertação foi apresentada em sessão pública e aprovada em 26 de fevereiro de 2019, para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil na Universidade Federal de Juiz de Fora, pela Banca Examinadora composta pelos seguintes membros:



Orientador: Prof. D.Sc. Geraldo Luciano de Oliveira Marques - UFJF



Membro: Prof. D.Sc. Thaís Mayra de Oliveira – UFJF



Membro: Prof. D.Sc. Tacião Oliveira da Silva – UFV

Dedico esta dissertação à minha família e aos meus amigos que sempre me apoiaram e concederam o suporte necessário para que eu pudesse realizar o sonho de me tornar mestre em Engenharia Civil.

## **Agradecimentos**

Agradeço primeiramente a Deus, inteligência suprema e causa primária de todas as coisas, pelo dom da vida, pelas inúmeras oportunidades e bênçãos a mim concedidas, e por toda proteção ao longo de minha jornada.

Agradeço, também, ao meu avô Arnaldo por exercer de forma plena o papel de pai, amigo e mentor, sendo ainda meu maior exemplo profissional e ético.

Agradeço à minha mãe Juliana e à minha avó Carmem por todo o carinho e amor que sempre tiveram por mim, por sempre me proporcionarem as melhores condições possíveis e por serem meu porto seguro.

Agradeço à toda minha família pelo apoio incondicional, por sempre estarem me motivando e fornecendo as condições necessárias para o meu desenvolvimento pessoal e profissional.

Agradeço aos meus amigos do Colégio Santa Catarina, da Faculdade de Engenharia da UFJF, da Universidade do Sul da Califórnia, da Fundação Espírita Alan Kardec, do CrossFit VidAtiva e da CFP9 por estarem ao meu lado nos bons e, principalmente, maus momentos.

Agradeço ao meu orientador e amigo, Geraldo Marques, por toda atenção, dedicação e conhecimentos transmitidos.

Agradeço à professora Thaís Mayra e ao professor Taciano Oliveira por me concederem a honra de tê-los como membros da banca examinadora.

Agradeço ao meu grande amigo e coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFJF, Alexandre Cury, por todo o incentivo e por acreditar no meu potencial desde a época da graduação.

Agradeço à Pró-Reitoria de Infraestrutura e Gestão (PROINFRA) da UFJF, à Fundação Centro Tecnológico (FCT) de Juiz de Fora e à empresa de engenharia ENGGEOTECH por todo o suporte e auxílio concedidos na execução de ensaios necessários ao desenvolvimento do presente trabalho de pesquisa.

Agradeço à CAPES pelas bolsas a mim concedidas no período do intercâmbio e do mestrado.

Agradeço, finalmente, aos servidores, técnicos e professores da Faculdade de Engenharia da UFJF que, de alguma forma, contribuíram para a minha caminhada.

Muito obrigado!

*"Aos outros, dou o direito de ser como são.  
A mim, dou o dever de ser cada dia melhor".*

*(Chico Xavier)*

## Resumo

Os procedimentos de dimensionamento e projeto de reforço de pavimentos flexíveis disponíveis no Brasil são, em sua maioria, baseados em modelos empíricos desenvolvidos a partir de estudos realizados em localidades específicas e que, por isso, deveriam ser empregados somente em casos onde houvesse equivalência de condições climáticas e de tráfego. Órgãos rodoviários nacionais em parceria com universidades e centros de pesquisa têm se empenhado em mudar esse panorama mediante a elaboração de um método com caráter mecanístico-empírico e que seja mais compatível com as realidades geográfica e técnico-científica brasileiras. O primeiro fruto dessa força-tarefa consiste no programa computacional MeDiNa, ainda em fase de avaliação, o qual conta com uma função de transferência que leva em consideração o dano por fadiga de misturas asfálticas, permitindo a estimativa da porcentagem de área trincada referente ao período de projeto. O presente trabalho de pesquisa utiliza esse programa para o cálculo de reforço do pavimento flexível do anel viário da Universidade Federal de Juiz de Fora visando o restabelecimento de propriedades funcionais e a prevenção de danos à sua estrutura. Esse pavimento é avaliado funcionalmente através de Levantamento Visual Contínuo Informatizado (LVCI) e ensaio de irregularidade longitudinal com perfilômetro a laser, e estruturalmente por meio de levantamento de deflexões realizado por equipamento FWD (*falling weight deflectometer*) e abertura de poço de sondagem. Com os dados coletados na avaliação estrutural, é realizada uma retroanálise de dados para obtenção de parâmetros necessários ao referido cálculo. O anel viário em questão foi dividido em 8 segmentos homogêneos e, após o devido dimensionamento e análise dos resultados, chegou-se à conclusão de que a melhor solução de reforço é o recapeamento de toda sua extensão com a mistura asfáltica de projeto em espessura única de 5,0 cm, observando a aplicação de uma camada antirreflexão de trincas em alguns trechos.

Palavras-chaves: Método mecanístico-empírico, Pavimento flexível, Reforço, Retroanálise.

## **Abstract**

The procedures of design and reinforcement project for flexible pavements available in Brazil are, mostly, based on empirical models developed from studies carried out in specific localities, and, therefore, should only be used in cases where equivalent climatic and traffic conditions were observed. The national road agencies in partnership with universities and research centers have been working to change this scenario through the development of a mechanistic-empirical method that is more compatible with the Brazilian geographic and technical-scientific realities. The first outcome of this task force is the computer program MeDiNa, which is still under assessment. This program has a transfer function that considers the fatigue damage of asphalt mixtures, allowing the estimation of the percentage of cracked area related to the project period. The present research work uses this program to a reinforcement calculation for the flexible pavement of the Federal University of Juiz de Fora ring road aiming at restoring functional properties and preventing damages to its structure. This pavement is functionally evaluated through Computerized Continuous Visual Survey (CCVS) and longitudinal irregularity test with laser profilometer, and structurally by means of deflection survey carried out by FWD (falling weight deflectometer) equipment and prospecting procedure. From data collected in the structural evaluation, a backcalculation is executed to obtain required parameters to the concerned calculation. The ring road was divided into 8 homogeneous sections and, after the proper design and results analysis, it was concluded that the best reinforcement solution is the pavement full-length resurfacing using the project asphalt mixture in a single thickness of 5,0 cm, paying attention to the application of a crack relief layer in some sectors.

**Keywords:** Mechanistic-empirical method, Flexible pavement, Reinforcement, Backcalculation.

## Lista de Figuras

Figura 2.1 – Ficha de avaliação de serventia (Fonte: DNIT, 2003a) .....	7
Figura 2.2 – Variação da serventia com o tempo de uso da via (Fonte: Bernucci <i>et al.</i> , 2008) .....	7
Figura 2.3 – Exemplo de demarcação de áreas para inventário de defeitos (Fonte: Bernucci <i>et al.</i> , 2008).....	9
Figura 2.4 – Modo de apresentação de LVCI pelo Método da Varredura com uso de vídeo registro e indicação dos defeitos em sincronia com as imagens e planialtimetria (Fonte: Souza Júnior, 2018).....	10
Figura 2.5 – Esquema representativo da irregularidade longitudinal de um pavimento (Fonte: <a href="http://www.usp.br/lds/v/?page_id=217">http://www.usp.br/lds/v/?page_id=217</a> ).....	10
Figura 2.6 – Figura esquemática de um equipamento do tipo resposta (Fonte: Gillespie, 1992).....	11
Figura 2.7 – Figura esquemática de um perfilômetro inercial (Fonte: Karamihas e Sayers, 1998).....	12
Figura 2.8 – Ilustração de poço de sondagem (Fonte: Bernucci <i>et al.</i> , 2008).....	13
Figura 2.9 – Esquema de um deflectômetro de impacto (Fonte: Bernucci <i>et al.</i> , 2008)...	14
Figura 2.10 – Vista geral de equipamento FWD (Fonte: Autor, 2018).....	15
Figura 2.11 – Esquema da deformada obtida com equipamento FWD (Fonte: Bernucci <i>et</i> <i>al.</i> , 2008).....	15
Figura 2.12 – Esquema de dados necessários à retroanálise (Fonte: Nóbrega, 2003) .....	25
Figura 2.13 – Diferentes formas de bacia deflectométrica indicam diferentes capacidades de carga para a mesma deflexão máxima (Fonte: Motta e Nóbrega, 2003) .....	26
Figura 2.14 – Modelo de planilha para importação de dados (Fonte: Autor, 2018) .....	29
Figura 2.15 – Fluxograma do método integrado de análise e dimensionamento de pavimentos asfálticos (Fonte: Franco, 2007).....	30
Figura 2.16 – Curvas do critério de deflexão admissível (Fonte: Preussler, 1983) .....	33
Figura 2.17 – Pontos onde o estado de tensões é calculado (Fonte: Franco <i>et al.</i> , 2018b)	40

Figura 2.18 – Dados do Eixo Padrão Rodoviário (Fonte: Franco <i>et al.</i> , 2018b).....	41
Figura 2.19 – Planilha de cálculo do Fator de Veículo utilizada no programa computacional MeDiNa (Fonte: Franco <i>et al.</i> , 2018b) .....	42
Figura 2.20 – Perspectiva da distribuição dos 110 pontos gerados no componente AEMC (Fonte: Nascimento, 2015) .....	43
Figura 2.21 – Ajuste da curva sigmoideal (Fonte: Franco <i>et al.</i> , 2018b).....	44
Figura 2.22 – Representação gráfica da função de transferência obtida (Fonte: Franco <i>et al.</i> , 2018b).....	45
Figura 2.23 – Exemplo da janela “Propriedades dos Materiais” de uma camada asfáltica existente (Fonte: Autor, 2018).....	46
Figura 3.1 – (a) Imagem de satélite do anel viário da UFJF (Fonte: <a href="https://www.google.com.br/maps/@-21.7765183,-43.3682924,747m/data=!3m1!1e3">https://www.google.com.br/maps/@-21.7765183,-43.3682924,747m/data=!3m1!1e3</a> ) (b) Representação esquemática do estacionamento (Fonte: Junqueira, 2014).....	49
Figura 3.2 – Tela do programa HoleHunter 4.0 exibindo o vídeo registro em conjunto com os defeitos catalogados, caminhamento e planialtimetria (Fonte: Autor, 2018) .....	50
Figura 3.3 – Perfilômetro a laser instalado no veículo da COPPE/UFRJ (Fonte: Fritzen e Motta, 2018) .....	51
Figura 3.4 – FWD KUAB modelo 8833 (Fonte: Autor, 2018) .....	53
Figura 3.5 – Diagrama esquemático do equipamento FWD modelo KUAB 8833 (Fonte: Luis, 2009).....	54
Figura 3.6 – Visão do sistema de leitura de deflexões na posição de operação (Fonte: Autor, 2018).....	54
Figura 3.7 – Esquema dos furos de extração de corpos-de-prova do revestimento (Fonte: Autor, 2018) .....	55
Figura 3.8 – Perfuratriz modelo Tyrolit DRU160 (Fonte: Tyrolit, 2009).....	55
Figura 3.9 – Corpos de prova retirados do revestimento na prospecção (Fonte: Autor, 2018) .....	56
Figura 3.10 – Poço de sondagem executado no pavimento do anel viário da UFJF (Fonte: Autor, 2018) .....	56

Figura 3.11 – Corpos de prova de amostras de solo utilizados nos ensaios de determinação do módulo de resiliência dos materiais das camadas do pavimento do anel viário da UFJF (Fonte: Autor, 2018).....	57
Figura 3.12 – Exemplo de delimitação de segmentos homogêneos pelo método das diferenças acumuladas (Fonte: Bernucci <i>et al.</i> , 2009).....	59
Figura 3.13 – Ilustração de marcação de seções no programa computacional BackMeDiNa (Fonte: Autor, 2018).....	60
Figura 3.14 – Janela “Propriedades da Camada” da camada asfáltica existente (Fonte: Autor, 2018) .....	61
Figura 4.1 – Curva auxiliar do método das diferenças acumuladas para definição dos segmentos homogêneos (Fonte: Autor, 2018).....	63
Figura 4.2 – Ilustração de estrutura definida no programa computacional MeDiNa (Fonte: Autor, 2019) .....	72
Figura 4.3 – Planilha de cálculo do FV utilizada pelo programa computacional MeDiNa (Fonte: Autor, 2019).....	73

## Lista de Tabelas

Tabela 2.1 – Grupos de Solos (Fonte: DNER, 1994a).....	21
Tabela 2.2 – Classes de desempenho de Flow Number (Fonte: Franco <i>et al.</i> , 2018b) .....	39
Tabela 3.1 – Valores de “z” em função da quantidade de valores individuais (Fonte: Autor, 2018).....	52
Tabela 4.1 – Segmentos homogêneos definidos (Fonte: Autor, 2018) .....	64
Tabela 4.2 – Percentual de área trincada característico dos segmentos homogêneos (Fonte: Autor, 2018) .....	64
Tabela 4.3 – Classes de trincamento (Fonte: ANTT, 2017b).....	65
Tabela 4.4 – IRI <sub>c</sub> dos segmentos homogêneos (Fonte: Autor, 2018).....	65
Tabela 4.5 – Classes de irregularidade longitudinal (Fonte: ANTT, 2017b).....	66
Tabela 4.6 – Deflexões características dos segmentos homogêneos (Fonte: Autor, 2018) .....	66
Tabela 4.7 – Classes de deflexão máxima (Fonte: ANTT, 2017b) .....	67
Tabela 4.8 – Resultados dos ensaios de análise granulométrica por peneiramento dos materiais das camadas (Fonte: Autor, 2018) .....	67
Tabela 4.9 – Resultados dos ensaios de compactação dos materiais das camadas (Fonte: Autor, 2018) .....	68
Tabela 4.10 – Resultados dos ensaios de módulo de resiliência dos materiais das camadas (Fonte: Autor, 2018).....	68
Tabela 4.11 – Resultados dos ensaios de módulo de resiliência do revestimento existente (Fonte: Autor, 2018).....	68
Tabela 4.12 – Resultados dos ensaios de módulo de resiliência e fadiga por compressão diametral da mistura asfáltica de projeto (Fonte: Autor, 2018).....	69
Tabela 4.13 – Valores dos módulos de resiliência obtidos em laboratório para o revestimento e demais camadas do pavimento (Fonte: Autor, 2018) .....	70
Tabela 4.14 – Valores de módulos e parâmetros obtidos na retroanálise (Fonte: Autor, 2018).....	70

Tabela 4.15 – Resultados da dosagem SUPERPAVE da mistura asfáltica de projeto (Fonte: Neumann, 2018) .....	72
Tabela 4.16 – Estimativa de percentual de veículos na faixa de tráfego de projeto (Fonte: DNIT, 2006c) .....	74
Tabela 4.17 – Resumo dos dados de tráfego considerados no dimensionamento do reforço (Fonte: Autor, 2019).....	74
Tabela 4.18 – Resultados obtidos no dimensionamento do reforço de todos os segmentos homogêneos para 50% do tráfego passando na faixa de projeto (Fonte: Autor, 2019).....	74
Tabela 4.19 – Resultados obtidos no dimensionamento do reforço de todos os segmentos homogêneos para 100% do tráfego passando na faixa de projeto (Fonte: Autor, 2019).....	75
Tabela 4.20 – Resultados obtidos no dimensionamento dos segmentos 02, 04, 06 e 08 com camada antirreflexão de trincas para 100% do tráfego passando na faixa de projeto (Fonte: Autor, 2019) .....	76
Tabela 4.21 – Planejamento de avaliações para o anel viário da UFJF (Fonte: Rede, 2010) .....	82

## Sumário

1	Introdução.....	1
1.1	Problemática.....	1
1.2	Objetivo geral.....	3
1.2.1	Objetivos específicos.....	3
1.3	Estrutura do trabalho.....	3
2	Revisão Bibliográfica.....	5
2.1	Avaliação de pavimentos.....	5
2.2	Avaliação funcional de pavimentos.....	6
2.2.1	Avaliação funcional subjetiva.....	6
2.2.2	Avaliação funcional objetiva.....	8
2.3	Avaliação estrutural de pavimentos.....	12
2.3.1	Avaliação estrutural destrutiva.....	13
2.3.2	Avaliação estrutural não-destrutiva.....	13
2.4	Normas técnicas nacionais para projeto de reforço de pavimento.....	16
2.4.1	DNER-PRO 010/79.....	17
2.4.2	DNER-PRO 011/79.....	18
2.4.3	DNER-PRO 159/85.....	19
2.4.4	DNER-PRO 269/94.....	20
2.5	Método mecanístico-empírico.....	22
2.5.1	Modelos de previsão de desempenho.....	22
2.6	Retroanálise.....	24
2.6.1	Métodos iterativos.....	27
2.6.2	Métodos simplificados.....	28
2.6.3	Programa computacional BackMeDiNa.....	28
2.7	Programa computacional SisPav.....	30

2.7.1	Deformação limite no topo do subleito .....	32
2.7.2	Deflexão admissível na superfície do pavimento .....	33
2.7.3	Deformação permanente.....	34
2.7.4	Fadiga dos materiais asfálticos e estabilizados .....	35
2.8	Programa computacional MeDiNa .....	37
2.8.1	Materiais asfálticos .....	38
2.8.2	Camadas estabilizadas .....	39
2.8.3	Materiais granulares e solos .....	40
2.8.4	Carregamento e tráfego .....	41
2.9	Função de transferência .....	42
2.10	Modo reforço .....	45
3	Materiais e Métodos .....	48
3.1	Trecho em estudo.....	48
3.2	Avaliação funcional.....	50
3.2.1	Levantamento Visual Contínuo Informatizado .....	50
3.2.2	Índice de Irregularidade Longitudinal .....	51
3.3	Avaliação estrutural.....	53
3.3.1	Ensaio com equipamento FWD.....	53
3.3.2	Prospecção .....	55
3.4	Ensaio de laboratório .....	56
3.5	Segmentação do trecho.....	58
3.6	Retroanálise .....	59
3.7	Dimensionamento pelo programa computacional MeDiNa .....	60
4	Resultados e Discussões .....	63
4.1	Segmentos homogêneos .....	63
4.2	Levantamentos de campo .....	64

4.2.1	Percentual de área trincada.....	64
4.2.2	Índice de irregularidade longitudinal.....	65
4.2.3	Deflexão característica .....	66
4.3	Ensaio de laboratório .....	67
4.4	Retroanálise .....	69
4.5	Dimensionamento do reforço .....	71
4.6	Planejamento de avaliações .....	77
4.6.1	Pré-execução.....	77
4.6.2	Execução.....	80
4.6.3	Pós-execução .....	81
5	Conclusão .....	83
5.1	Sugestões para trabalhos futuros .....	86
	Referências .....	87
	Apêndice A – Planilha auxiliar do método das diferenças acumuladas para definição de segmentos homogêneos .....	95
	Apêndice B – Relatórios completos de análise para a solução de reforço escolhida.....	97
	B.1 – Segmento 01.....	97
	B.2 – Segmento 02.....	100
	B.3 – Segmento 03.....	104
	B.4 – Segmento 04.....	107
	B.5 – Segmento 05.....	111
	B.6 – Segmento 06.....	114
	B.7 – Segmento 07.....	118
	B.8 – Segmento 08.....	121
	Anexo A – Planilha de dados coletados pelo LVCI.....	125

Anexo B – Planilha do ensaio de índice de irregularidade longitudinal com perfilômetro a laser.....	128
Anexo C – Planilha do levantamento deflectométrico feito com equipamento do tipo FWD .....	130

# 1 Introdução

## 1.1 Problemática

Em um sistema de infraestrutura de transportes, o pavimento é considerado o elemento mais importante tanto em questões financeiras quanto operacionais, representando um patrimônio cujo gerenciamento adequado mostra-se crucial para a redução do custo total compreendido no transporte. A conservação e manutenção dos pavimentos devem ser encaradas como investimentos, possibilitando um retorno econômico e social, garantindo que o pavimento mantenha sua serventia (RODRIGUES, 2007a).

A estrutura de um pavimento sofre um processo progressivo de degradação, o que concorre para uma atenuação de sua funcionalidade. Tal processo é resultante da ação de agentes de intemperismo, da ação repetida de cargas, e das modificações físicas e químicas inatas dos materiais componentes do pavimento. Em comparação a outros tipos de estruturas, a velocidade de deterioração tende a ser superior em um pavimento, visto sua ampla exposição ao clima e intensa solicitação pelas cargas de tráfego (RODRIGUES, 2007b). Assim sendo, é justificável dizer que é imprescindível a um sistema de gerenciamento o acompanhamento rotineiro do desempenho funcional e estrutural de um pavimento, o que influencia não só nos custos diretos de conservação e manutenção, mas igualmente em todas as outras frações do custo total do transporte (custos operacionais de veículos, acidentes, interrupções no tráfego devido a intervenções no pavimento, pedágios, etc.).

A manutenção de um pavimento inclui todas as operações que modificam, direta ou indiretamente, sua condição atual de serventia e/ou seu futuro desempenho. A finalidade da manutenção pode ser a de devolver certas propriedades funcionais ao pavimento ou a de prevenir danos aos seus componentes estruturais, garantindo, assim, uma extensão de sua vida útil. As ações realizadas abrangem desde intervenções mais simples (como limpeza da pista, capina, desobstrução do sistema de drenagem, e conservação de cortes e aterros) à restauração total do pavimento, sendo determinadas com base nas avaliações funcional e estrutural (RODRIGUES, 2007b).

Tanto o atual método de dimensionamento de pavimentos flexíveis (método do DNER, desenvolvido em 1966 pelo Engenheiro Murillo Lopes de Souza) quanto os procedimentos para projeto de reforço hoje existentes no Brasil são, em sua maioria, baseados em metodologias puramente empíricas, as quais desenvolveram-se a partir de acompanhamentos e investigações

realizados em campo e que, portanto, deveriam ser replicadas apenas em locais providos das mesmas condições estruturais, de tráfego e ambientais observadas nos estudos originais.

Tendo isso em vista, órgãos rodoviários juntamente com universidades e centros de pesquisa têm feito, nos últimos anos, uma força-tarefa para que um método de dimensionamento de natureza mecânica-empírica e mais adequado às realidades técnico-científica e geográfica brasileiras seja desenvolvido. Esse método aprofunda-se na análise teórica no que diz respeito à Mecânica dos Pavimentos e torna-se independente de parâmetros empíricos de solos e materiais de pavimentação, apesar de necessitar calibração com dados de segmentos experimentais (FRITZEN, 2016).

Para a realização dessa calibração, o procedimento que tem se mostrado mais eficaz é o de se utilizar modelos de previsão de desempenho, os quais permitem mensurar a redução do nível de serventia ou a evolução de defeitos ao longo da vida de serviço de um pavimento. Nesse contexto, torna-se imprescindível a determinação de uma função de transferência, a qual relaciona as respostas da estrutura às solicitações do tráfego e ao aparecimento e difusão de defeitos (DNIT, 2006a).

Em sua tese de doutorado, Fritzen (2016) determinou uma função de transferência a partir de 6 misturas asfálticas aplicadas em 45 trechos construídos na Cidade Universitária da UFRJ (“Projeto Fundão”) em distintas condições estruturais e de tráfego, sendo sua validação posteriormente estendida a segmentos experimentais nacionais construídos e monitorados em diferentes regiões do país. Seu desenvolvimento baseou-se no dano médio acumulado distribuído em 110 pontos ao longo de uma região do revestimento sob a carga, calculado por análise elástica de múltiplas camadas e levando em conta os ensaios mecânicos de módulo de resiliência e fadiga por compressão diametral de misturas asfálticas. Essa função possibilita prever o percentual de área trincada de um pavimento flexível e, conseqüentemente, o uso desse parâmetro como critério para se estabelecer a vida útil de sua estrutura.

A função de transferência obtida foi então implementada no programa SisPavBR, que é uma atualização do programa de dimensionamento mecânico-empírico SisPav desenvolvido por Franco (2007). Ambos apresentam modelos de desempenho cujas calibrações não foram realizadas por não haverem, à época, informações e dados suficientes (FRANCO, 2007). Então, nesse sentido, a referida implementação da função de transferência, calibrada e validada com diferentes segmentos nacionais, preenche uma importante lacuna do método de dimensionamento do SisPavBR no que concerne à previsão do dano por fadiga de pavimentos asfálticos. Essa versão modificada foi apresentada recentemente sob a forma do programa

MeDiNa (Método de Dimensionamento Nacional) – versão de avaliação, consistindo na mais nova ferramenta de dimensionamento mecanístico-empírico no Brasil.

## **1.2 Objetivo geral**

O presente trabalho de pesquisa tem o objetivo de estudar e indicar um tipo de manutenção geralmente empregado em pavimentos flexíveis mais antigos e que consiste na aplicação de uma camada de material asfáltico de pequena espessura (reforço) sobre o revestimento existente. O dimensionamento desse reforço é realizado com base no novo método de dimensionamento mecanístico-empírico nacional e tem como trecho alvo o pavimento do anel viário da Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), o qual é avaliado funcional e estruturalmente visando a obtenção de parâmetros necessários ao projeto.

### **1.2.1 Objetivos específicos**

- Determinar as atuais condições funcional e estrutural do pavimento flexível do anel viário da UFJF, avaliando características físicas e propriedades mecânicas dos materiais que compõem suas camadas estruturais;
- Definir, após simulações no programa computacional MeDiNa, espessuras exequíveis de reforço com uma mistura asfáltica comumente usada pela empresa de pavimentação que atende ao município de Juiz de Fora;
- Colaborar para a inserção do referido anel viário no banco de dados do Sistema da Rede Temática de Asfaltos a partir da proposição de um programa de avaliações baseado em um manual de construção de trechos monitorados do DNIT, o qual orienta a coleta de dados e informações do anel viário para que sirvam a melhorias no método de dimensionamento representado pelo programa computacional MeDiNa.

## **1.3 Estrutura do trabalho**

O presente trabalho divide-se em cinco capítulos. O primeiro faz uma introdução ao tema apresentando a respectiva problemática, definindo os objetivos geral e específicos do trabalho e resumindo os assuntos tratados nos demais capítulos

No capítulo 2 é realizada uma revisão de literatura que compreende os tópicos e procedimentos de referência considerados os mais relevantes ao tema proposto nessa pesquisa. Apresentam-se as metodologias de avaliação de pavimentos e de cálculo de reforço segundo normas técnicas nacionais, as definições e conceitos dos métodos mecanístico-empírico de dimensionamento e de retroanálise de dados, bem como os respectivos programas

computacionais utilizados. Discorre-se, ainda, a respeito do processo de elaboração da função de transferência do modelo de previsão de desempenho incorporado ao método de dimensionamento de reforço do pavimento flexível.

O capítulo 3 explana os materiais e métodos efetivamente empregados no desenvolvimento do presente trabalho. Descreve-se o trecho viário em estudo e as metodologias utilizadas para mensurar suas condições funcional e estrutural, abordando-se, também, os ensaios de laboratório realizados e os processos de determinação dos segmentos homogêneos, de retroanálise e de dimensionamento do reforço.

O capítulo 4 trata dos resultados obtidos nas diferentes etapas de dimensionamento do reforço do pavimento flexível do anel viário da UFJF: segmentação do trecho, retroanálise de bacias deflectométricas, levantamentos de campo, ensaios de laboratório e cálculo do reforço pelo novo método mecanístico-empírico nacional. Ademais, comenta-se em relação aos parâmetros encontrados, avalia-se a melhor alternativa de restauração e, por fim, apresenta-se um planejamento de avaliações para o anel viário.

Finalmente, o quinto e último capítulo apresenta as conclusões e considerações finais, assim como as sugestões para trabalhos futuros.

## 2 Revisão Bibliográfica

Nesse capítulo é realizada uma revisão de literatura referente aos assuntos mais importantes ao desenvolvimento da presente dissertação. Apresentam-se informações sobre a metodologia de avaliação de pavimentos e suas duas vertentes: avaliação funcional e estrutural, bem como os procedimentos de cálculo de reforço de pavimentos asfálticos normatizados pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT).

Trata-se, também, da definição e conceito de um método mecanístico-empírico para projetos de pavimentos novos e restaurados, comentando-se a respeito de uma técnica analítica de cálculo incorporada a esse tipo de método chamada “retroanálise”, a qual é utilizada na determinação de módulos de elasticidade efetivos a partir de deflexões medidas em campo. Ainda dentro desse quadro, discorre-se a respeito de um programa computacional de dimensionamento e verificação de pavimentos flexíveis, o SisPav, e sua mais recente versão, que recebeu a incorporação de uma função de transferência, tendo então seu nome atualizado para MeDiNa.

Além disso, explana-se sobre a metodologia de desenvolvimento da referida função de transferência, a qual objetiva prever a área trincada de um trecho a partir do dano médio acumulado calculado através de análise elástica de múltiplas camadas. E, por fim, apresenta-se o modo do programa computacional MeDiNa utilizado para o cálculo de reforço dos segmentos homogêneos do trecho viário em estudo.

### 2.1 Avaliação de pavimentos

Segundo Bernucci *et al.* (2008), pavimentos são estruturas que, geralmente, não apresentam ruptura súbita. Contudo, a partir da abertura ao tráfego, passam a experimentar ações de cargas e intempéries, acumulando imperfeições funcionais e estruturais que prejudicam o conforto ao rolamento, economia e segurança dos usuários.

Assim sendo, faz-se necessário um acompanhamento do grau de deterioração dos pavimentos, realizado através da avaliação de seu estado, a qual abrange um leque de ações que visam a aquisição de informações sobre determinadas características e propriedades que, por sua vez, possibilitarão o diagnóstico dos defeitos encontrados, além de permitir uma análise de desempenho (DEUCHER, 2016).

Essas informações servem, então, como base para o projeto e planejamento de serviços de gerência de pavimentos, orientando serviços de manutenção e definindo as possíveis soluções de reparo para cada caso.

De acordo com Prestes (2001), a avaliação de pavimentos pode ser dividida em avaliação funcional e avaliação estrutural.

## **2.2 Avaliação funcional de pavimentos**

### **2.2.1 Avaliação funcional subjetiva**

A avaliação funcional subjetiva de um pavimento destina-se a analisar a condição de sua superfície conforme o ponto de vista do usuário, envolvendo o levantamento de aspectos como conforto ao rolamento (diretamente relacionado aos custos operacionais dos veículos), segurança e tempo de viagem (GONÇALVES, 1999).

Bernucci *et al.* (2008) relatam que o primeiro método estabelecido de forma sistemática para avaliação funcional subjetiva foi inicialmente proposto por Carey e Irick (1960) para as pistas experimentais da AASHO (American Association of State Highway Officials, hoje AASHTO, American Association of State Highway and Transportation Officials) e leva em conta o conceito de serventia, o qual, segundo Danieleski (2004), está relacionado ao “propósito para o qual o pavimento foi construído, que é o de proporcionar um rolamento suave, confortável e seguro.”

O Valor de Serventia Atual (VSA) – *Present Serviceability Rating (PSR)* –, definido por esse método, representa a avaliação de uma comissão julgadora a respeito da capacidade do pavimento de servir ao tráfego e, portanto, considera a sensação dos usuários relativa à interação veículo-pavimento a certa velocidade, assim como a resposta deles a fatores como estética, condição dos acostamentos, drenagem e segurança (HAAS E HUDSON, 1978 *apud* DANIELESKI, 2004).

O VSA de um pavimento (ou de determinado trecho viário) varia de 0 a 5, sendo determinado pela média de notas dos avaliadores. Conforme apresentado na Figura 2.1, o procedimento DNIT 009/2003 - PRO: “Avaliação subjetiva da superfície de pavimentos flexíveis e semirrígidos - Procedimento” estabelece os cinco níveis de serventia compreendidos por essa escala (DNIT, 2003e).

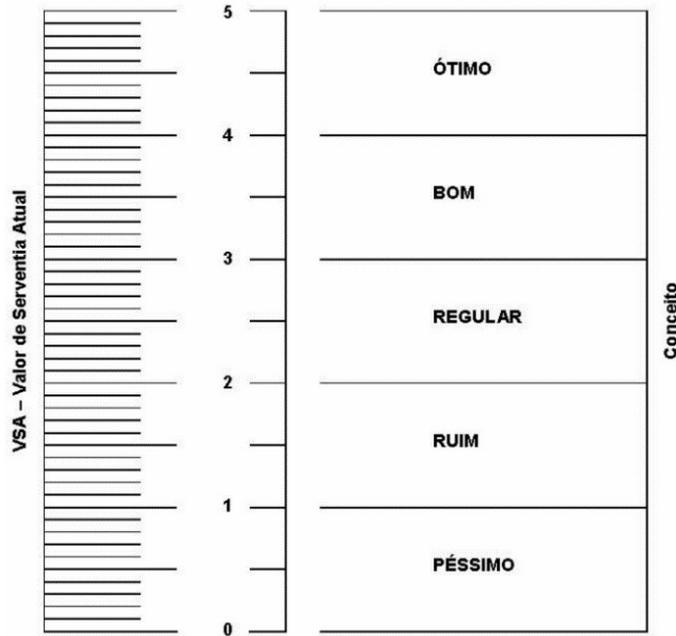


Figura 2.1 – Ficha de avaliação de serventia (Fonte: DNIT, 2003a)

Um pavimento recém construído tende a apresentar um VSA elevado (entre 4 e 5), porém, com a ação do tráfego e dos agentes climáticos, seu valor é gradualmente reduzido.

A curva de serventia possui o formato apresentado na Figura 2.2, em que o “limite de aceitabilidade” refere-se à condição abaixo da qual o nível de conforto torna-se inaceitável, e o “limite de trafegabilidade” é relativo ao estado de deterioração do pavimento no qual requer-se sua restauração ou reconstrução (BERNUCCI *et al.*, 2008).

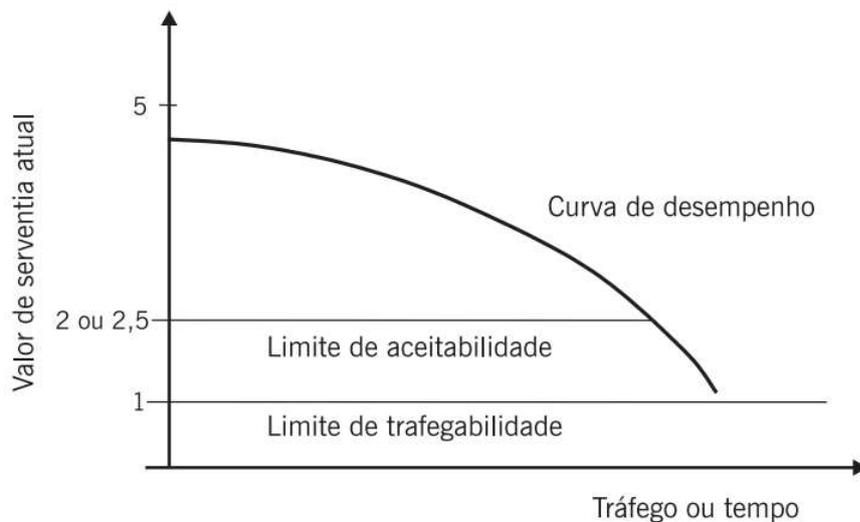


Figura 2.2 – Variação da serventia com o tempo de uso da via (Fonte: Bernucci *et al.*, 2008)

### 2.2.2 Avaliação funcional objetiva

A avaliação objetiva da superfície de um pavimento destina-se a identificar, julgar e mensurar as patologias existentes, servindo de embasamento para a seleção de alternativas de manutenção e sendo executada conforme procedimentos padronizados de medidas e inspeções (DANIELESKI, 2004).

Os defeitos de superfície podem surgir de maneira precoce (devido a erros e inadequações) ou a médio e longo prazo (devido à ação do tráfego e de agentes de intemperismo). Erros ou inadequações no projeto, na seleção, dosagem e/ou produção de materiais, na construção do pavimento, ou na escolha de alternativas de conservação e manutenção, são considerados os principais fatores redutores da vida útil de um pavimento (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Prestes (2001) cita que a caracterização dos defeitos existentes é alcançada a partir da análise dos seguintes parâmetros:

- Tipo: identificação do defeito, classificando-o segundo sua origem/causa;
- Severidade: estágio atual do desenvolvimento do defeito, representando o grau de degradação da área afetada. Normalmente representada em três níveis: baixa, média e alta;
- Extensão: dimensão relativa da região que apresenta o defeito em questão;

No Brasil, as normas que regem o levantamento de defeitos de pavimentos flexíveis e semi-rígidos são as seguintes:

- DNIT 005/2003 - TER: “Defeitos nos pavimentos flexíveis e semi-rígidos” – Terminologia (DNIT, 2003a);
- DNIT 006/2003 - PRO: “Avaliação objetiva da superfície de pavimentos flexíveis e semi-rígidos” – Procedimento (DNIT, 2003b);
- 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 (DNIT, 2003c);
- DNIT 008/2003 - PRO: “Levantamento visual contínuo para avaliação da superfície de pavimentos flexíveis e semi-rígidos” – Procedimento (DNIT, 2003d).

Os procedimentos descritos nas normas DNIT 006/2003 - PRO, DNIT 007/2003 - PRO e DNIT 008/2003 – PRO (DNIT, 2003bcd), porém, falham na caracterização completa do trecho viário analisado por não contemplarem a área do pavimento em sua totalidade, visto que

são feitos por amostragem em áreas demarcadas de 20,0 em 20,0 m com 6,0 m de comprimento longitudinal e largura correspondente à largura da faixa de tráfego, conforme apresentado na Figura 2.3 (SOUZA JÚNIOR, 2018).

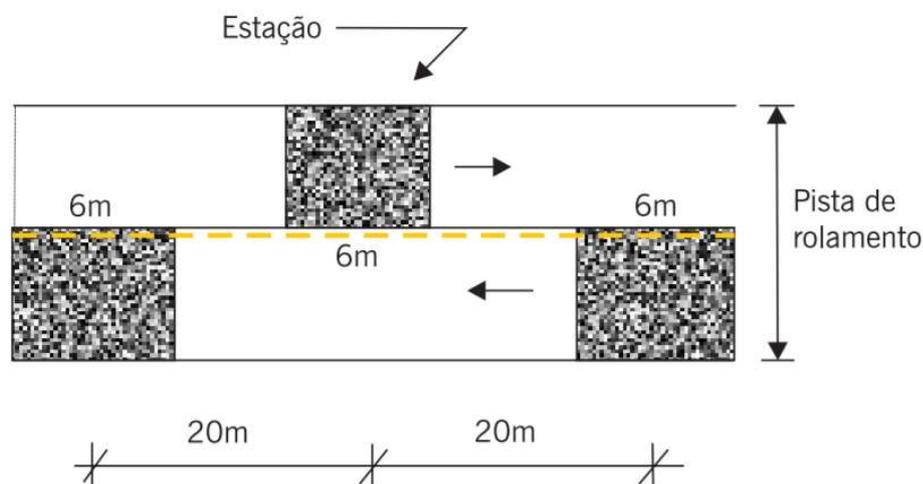


Figura 2.3 – Exemplo de demarcação de áreas para inventário de defeitos (Fonte: Bernucci *et al.*, 2008)

No entanto, com o avanço tecnológico e uso da informática e instrumentação, foi possível desenvolver um processo de levantamento de defeitos que é capaz de abranger toda a superfície do pavimento. Fazendo uso de um veículo equipado com instrumentos e um sistema de automação, aquisição e processamento de dados (SAPD), realiza-se o Levantamento Visual Contínuo Informatizado (LVCI) pelo Método da Varredura. A instrumentação é integrada por odômetro digital, GPS (*Global Positioning System*), câmera filmadora digital e computador. Como saída, o software do sistema emite uma planilha contendo uma listagem dos defeitos previstos na norma DNIT 005/2003 – TER (DNIT, 2003a) expressos em área, extensão ou unidade, com os devidos espaçamentos pré-definidos (ANTT, 2017a).

De acordo com Silva (2017), os resultados do LVCI podem ser utilizados em métodos mecânicos de dimensionamento de pavimentos, assim como nos tradicionais Sistemas de Gerência de Pavimentos (SGPs). As imagens dos trechos sincronizadas com o odômetro, planialtimetria e defeitos cadastrados são visualizadas fazendo-se uso de um sistema visualizador do vídeo registro, conforme mostra a Figura 2.4. Esse vídeo, além de “transferir a rodovia para o escritório/laboratório”, simplificando a elaboração de análises, também valida o levantamento, já que exibe a legenda dos defeitos catalogados simultaneamente às imagens e ao caminhar do veículo em planta e perfil (SILVA, 2017).

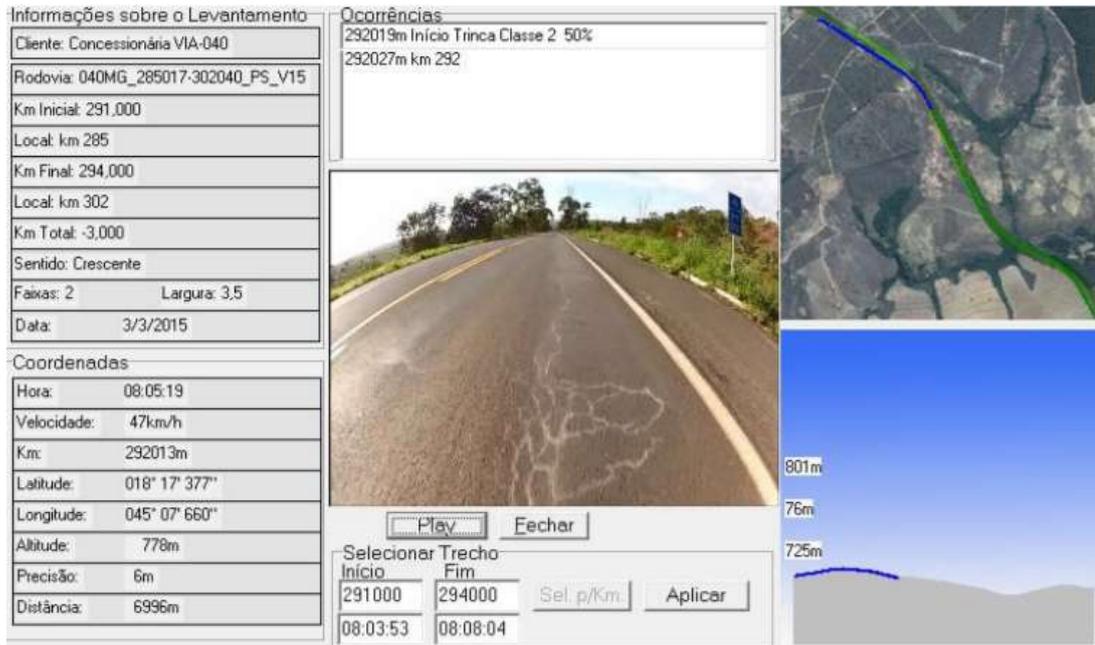


Figura 2.4 – Modo de apresentação de LVCI pelo Método da Varredura com uso de vídeo registro e indicação dos defeitos em sincronia com as imagens e planialtimetria (Fonte: Souza Júnior, 2018)

Um parâmetro não levantado pelos métodos descritos anteriormente e que influencia a dinâmica dos veículos, o efeito das cargas e a drenagem superficial de um pavimento é a irregularidade longitudinal de sua superfície (BERNUCCI *et al.*, 2008). Definida como o desvio da superfície em relação a um plano de referência (Figura 2.5), a irregularidade longitudinal afeta não somente o conforto ao rolamento da via, como também compromete sua segurança, consistindo, portanto, em um importante elemento indicativo do estado funcional de um pavimento.

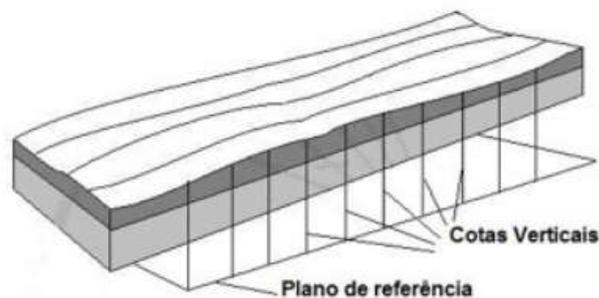


Figura 2.5 – Esquema representativo da irregularidade longitudinal de um pavimento (Fonte: [http://www.usp.br/ldsv/?page\\_id=217](http://www.usp.br/ldsv/?page_id=217))

Biconsini (2016) afirma que o principal índice de quantificação da irregularidade de um pavimento denomina-se IRI – *International Roughness Index*, assim escolhido no IRRE –

*International Road Roughness Experiment*, realizado no Brasil em 1982 e padronizado pelo Banco Mundial em 1986. O IRI é um índice estatístico, expresso em m/km, que mensura os desvios da superfície do pavimento em relação à de projeto, representando deslocamentos acumulados na unidade de distância percorrida (FRITZEN E MOTTA, 2018).

De acordo com Gillespie *et al.* (1986), a escolha do IRI como índice padrão de irregularidade se deve a três fatores principais: 1) foi o índice que melhor se adequou ao conceito dos sistemas medidores tipo resposta, utilizados largamente naquela época, principalmente por apresentar custo baixo e rendimento elevado; 2) apresentou maior acurácia dentre os considerados no estudo realizado; e 3) alcançou maior compatibilidade com os métodos perfilométricos existentes até o momento.

Existem diferentes aparelhos de medida da irregularidade longitudinal de um pavimento, sendo diferenciados com base em quão diretamente conseguem mensurar esse defeito e no intervalo de amostragem utilizado, o qual depende da taxa de aquisição de dados e da velocidade do veículo (BISCONSINI, 2016). Segundo Balbo *et al.* (2005), os dois principais tipos desses aparelhos são os equipamentos do tipo resposta e os perfilômetros inerciais.

Os equipamentos do tipo resposta buscam medir a resposta do veículo às imperfeições do pavimento por meio do somatório da variação da distância entre eixo e carroceria do veículo, a qual é captada por um transdutor (Figura 2.6). Tal somatório é então comparado a algum índice de irregularidade relativo a um modelo de correlação especificamente elaborado para o veículo ao qual é acoplado e para a velocidade constante que o mesmo deve trafegar, retornando então o valor desse índice (BALBO *et al.*, 2005).

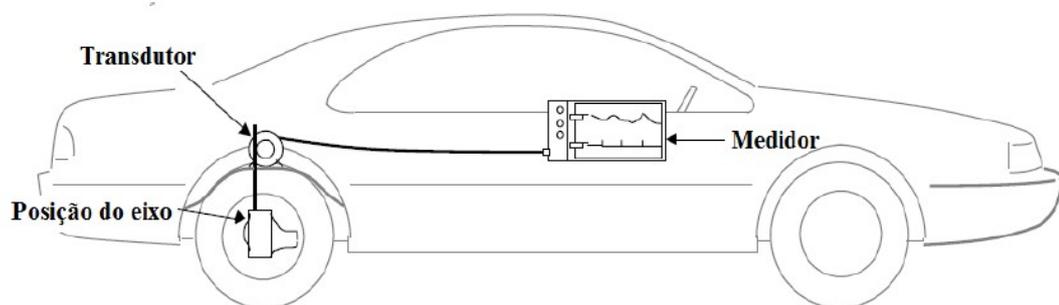


Figura 2.6 – Figura esquemática de um equipamento do tipo resposta (Fonte: Gillespie, 1992)

Já os perfilômetros inerciais funcionam da seguinte maneira: o veículo trafega sobre o pavimento e um computador registra simultaneamente o deslocamento longitudinal, a altura do veículo em relação ao pavimento (medida por um sensor a laser, infravermelho ou ultrassom) e sua aceleração vertical (medida por um acelerômetro). Um sistema de processamento de dados

“transforma”, por meio de duas integrações sucessivas, a aceleração vertical do veículo em deslocamento vertical, o qual é usado para manter a elevação da referência para cada instante. As medidas de altura são então corrigidas gerando um perfil longitudinal da irregularidade do pavimento (Figura 2.7) (BALBO *et al.*, 2005).

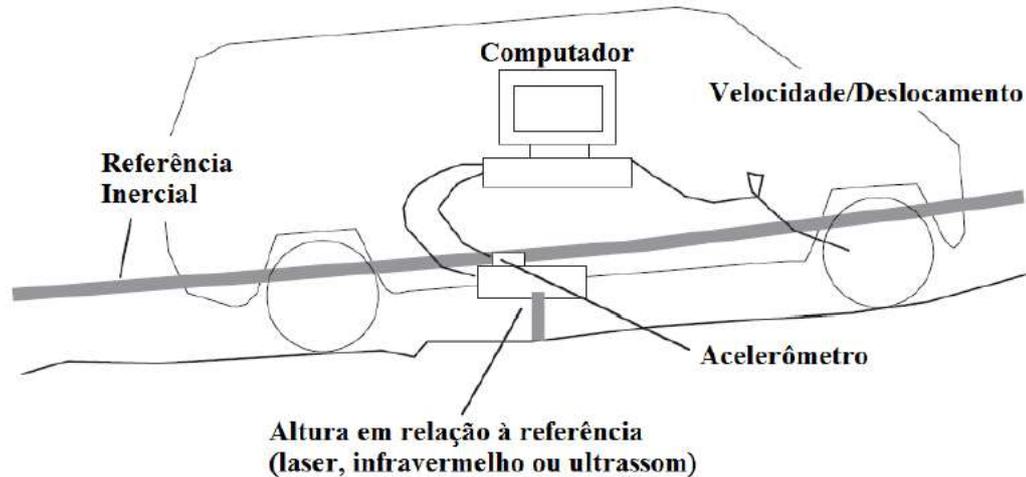


Figura 2.7 – Figura esquemática de um perfilômetro inercial (Fonte: Karamihas e Sayers, 1998)

### 2.3 Avaliação estrutural de pavimentos

Balbo (2007) declara que “a expressão avaliação estrutural, em seu sentido mais amplo, abrange a caracterização completa de elementos e variáveis estruturais dos pavimentos que possibilite uma descrição objetiva de seu modo de comportamento em face das cargas do tráfego e ambientais, de modo a possibilitar a emissão de julgamento abalizado sobre a capacidade portante de um pavimento existente diante das futuras demandas do tráfego”.

Logo, avaliar estruturalmente um pavimento demanda caracterizar os materiais constituintes de suas camadas, determinar as respectivas espessuras, assim como verificar os estados de integridade de tais materiais por meio de parâmetros estruturais.

O resultado desse tipo de avaliação, associado àquele da avaliação objetiva de patologias da superfície de um pavimento, permite a determinação de padrões e causas dos defeitos e, conseqüentemente, uma escolha mais acertada do método de restauração a ser adotado.

As avaliações estruturais realizam-se de duas formas complementares, conforme se discorre em seguida.

### 2.3.1 Avaliação estrutural destrutiva

Conhecida também como prospecção, requer a abertura de poços de sondagem para identificação e caracterização dos materiais e espessuras que integram as camadas do pavimento (Figura 2.8). Os materiais recolhidos são ensaiados tanto *in situ* como em laboratórios certificados para a correta determinação de suas características físicas e propriedades mecânicas (GONÇALVES, 1999).



Figura 2.8 – Ilustração de poço de sondagem (Fonte: Bernucci *et al.*, 2008)

Uma avaliação destrutiva tem possibilidade de ser executada através de processos mecânicos ou manuais. Balbo (2007) afirma que os processos mais empregados são: abertura de cavas à pá e picareta, abertura de furos a trado (concha ou helicoidal), abertura de trincheiras transversais à pista e extração de amostras de revestimentos e bases com sondagens rotativas.

### 2.3.2 Avaliação estrutural não-destrutiva

Gonçalves (1999) afirma que esse tipo de avaliação estrutural consiste na “realização de provas-de-carga para medida de parâmetros de resposta da estrutura às cargas de roda em movimento”.

O parâmetro estrutural de medida mais simples e confiável, segundo Bernucci *et al.* (2008), é aquele referente aos deslocamentos verticais (deformações) elásticos de superfície – deflexões, o que justifica o fato de a grande maioria dos aparelhos usados para ensaios não-destrutivos serem deflectômetros. Tais aparelhos podem ser classificados como sendo de:

- Carregamento quase estático: e.g., viga Benkelman e ensaio de placa;
- Carregamento vibratório: e.g., dynaflect;
- Carregamento por impacto: e.g., *falling weight deflectometer* (FWD);

Bernucci *et. al* (2008) ainda relatam que existem grandes diferenças no que se diz respeito aos valores numéricos aferidos por cada um desses tipos de aparelhos citados, e que esses podem ser utilizados para atender a levantamentos rotineiros, projetos de restauração ou sistemas de gerência em nível de rede.

No presente trabalho, a análise estrutural do pavimento em questão é realizada por meio do ensaio de carregamento por impacto – FWD.

### 2.3.2.1 Ensaio de carregamento por impacto – FWD

Os equipamentos de carregamento por impacto que medem deslocamentos elásticos de um pavimento são tipicamente conhecidos como *Falling Weight Deflectometer* (FWD). Esses equipamentos transmitem o esforço ao pavimento através da queda de um conjunto suspenso de pesos sobre amortecedores que, por sua vez, transferem o choque a uma placa metálica de carga apoiada sobre o pavimento, conforme esquema apresentado na Figura 2.9 (HAAS *et al.*, 1994, *apud* NÓBREGA, 2003). Dessa forma, um pulso de carga com formato aproximadamente igual a uma senóide é produzido, simulando o efeito da passagem de uma roda em movimento sobre o pavimento (NÓBREGA, 2003).

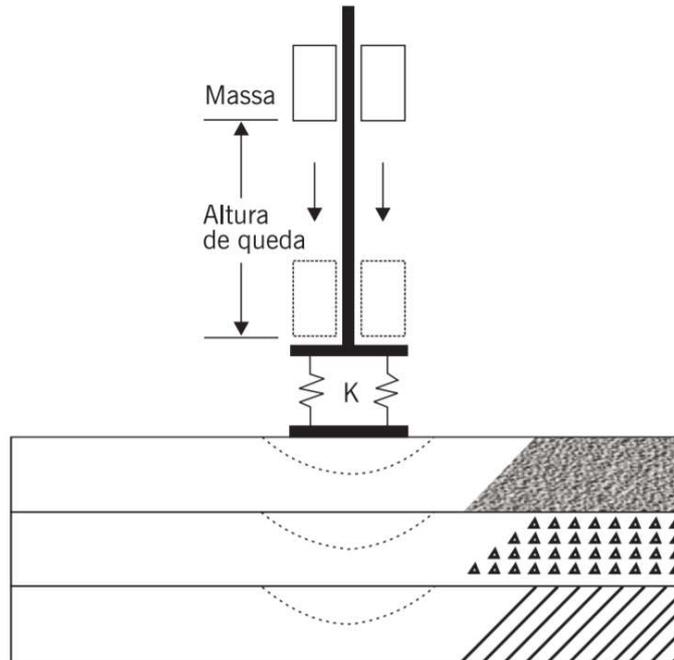


Figura 2.9 – Esquema de um defletoômetro de impacto (Fonte: Bernucci *et al.*, 2008)

A carga do impulso pode ser variada alterando-se a altura de queda ou a configuração do conjunto de pesos utilizado. O pulso tem duração de 25 a 30 ms, o que equivale à passagem de um veículo com velocidade de 60 a 80 km/h (LOPES, 2012).

O dispositivo FWD é completamente automatizado, possuindo um sistema computadorizado de aquisição de dados, o qual fica conectado aos sensores de carga localizados em distâncias pré-estabelecidas ao longo de uma barra (deflectômetros propriamente ditos). Esses elementos, juntamente com o equipamento de aplicação do carregamento, ficam dispostos em um reboque que é puxado por um veículo (Figura 2.10).



Figura 2.10 – Vista geral de equipamento FWD (Fonte: Autor, 2018)

O ensaio consiste, basicamente, em se aplicar a carga de impacto e realizar a leitura dos deslocamentos aferidos pelos sensores para se obter a bacia de deflexões (Bernucci *et al.*, 2008). A Figura 2.11 exibe o esquema da deformada obtida com o equipamento FWD.

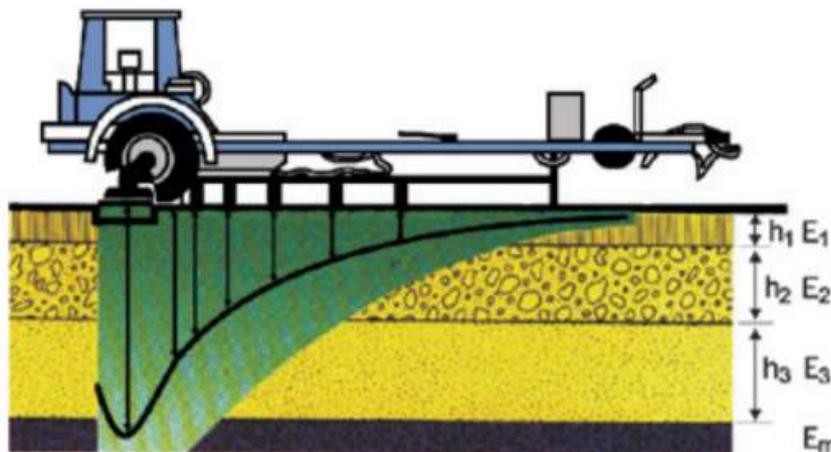


Figura 2.11 – Esquema da deformada obtida com equipamento FWD (Fonte: Bernucci *et al.*, 2008)

As vantagens da utilização do equipamento FWD em relação à viga Benkelman convencional relatadas por DNIT (2011) são as seguintes:

- Boa acurácia na medição das deflexões e baixa dispersão de valores;
- Possibilidade de aplicação de diferentes níveis de carga em um mesmo ponto;
- Rapidez e facilidade de operação, traduzidas como maior produtividade;
- Resultados não influenciados pelo operador;
- Registro automático da temperatura do ar e do pavimento e da distância entre os pontos de ensaio.

Como desvantagens citam-se o custo elevado do equipamento FWD, a necessidade de calibrações complexas e onerosas, além das diferenças de resultados quando se utilizam dispositivos de marcas diferentes.

A grande acurácia na medição das bacias deflectométricas permite que essas sejam utilizadas na estimativa dos módulos de resiliência das camadas do pavimento utilizando-se uma técnica de retroanálise, possibilitando uma avaliação estrutural mais apropriada e o cálculo de reforço, caso seja necessário, à luz da mecânica dos pavimentos.

## **2.4 Normas técnicas nacionais para projeto de reforço de pavimento**

De acordo com Balbo (2007), o reforço de um pavimento refere-se à nova camada de rolamento a ser sobreposta à superfície existente, quando verificada, a partir das avaliações funcional e estrutural, necessidade de restauração. Seu objetivo é o de devolver ao pavimento uma condição satisfatória de rolamento e um desempenho estrutural adequado.

Atualmente, os órgãos rodoviários dispõem de uma vasta diversidade de métodos para o cálculo de reforços de pavimentos asfálticos, contudo, não existe unanimidade no que concerne à escolha do mais apropriado (DNIT, 2006a).

Balbo (2007) explica que esses métodos seguem diferentes critérios de dimensionamento, e esclarece aqueles que são utilizados nas normas técnicas do DNIT:

- O primeiro critério abordado é o de resistência, o qual avalia a capacidade atual de suporte das camadas existentes e do subleito para então propor uma espessura de reforço que seja eficiente na proteção contra a ruptura por cisalhamento ou surgimento de deformações plásticas excessivas (critério do CBR);
- O segundo critério é o de deformabilidade, que leva em conta diferentes estágios e propriedades de deformação de um pavimento para, então, analisar a espessura de reforço. Tal espessura tem a finalidade de limitar deformações, minimizando a degradação estrutural, e restituir uma qualidade satisfatória de rolamento (serventia).

- O terceiro e último critério citado por Balbo (2007) estuda a necessidade de reforço a partir de uma perspectiva de desempenho e serventia, parametrizando a estrutura existente por um índice denominado número estrutural (SN) e definindo restrições de desempenho quanto ao trincamento, irregularidade longitudinal e desgaste.

Os procedimentos homologados pelo DNER, atual DNIT, para projeto de reforço de pavimentos são:

- 1) DNER-PRO 010/79 – Procedimento A: “Avaliação Estrutural dos Pavimentos Flexíveis” (DNER, 1979a);
- 2) DNER-PRO 011/79 – Procedimento B: “Avaliação Estrutural dos Pavimentos Flexíveis” (DNER, 1979b);
- 3) DNER-PRO 159/85: “Projeto de Restauração de Pavimentos Flexíveis e Semi-Rígidos” (DNER, 1985);
- 4) DNER-PRO 269/94 (TECNAPAV): “Projeto de Restauração de Pavimentos Flexíveis” (DNER, 1994a).

#### **2.4.1 DNER-PRO 010/79**

Esse procedimento, desenvolvido pelo engenheiro Armando Martins Pereira e normatizado pelo DNER, tem seus princípios básicos derivados do trabalho “Análise das Condições de Deformabilidade de Reforços com Base na Experiência Californiana”, no qual o autor faz uma adaptação do método utilizado pela California Division of Highways (hoje em dia CALTRANS – *California Department of Transportation*) apresentando, entre outras novidades, soluções que fazem uso de nomogramas. Assim, a iteratividade que era inerente ao método foi eliminada (DNIT, 2006a).

A metodologia abordada nessa norma técnica é baseada no critério de deformabilidade, pois, apesar de suas limitações, o empirismo demonstrou haver uma aceitável relação entre o desempenho dos pavimentos flexíveis e a grandeza de suas deflexões recuperáveis (DNER, 1979a).

A fim de se obter parâmetros para o cálculo da espessura de reforço, a norma requer estudos que englobam levantamentos prévios (análise histórica e prospecção preliminar) e definitivos (demarcação das estações de ensaio, determinação das deflexões recuperáveis, elaboração do inventário do estado da superfície e execução de sondagens complementares). Esses estudos servem também como base para a divisão do trecho em segmentos homogêneos,

sendo que tal homogeneidade refere-se às medidas corretivas que os segmentos em questão irão solicitar, tendo, portanto, um vínculo estreito com a composição da estrutura e seu estado de degradação (DNER, 1979a).

A espessura de reforço, nesse método, é definida por meio do uso de uma sequência de cinco nomogramas, os quais foram embasados nos nomogramas A e B da CALTRANS. Os quatro primeiros são utilizados nos casos em que apenas uma camada de CBUQ (concreto betuminoso usinado a quente) constitui o reforço, já o quinto é usado quando o reforço for integrado por camadas compostas por materiais distintos (capa e camada de ligação, por exemplo) (NÓBREGA, 2003).

O nomograma A correlaciona o índice de tráfego (IT) com a deflexão admissível do pavimento, dando origem ao Nomograma 1 da DNER-PRO 010/79. Por outro lado, o nomograma B associa a redução percentual de deflexão com a espessura de reforço em termos de pedregulho (espessura virtual de material granular), originando o Nomograma 5 da norma técnica brasileira (NÓBREGA, 2003).

A determinação da espessura de reforço pelo processo exposto na DNER-PRO 010/79 envolve, além dos gráficos citados, etapas de cálculo que dependem de parâmetros como o número N de projeto, IT, grau de deflexão, condição de fissuração e deflexão admissível. Por isso, Pinto e Preussler (2002) dizem que essa metodologia é bastante trabalhosa, podendo tornar-se mais prática se for implementada em uma rotina computacional.

#### **2.4.2 DNER-PRO 011/79**

A DNER-PRO 011/79 – Procedimento B: “Avaliação Estrutural dos Pavimentos Flexíveis” apresenta um procedimento normatizado pelo DNER tendo seus princípios básicos derivados de estudos desenvolvidos pelo engenheiro Bolívar Lobo Carneiro, o qual, por sua vez, baseou-se em trabalhos do engenheiro argentino Celestino Ruiz (DNIT, 2006a). De acordo com DNIT (2006a), a metodologia proposta por essa norma técnica tem seu emprego bastante difundido no Brasil, sendo isso causa, principalmente, de sua fácil compreensão.

O método descrito tem base no critério de deformabilidade de pavimentos, assim como a DNER-PRO 010/79, e requer basicamente as mesmas avaliações que essa última, abrangendo informações do levantamento histórico, da prospecção preliminar e dos estudos definitivos. Seu princípio de cálculo diz que, para se evitar trincas no revestimento, é necessário que a deflexão do pavimento se mantenha inferior a um valor estabelecido denominado deflexão admissível

( $D_{adm}$ ), sendo esse vinculado à composição da base e do revestimento do pavimento, assim como ao número N (DNER, 1979b).

A fim de se estabelecer a qualidade estrutural do pavimento, a necessidade de estudos complementares e o critério para cálculo do reforço, a DNER-PRO 011/79 apresenta uma tabela que requer como parâmetros de entrada a deflexão de projeto, o raio de curvatura do trecho e seu Índice de Gravidade Global (IGG), além da deflexão admissível determinada.

Enquadrando-se o trecho em uma das cinco hipóteses apresentadas na referida tabela e constatando-se a possibilidade de uso do critério deflectométrico para cálculo do reforço, o mesmo é realizado, de forma simples, pela Equação 2.1:

$$h_{CB} = K \cdot \log \frac{D_p}{D_{adm}} \quad (2.1)$$

onde:

- $h_{CB}$  é a espessura de reforço em concreto betuminoso;
- $D_p$  é a deflexão de projeto do subtrecho homogêneo;
- $D_{adm}$  é a deflexão admissível após a execução do reforço; e
- $K$  é o fator de redução de deflexão, que, para concreto betuminoso, deve ser igual a 40.

### 2.4.3 DNER-PRO 159/85

O procedimento descrito por essa norma técnica baseia-se em uma das mais importantes técnicas da Gerência de Pavimentos, que é a avaliação e comparação de mais de uma opção para o reforço de um pavimento, sendo isso realizado a partir de estudos do desempenho estrutural e funcional de cada uma dessas opções, assim como de seus respectivos custos de execução e manutenção/restauração ao longo do período de projeto determinado (DNIT, 2006a).

A coleta de dados requerida por esse procedimento assemelha-se àquela das normas DNER-PRO 010/79 e DNER-PRO 011/79 no que se diz respeito à medição das deflexões recuperáveis, execução de sondagens e ensaios de caracterização, assim como no que concerne à determinação e delimitação dos subtrechos homogêneos, porém existem diferenças relativas ao levantamento de dados e ao cálculo de parâmetros (DNER, 1985).

O procedimento da norma apresenta três alternativas para reforço de pavimento: reforço em concreto betuminoso, em tratamento superficial ou em lama asfáltica. Para o cálculo dessas alternativas utiliza-se equações de previsão de desempenho concebidas pela Pesquisa de Inter-

relacionamento de Custos Rodoviários (PICR), a qual foi conduzida pelo Grupo Executivo de Integração da Política de Transportes (GEIPOT) entre os anos de 1975 e 1984 (DNIT, 2006a).

Segundo Nóbrega (2003), o método empírico de dimensionamento representado na DNER-PRO 159/85 baseia-se no critério de desempenho e serventia e conta com as seguintes inovações no cálculo da alternativa mais racional de reforço:

- Introdução do número estrutural do pavimento (SN), conforme proposto pela AASHTO;
- Medição do quociente de irregularidade (QI), que representa a irregularidade longitudinal da superfície do pavimento;
- Determinação do módulo de resiliência do revestimento a 30° C, podendo-se adotar 30.000 kgf/cm<sup>2</sup> na impossibilidade de se determinar o real valor.

Esses elementos, juntamente com as medidas de deflexão máxima e de porcentagem de área trincada, configuram os parâmetros de entrada utilizados nos modelos de previsão de desempenho representados pelas equações desenvolvidas na PICR (MEDINA, 1997).

De acordo com Pinto e Preussler (2002), apesar da grande quantidade de variáveis introduzidas na análise estrutural realizada conforme o procedimento dessa norma técnica, somente a deflexão máxima medida com a viga Benkelman e o parâmetro de tráfego (número N) influenciam significativamente no cálculo da espessura de reforço em concreto asfáltico.

#### **2.4.4 DNER-PRO 269/94**

A DNER-PRO 269/94, também conhecida como “Método da Resiliência”, foi apresentada à comunidade rodoviária pelos engenheiros Salomão Pinto e Ernesto Preussler em junho de 1982, na 17ª Reunião Anual de Pavimentação (NÓBREGA, 2003). Esse método possibilita a consideração objetiva das propriedades resilientes de solos e materiais que, usualmente, compõem as camadas de um pavimento executado no Brasil. Conforme DNIT (2006a), após alguns anos implementando esse programa em trechos recapeados, os dados de campo recolhidos permitiram a validação e oficialização do procedimento, transcrito na norma técnica em questão.

“O procedimento é fundamentado em modelos de fadiga de misturas betuminosas, no comportamento resiliente típico de solos finos e materiais granulares e no cálculo de tensões e deformações considerando a teoria da elasticidade não linear” (DNIT, 2006a).

Essa norma segue o mesmo processo de levantamento de dados que a DNER-PRO 159/85, requerendo basicamente as mesmas informações, porém apresentando duas ressalvas,

uma com relação aos ensaios para determinação de módulos de resiliência, os quais devem ser acompanhados de ensaios de resistência à tração por compressão diametral, e outra com relação à caracterização dos solos, a qual é realizada em função de dois parâmetros principais: o Índice de Suporte Califórnia (ISC ou CBR, em inglês) e a percentagem de Silte (S) (Tabela 2.1) (DNER, 1994a).

Tabela 2.1 – Grupos de Solos (Fonte: DNER, 1994a)

CBR %	S %		
	≤ 35	35 a 65	> 65
≥ 10	I	II	III
6 a 9	II	II	III
2 a 5	III	III	III

Segundo Pinto e Preussler (2002), solos do tipo I possuem baixa resiliência (sendo recomendados para camadas de pavimentos), solos do tipo II dispõem de resiliência intermediária (apresentando comportamento regular para emprego como subleito) e solos do tipo III contam com elevada resiliência (sendo desaconselhável utilizá-los em camadas de pavimentos).

Para fins de dimensionamento, deve-se levar em consideração como camadas granulares aquelas compostas por materiais granulares (como macadames, solo brita, solo estabilizado granulometricamente, pedregulhoso, e solo arenoso) que possuam menos de 35% – em peso – de material passante na peneira nº 200 (abertura de 0,075 mm) (DNER, 1994a).

O procedimento para cálculo do reforço de acordo com a DNER-PRO 269/94 segue as seguintes etapas:

1. Determinação da deflexão de projeto característica;
2. Definição de uma estrutura de referência integrada por três camadas com espessuras definidas (revestimento betuminoso, camada granular e solo de fundação – tipo I, II ou III);
3. Cálculo da espessura efetiva (espessura equivalente de revestimento asfáltico);
4. Cálculo do reforço em concreto asfáltico.

Vale ressaltar que essa norma técnica permite, também, o dimensionamento de reforço com mistura reciclada.

## 2.5 Método mecanístico-empírico

Um método mecanístico-empírico de dimensionamento utiliza princípios derivados da Mecânica dos Pavimentos (especificamente aqueles provenientes da Teoria da Elasticidade) para examinar as tensões e deformações que ocorrem no pavimento por efeito das ações do tráfego e do clima, sendo sua estrutura modelada como um sistema de multicamadas (BASTOS, 2016). Nesse tipo de metodologia, procura-se compatibilizar a resistência dos materiais empregados com os esforços que agem no pavimento para que este seja equilibradamente solicitado, evitando-se que níveis muito elevados de tensões se desenvolvam em sua estrutura (BEZERRA NETO, 2004).

O propósito do dimensionamento de pavimentos dentro de um enfoque mecanístico é o de se alcançar uma estrutura viável do ponto de vista econômico e que atenda, ao mesmo tempo, determinados critérios de serventia durante o tempo de projeto (HUANG, 2003 *apud* MATTOS, 2014). Segundo Mattos (2014), os parâmetros de entrada nesse modelo de análise são, usualmente, os seguintes:

- Módulo de elasticidade ou Young e coeficiente de Poisson dos materiais empregados nas camadas do pavimento;
- Tráfego previsto para a vida de projeto (classes de veículos e volume médio diário – VMD);
- Espessuras arbitradas para as camadas do pavimento;
- Condições climáticas (temperatura e precipitação pluvial média mensal);
- Confiabilidade do projeto.

Apesar de um método mecanístico-empírico possibilitar uma abordagem mais racional da estrutura do pavimento, seu modelo teórico terá sempre que ser calibrado com dados de trechos experimentais, correlacionando suas respostas ao desempenho das estruturas reais (parte empírica do método) (ALMEIDA *et al.*, 2015). Para tanto, o procedimento que se mostra mais eficiente é o de aplicar modelos de previsão de desempenho do tipo mecanístico-empírico, pois possuem vasto campo de aplicação e são baseados em propriedades mecânicas fundamentais dos materiais presentes no pavimento (DNIT, 2006a).

### 2.5.1 Modelos de previsão de desempenho

De acordo com DNIT (2006a), um modelo de previsão de desempenho se traduz como sendo uma função que permite quantificar a diminuição do grau de serventia ou o

desenvolvimento de defeitos ao longo da vida de serviço de um pavimento. Tal modelo é designado como mecanístico-empírico quando é composto por três partes:

- 1) Um modelo estrutural de cálculo das respostas das camadas do pavimento às cargas dinâmicas do tráfego, ou seja, tensões e deformações plásticas ou elásticas que tenham relação com o aparecimento ou a multiplicação de defeitos estruturais;
- 2) Funções de transferência que relacionam as respostas da estrutura às solicitações do tráfego e ao surgimento e disseminação de defeitos. Essas funções devem ser embasadas em fundamentos, empiricamente validados, que traduzam o modo pelo qual a deterioração se procede, devendo também satisfazer a certas condições de contorno impostas pelo problema;
- 3) Fatores ou funções de calibração que adaptam as estimativas das funções de transferência de maneira a se gerar dados para uma base empírica. São incumbidos, então, de levar em conta parâmetros que não puderam ser evidenciados, seja no modelo estrutural ou nas funções de transferência, como, por exemplo: fatores climáticos, características próprias do tráfego operante e singularidades e variabilidade dos materiais.

Ainda segundo DNIT (2006a), a correta definição do comportamento tensão-deformação dos materiais presentes no pavimento frente às cargas do tráfego assume um papel crucial quando se aplica modelos mecanístico-empíricos, seja no projeto de novos pavimentos ou no de reforço. Nesse contexto, o módulo de elasticidade ou Young cobre duas definições distintas, são elas:

- Módulo de Deformação Resiliente ou Módulo de Resiliência ( $M_R$ ) – valor determinado através de ensaios de cargas repetidas realizados em laboratório. O carregamento, geralmente, tem duração de 0,10 s e o tempo de repouso é de 0,90 s. Tanto a parcela elástica instantânea quanto a viscoelástica são computadas e, portanto, toda a deformação recuperável é inserida no cálculo.
- Módulo de Elasticidade Efetivo *in situ* ( $ME_{ef}$ ) – valor determinado por retroanálise de bacias deflectométricas obtidas por meio de equipamentos para ensaios não destrutivos.

Portanto,  $M_R$  relaciona-se às condições de compactação e solicitação do ensaio de laboratório, já  $ME_{ef}$  representa ou simboliza o estado de tensões, a compactação e o tipo de carregamento impostos pelas cargas de roda.

Medina e Motta (2015) afirmam que o maior obstáculo no projeto de reforço por um método mecanístico-empírico é a correta determinação dos módulos elásticos dos materiais presentes nas camadas do pavimento a ser recuperado. Isso ocorre porque, na grande maioria dos casos, lida-se com pavimentos antigos que foram projetados pelo método de dimensionamento do CBR (método empírico normatizado pelo DNER) e dos quais são escassas as informações construtivas, além do fato de nem sempre ter sido implantado aquilo que foi projetado em termos de materiais e espessuras.

Para solucionar esse problema, Medina e Motta (2015) declaram que ou procede-se à avaliação destrutiva do pavimento, com abertura de poços de sondagem para recolhimento de material e aferição dos módulos em laboratório, ou efetua-se uma avaliação não destrutiva, com a utilização de equipamentos para medição das deflexões e posterior retroanálise das bacias deflectométricas obtidas.

## **2.6 Retroanálise**

De acordo com a norma técnica D5858 (ASTM, 2015), retroanálise (*backcalculation*) é a técnica analítica utilizada para a determinação do módulo elástico equivalente dos materiais que compõem as camadas de um pavimento correspondente a uma carga aplicada e às deflexões aferidas, sendo empregada em avaliações de pavimentos e projetos de reforço. Essa norma ressalta que os módulos calculados através de retroanálise referem-se a um estado de carregamento específico e às condições ambientais presentes no momento de realização do ensaio (MEDINA E MOTTA, 2015).

A Figura 2.12 apresenta os elementos essenciais ao processo de retroanálise. Conhecendo-se a magnitude da carga externa aplicada (para a qual foi medida a bacia de deflexão), certas características dos materiais integrantes de cada camada e suas espessuras, é possível inferir os módulos de elasticidade com base nas deflexões apuradas (NÓBREGA, 2003).

Admite-se, como hipótese, que existe um conjunto representativo de módulos para as condições específicas de carregamento e de temperatura que faz coincidir a bacia teórica calculada com aquela obtida em campo. Essa última pode ser determinada por meio de ensaios não-destrutivos, fazendo-se uso de equipamentos como a viga Benkelman ou do tipo FWD (MARCON E VILLELA, 2001).

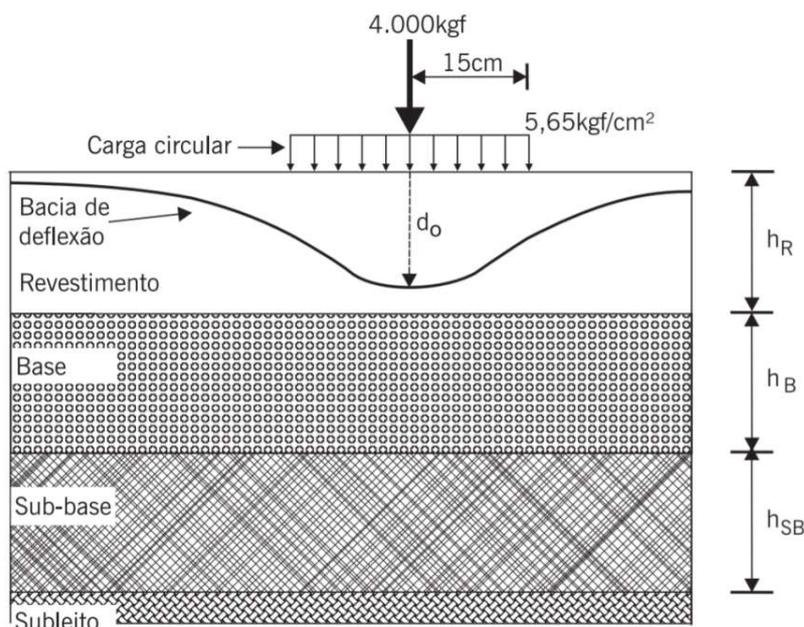


Figura 2.12 – Esquema de dados necessários à retroanálise (Fonte: Nóbrega, 2003)

Bernucci *et al.* (2008) afirmam que, em um método de retroanálise, os dados de entrada são os seguintes: seção-tipo do pavimento, coeficiente de Poisson e valor inicial de módulo para o material componente de cada camada, bacia de deflexão e configuração do carregamento. A maioria desses métodos segue o seguinte procedimento (MACEDO, 1996):

1. Estimativa dos módulos iniciais (*seed values*) por meio de uma técnica de aproximação de valores, ensaios de laboratório ou através de um banco de dados;
2. Cálculo da bacia de deflexões fazendo uso dos módulos estimados no passo 1;
3. Comparação entre as deflexões medidas e calculadas;
4. Ajuste dos módulos para redução das diferenças encontradas no passo 3;
5. Repetição dos passos 2 e 4 até que o erro aferido entre as bacias medida e calculada se enquadre em um critério de tolerância preestabelecido, ou que o conjunto de módulos não varie mais do que um intervalo prefixado, ou ainda que o programa atinja um certo número de iterações.

Conforme Albernaz *et al.* (1996) e Carvalho *et al.* (2000) declaram, a retroanálise apresenta as seguintes vantagens em relação aos processos de avaliação estrutural e projeto de reforço adotados pelo DNIT:

- Possibilidade de obtenção dos módulos resilientes dos materiais nas condições de campo;

- Eliminação ou redução do número de sondagens necessárias para coleta de amostras e determinação de espessuras;
- Representação do estado real da estrutura;
- Rapidez e acurácia na definição das características elásticas dos materiais empregados nas camadas do pavimento;

Os métodos homologados pelo DNIT utilizam valores individuais de deflexão máxima para caracterizar estruturalmente um pavimento, levando-os em conta de forma isolada. Apesar de as deflexões máximas permitirem a determinação dos segmentos nos quais o pavimento apresenta oscilações nas deformações recuperáveis, um mesmo valor de deflexão máxima pode ser representativo de diversos estágios de qualidade estrutural (tanto mais crítica quanto mais concentrada a bacia), conforme apresentado na Figura 2.13. A retroanálise, portanto, apresenta como vantagem, ainda, a possibilidade de uso pleno da bacia deflectométrica (BERNUCCI *et al.*, 2008).

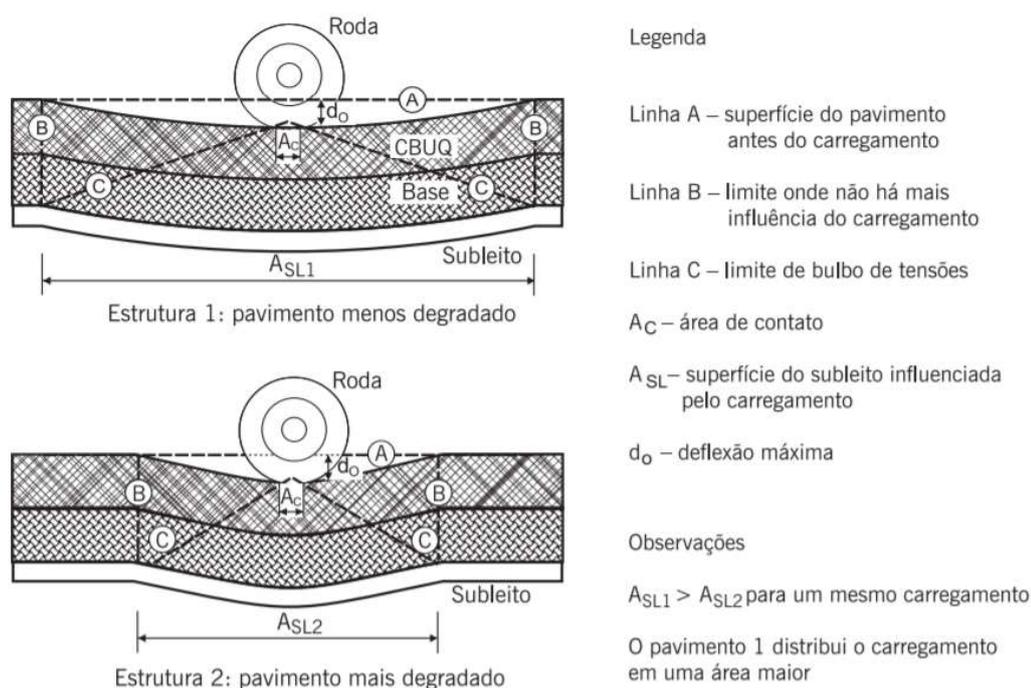


Figura 2.13 – Diferentes formas de bacia deflectométrica indicam diferentes capacidades de carga para a mesma deflexão máxima (Fonte: Motta e Nóbrega, 2003)

A correta escolha das bacias de deflexão utilizadas em uma retroanálise é um ponto de suma importância em um projeto de reforço que utiliza essa técnica para determinação dos módulos de elasticidade efetivos dos materiais constituintes das camadas do pavimento. Isso se

justifica devido à inerente variabilidade das deflexões medidas, fato que pode fazer com que o programa computacional emita resultados assaz discrepantes (BEZERRA JÚNIOR, 2018).

Medina e Motta (2015) relatam que os potenciais fatores causadores dessa variabilidade são a heterogeneidade dos materiais e de suas espessuras, as falhas na execução do ensaio (como contato insuficiente da placa de carga do deflectômetro com a superfície do pavimento) e a acurácia e precisão do equipamento utilizado.

Bernucci *et al.* (2008) relatam que as desvantagens da utilização de retroanálise para determinação dos módulos de elasticidade são as seguintes:

- Sensibilidade do cálculo dos valores dos módulos de elasticidade com relação às bacias de deflexão, as quais apresentam uma imprecisão intrínseca aos levantamentos de campo;
- Necessidade de verificação contínua da confiabilidade dos equipamentos e procedimentos que medem as deflexões;
- Os valores de módulo elástico obtidos através da retroanálise não configuram, necessariamente, os valores reais apresentados pelos materiais das camadas e sim “módulos equivalentes” (a igualdade vai depender de aspectos diversos, como quantidade de camadas, estágio de trincamento, homogeneidade de material e constância de espessura);
- A combinação de módulos calculada não é única, dependendo do tipo de programa operado, das hipóteses simplificadoras, dos níveis de ajuste estabelecidos, etc.

Os referidos autores dizem ainda ser fundamental balizar os programas e procedimentos de retroanálise com resultados dos ensaios de laboratório, como faixas consistentes de valores de módulos de elasticidade.

O conceito de retroanálise não é novo, existindo métodos datados da década de 1970 e, atualmente, consiste no procedimento usado em projetos de reforço que mais evoluiu no mundo. O avanço tecnológico possibilitou o surgimento de diversos programas computacionais, os quais se dividem em simplificados e iterativos (BERNUCCI *et al.*, 2008).

### **2.6.1 Métodos iterativos**

Em um método iterativo, a definição das propriedades elásticas e geométricas dos materiais que constituem as camadas do pavimento é realizada por meio de comparações entre a bacia de deflexões medida em campo e bacias teóricas de uma série de estruturas. Quando as

bacias medida e teórica coincidem ou apresentam um erro admissível, o processo então se encerra (NÓBREGA, 2003).

Dentre os critérios limites da diferença entre as bacias medida e calculada em um método iterativo, destacam-se os seguintes: erro relativo em cada sensor; soma dos valores absolutos das diferenças entre deflexões medida e calculada em cada sensor; soma das diferenças ao quadrado e raiz média quadrática – RMS (MACÊDO *et al.*, 1994).

Esses métodos gastam um período significativo de tempo de processamento devido ao fato de utilizarem processos iterativos na convergência da solução, podendo durar horas para serem finalizados dependendo da quantidade de camadas e trechos analisados (ALBERNAZ *et al.*, 1995).

### **2.6.2 Métodos simplificados**

Um método de retroanálise simplificado é aquele onde a determinação das propriedades elásticas da estrutura do pavimento é realizada por meio de equações, tabelas e gráficos, entre outros processos simplificados provenientes da teoria da elasticidade aplicada a meios homogêneos, isotrópicos e linearmente elásticos (NÓBREGA, 2003).

Nóbrega (2003) diz que, de maneira geral, esse tipo de método consiste na conversão do pavimento real em estruturas equivalentes mais simples, compostas de duas ou três camadas, incluindo o subleito. Afirmar ainda que, por tratarem o problema simplificada, os métodos simplificados são mais rápidos que os iterativos, porém perdem em acurácia.

### **2.6.3 Programa computacional BackMeDiNa**

Nesse trabalho de pesquisa, utilizou-se o programa computacional BackMeDiNa para execução da retroanálise das bacias deflectométricas, obtidas pelo levantamento com equipamento FWD, a fim de se inferir o módulo de elasticidade efetivo *in situ* das camadas do pavimento. Segundo Franco *et al.* (2018), a rotina de cálculo implementada consiste em um método iterativo de aproximação das bacias medida e calculada, sendo esse realizado a partir da variação dos valores dos módulos em torno de um valor central (inserido pelo usuário) e valendo-se do componente AEMC (Análise Elástica de Múltiplas Camadas), também elaborado por Franco (2007), para execução de análise elástica linear.

Essa variação dos valores dos módulos ocorre em uma faixa que depende do erro da retroanálise. Para erros elevados, a faixa de variação de cada um dos módulos é de 80% do valor inicial fornecido (para mais e para menos). Já para erros mais baixos, a faixa de valores

diminui para 25%. A quantidade de intervalos de cada faixa também varia de acordo com o erro. No caso de erros elevados, somente 9 (nove) intervalos são considerados. Já em situações de erros baixos, 15 (quinze) intervalos são levados em conta, objetivando uma melhor precisão (FRANCO *et al.*, 2018a).

A partir de um arquivo de dados do programa computacional Microsoft Excel® em formato .csv (*comma separated file* ou arquivo separado por vírgulas) – Figura 2.14, importam-se dados referentes aos valores das deflexões medidas pelo equipamento FWD em cada sensor, às posições dos sensores, raio da placa do equipamento, carga aplicada e temperaturas do ar e do pavimento. Como informações complementares tem-se a localização da rodovia (ou trecho), faixa e trilha referentes ao local onde o ensaio foi realizado e o respectivo número da estaca.

4	Data de Execução	Temp. Do Ar	Temp. Do Pavimento	Carga	Estaca – Número	Estaca – Descolamento	Estaca – Faixa	Estaca – Trilha	d0	d20	d30	d45	d60	d90	d120	d150	d180
5	10/3/2018	19	25	4097	0	0	0	0	410	294	212	126	92	61	45	34	26
6	10/3/2018	19	26	4098	1	20	0	0	421	274	193	109	87	66	48	40	32
7	10/3/2018	20	26	4109	2	40	0	0	481	322	217	108	65	42	35	32	28
8	10/3/2018	20	24	4072	3	60	0	0	422	281	199	105	64	34	27	24	19
9	10/3/2018	20	23	4091	5	100	0	0	361	257	193	108	63	38	28	22	19
10	10/3/2018	19	26	4121	6	120	0	0	289	208	160	100	70	44	33	29	22
11	10/3/2018	20	24	4086	7	140	0	0	332	215	154	93	62	34	24	21	18
12	10/3/2018	20	26	4054	8	160	0	0	422	279	183	100	63	33	24	22	19
13	10/3/2018	20	24	4009	9	180	0	0	550	409	315	204	142	81	55	45	35
14	10/3/2018	20	22	4013	10	200	0	0	498	343	254	155	111	66	48	36	29
15	10/3/2018	20	23	3925	11	220	0	0	585	379	238	107	66	32	21	17	15
16	10/3/2018	20	24	4074	13	260	0	0	326	217	155	91	62	37	27	24	20
17	10/3/2018	20	27	4085	14	280	0	0	294	198	148	85	56	36	28	25	22
18	10/3/2018	20	27	4063	15	300	0	0	343	228	156	94	64	38	27	23	19
19	10/3/2018	20	25	4082	16	320	0	0	253	168	125	80	60	40	31	27	23

Figura 2.14 – Modelo de planilha para importação de dados (Fonte: Autor, 2018)

Toda vez que o usuário clicar no botão que dá início à retroanálise, o software testa todos os possíveis intervalos de módulos das camadas para então apresentar a bacia calculada que melhor se aproxima da bacia medida em campo, isto é, aquela que possui o menor erro, o qual é calculado pela raiz do valor quadrático médio das diferenças entre as respectivas deflexões (RMS). Portanto, para que se tenha uma retroanálise satisfatória, o usuário deve clicar no referido botão diversas vezes (podendo até ajustar os valores de entrada dos módulos de acordo com os resultados) até que o erro (RMS) não varie mais. Caso a retroanálise ainda assim se apresente inadequada, o usuário pode fornecer outro valor inicial de módulo em qualquer uma das camadas e então repetir o processo (FRANCO *et al.*, 2018a).

## 2.7 Programa computacional SisPav

Desenvolvido por Franco (2007), o SisPav consiste em um programa computacional de dimensionamento e verificação de pavimentos flexíveis por método mecanístico-empírico, onde as respostas do pavimento em questão são calculadas, em cada subcamada da estrutura definida, utilizando a teoria da elasticidade por meio do componente AEMC, que tem como base a rotina JULEA, elaborada por Uzan (1978 *apud* Franco, 2007) (FONSECA, 2013).

A Figura 2.15 apresenta o fluxograma do método de dimensionamento desenvolvido por Franco (2007) que resultou no software SisPav.

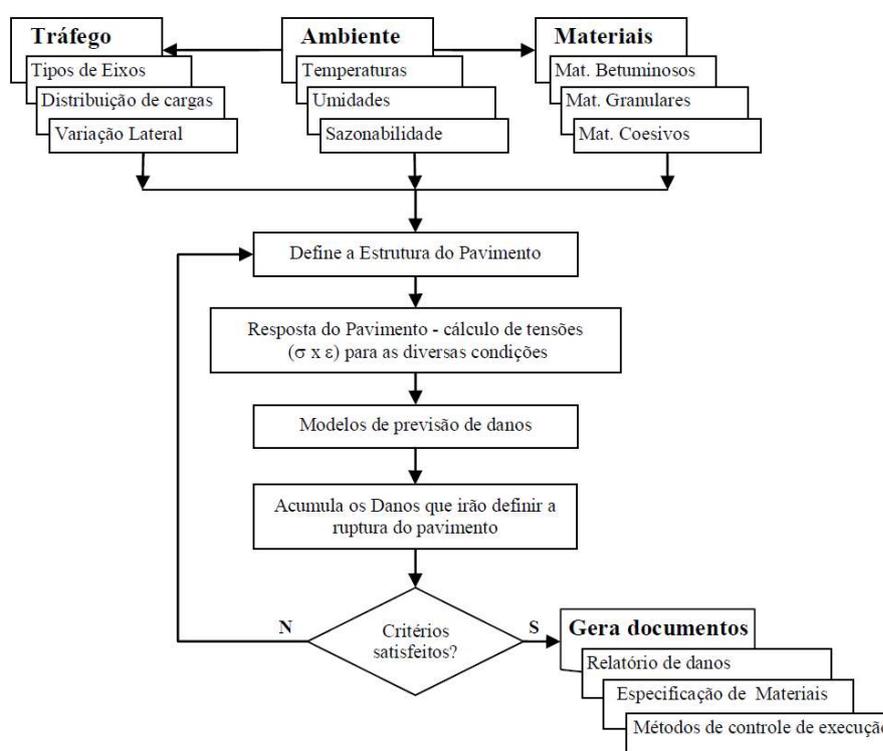


Figura 2.15 – Fluxograma do método integrado de análise e dimensionamento de pavimentos asfálticos (Fonte: Franco, 2007)

No programa computacional SisPav, os materiais componentes da estrutura devem ser devidamente caracterizados a fim de se proceder à adequada análise de tensões, deformações e deslocamentos das camadas do pavimento, considerando, principalmente, o comportamento resiliente dos mesmos (PINTO, 2016). Para caracterizar as misturas asfálticas, Franco (2007) adota o módulo de resiliência como parâmetro representativo de seu comportamento mecânico. Além disso, para o perfeito funcionamento do programa, é necessário informar dados a respeito do coeficiente de Poisson, granulometria, viscosidade do ligante asfáltico e índices volumétricos da mistura asfáltica.

Os materiais granulares, os solos finos, siltosos, argilosos e lateríticos finos e as lateritas pedregulhosas são caracterizados no programa computacional SisPav pelos parâmetros de módulo de resiliência e coeficiente de Poisson, sendo possível optar pela consideração de modelo elástico linear ou não linear (FONSECA, 2013). Já os materiais estabilizados com cimento são caracterizados pelos parâmetros de módulo de resiliência, coeficiente de Poisson e resistência à tração aos 28 dias, podendo-se considerar o modelo elástico linear ou representado pela função sigmoideal dependente do consumo de vida de fadiga (PINTO, 2016).

A influência da ação do meio físico nos cálculos realizados pelo programa computacional foi considerada por Franco (2007) tendo em vista dois aspectos principais: a temperatura e a umidade. A temperatura atua modificando certas propriedades físicas dos materiais, como no processo de envelhecimento do ligante asfáltico e na variação do módulo de resiliência dos materiais. Franco (2007) divide o ano de análise em períodos ou estações, sendo cada estação subdividida em cinco subestações, nas quais são simuladas, a partir de modelos matemáticos, a distribuição de temperatura no interior do pavimento. Em seguida, o programa estima a variação do módulo de resiliência das camadas asfálticas em função da mudança de viscosidade ao longo do tempo e das oscilações climáticas do local da obra. Os parâmetros de estimativa dessa variação foram adaptados por Franco (2007) para os ligantes asfálticos típicos nacionais (FERREIRA, 2013; COUTINHO, 2011).

Já no que concerne à umidade, Franco (2007) opta por não levar em consideração a influência de sua variação ao longo do ano nas camadas do pavimento, pois, com base nos resultados de estudos analisados e apresentados em Medina e Motta (2005), a umidade de equilíbrio é alcançada no subleito e nas camadas de base e sub-base de rodovias adequadamente projetadas e construídas, mantendo-se próxima da umidade ótima (FRANCO, 2007).

Com relação ao tráfego que solicita o pavimento, o programa computacional SisPav permite a entrada de diferentes tipos de eixos ou que se use o eixo-padrão rodoviário de 8,2 tf como referência. O efeito de cada configuração de eixo sobre a estrutura do pavimento é então computado na análise. Existe a possibilidade de se considerar, ainda, a variação do tráfego ao longo do ano e a distribuição e variação lateral do tráfego no acúmulo de danos do pavimento (FONSECA, 2013; PINTO, 2016).

Franco (2007) diz que, no dimensionamento de uma estrutura, o programa computacional SisPav considera diferentes critérios de ruptura estrutural do pavimento asfáltico, os quais são baseados em modelos de previsão de desempenho e funcionam como limitantes na determinação das espessuras das camadas. Esses critérios são: deformação limite

no topo do subleito, deflexão máxima na superfície do pavimento, deformação permanente (ou afundamento de trilha de roda – ATR) e comportamento do revestimento e camadas estabilizadas quanto à fadiga, sendo esse último o principal deles (FONSECA, 2013). Franco (2007) afirma ainda que, por insuficiência de dados e informações relativos a segmentos nacionais, não foi possível realizar a calibração desses modelos de previsão de desempenho.

### 2.7.1 Deformação limite no topo do subleito

O critério de ruptura que aborda o dano provocado pela deformação limite no topo do subleito tem limitações quanto à aquisição de dados para constituir seu modelo devido ao elevado período de tempo requerido para a execução de ensaios, além da dificuldade referente à necessidade de avaliação de um grande número de variáveis nesse estudo. Por tais motivos, diversos métodos, que adotam esse critério de ruptura para o dimensionamento de pavimentos, simplificam suas análises avaliando-o indiretamente através das tensões verticais e deformações resilientes que se desenvolvem em função da aplicação de cargas no topo do subleito (FONSECA, 2013).

De acordo com Motta (1991), a verificação da tensão vertical é feita no topo do subleito devido ao fato de se lidar com a camada do pavimento composta pelo material existente no leito natural, o qual, normalmente, apresenta menor resistência ao cisalhamento do que aqueles presentes nas camadas superiores.

O modelo adotado por Franco (2007) para estimar a tensão vertical admissível no topo do subleito (Equação 2.2) foi originalmente desenvolvido por Heukelom e Klomp (1962) e apresentado por Motta (1991). Apesar de não se enquadrar completamente nas condições climáticas e de solo brasileiras, o modelo foi adotado em razão de não existir outros estudos, àquela época, que se adaptavam de forma mais adequada à realidade geográfica nacional.

$$\sigma_{adm} = \frac{0,006 \cdot M_R}{1+0,7 \cdot \log N} \quad (2.2)$$

onde:

- $\sigma_{adm}$  é a tensão vertical admissível no topo do subleito, em kgf/cm<sup>2</sup>;
- $M_R$  é o modulo de resiliência do subleito, em kgf/cm<sup>2</sup>; e
- $N$  é o número de aplicações de carga.

## 2.7.2 Deflexão admissível na superfície do pavimento

A deflexão máxima admissível na superfície do pavimento consiste em um parâmetro potencialmente representativo do controle da resistência à fadiga, sendo adotado como critério de avaliação estrutural em virtude da facilidade de monitoramento em campo (MEDINA E MOTTA, 2005).

A determinação da deformação recuperável máxima está correlacionada à concepção estrutural do pavimento e às características elásticas de suas camadas, o que justifica o uso desse fator como parâmetro indicativo do comportamento global da estrutura (FRANCO, 2007). A deflexão representativa de certo segmento é considerada em variados métodos de dimensionamento de reforço como o principal elemento a influenciar o cálculo da espessura dessa camada, conforme exposto.

Na norma técnica DNER-PRO 269/94 (DNER, 1994), especialmente, utilizam-se equações para se estimar a vida de fadiga baseada na deflexão máxima admissível devida a uma solicitação conhecida. Tais equações (Equação 2.3), propostas por Preussler (1983) e utilizadas por Franco (2007) no programa computacional SisPav, são expostas a seguir e representadas na Figura 2.16.

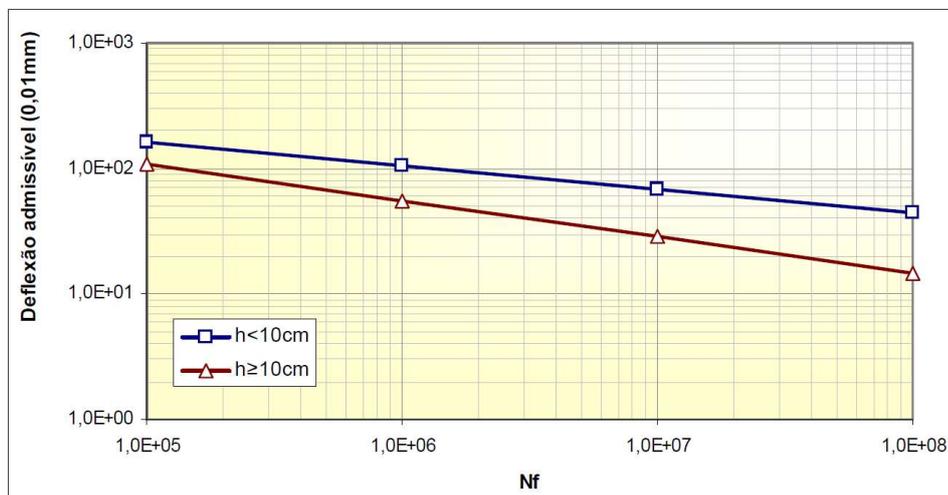


Figura 2.16 – Curvas do critério de deflexão admissível (Fonte: Preussler, 1983)

$$\begin{cases} \log(D) = 3,148 - 0,188 \cdot \log(N_f) & \text{para } h < 10\text{cm} \\ \log(D) = 3,479 - 0,289 \cdot \log(N_f) & \text{para } h \geq 10\text{cm} \end{cases} \quad (2.3)$$

onde:

- $D$  é a deflexão máxima total admissível (0,01 mm); e
- $N_f$  é o número de repetições de carga.

Preussler (1983) multiplicou por 100 o valor do número de repetições de carga do ensaio de fadiga que embasou o critério, sendo esse fator campo-laboratório já incorporado aos parâmetros das expressões do modelo.

Franco (2007) alerta para a descontinuidade das expressões, como se observa no gráfico exibido, a qual pode levar o programa a dimensionar de forma inapropriada a camada de revestimento quando essa possuir uma espessura próxima de 10,0 cm.

### **2.7.3 Deformação permanente**

Fonseca (2013) relata que a previsão da deformação permanente de um pavimento (ou ATR) não consiste em um critério prioritário de ruptura estrutural quando se trata da avaliação de vida útil de projeto realizada pelo programa computacional SisPav. Contudo, depois de ser realizada a verificação de determinada estrutura de pavimento, a estimativa da deformação permanente é exibida associada à uma comparação feita com um valor limite preestabelecido. Fonseca (2013) afirma que a deformação permanente total capaz de conferir conforto e segurança ao pavimento encontra-se no intervalo de 7,5 mm a 16,0 mm, sendo o valor de 12,5 mm empregado como limite admissível no programa.

A deformação total de um pavimento é composta por duas frações: a referente à deformação resiliente (ou reversível) e aquela referente à deformação permanente (ou plástica). Todas as camadas do pavimento contribuem com alguma parcela para a deformação permanente total da estrutura, sendo primordial o conhecimento do mecanismo de deformação de cada um dos materiais constituintes das camadas do pavimento para se estimar a profundidade dos afundamentos de trilha de roda (Motta, 1991).

A medição de ATR em campo é uma tarefa simples de ser executada, apesar disso, sua estimativa é assaz complexa. O problema não se resume somente em caracterizar os materiais corretamente, incluindo também a necessidade de se fazer um cálculo adequado de tensões ao longo de toda a vida de serviço do pavimento e de se avaliar a influência das condições ambientais no desenvolvimento das deformações permanentes (FRANCO, 2007).

Franco (2007) informa que o modelo de previsão da deformação permanente exposto por Cardoso (1987) obtido da diferenciação matemática do modelo de Monismith *et al.* (1975 *apud* Franco, 2007) foi integrado ao programa computacional SisPav. Nesse modelo, Cardoso (1987) relaciona a deformação permanente com a deformação resiliente, permitindo uma previsão baseada não somente no número de repetições de carga, mas também no estado de tensões ao qual o material está submetido (Equação 2.4). Assim, o referido autor procurou

representar, no termo da deformação resiliente, a influência de outros fatores no comportamento dos materiais quanto a deformação plástica, tais como a umidade, a granulometria, tipo e densidade dos materiais, bem como o estado passado e presente de tensões (FRANCO, 2007).

$$\frac{\varepsilon_p(N)}{\varepsilon_r} = \mu \cdot (N)^{-\alpha} \quad (2.4)$$

onde:

- $\mu = \frac{A \cdot B}{\varepsilon_r}$  ;
- $\alpha = 1 - B$  ;
- $\varepsilon_p(N)$  é a deformação permanente na n-ésima repetição de carga;
- $\varepsilon_r$  é a deformação específica resiliente;
- $N$  é o número de aplicações de carga em laboratório; e
- $A$  e  $B$  são os parâmetros experimentais do modelo de Monismith *et al.* (1975).

A partir do conhecimento das tensões em laboratório e das equações que relacionam as deformações permanente e resiliente para todos os materiais que compõem as camadas do pavimento asfáltico, pode-se estimar a deformação permanente total de sua estrutura mediante o somatório das deformações individuais de cada camada, conforme Equação 2.5, adaptada de Barksdale (1972) para a previsão do afundamento de trilha de roda ( $\delta_{total}^P$ ) (MOTTA, 1991).

$$\delta_{total}^P = \sum_{i=1}^{n-1} (\varepsilon_p^i \times h_i) + \delta_{SL} \quad (2.5)$$

onde:

- $\delta_{total}^P$  é a deformação permanente total do pavimento;
- $\varepsilon_p^i$  é a deformação permanente específica média da camada de ordem  $i$ ;
- $h_i$  é a espessura da camada de ordem  $i$ ;
- $n$  é o número de camadas do pavimento, considerando o subleito; e
- $\delta_{SL}$  é a deformação permanente do subleito.

#### 2.7.4 Fadiga dos materiais asfálticos e estabilizados

Franco (2007) afirma que, a fim de se analisar a estrutura de um pavimento, os métodos de ensaio utilizados para previsão da fadiga de materiais asfálticos e para determinação de seus módulos de deformabilidade devem estar em conformidade com a técnica aplicada no programa de dimensionamento. Tendo isso em vista, o uso indiscriminado de modelos desenvolvidos a partir de métodos de ensaio distintos daqueles nos quais a rotina de dimensionamento foi

baseada pode originar resultados discrepantes. Preocupação semelhante observa-se nos modelos que estimam a vida de fadiga de misturas cimentadas.

Com o propósito de elaborar os modelos de previsão de fadiga das misturas asfálticas do programa computacional SisPav, Franco (2007) levantou dados de ensaios à compressão diametral de carga repetida à tensão controlada executados no laboratório de pavimentação da COPPE/UFRJ e de ensaios diversos publicados em trabalhos técnicos e científicos. Foram obtidos modelos para misturas asfálticas com ligantes tradicionais, ligantes com polímeros e asfalto borracha. Porém, no programa computacional SisPav, somente o modelo para ligante tradicional (Equação 2.6) foi considerado.

$$N_{lab} = 1,904 \cdot 10^{-6} \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon_t}\right)^{2,821} \cdot \left(\frac{1}{MR}\right)^{0,74} \quad (2.6)$$

onde:

- $N_{lab}$  é a vida de fadiga em laboratório;
- $\varepsilon_t$  é a deformação específica de tração; e
- $MR$  é o módulo de resiliência da mistura asfáltica, em MPa.

Com relação às misturas de solo cimento, o modelo de previsão de fadiga implementado por Franco (2007) no programa computacional SisPav apresenta a mesma configuração matemática daquele apresentado por Ceratti (1991 *apud* Franco, 2007)), que concebeu curvas de fadiga para seis misturas diferentes de solo cimento a partir de ensaios com modo de carregamento à flexão. As equações implementadas são as seguintes (Equações 2.7 e 2.8):

$$\%RF = a + b \cdot (\log(N_f)) \quad (2.7)$$

$$\varepsilon_t = a + b \cdot (\log(N_f)) \quad (2.8)$$

onde:

- $\%RF$  é a relação entre a tensão aplicada no ensaio e a resistência à tração na flexão do material;
- $\varepsilon_t$  é a deformação inicial de tração imposta no material;
- $a$  e  $b$  são parâmetros experimentais; e
- $N_f$  é o número de repetições de carga que levam à ruptura por fadiga.

Finalmente, para misturas de concreto compactado a rolo (CCR) e brita graduada tratada com cimento (BGTC), Franco (2007) emprega os modelos de fadiga obtidos por Trichês (1994),

os quais foram desenvolvidos para misturas com consumo de cimento na faixa de 60 a 120 kg/m<sup>3</sup>. Os modelos contemplam duas condições de deterioração distintas (Equações 2.9 a 2.12):

- Aparecimento de fissuras de 2,5mm de profundidade na face tracionada.

$$N_f = 10^{(15,082-15,753 \cdot SR)} \text{ propabilidade de 50\% para ruptura} \quad (2.9)$$

$$N_f = 10^{(14,306-15,753 \cdot SR)} \text{ propabilidade de 95\% para ruptura} \quad (2.10)$$

- Ruptura total da camada.

$$N_f = 10^{(14,911-15,074 \cdot SR)} \text{ propabilidade de 50\% para ruptura} \quad (2.11)$$

$$N_f = 10^{(14,222-15,074 \cdot SR)} \text{ propabilidade de 95\% para ruptura} \quad (2.12)$$

onde:

- $SR$  é a relação entre a tensão aplicada no ensaio e a resistência à tração na flexão do material aos 28 dias; e
- $N_f$  é o número de repetições de carga que levam à ruptura por fadiga.

## 2.8 Programa computacional MeDiNa

O programa computacional SisPav passou por uma atualização no ano de 2013, tornando-se o programa computacional SisPavBR. As principais modificações implementadas, segundo Ferreira (2013), foram:

- Modificação dos modelos de previsão de deformação permanente para os solos e britas, adotando-se o modelo de Guimarães (2009);
- Introdução de critérios de Flow Number para expressar as exigências de deformação permanente de misturas asfálticas em função do número N;
- Possibilidade de dimensionamento por dois níveis de detalhamento, sendo que o único disponível no lançamento era o “nível A”, o qual considera o revestimento asfáltico elástico e o caracteriza pelos ensaios mecânicos de módulo de resiliência e fadiga por compressão diametral de carga repetida. O nível B, posteriormente habilitado, considera o revestimento asfáltico viscoelástico e o caracteriza pelos ensaios mecânicos de módulo dinâmico e fadiga por tração direta com tensão controlada.

Por efeito do Termo de Execução Descentralizada celebrado do ano de 2015 ao ano de 2018 entre o Instituto de Pesquisas Rodoviárias - IPR e o Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, da Universidade Federal do Rio de Janeiro - COPPE,

bem como da colaboração do Centro de Pesquisas da Petrobrás - CENPES e de diversas universidades do Brasil, o programa computacional SisPavBR recebeu a implementação de uma função de transferência no nível A de detalhamento, passando então a ser denominado MeDiNa (SOUZA JÚNIOR, 2018).

O MeDiNa, então, continua sendo um programa computacional de dimensionamento e verificação de pavimentos flexíveis que realiza a análise elástica da estrutura por meio do componente AEMC, porém utiliza diferentes modelos para a previsão de danos. Os critérios de deformação limite no topo do subleito e de deflexão admissível na superfície do pavimento não se fazem mais presentes, já os critérios de deformação permanente e fadiga ganharam uma nova configuração, conforme explanação a seguir:

### 2.8.1 Materiais asfálticos

A curva de fadiga das misturas asfálticas deve ser obtida por meio de ensaios de tração indireta por compressão diametral, com carregamento repetido à tensão constante. O programa considera somente a relação do número de ciclos com a deformação específica resiliente de tração, conforme a Equação 2.13 (FRANCO *et al.*, 2018b).

$$N_{fad} = k_1 \cdot \varepsilon_t^{k_2} \quad (2.13)$$

onde:

- $N_{fad}$  é o número de ciclos;
- $\varepsilon_t$  é a deformação específica resiliente de tração; e
- $k_1$  e  $k_2$  são coeficientes da curva de fadiga do material em questão.

Franco *et al.* (2018b) dizem que, para o cálculo da fadiga, o programa computacional MeDiNa analisa o estado de tensões em 10 pontos na superfície do pavimento – espaçados de 3,65 cm – e em outros 10 pontos na profundidade correspondente à fibra inferior da última camada asfáltica. O dano de fadiga é computado em cada um dos 20 pontos sendo então feita uma média. Com essa média, é calculada a porcentagem de área trincada baseando-se na função de transferência determinada por Fritzen (2016).

A deformação permanente da camada asfáltica não é levada em conta para o cálculo do afundamento de trilha de roda. Porém, para que isso seja efetivamente válido, a mistura asfáltica deve se enquadrar em uma classe de desempenho relativa ao seu Flow Number (Tabela 2.2).

Tabela 2.2 – Classes de desempenho de Flow Number (Fonte: Franco *et al.*, 2018b)

Classe	Flow Number (FN)	N recomendado Condições Normais	N recomendado Condições Severas
1	FN ≥ 100 ciclos	N < 1e6	Não recomendado
2	100 ciclos ≤ FN < 300 ciclos	1e6 ≤ N < 1e7	N < 1e6
3	300 ciclos ≤ FN < 750 ciclos	1e7 ≤ N < 1e8	1e6 ≤ N < 1e7
4	750 ciclos ≤ FN < 2000 ciclos	N ≥ 1e8	1e7 ≤ N < 1e8
5	FN ≥ 2000 ciclos	-	Nser ≥ 1e8

As Condições Normais são representativas de situações onde se tem tráfego com velocidades acima de 60 km/h, via sem intersecções, sem terceira faixa e/ou temperatura máxima do revestimento asfáltico moderada. Já as Condições Severas compreendem casos onde o tráfego é lento (velocidades abaixo de 60 km/h), via com intersecções, terceira faixa, praças de pedágio, tráfego canalizado, paradas de ônibus e/ou temperatura máxima do revestimento elevada (FRANCO *et al.*, 2018b).

Após executar o dimensionamento ou verificação de determinada estrutura, o programa computacional MeDiNa apresenta o valor do Flow Number como uma propriedade da camada asfáltica a ser requerida no controle de qualidade durante a execução do projeto.

## 2.8.2 Camadas estabilizadas

O modelo de fadiga para os materiais estabilizados (BGTC, CCR e solo cimento) considerado no programa computacional MeDiNa é definido através de ensaio de flexão em vigotas, onde obtém-se a relação (%RF) entre a tensão de tração na fibra inferior da camada e a resistência à tração na flexão do material aos 28 dias. A equação que representa o modelo é a seguinte (Equação 2.14) (FRANCO *et al.*, 2018b):

$$N_{fad} = 10^{(k_1 + k_2 \cdot \%RF)} \quad (2.14)$$

onde:

- $N_{fad}$  é o número de ciclos de carga até a ruptura por fadiga; e
- $k_1$  e  $k_2$  são os coeficientes da curva de fadiga do material.

Franco *et al.* (2018b) dizem que o programa, valendo-se do referido modelo, faz duas checagens a fim de aprovar o uso das camadas cimentadas. A primeira avalia se o dano por fadiga é muito elevado entre dois períodos de análise consecutivos. Se o módulo de resiliência reduzir mais que 25%, o programa, quando verifica um pavimento, emite um alerta informando

que o módulo reduziu rapidamente; já quando dimensiona, ele aumenta a espessura da camada assinalada até que o critério seja atendido. Caso não seja, o mesmo alerta da verificação é emitido.

A segunda checagem é feita na deflexão da camada que se subpõe à camada cimentada. Se ela apresentar uma deflexão computada por equipamento FWD teórico superior a 70 (0,01 mm), o programa emite um alerta informando que a estrutura precisa ser revista.

Com relação à deformação permanente das camadas estabilizadas, para efeito de cálculo, ela não é considerada. O critério adotado é o de que essas camadas, quando construídas e preservadas adequadamente, não influenciam de forma significativa no afundamento de trilha de roda da estrutura do pavimento (FRANCO *et al.*, 2018b).

### 2.8.3 Materiais granulares e solos

No programa computacional MeDiNa, os materiais granulares, solos finos, siltosos ou argilosos são representados por seus parâmetros de módulo de resiliência, coeficiente de Poisson e deformação permanente, não sendo avaliados quanto ao dano por fadiga. O projetista pode optar por caracterizar o comportamento do material como elástico linear, fornecendo um valor de módulo constante, ou não linear, inserindo no programa o modelo constitutivo que represente de forma mais adequada o comportamento do material (FRANCO *et al.*, 2018b).

Franco *et al.* (2018b) informam que, para o cálculo da deformação permanente desses materiais, o programa computacional MeDiNa utiliza o estado de tensões calculado em pontos sob a roda e entre as rodas, no centro das camadas (no caso do subleito, a 25 cm de profundidade tendo como referência o topo do mesmo) (Figura 2.17).

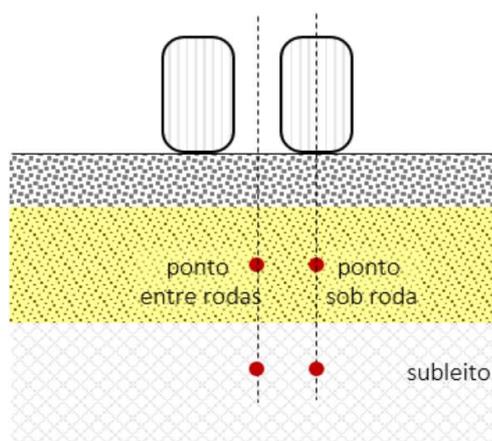


Figura 2.17 – Pontos onde o estado de tensões é calculado (Fonte: Franco *et al.*, 2018b)

Os materiais são avaliados de acordo com a modelagem proposta por Guimarães (2009), a qual apresenta quatro constantes obtidas em ensaios de laboratório (Equação 2.15).

$$\varepsilon_p^{esp} = \psi_1 \cdot (\sigma_3)^{\psi_2} \cdot (\sigma_d)^{\psi_3} \cdot (N)^{\psi_4} \quad (2.15)$$

onde:

- $\varepsilon_p^{esp}$  é a deformação permanente específica;
- $\psi_1, \psi_2, \psi_3$  e  $\psi_4$  são parâmetros do modelo obtidos em laboratório;
- $\sigma_3$  é a tensão confinante do ensaio (em kgf/cm<sup>2</sup>);
- $\sigma_d$  é a tensão desvio do ensaio (em kgf/cm<sup>2</sup>); e
- $N$  é o número de aplicações de carga em laboratório.

As parcelas de deformação permanente calculadas para cada material constituinte das diferentes camadas granulares e de solos são somadas para então obter a deformação permanente total utilizada no dimensionamento (FRANCO *et al.*, 2018b).

Quando a deformação permanente de cada camada individual ultrapassar 5% de sua espessura (ou 5,0 mm, no caso do subleito), o programa emite um alerta indicando ao projetista a revisão da estrutura.

#### 2.8.4 Carregamento e tráfego

Segundo Franco *et al.* (2018b), nas análises e dimensionamentos feitos pelo programa computacional MeDiNa, o eixo utilizado como referência para o carregamento da estrutura é o Eixo Padrão Rodoviário (Figura 2.18). Justifica-se sua utilização em função da calibração dos modelos de fadiga, os quais basearam-se na comparação da evolução de área trincada com um número estimado de passagens do Eixo Padrão.



Figura 2.18 – Dados do Eixo Padrão Rodoviário (Fonte: Franco *et al.*, 2018b)

O programa é capaz de calcular automaticamente o número equivalente de passagens do Eixo Padrão Rodoviário (número  $N$  anual) a partir do VMD e do fator de veículo (FV) da frota considerada. Porém, caso o projetista disponha do valor do número  $N$  anual de antemão,



O desenvolvimento da FT baseou-se no dano médio acumulado calculado por análise elástica de múltiplas camadas em 110 pontos ao longo do revestimento, sob a carga, em uma grade de 10 pontos distribuídos na direção horizontal a partir do centro do carregamento (considerando o Eixo Padrão Rodoviário) até 32,85 cm, e 11 pontos distribuídos na direção vertical, a partir de 0,01 mm da superfície igualmente distribuídos em função da espessura da camada asfáltica (Figura 2.20) (FRITZEN, 2016).

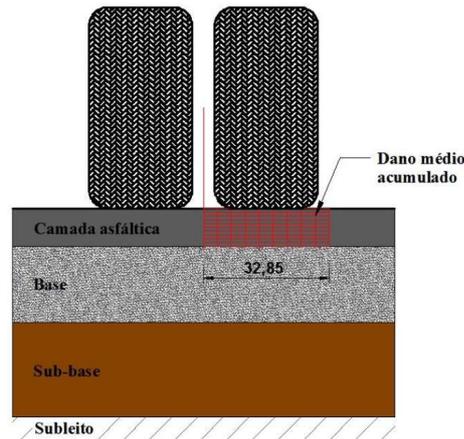


Figura 2.20 – Perspectiva da distribuição dos 110 pontos gerados no componente AEMC  
(Fonte: Nascimento, 2015)

A finalidade da FT desenvolvida por Fritzen (2016) é a de transformar o dano médio acumulado em área trincada prevista, cuja evolução é representada na FT por uma curva sigmoideal padronizada (Equação 2.16).

$$AT(\%) = \frac{e^{-A} \cdot e^{-B}}{1 - e^{-B}} \quad A = \left(\frac{N'-1}{Z-1}\right)^n \quad B = \left(\frac{-1}{Z-1}\right)^n \quad (2.16)$$

onde:

- $Z$  e  $n$  são parâmetros da curva sigmoideal;
- $AT(\%)$  é a área trincada estimada em percentual; e
- $N'$  é o número  $N$  equivalente deslocado.

Em todas as seções avaliadas por Fritzen (2016) que dispunham de leitura de área trincada, foram multiplicados fatores de deslocamento para o respectivo número  $N$ , de forma aleatória, até minimizar o erro da curva sigmoideal padrão. A equação do número  $N$  ajustado pelo fator de deslocamento é representada pela Equação 2.17 (FRANCO *et al.*, 2018b).

$$N' = (N \cdot fS) \cdot 10^{-10} \quad (2.17)$$

onde:

- $N$  é o número de repetições do Eixo Padrão quando foi realizada a medição da área trincada;
- $fS$  é o fator de deslocamento atribuído de forma aleatória até minimizar o erro entre a evolução da área trincada com a curva sigmoide padrão; e
- $N'$  é o número  $N$  ajustado.

Após a aplicação de todos os fatores nas seções, o melhor ajuste à curva sigmoideal apresentou os valores de 0,25 para o parâmetro “Z” e 5,0 para o parâmetro “n”, com um coeficiente de determinação  $r^2 = 0,82$  (Figura 2.21).

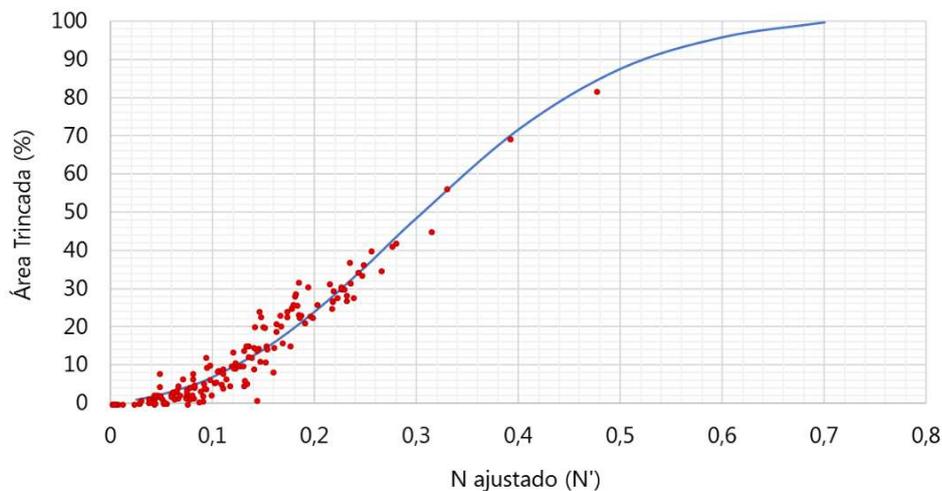


Figura 2.21 – Ajuste da curva sigmoideal (Fonte: Franco *et al.*, 2018b)

Os fatores de deslocamento de cada seção foram então correlacionados com uma informação estrutural do pavimento, no caso o dano médio de fadiga calculado pelo AEMC nos 110 pontos citados. De fato, a fim de simplificar o processo de implementação da FT no programa computacional MeDiNa, verifica-se que considerando apenas 20 pontos (10 pontos da superfície e 10 pontos da face inferior da camada asfáltica) é possível obter uma correlação satisfatória (FRANCO *et al.*, 2018b).

O dano médio ( $d_{\text{médio}}$ ) é calculado pelo programa, para cada período, individualmente, nos 20 pontos da malha definida através da divisão de uma aplicação do Eixo Padrão Rodoviário pelo número permissível de aplicações de eixos de carga ( $N$ ), conforme a Equação 2.18 (FRANCO *et al.*, 2018b).

$$d_{\text{médio}} = \frac{1}{20} \sum \left( \frac{1}{N} \right)_{t,c} \quad (2.18)$$

Por fim, obtém-se a atualização da FT que transforma o dano médio dos 20 pontos em área trincada prevista por meio de duas constantes  $C1$  e  $C2$  definidas no processo de calibração,

cujos valores de melhor ajuste foram 1993,7 e 0,3737 respectivamente (Equação 2.19 e Figura 2.22).

$$fS = C1 \times (d_{m\u00e9dio})^{C2} \quad (2.19)$$

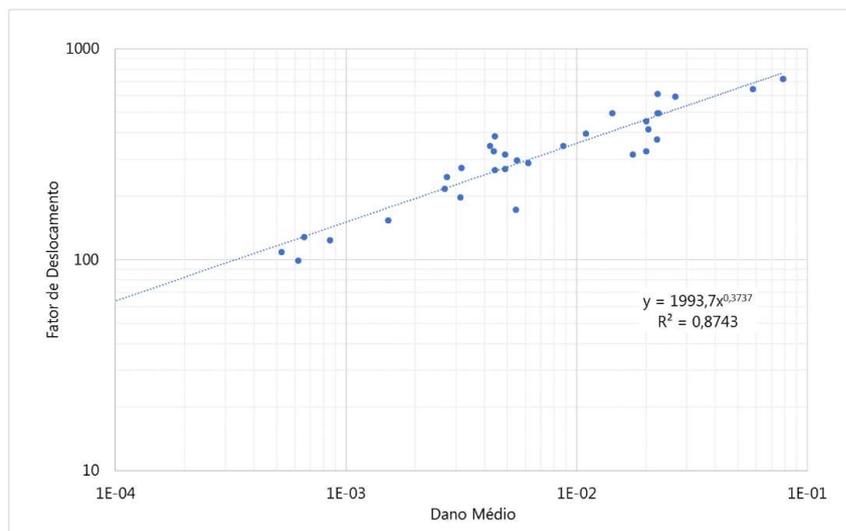


Figura 2.22 – Representação gráfica da função de transferência obtida (Fonte: Franco *et al.*, 2018b)

Franco *et al.* (2018b) dizem que a diferença entre a área prevista e a observada em campo para cada segmento empregado na calibração originou o erro dessa FT, tal como observado por Fritzen (2016). Esse erro é obtido por regressão após o devido tratamento dos dados.

Franco *et al.* (2018b) afirmam ainda que, para a validação da FT aplicada no programa computacional MeDiNa, segmentos nacionais construídos em diferentes regiões sob diferentes características de tráfego foram estudados e analisados, sendo que os erros obtidos entre a AT prevista pela calibração e a observada em campo enquadraram-se dentro do intervalo de confiabilidade estabelecido. Os coeficientes da curva de calibração da área trincada e da curva de ajuste de erro encontram-se na aba “Modelagem” do referido programa.

## 2.10 Modo reforço

O programa computacional MeDiNa apresenta um modo, denominado “Modo Reforço”, criado especificamente para cálculo de camadas de reforço. Nesse modo, o projetista consegue importar dados provenientes de uma retroanálise diretamente de arquivos do BackMeDiNa ou inseri-los manualmente.

Com a finalidade de apresentar resultados mais confiáveis e precisos, a importação ou inserção de dados deve se referir a um segmento homogêneo, ou seja, um segmento com a

mesma quantidade de camadas, mesmo tipo de condição de aderência entre elas, e a menor variação possível de módulos, deflexões e espessuras (FRANCO *et al.*, 2018b). Quando as deflexões, os módulos retroanalizados, as espessuras e os coeficientes de Poisson apresentam um coeficiente de variação superior a 30%, o programa emite um alerta ao projetista, cabendo a esse a decisão de seguir em frente ou não com o projeto de reforço daquele segmento.

Durante o processo de importação, o programa computacional MeDiNa calcula a média, o desvio padrão e os valores mínimos e máximos dos módulos retroanalizados, assim como o valor da deflexão característica do trecho. Caso opte por inserir os dados manualmente, o projetista deve entrar com esses valores na janela “Propriedades dos Materiais”. Ainda nessa janela, devem ser fornecidos os dados complementares da camada asfáltica existente, que são: percentual de área trincada (AT%), IRI e idade do pavimento (Figura 2.23).

CAMADA ASFÁLTICA EXISTENTE	
Material	Camada Asfáltica Superficial
<b>Parâmetros</b>	
Espessura (cm)	8,0
Coefficiente de Poisson	0,30
Contato	Não Aderido
<b>Módulo (MPa)</b>	
Modelo Constituinte	Resiliente Linear
Módulo (MPa)	4523
<b>Características</b>	
Espessura de fresagem (cm)	0,0
Espessura de campo (cm)	8,0
Área Trincada (%)	40
IRI (m/km)	1,83
Deflexão característica (0,01mm)	60,90
Idade do pavimento (anos)	27
Módulo mínimo (MPa)	3189
Módulo máximo (MPa)	6000
MR - Desvio Padrão (MPa)	706,65
Coef de Variação do Módulo (%)	15,62
Comentários	...

Figura 2.23 – Exemplo da janela “Propriedades dos Materiais” de uma camada asfáltica existente (Fonte: Autor, 2018)

Franco *et al.* (2018b) relatam que, no Modo Reforço, o programa considera que as camadas existentes já se estabilizaram com relação à deformação permanente e já atingiram o limite de fadiga. Portanto, a única camada dimensionada nesse modo é a nova camada asfáltica, sobreposta à camada asfáltica existente (fresada ou não), sendo avaliada apenas com relação ao consumo de fadiga. Além disso, os módulos elásticos de todos os materiais são representados somente pelo modelo resiliente linear, não sendo possível fazer uso do resiliente não-linear.

Ressalta-se que “o programa computacional MeDiNa não dispõe de elementos nem modelos de análise da reflexão de trincas do pavimento antigo ao novo, cabendo ao projetista elaborar estratégias e soluções para evitar ou adiar esse processo independentemente do resultado fornecido” (FRANCO *et al.*, 2018b). Nesse sentido, o programa permite a inclusão de uma camada antirreflexão de trincas entre a nova camada de reforço e a camada asfáltica superficial existente, a qual tem a função de absorver as tensões geradas pelas movimentações diferenciais nas trincas impedindo que elas afetem o desempenho do reforço (BERNUCCI *et al.*, 2014). O programa dispõe de três opções para a camada antirreflexão de trincas: tratamento superficial duplo, SAMI (*Stress Absorbing Membrane Interlayer*), ou outro material de projeto que tenha seu coeficiente de Poisson, módulo resiliente e massa específica pré-definidos. A espessura mínima aceita pelo programa computacional MeDiNa para esse tipo de camada é de 1,5 cm e, a máxima, de 3,0 cm.

Após o dimensionamento da nova camada asfáltica pelo Modo Reforço, alguns relatórios ficam disponíveis na aba “Resultados”. O primeiro deles é o relatório de “Evolução Mensal de Danos”, que apresenta o desenvolvimento do dano de fadiga em termos de porcentagem de área trincada. O segundo relatório é denominado “Bacias de Deflexão”, o qual exibe as bacias deflectométricas, medidas em  $10^{-2}$  mm no topo de cada uma das camadas (inclusive do subleito). Essas bacias são calculadas a partir dos parâmetros fornecidos pelo projetista, simulando os equipamentos FWD e viga Benkelman. O último relatório disponibilizado é o “Relatório Completo da Análise”, que possui todas as informações utilizadas no dimensionamento do reforço (FRANCO *et al.*, 2018b).

### 3 Materiais e Métodos

Esse capítulo descreve os materiais e métodos utilizados no desenvolvimento do presente trabalho de pesquisa. Primeiramente, retrata-se o trecho em estudo, apresentando informações sobre sua construção, reforma, localização e tráfego, além dos métodos de avaliação usados para quantificar suas condições funcional e estrutural: levantamento visual contínuo informatizado, ensaio de índice de irregularidade longitudinal do pavimento, medidas de deflexão com equipamento do tipo FWD e prospecção (abertura de poços de sondagem). Aborda-se, também, os ensaios realizados em laboratório, a metodologia de determinação dos segmentos homogêneos, assim como os procedimentos de retroanálise e de dimensionamento do reforço pelo programa computacional MeDiNa.

#### 3.1 Trecho em estudo

O objeto de estudo desse trabalho de pesquisa é o pavimento flexível do anel viário da Universidade Federal de Juiz de Fora. Segundo Machado (2016), sua construção data da década de 1960 e, desde então, apenas uma restauração foi realizada – no ano de 1991, executando-se um recapeamento com aproximadamente 4,0 cm de espessura. Esse anel viário representa a principal via de acesso do campus, ligando as diferentes faculdades à região central – reitoria, biblioteca central, praça cívica, etc. – e também a Zona Sul de Juiz de Fora à Cidade Alta.

Um estudo realizado no segundo semestre do ano de 2015 pelo professor José Alberto Barroso Castanon, do Departamento de Transportes e Geotecnia da Faculdade de Engenharia da UFJF, aponta que o volume médio diário (VMD) do campus, em dias úteis, corresponde a, aproximadamente, 9.000 veículos (MACHADO, 2016). De posse desse número e considerando uma taxa de crescimento do tráfego de 1% ao ano, chegou-se ao valor estimado de 9.300 veículos para o VMD utilizado nesse trabalho de pesquisa.

O anel viário foi avaliado funcionalmente através de LVCI e ensaio de irregularidade longitudinal com perfilômetro a laser. O primeiro, como abordado no item 2.2.2, investiga e quantifica os defeitos do pavimento mediante uma análise minuciosa de sua superfície, a qual acontece em laboratório a partir de imagens digitais coletadas em campo. Já o segundo define o índice de irregularidade longitudinal (IRI) dos segmentos homogêneos, parâmetro esse que fornece informações indiretas sobre o conforto ao rolamento, segurança e drenagem superficial da via (Bernucci *et al.*, 2008).

A avaliação estrutural do pavimento flexível do anel viário se deu por meio de ensaios deflectométricos realizados com equipamento do tipo FWD, os quais medem deflexões que, por sua vez, foram usadas no procedimento de retroanálise para determinação dos módulos de elasticidade efetivos das camadas do pavimento. Essa avaliação sucedeu-se, também, através de prospecção, onde as espessuras das camadas do pavimento foram determinadas e amostras representativas dos materiais coletadas para posterior caracterização, em laboratório, de suas propriedades físicas e mecânicas.

O estaqueamento do trecho viário foi realizado tomando-se como referência a faixa interna do anel viário. Assim, ao longo de 2.140 m de extensão, 107 estações foram inventariadas com espaçamento de 20 m entre elas (Figura 3.1a e 3.1b). Porém, durante a execução do levantamento com FWD, a medição das deflexões teve de ser deslocada, em alguns pontos, devido à existência de elementos componentes do sistema de *traffic calming* do anel viário, o que resultou na catalogação de 98 estacas. Já com relação à abertura de poços de sondagem, por conta de dificuldades logísticas e executivas, somente foi possível a execução de um poço (na faixa de estacionamento) em toda a extensão da via.

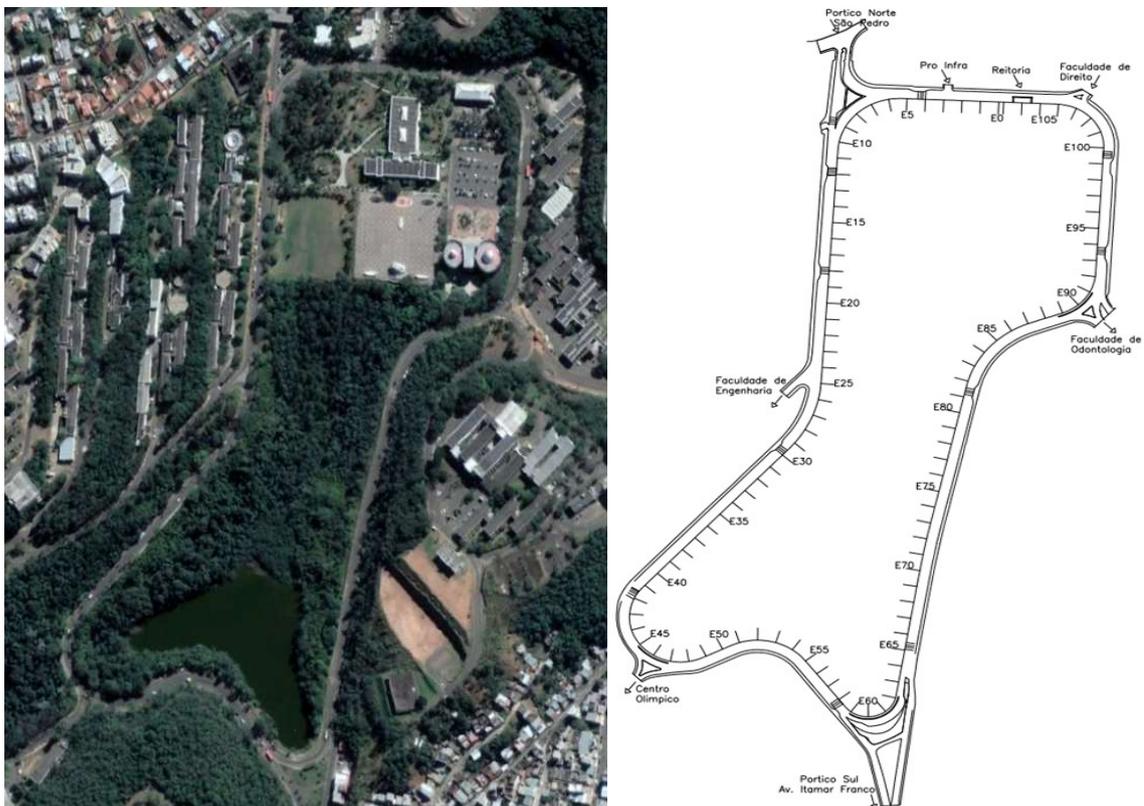


Figura 3.1 – (a) Imagem de satélite do anel viário da UFJF (Fonte: <https://www.google.com.br/maps/@-21.7765183,-43.3682924,747m/data=!3m1!1e3>) (b) Representação esquemática do estaqueamento (Fonte: Junqueira, 2014)

## 3.2 Avaliação funcional

### 3.2.1 Levantamento Visual Contínuo Informatizado

No presente trabalho de pesquisa, o LVCI foi realizado pela empresa ENGGEO TECH Consultores de Engenharia Ltda. utilizando-se o programa computacional HoleHunter 4.0, elaborado e desenvolvido pelo engenheiro D.Sc. Rafael Cerqueira Silva no ano de 2018. Esse programa permite a visualização do vídeo registro em conjunto com a descrição das ocorrências (defeitos) observadas, ao mesmo tempo em que exibe um gráfico representativo da altimetria do relevo do trecho viário e, em uma fotografia de satélite do mesmo, o trajeto percorrido (Figura 3.2).

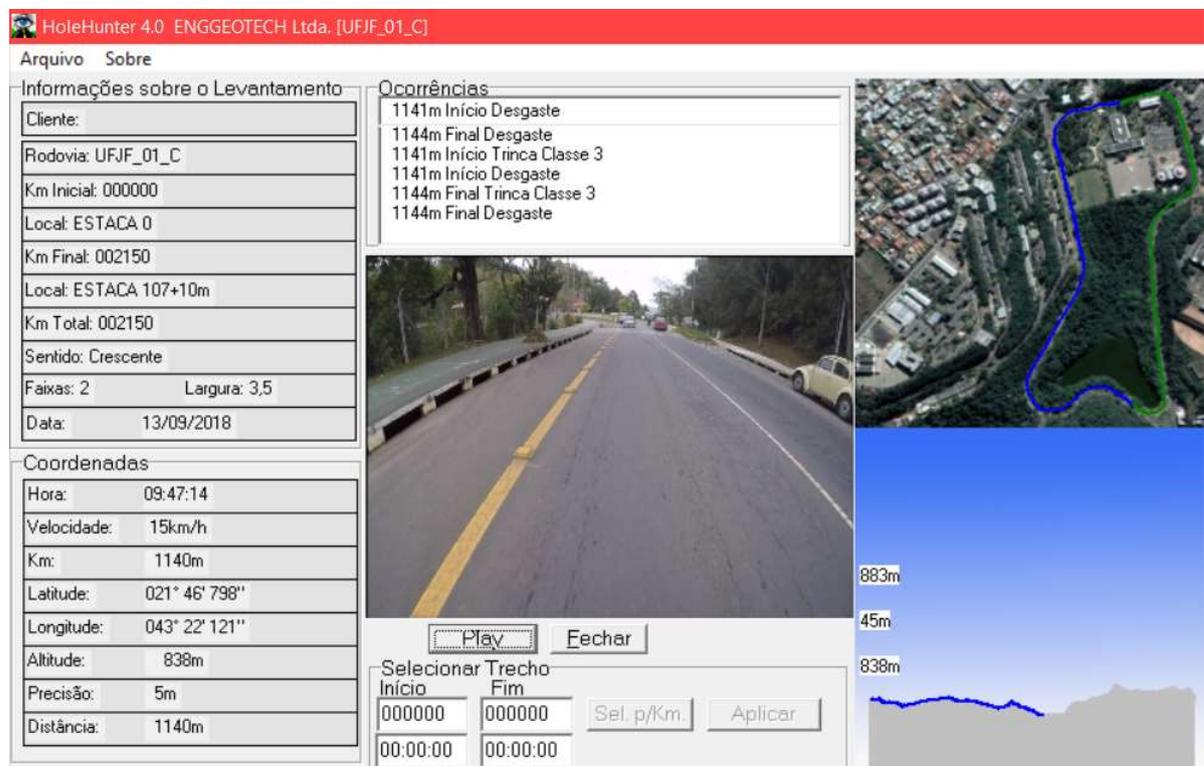


Figura 3.2 – Tela do programa HoleHunter 4.0 exibindo o vídeo registro em conjunto com os defeitos catalogados, caminhamento e planialtimetria (Fonte: Autor, 2018)

Apesar do levantamento de todos os defeitos previstos na DNER 005/2003-TER (DNER, 2003a), para fins de dimensionamento de reforço pelo programa computacional MeDiNa, necessita-se somente dos valores de percentual de área trincada (AT%) do pavimento existente, os quais são obtidos pela soma das porcentagens referentes às trincas de classe 2 (abertura superior a 1,0 mm sem erosão nas bordas) e 3 (abertura superior a 1,0 mm com erosão nas bordas) verificadas em campo através do LVCI.

As dimensões das respectivas áreas trincadas foram definidas a partir das imagens digitais e, dividindo-as pela área da seção (comprimento do caminhamento multiplicado pela largura da faixa – 3,5 m), encontrou-se os referidos percentuais. Já na definição do percentual de área trincada característico de cada segmento homogêneo, tomou-se o valor da média dos valores levantados ao longo de seu comprimento acrescido do valor do desvio padrão da amostra.

### 3.2.2 Índice de Irregularidade Longitudinal

No levantamento realizado no anel viário da UFJF, por uma equipe da COPPE/UFRJ coordenada pelo engenheiro D.Sc. Marcos Antônio Fritzen, fez-se uso de um equipamento suspenso (sem contato com a superfície do pavimento) que utiliza o princípio da onda de luz do laser para as medidas de irregularidade – o perfilômetro inercial a laser.

Esse dispositivo foi desenvolvido no Brasil pela empresa Cibernétrica, e apresenta 5 módulos de laser instalados em uma barra acoplada na parte frontal do veículo. Os módulos são conectados a uma unidade central de processamento que armazena os dados em um computador dentro do veículo, calculando em tempo real os parâmetros de medição da irregularidade longitudinal em intervalos contínuos pré-estabelecidos e avaliando, também, os afundamentos de trilha de roda em ambas as trilhas (FRITZEN E MOTTA, 2018). No perfilômetro inercial existe, ainda, um módulo a laser que mede a macrotextura do pavimento, sendo esse instalado na posição da trilha de roda (Figura 3.3).



Figura 3.3 – Perfilômetro a laser instalado no veículo da COPPE/UFRJ (Fonte: Fritzen e Motta, 2018)

O levantamento foi realizado com espaçamento de 20 m, correspondendo às estacas demarcadas no anel viário. Contudo, como o veículo movimentou-se a uma velocidade variável e informações sobre a frequência de aquisição de dados não foram fornecidas, não foi possível se definir os intervalos de amostragem do ensaio.

Para o cálculo do IRI característico ( $IRI_c$ ) de cada segmento homogêneo, adotou-se o seguinte procedimento:

1. Calculou-se a média aritmética dos valores medidos pelos 5 módulos em cada estação inventariada;
2. Tabulou-se os valores individuais das médias obtidas ( $IRI_i$ );
3. Calculou-se a média aritmética,  $\Delta IRI$ , dos valores individuais (média da amostra);
4. Determinou-se o valor do desvio-padrão ( $\sigma$ ) da amostra;
5. Estabeleceu-se o intervalo de aceitação para os valores individuais, definindo-o através dos limites  $\Delta IRI \pm z \cdot \sigma$ , onde  $z$  é determinado em função do número de valores individuais computados, mediante o critério constante na Tabela 3.1:

Tabela 3.1 – Valores de “z” em função da quantidade de valores individuais (Fonte: Autor, 2018)

<b>n</b>	<b>z</b>
1 - 9	1
10 - 19	1,5
$\geq 20$	2

6. Seguiu-se a eliminação de todos os valores individuais da amostra situados fora do intervalo anteriormente definido, procedendo-se a novo cálculo de  $\Delta IRI$  e  $\sigma$  com os valores remanescentes, bem como a fixação dos novos limites do intervalo de aceitação,  $\Delta IRI \pm z \cdot \sigma$ , para a nova situação. Esse procedimento foi repetido, em cada caso, tantas vezes sucessivas quantas foram necessárias para o enquadramento de todos os valores individuais remanescentes no intervalo determinado. Os valores de  $\Delta IRI$  e  $\sigma$  encontrados são considerados, respectivamente, como a média aritmética e o desvio padrão representativos da amostra;
7. O IRI característico ( $IRI_c$ ) foi determinado, para cada uma das distribuições de valores dos segmentos homogêneos, como a soma de  $\Delta IRI$  e  $\sigma$  ( $IRI_c = \Delta IRI + \sigma$ ).

### 3.3 Avaliação estrutural

#### 3.3.1 Ensaio com equipamento FWD

Com o objetivo de obter as bacias deflectométricas do pavimento do anel viário da UFJF, foram realizados ensaios de deflexão com equipamento do tipo FWD (apresentado no item 2.3.2.1) em cada estaca demarcada, exceto naquelas que coincidem com elementos do sistema de *traffic calming*, onde foi necessário o deslocamento do equipamento para o próximo ponto disponível. A execução desses ensaios também ficou a cargo da equipe da COPPE/UFRJ mencionada anteriormente, coordenada pelo engenheiro D.Sc. Marcos Antônio Fritzen.

O modelo do equipamento FWD utilizado foi o 8833 da fabricante sueca *Konsult & Utveckling AB* (KUAB), que conta com uma carcaça metálica de proteção montada sobre um reboque (Figura 3.4), possuindo a finalidade de evitar ataques de agentes agressivos – óleo, água, poeira, etc. – aos componentes do sistema (FRITZEN E MOTTA, 2018).



Figura 3.4 – FWD KUAB modelo 8833 (Fonte: Autor, 2018)

Variando-se a configuração do conjunto de massas e sua altura de queda, é possível aplicar cargas de 14 a 150 kN, fato que permite o uso desse equipamento tanto em levantamentos rodoviários como aeroportuários (MORAES, 2015).

A transmissão do impacto no modelo KUAB 8833 é feita por repique, sendo a força impulsiva gerada pela queda de dois pesos, um intermediário e um principal – situado dentro do primeiro – com diferentes alturas de queda, sobre uma placa circular de 30 cm segmentada

em quatro partes unidas por êmbolos, a qual possibilita melhor uniformidade na distribuição do carregamento ao pavimento (Figura 3.5) (LUIS, 2009).

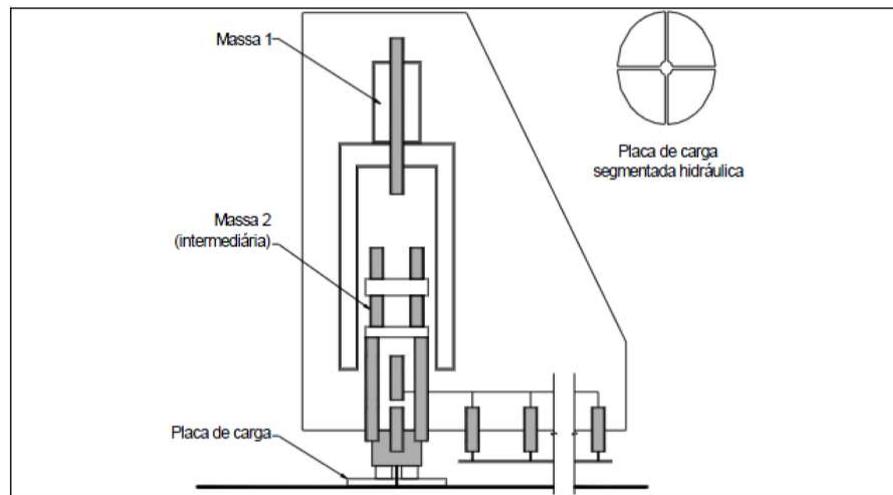


Figura 3.5 – Diagrama esquemático do equipamento FWD modelo KUAB 8833 (Fonte: Luis, 2009)

As deflexões do pavimento foram medidas com nove transdutores de deflexão absoluta, chamados sismômetros. Esses dispositivos de baixa frequência usam um sistema massa-mola como referência e um transformador diferencial (LVDT) como elemento de detecção, medindo deflexões de até 5 mm com precisão de 1  $\mu$ m (MORAES, 2015). Um sismômetro localiza-se no centro da placa de carga, enquanto os demais são montados numa barra de 1,80 m às distâncias de 20 cm, 30 cm, 45 cm, 60 cm, 90 cm, 120 cm, 150 cm e 180 cm. Na Figura 3.6 podem ser vistos detalhes dos sismômetros na parte inferior do equipamento utilizado.



Figura 3.6 – Visão do sistema de leitura de deflexões na posição de operação (Fonte: Autor, 2018)

### 3.3.2 Prospecção

Um poço de sondagem de 80x80 cm foi aberto no pavimento flexível do anel viário da UFJF, na altura da estaca número 40, para a coleta de materiais e determinação de espessuras de suas camadas. Esse teve de ser alocado na faixa de estacionamento para que não houvesse algum tipo de transtorno ao trânsito. Inicialmente, usou-se uma sonda rotativa (perfuratriz) para a extração de corpos-de-prova do revestimento asfáltico existente, num total de oito ao longo do perímetro do poço de sondagem e quatro no interior do mesmo (Figura 3.7).

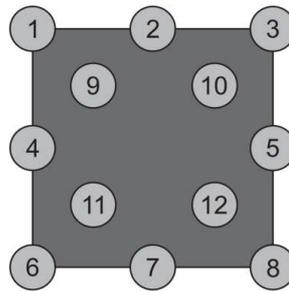


Figura 3.7 – Esquema dos furos de extração de corpos-de-prova do revestimento (Fonte: Autor, 2018)

O modelo da perfuratriz utilizada é o Tyrolit DRU160, o qual tem fabricação austríaca pela empresa Tyrolit. Ele possui um motor de 1600 watts de potência com três níveis de ajuste de velocidade, sendo equipado com um tubo de extração que conta, em sua extremidade, com uma coroa diamantada refrigerada por água. Esse sistema é acoplado em uma base (Figura 3.8) e pode realizar furos de até 30 cm de profundidade com 15 cm de diâmetro em revestimentos asfálticos (TYROLIT, 2009).



Figura 3.8 – Perfuratriz modelo Tyrolit DRU160 (Fonte: Tyrolit, 2009)

Após a extração dos corpos-de-prova do revestimento asfáltico, retirou-se o que restou do mesmo dentro do perímetro demarcado, prosseguindo à escavação do solo com pá e cavadeira de boca nas demais camadas até atingir o subleito (Figuras 3.9 e 3.10). O material retirado foi acondicionado em sacos de rafia e levado a um laboratório para caracterização e determinação de propriedades mecânicas.



Figura 3.9 – Corpos de prova retirados do revestimento na prospecção (Fonte: Autor, 2018)



Figura 3.10 – Poço de sondagem executado no pavimento do anel viário da UFJF (Fonte: Autor, 2018)

### 3.4 Ensaios de laboratório

As amostras de materiais (solos) coletadas das camadas foram ensaiadas no laboratório da Fundação Centro Tecnológico de Juiz de Fora (FCT-JF) seguindo-se os procedimentos descritos nas seguintes normas:

- DNER-ME 080/94: “Solos – Análise granulométrica por peneiramento - Método de Ensaio” (DNER, 1994b);
- DNIT 164/2013-ME: “Solos – Ensaio de compactação utilizando amostras não trabalhadas - Método de Ensaio” (DNIT, 2013);

No ensaio de compactação, utilizou-se energia correspondente ao Proctor Modificado para a amostra de solo coletada da base, Proctor Intermediário para as amostras da sub-base e do reforço do subleito, e Proctor Normal para a amostra do subleito. Com as respectivas umidades ótimas definidas, moldou-se 3 corpos de prova para cada camada (Figura 3.11), os quais foram submetidos ao ensaio de determinação de módulo de resiliência de acordo com a norma “DNIT 134/2010-ME: Pavimentação – Solos – Determinação do módulo de resiliência - Método de Ensaio” (DNIT, 2010a).



Figura 3.11 – Corpos de prova de amostras de solo utilizados nos ensaios de determinação do módulo de resiliência dos materiais das camadas do pavimento do anel viário da UFJF (Fonte: Autor, 2018)

Os resultados dos ensaios de análise granulométrica não são utilizados no processo de dimensionamento do reforço do pavimento flexível, sendo apresentados apenas a título de caracterização física dos materiais e devendo, portanto, ser tratados com certo cuidado. Esses podem, no entanto, servir a uma base de dados que alimente melhorias no programa computacional MeDiNa ou a estudos mais aprofundados da estrutura do pavimento do anel viário da UFJF.

Com relação aos 12 testemunhos retirados do revestimento asfáltico existente, esses tiveram seus módulos de resiliência determinados no Laboratório de Pavimentação da Faculdade de Engenharia da UFJF a partir do ensaio executado com base na norma “DNIT 135/2010-ME: Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação do módulo de resiliência - Método de Ensaio” (DNIT, 2010b).

Com a mistura asfáltica levada em conta no dimensionamento do reforço, moldou-se 6 corpos de prova para a determinação de seus módulos de resiliência pelo referido ensaio e, também, para a definição de sua curva de fadiga a partir da metodologia regida pela norma provisória “DNIT 183/2018-ME: Pavimentação asfáltica – Ensaio de fadiga por compressão diametral à tensão controlada - Método de Ensaio” (DNIT, 2018). Tais ensaios também se sucederam no Laboratório de Pavimentação da Faculdade de Engenharia da UFJF.

Os valores obtidos nos ensaios de determinação do módulo de resiliência (tanto para os corpos de prova de solo como para os do revestimento) serviram de referência para o procedimento de retroanálise, tomando-se, para isso, as respectivas médias aritméticas das “n” determinações de cada camada.

### 3.5 Segmentação do trecho

A determinação de segmentos homogêneos possibilita estender a validade de parâmetros estruturais e de tráfego medidos em determinado ponto para toda a extensão de um trecho viário, em função da uniformidade de suas características físicas, estado de degradação e composição do fluxo de tráfego.

Nesse trabalho de pesquisa, definiu-se os segmentos homogêneos a partir do levantamento deflectométrico realizado com equipamento FWD. O procedimento seguido foi o indicado pela AASHTO (1993), o qual faz uso das diferenças acumuladas e utiliza as deflexões máximas medidas como parâmetro, consistindo na seguinte sequência de cálculo:

1. Calcula-se o valor médio da deflexão para todo o trecho ( $\bar{D}$ );
2. Calcula-se a diferença entre cada valor individual e o valor médio;
3. Calculam-se os valores acumulados das diferenças;
4. Plota-se um gráfico que contenha, nas abscissas, as distâncias e, nas ordenadas, os valores acumulados das diferenças.

As Equações 3.1 a 3.5 regem esse procedimento:

$$\bar{D}_i = \frac{D_{i-1} + D_i}{2} \quad (3.1)$$

$$A_i = \bar{D}_i \times \Delta l_i \quad (3.2)$$

$$A_c = \sum_{i=1}^n A_i \quad (3.3)$$

$$L_c = \sum_{i=1}^n \Delta l_i \quad (3.4)$$

$$Z_i = \sum A_i - tga \sum \Delta l_i \quad (3.5)$$

onde:

- $\bar{D}_i$  é a deflexão média;
- $D_i$  é a deflexão máxima na estaca  $i$ ;
- $A_i$  é a área entre estações e curva;
- $L_c$  é a distância acumulada;
- $Z_i$  é a diferença acumulada; e
- $tg\alpha = \frac{A_c}{L_c}$

Cada variação de coeficiente angular da curva obtida indica uma mudança do comportamento médio de um determinado segmento para outro, delimitando as extremidades dos segmentos homogêneos. A Figura 3.12 exemplifica esse método (BERNUCCI *et al.*, 2008).

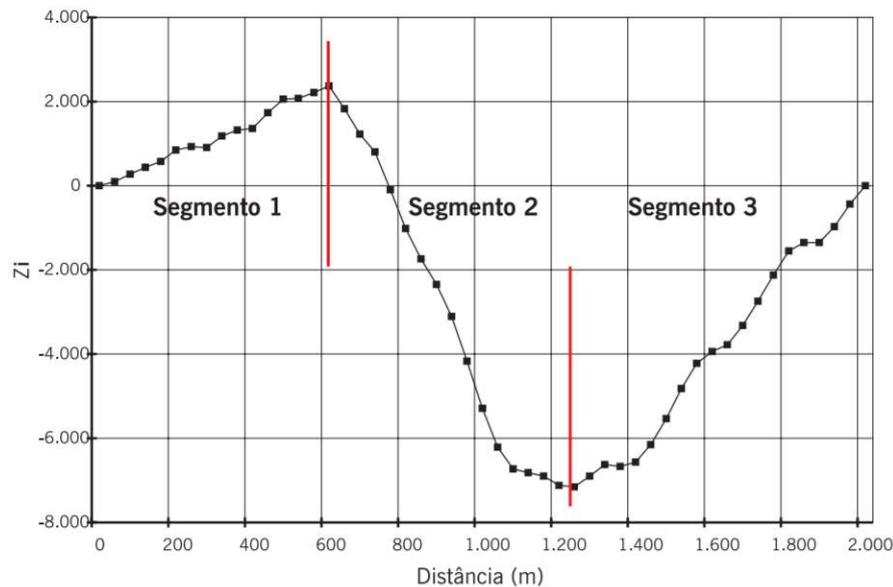


Figura 3.12 – Exemplo de delimitação de segmentos homogêneos pelo método das diferenças acumuladas (Fonte: Bernucci *et al.*, 2009)

### 3.6 Retroanálise

O programa computacional usado nesse trabalho de pesquisa para realização da retroanálise de bacias deflectométricas, BackMeDiNa, calcula as diferenças entre as deflexões medida e calculada de cada sensor, levando-as em conta no cômputo do erro final, o qual é obtido pela raiz do valor quadrático médio (RMS) dessas diferenças. Quando o erro se apresenta maior que 10  $\mu\text{m}$ , o programa marca a seção com a cor vermelha no quadro de listagem das seções, indicando que a retroanálise não conseguiu atingir uma correlação satisfatória. Já as

seções com erros que ficam dentro do intervalo de 5 a 10  $\mu\text{m}$  são marcadas com a cor amarela, enquanto aquelas com erros inferiores a 5  $\mu\text{m}$ , com a cor verde (Figura 3.13).

BACIA	ESTACA	FADXA	TRILHA	
1	Estaca: 0 + 0m	0	0	
2	Estaca: 1 + 20m	0	0	
3	Estaca: 2 + 40m	0	0	
4	Estaca: 3 + 60m	0	0	
5	Estaca: 5 + 100m	0	0	
6	Estaca: 6 + 120m	0	0	
7	Estaca: 7 + 140m	0	0	
8	Estaca: 8 + 160m	0	0	
9	Estaca: 9 + 180m	0	0	
10	Estaca: 10 + 20...	0	0	
11	Estaca: 11 + 22...	0	0	
12	Estaca: 13 + 26...	0	0	
13	Estaca: 14 + 28...	0	0	
14	Estaca: 15 + 30...	0	0	
15	Estaca: 16 + 32...	0	0	
16	Estaca: 17 + 34...	0	0	
17	Estaca: 19 + 38...	0	0	
18	Estaca: 20 + 40...	0	0	
19	Estaca: 21 + 42...	0	0	
20	Estaca: 22 + 44...	0	0	
21	Estaca: 23 + 46...	0	0	
22	Estaca: 24 + 48...	0	0	
23	Estaca: 25 + 50...	0	0	

Estaca: 0 + 0m	Faixa:	0	Trilha:	0	10/03/2018				
CARGA (kgf):	4097			T AR:	19 °C				
RAIO (cm):	15			T PAV:	25 °C				
SENSORES:	0	1	2	3	4	5	6	7	8
DISTÂNCIA (cm):	0	20	30	45	60	90	120	150	180
DEFLEXÕES ( $\mu\text{m}$ ):	410	294	212	126	92	61	45	34	26
CALCULADAS ( $\mu\text{m}$ ):	413	288	212	138	98	61	43	32	26
DIFERENÇAS ( $\mu\text{m}$ ):	-3	6	0	-12	-6	0	2	2	0
ERRO ( $\mu\text{m}$ ):	5,204								

CAMADA	MATERIAL	ESPESSURA (cm)	MÓDULO (MPa)	COEF POISSON	ADERÊNCIA
1	Camadas Asfálticas	8,0	6000	0,30	NÃO ADERIDO
2	Camadas em Solos Naturais	10,0	222	0,35	NÃO ADERIDO
3	Camadas em Solos Naturais	20,0	400	0,35	NÃO ADERIDO
4	Camadas em Solos Naturais	40,0	507	0,45	NÃO ADERIDO
5	Subleito	0	222	0,45	-

Figura 3.13 – Ilustração de marcação de seções no programa computacional BackMeDiNa (Fonte: Autor, 2018)

Visando desenvolver um projeto o mais confiável possível, admitiu-se, nesse trabalho, apenas resultados cujos erros se apresentaram inferiores a 10  $\mu\text{m}$ , ou seja, somente as seções demarcadas com a cor amarela ou verde foram consideradas.

A partir dos valores de referência obtidos nos ensaios de laboratório e dos outros dados de entrada, procedeu-se à retroanálise das bacias deflectométricas conforme indicado no item 2.6.3. O processo foi repetido até que o erro calculado pelo programa parasse de variar. Vale ressaltar que, para efeito de cálculo, todas as camadas foram consideradas como “não aderidas”, o que significa que o programa não levou em conta o cisalhamento na interface entre elas.

### 3.7 Dimensionamento pelo programa computacional MeDiNa

O dimensionamento do reforço do anel viário da UFJF foi realizado, para cada segmento homogêneo definido, por meio do “Modo Reforço” do programa computacional MeDiNa. Nesse modo, entra-se inicialmente com informações sobre a estrutura do pavimento, como número de camadas, espessuras, materiais constituintes e seus respectivos módulos de elasticidade efetivos e coeficientes de Poisson. Nesse trabalho de pesquisa, todos os segmentos foram considerados como tendo a mesma estrutura no que concerne aos seus parâmetros físicos, diferindo-se, portanto, em termos de propriedades mecânicas dos materiais.

Com relação aos dados obtidos na retroanálise, optou-se por inseri-los manualmente ao invés de importá-los diretamente através dos arquivos gerados pelo programa computacional



(municipais e da própria universidade), visto que caminhões comerciais são proibidos de trafegar no campus da UFJF.

Para o cômputo do FV da frota, a carga dos eixos foi estimada, já que não houve uma pesagem dos mesmos juntamente com a contagem volumétrica. Os respectivos fatores de carga são definidos automaticamente pelo programa que, ao mesmo tempo, atualiza os FV individuais e total. Tendo o FV definido, o programa computacional MeDiNa instantaneamente calcula o correspondente valor do número N inicial ( $N = VMD \times 365 \times FV$ ) e, a partir dos valores da taxa de crescimento anual do tráfego e do período de projeto, ele também calcula o número N total a ser suportado pelo pavimento durante sua vida útil de projeto.

Com todos os dados e parâmetros necessários ao dimensionamento devidamente inseridos, procedeu-se ao cálculo do reforço em concreto asfáltico dos 8 segmentos homogêneos definidos, o qual é efetuado apertando-se a tecla “F2” do teclado do computador no qual o programa encontra-se instalado.

## 4 Resultados e Discussões

O presente capítulo apresenta e discute os resultados obtidos nas diferentes etapas do projeto de dimensionamento do reforço do anel viário da UFJF. Inicialmente, é exposta a definição dos segmentos homogêneos e, em seguida, discorre-se sobre a retroanálise das bacias deflectométricas e o tratamento dos dados de saída do programa computacional BackMeDiNa.

Ainda nesse capítulo, os resultados dos levantamentos de campo e dos ensaios de laboratório são relatados e comentados, para então se suceder ao dimensionamento propriamente dito pelo novo método de dimensionamento mecanístico-empírico nacional. E, por fim, apresenta-se um planejamento detalhado de avaliações que engloba as fases de pré-execução, execução e pós-execução do trecho viário a ser restaurado, tendo como objetivo coletar informações potencialmente úteis a futuros estudos e melhorias no programa computacional MeDiNa.

### 4.1 Segmentos homogêneos

Seguindo o processo de cálculo descrito no item 3.5 para a segmentação do trecho viário em estudo, obteve-se a curva da Figura 4.1, onde as linhas verticais representam a delimitação das extremidades dos segmentos homogêneos definidos. A planilha que deu origem a esse gráfico encontra-se no Apêndice A.

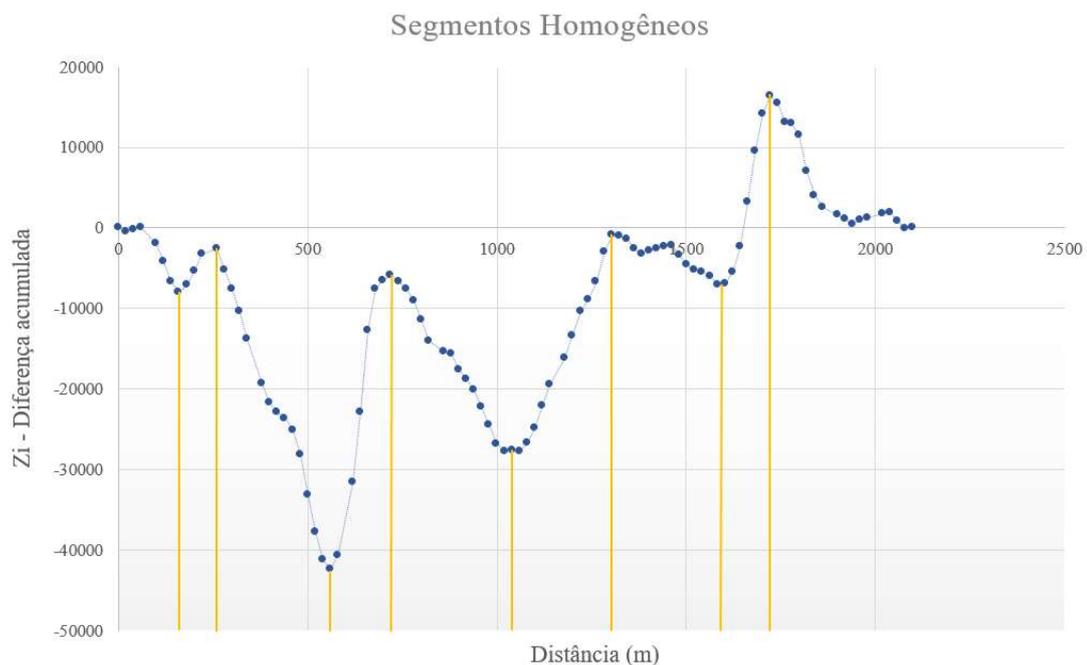


Figura 4.1 – Curva auxiliar do método das diferenças acumuladas para definição dos segmentos homogêneos (Fonte: Autor, 2018)

De acordo com DNER (1998), a extensão máxima de um segmento homogêneo deve ser de 7 km, enquanto a mínima, por razões de cunho construtivo, deve ser de 200 m. Contudo, devido ao fato de esse trabalho de pesquisa ter um caráter acadêmico, permitiu-se que alguns dos segmentos homogêneos definidos possuíssem dimensões menores que esse limite inferior, conforme apresentado na Tabela 4.1:

Tabela 4.1 – Segmentos homogêneos definidos (Fonte: Autor, 2018)

Segmento	Estacas	Extensão (m)
01	0 a 8 e 86 a 0	577
02	8 a 13	100
03	13 a 28	300
04	28 a 36	160
05	36 a 52	320
06	52 a 65	263
07	65 a 79	280
08	79 a 86	140

## 4.2 Levantamentos de campo

### 4.2.1 Percentual de área trincada

A partir da análise das imagens coletadas no LVCI, definiu-se o percentual das áreas afetadas por trincas de classe 2 e 3. A planilha completa referente a esse levantamento encontra-se no Anexo A e, a seguir, apresenta-se um resumo dos valores de AT% característicos ( $AT\% = \Delta + \sigma$ ) encontrados por meio do procedimento descrito em 3.2.1 (Tabela 4.2), onde “ $\Delta$ ” representa a média aritmética e “ $\sigma$ ” o desvio padrão da amostra.

Tabela 4.2 – Percentual de área trincada característico dos segmentos homogêneos (Fonte: Autor, 2018)

<i>Segmento 01</i>	$\Delta$	<b>AT%</b>	<i>Segmento 05</i>	$\Delta$	<b>AT%</b>
	24,20%			5,16%	
	$\sigma$			$\sigma$	
	15,75%	<b>39,95%</b>		8,34%	<b>13,50%</b>
<i>Segmento 02</i>	$\Delta$	<b>AT%</b>	<i>Segmento 06</i>	$\Delta$	<b>AT%</b>
	39,58%			13,65%	
	$\sigma$			$\sigma$	
	14,78%	<b>54,37%</b>		11,97%	<b>25,63%</b>
<i>Segmento 03</i>	$\Delta$	<b>AT%</b>	<i>Segmento 07</i>	$\Delta$	<b>AT%</b>
	25,67%			6,25%	
	$\sigma$			$\sigma$	
	10,11%	<b>35,78%</b>		6,99%	<b>13,24%</b>
<i>Segmento 04</i>	$\Delta$	<b>AT%</b>	<i>Segmento 08</i>	$\Delta$	<b>AT%</b>
	18,75%			23,13%	
	$\sigma$			$\sigma$	
	16,85%	<b>35,60%</b>		7,65%	<b>30,77%</b>

ANTT (2017b) apresenta tabelas para enquadramento de segmentos homogêneos conforme suas classes de trincamento, índice de irregularidade longitudinal e deflexão máxima, as quais foram elaboradas baseadas no programa HDM-4 (*Highway Development and Management* – sistema de gerência de pavimentos desenvolvido pela PIARC *World Road Association* no ano de 2000) e na Publicação IPR 745 (“Manual de Gerência de Pavimentos” elaborado pelo DNIT no ano de 2011). Essas tabelas foram consultadas nesse trabalho de pesquisa para avaliar os estados funcional e estrutural do pavimento do anel viário da UFJF.

Com relação ao percentual de área trincada, ANTT (2017b) fornece a seguinte classificação (Tabela 4.3):

Tabela 4.3 – Classes de trincamento (Fonte: ANTT, 2017b)

<b>Trincamento</b>	<b>Classe</b>
AT% = 0	Ótimo
0 < AT% < 5%	Bom
5% ≤ AT% ≤ 25%	Regular
25% ≤ AT% ≤ 35%	Ruim
AT% ≥ 35%	Péssimo

Assim, os segmentos homogêneos 01, 02, 03 e 04 enquadraram-se na classe “Péssimo”, os segmentos 06 e 08 na classe “Ruim”, enquanto os segmentos 05 e 07 classificaram-se como “Regular”.

Observou-se que, no geral, o revestimento asfáltico do anel viário da UFJF encontra-se com elevado grau de trincamento, fato que pode ser atribuído à longa e constante solicitação pelas cargas do tráfego e à ação dos agentes de intemperismo.

#### 4.2.2 Índice de irregularidade longitudinal

Seguindo o processo de cálculo do índice de irregularidade longitudinal característico (IRI<sub>c</sub>) para cada segmento homogêneo, descrito no item 3.2.2, obteve-se os valores constantes na Tabela 4.4. A planilha completa com os valores de IRI medidos por cada módulo do perfilômetro a laser encontra-se no Anexo B.

Tabela 4.4 – IRI<sub>c</sub> dos segmentos homogêneos (Fonte: Autor, 2018)

<b>IRI<sub>c</sub> (m/km)</b>			
<i>Segmento 01</i>	4,31	<i>Segmento 05</i>	2,56
<i>Segmento 02</i>	4,16	<i>Segmento 06</i>	1,87
<i>Segmento 03</i>	3,39	<i>Segmento 07</i>	2,70
<i>Segmento 04</i>	4,14	<i>Segmento 08</i>	2,72

As classes indicadas por ANTT (2017b) para enquadramento dos trechos viários segundo seus respectivos IRI's característicos são apresentadas na Tabela 4.5:

Tabela 4.5 – Classes de irregularidade longitudinal (Fonte: ANTT, 2017b)

IRI (m/km)	Classe
IRI < 3	Bom
3 ≤ IRI < 4	Regular
4 ≤ IRI < 5,5	Ruim
IRI ≥ 5,5	Péssimo

Portanto, os segmentos 01, 02 e 04 classificaram-se como “Ruim”, o segmento 03 como “Regular”, e os segmentos 05, 06, 07 e 08 foram enquadrados na classe “Bom”.

Levando-se em consideração a idade do pavimento, o volume de tráfego recebido e o fato de o mesmo ter passado por somente uma reforma há 27 anos, constatou-se que o estado do mesmo quanto à sua irregularidade longitudinal é aceitável na maior parte de sua extensão.

#### 4.2.3 Deflexão característica

No levantamento realizado com equipamento do tipo FWD, mensuraram-se as deflexões máximas em cada estaca inventariada, as quais correspondem às leituras do primeiro sensor, ou seja, aquele que fica localizado no centro da placa de carga.

Para a determinação da deflexão característica de cada segmento homogêneo, adotou-se o procedimento de cálculo incorporado ao programa computacional MeDiNa, o qual consiste em se considerar a deflexão característica como a soma da média aritmética simples ( $\Delta$ ) com o desvio padrão ( $\sigma$ ) da amostra ( $D_c = \Delta + \sigma$ ). A Tabela 4.6 apresenta os resultados obtidos.

Tabela 4.6 – Deflexões características dos segmentos homogêneos (Fonte: Autor, 2018)

<i>Segmento 01</i>	$\Delta$	$D_c$	<i>Segmento 05</i>	$\Delta$	$D_c$
	39,46	(0,01mm)		36,81	(0,01mm)
	$\sigma$	<b>47,46</b>		$\sigma$	<b>43,47</b>
	7,99		6,65		
<i>Segmento 02</i>	$\Delta$	$D_c$	<i>Segmento 06</i>	$\Delta$	$D_c$
	45,06	(0,01mm)		54,27	(0,01mm)
	$\sigma$	<b>58,31</b>		$\sigma$	<b>60,90</b>
	13,25		6,63		
<i>Segmento 03</i>	$\Delta$	$D_c$	<i>Segmento 07</i>	$\Delta$	$D_c$
	31,42	(0,01mm)		41,69	(0,01mm)
	$\sigma$	<b>40,49</b>		$\sigma$	<b>45,40</b>
	9,08		3,71		
<i>Segmento 04</i>	$\Delta$	$D_c$	<i>Segmento 08</i>	$\Delta$	$D_c$
	66,29	(0,01mm)		59,81	(0,01mm)
	$\sigma$	<b>88,59</b>		$\sigma$	<b>73,58</b>
	22,30		13,77		

ANTT (2017b) sugere a seguinte classificação relativa às deflexões máximas de um segmento homogêneo (Tabela 4.7):

Tabela 4.7 – Classes de deflexão máxima (Fonte: ANTT, 2017b)

Deflexão máxima (0,01mm)	Classe
$D_0 \leq 50$	Ótimo
$50 < D_0 \leq 70$	Bom
$70 < D_0 \leq 100$	Regular
$D_0 > 100$	Ruim

Logo, os segmentos 04 e 08 enquadraram-se na classe “Regular”, os segmentos 02 e 06 na classe “Bom”, e os segmentos 01, 03, 05 e 07 na classe “Ótimo”.

Notou-se que os valores de deflexão característica dos segmentos homogêneos contradisseram a suposição de que um pavimento antigo e pouco mantido invariavelmente dispõe de altos níveis de deformação elástica, já que na maior parte do anel viário os respectivos valores encontrados inseriram-se em uma faixa ótima.

### 4.3 Ensaios de laboratório

Os resultados dos ensaios de análise granulométrica são apresentados na Tabela 4.8.

Tabela 4.8 – Resultados dos ensaios de análise granulométrica por peneiramento dos materiais das camadas (Fonte: Autor, 2018)

Resumo	Base	Sub-base	Reforço do subleito	Subleito
Análise tátil-visual	Areia siltosa rosa	Areia siltosa bege	Argila marrom médio	Silte pouco argiloso laranja com areia fina (micáceo rosa)
Pedregulho: $d > 4,8\text{mm}$	1%	1%	0%	0%
Areia grossa: $4,8 \leq d < 2,0\text{mm}$	8%	12%	1%	1%
Areia média: $2,0 \leq d < 0,42\text{mm}$	51%	47%	10%	18%
Areia fina: $0,42 \leq d < 0,075\text{mm}$	22%	21%	13%	29%
Passante n°200 (0,075mm)	18%	19%	76%	52%

Os altos percentuais de material passante na peneira n°200 (forte presença de finos) observados para as amostras coletadas das camadas de reforço do subleito e subleito indicam a necessidade de se realizar ensaios de sedimentação para uma melhor caracterização dos materiais. Reitera-se que os resultados apresentados não são utilizados no processo de dimensionamento do reforço do pavimento flexível do anel viário da UFJF.

Os valores de umidade ótima e de densidade máxima obtidos nos ensaios de compactação são apresentados na Tabela 4.9, enquanto os resultados dos ensaios de módulo de resiliência realizados com os corpos de prova moldados na umidade ótima de cada camada são apresentados na Tabela 4.10.

Tabela 4.9 – Resultados dos ensaios de compactação dos materiais das camadas (Fonte: Autor, 2018)

<i>Base</i>	<i>Sub-base</i>	<i>Reforço do subleito</i>	<i>Subleito</i>
<b>Umidade ótima</b>			
12,9%	18,3%	21,7%	24,6%
<b>Densidade máxima (g/cm<sup>3</sup>)</b>			
1930,0	1760,0	1487,0	1451,0

Tabela 4.10 – Resultados dos ensaios de módulo de resiliência dos materiais das camadas (Fonte: Autor, 2018)

<b>Solos - Módulo de resiliência (MPa)</b>							
<i>Base</i>	<i>CP01</i>	<i>Sub-base</i>	<i>CP01</i>	<i>Reforço do subleito</i>	<i>CP01</i>	<i>Subleito</i>	<i>CP01</i>
	259,83		215,33		161,50		102,00
	<i>CP02</i>		<i>CP02</i>		<i>CP02</i>		<i>CP02</i>
	263,22		215,89		159,64		94,58
	<i>CP03</i>		<i>CP03</i>		<i>CP03</i>		<i>CP03</i>
	262,28		205,45		169,08		181,44
<i>Média</i>	<i>Média</i>	<i>Média</i>	<i>Média</i>				
261,78	212,22	163,41	126,01				

Os resultados dos ensaios de determinação do módulo de resiliência do revestimento asfáltico existente são apresentados na Tabela 4.11.

Tabela 4.11 – Resultados dos ensaios de módulo de resiliência do revestimento existente (Fonte: Autor, 2018)

<b>Revestimento existente - Módulo de resiliência (MPa)</b>					
<i>CP01</i>	5230,0	<i>CP05</i>	7564,0	<i>CP09</i>	7381,0
<i>CP02</i>	5478,0	<i>CP06</i>	6857,0	<i>CP10</i>	7733,0
<i>CP03</i>	6095,0	<i>CP07</i>	5536,0	<i>CP11</i>	6840,0
<i>CP04</i>	7690,0	<i>CP08</i>	5126,0	<i>CP12</i>	5834,0
Média aritmética = 6447,0					
Desvio padrão = 1006,2			Coeficiente de variação = 16%		

Observou-se uma satisfatória uniformidade do conjunto de valores encontrado nos ensaios de módulo de resiliência, fato comprovado pelo baixo coeficiente de variação calculado para o mesmo.

Com relação à mistura asfáltica de projeto, os resultados dos ensaios de módulo de resiliência e fadiga por compressão diametral são apresentados na Tabela 4.12.

Tabela 4.12 – Resultados dos ensaios de módulo de resiliência e fadiga por compressão diametral da mistura asfáltica de projeto (Fonte: Autor, 2018)

<b>Mistura asfáltica de projeto</b>						
Módulo de resiliência (MPa)						
<i>CP01</i>	5089,0	<i>CP04</i>	5469,0	<i>Média</i>		<i>Coeficiente de variação</i>
<i>CP02</i>	7152,0	<i>CP05</i>	4838,0	5963,0	1567,4	26%
<i>CP03</i>	8583,0	<i>CP06</i>	4647,0			
Curva de fadiga						
$N_{fad} = k_1 \cdot \varepsilon_t^{k_2}$						
k1 = 7,4e-11						
k2 = -3,3104						

Foi verificado um valor significativo para o coeficiente de variação relativo aos valores de módulo de resiliência obtidos para a mistura asfáltica de projeto. No entanto, o valor médio aproxima-se daquele encontrado por Neumann (2018) quando esse realizou ensaios de determinação do módulo de resiliência com corpos de prova dessa mesma mistura asfáltica.

#### 4.4 Retroanálise

Das 98 bacias deflectométricas levantadas pelo equipamento FWD e retroanalizadas, somente três foram demarcadas com a cor vermelha (estacas 25, 90 e 91), tendo seus resultados excluídos do processo de cálculo dos módulos de elasticidade efetivos dos materiais das camadas. As seções amarelas totalizaram 17 estacas, enquanto as verdes, 78. A planilha do levantamento deflectométrico realizado no anel viário da UFJF encontra-se no Anexo C.

A estrutura do pavimento inserida no programa computacional corresponde àquela observada na prospecção, sendo que os coeficientes de Poisson ( $\mu$ ) das diferentes camadas foram estimados de acordo com valores usuais dos respectivos materiais constituintes, conforme apresentado a seguir:

- Camada de revestimento asfáltico: 8,0 cm /  $\mu = 0,30$ ;
- Camada de base: 10,0 cm /  $\mu = 0,35$ ;

- Camada de sub-base: 20,0 cm /  $\mu = 0,35$ ;
- Camada de reforço do subleito: 40,0 cm /  $\mu = 0,45$ ;
- Camada de subleito: espessura considerada semi-infinita /  $\mu = 0,45$ ;

As estimativas iniciais de módulos de resiliência, que servem como parâmetros de entrada no programa computacional, foram definidas com base nos resultados dos ensaios de módulo de resiliência realizados com os 12 corpos de prova retirados do pavimento e com os corpos de prova de solos moldados em laboratório (Tabela 4.13).

Tabela 4.13 – Valores dos módulos de resiliência obtidos em laboratório para o revestimento e demais camadas do pavimento (Fonte: Autor, 2018)

$\Delta M_R$ (MPa)			
<b>Revestimento</b>	6447,00	<b>Reforço do subleito</b>	163,41
<b>Base</b>	261,78	<b>Subleito</b>	126,01
<b>Sub-base</b>	212,22		

A Tabela 4.14 apresenta os valores de módulo de elasticidade efetivo obtidos na retroanálise (executada conforme procedimento descrito no item 3.6), assim como os módulos máximo e mínimo, desvio padrão e coeficiente de variação das amostras. Esses valores de módulo de elasticidade efetivo correspondem às médias aritméticas simples dos conjuntos de valores de módulos referentes às bacias deflectométricas de cada estaca que compõe o respectivo segmento homogêneo.

Tabela 4.14 – Valores de módulos e parâmetros obtidos na retroanálise (Fonte: Autor, 2018)

		<b>Revestimento</b>	<b>Base</b>	<b>Sub-base</b>	<b>Reforço</b>	<b>Subleito</b>
<b>Segmento 01</b>	<b>ME<sub>ef</sub> (MPa)</b>	<b>6023,22</b>	<b>343,83</b>	<b>341,43</b>	<b>399,91</b>	<b>302,91</b>
	ME <sub>ef</sub> mínimo (MPa)	3289	123	167	193	193
	ME <sub>ef</sub> máximo (MPa)	7600	570	570	570	400
	Desvio Padrão	1331,65	124,05	127,45	119,44	62,19
	Coefficiente de variação	22,11%	36,08%	37,33%	29,87%	20,53%
<b>Segmento 02</b>	<b>ME<sub>ef</sub> (MPa)</b>	<b>4910,00</b>	<b>252,60</b>	<b>304,20</b>	<b>368,60</b>	<b>297,00</b>
	ME <sub>ef</sub> mínimo (MPa)	2960	194	167	167	167
	ME <sub>ef</sub> máximo (MPa)	6967	380	471	633	381
	Desvio Padrão	1431,07	73,65	114,27	185,94	107,41
	Coefficiente de variação	29,15%	29,16%	37,56%	50,45%	36,17%
<b>Segmento 03</b>	<b>ME<sub>ef</sub> (MPa)</b>	<b>7099,00</b>	<b>480,38</b>	<b>466,46</b>	<b>478,00</b>	<b>368,77</b>
	ME <sub>ef</sub> mínimo (MPa)	3333	258	257	222	250
	ME <sub>ef</sub> máximo (MPa)	9500	697	697	697	471
	Desvio Padrão	1584,53	127,27	155,79	151,70	67,26
	Coefficiente de variação	22,32%	26,49%	33,40%	31,74%	18,24%
<b>Segmento 04</b>	<b>ME<sub>ef</sub> (MPa)</b>	<b>4733,86</b>	<b>261,57</b>	<b>220,57</b>	<b>225,71</b>	<b>202,14</b>
	ME <sub>ef</sub> mínimo (MPa)	3167	64	91	67	99
	ME <sub>ef</sub> máximo (MPa)	5771	471	293	507	293
	Desvio Padrão	849,37	130,65	67,40	161,02	69,25
	Coefficiente de variação	17,94%	49,95%	30,56%	71,34%	34,26%

Tabela 4.14 – Valores de módulos e parâmetros obtidos na retroanálise (Fonte: Autor, 2018)

		<i>Revestimento</i>	<i>Base</i>	<i>Sub-base</i>	<i>Reforço</i>	<i>Subleito</i>
<i>Segmento 05</i>	<b>ME<sub>ef</sub> (MPa)</b>	<b>5174,67</b>	<b>364,13</b>	<b>426,40</b>	<b>509,53</b>	<b>335,73</b>
	ME <sub>ef</sub> mínimo (MPa)	3333	222	222	329	222
	ME <sub>ef</sub> máximo (MPa)	6500	507	633	633	436
	Desvio Padrão	890,10	115,07	127,52	67,95	73,00
	Coefficiente de variação	17,20%	31,60%	29,91%	13,34%	21,74%
<i>Segmento 06</i>	<b>ME<sub>ef</sub> (MPa)</b>	<b>4523,42</b>	<b>240,67</b>	<b>202,83</b>	<b>279,00</b>	<b>270,83</b>
	ME <sub>ef</sub> mínimo (MPa)	3189	167	129	167	167
	ME <sub>ef</sub> máximo (MPa)	6000	380	300	471	380
	Desvio Padrão	706,65	76,48	47,26	101,57	74,76
	Coefficiente de variação	15,62%	31,78%	23,30%	36,40%	27,61%
<i>Segmento 07</i>	<b>ME<sub>ef</sub> (MPa)</b>	<b>5595,77</b>	<b>324,69</b>	<b>427,38</b>	<b>369,08</b>	<b>247,15</b>
	ME <sub>ef</sub> mínimo (MPa)	4400	222	222	222	193
	ME <sub>ef</sub> máximo (MPa)	7067	471	633	507	329
	Desvio Padrão	688,09	73,19	116,95	118,03	41,32
	Coefficiente de variação	12,30%	22,54%	27,36%	31,98%	16,72%
<i>Segmento 08</i>	<b>ME<sub>ef</sub> (MPa)</b>	<b>4898,43</b>	<b>241,43</b>	<b>243,86</b>	<b>258,29</b>	<b>183,43</b>
	ME <sub>ef</sub> mínimo (MPa)	3800	167	164	97	150
	ME <sub>ef</sub> máximo (MPa)	6333	507	471	507	247
	Desvio Padrão	849,65	122,24	121,29	155,96	36,13
	Coefficiente de variação	17,35%	50,63%	49,74%	60,38%	19,70%

Observando esses resultados, verificou-se que o revestimento do pavimento flexível do anel viário da UFJF ainda tem um alto módulo elástico efetivo médio – 5369,79 MPa. Além disso, ressaltam-se os valores de módulos obtidos para as camadas de reforço do subleito, os quais apresentaram-se, na maioria dos casos, maiores do que aqueles encontrados nas camadas de base e sub-base.

A grande superioridade numérica de bacias deflectométricas com erro inferior a 5  $\mu$ m demonstrou existir, no geral, uma boa correlação entre as bacias medidas e calculadas pelo programa computacional BackMeDiNa. No entanto, para se atingir erros baixos, foi necessária a execução do processo de retroanálise em média 4 vezes para cada bacia, fato que pode ser entendido ao se comparar os valores de módulos elásticos efetivos obtidos com aqueles dos módulos de resiliência utilizados como parâmetros de entrada no método, os quais apresentaram substanciais diferenças.

#### 4.5 Dimensionamento do reforço

No dimensionamento do reforço dos segmentos homogêneos, inicialmente entrou-se com todas as informações sobre a estrutura do pavimento flexível, a qual, relativamente aos seus parâmetros físicos, foi considerada igual para todos os segmentos homogêneos definidos, diferindo, conforme relatado no item 3.7, no que diz respeito ao comportamento mecânico dos materiais integrantes das camadas. A Figura 4.2 exibe a estrutura definida para o segmento 01 (com a camada de reforço destacada em amarelo).

MeDiNa - v.1.1.1.0 - nov/2018

Projeto Editar Análise Ajuda

ESTRUTURA      MODELAGEM      RESULTADOS

RESPONSÁVEL: Thiago Fávero      EMPRESA: UFJF

PROJETO: Dimensionamento de reforço para o anel viário da UFJF

Alterar Estrutura >>

CAMADA	DESCRIÇÃO DO MATERIAL	TIPO	ESPESSURA (cm)	MÓDULO (MPa)	COEFICIENTE DE POISSON
>> 1 <<	CONCRETO ASFÁLTICO	CAP 50/70 Reduc	5,0	5963	0,30
2	CAMADA ASFÁLTICA EXISTENTE	Camada Asfáltica Superficial	8,0	6023	0,30
3	CAMADA EXISTENTE	Camada em Solo Natural	10,0	343	0,35
4	CAMADA EXISTENTE	Camada em Solo Natural	20,0	341	0,35
5	CAMADA EXISTENTE	Camada em Solo Natural	40,0	400	0,45
SL	SUBLEITO	Subleito	0,0	303	0,45

Figura 4.2 – Ilustração de estrutura definida no programa computacional MeDiNa (Fonte: Autor, 2019)

Em seguida, os resultados da retroanálise expostos na Tabela 4.13 foram inseridos manualmente no programa computacional MeDiNa através da janela “Propriedades da Camada”, onde, para a camada asfáltica existente, entrou-se ainda com os valores referentes à deflexão característica do segmento homogêneo analisado, seu percentual de área trincada e índice de irregularidade longitudinal, além da espessura de fresagem (considerada nula para todos os segmentos) e idade do pavimento (tida como 27 anos, que é o tempo decorrido desde o último recapeamento).

Finalmente, na janela correspondente à camada de reforço, os resultados da dosagem da mistura asfáltica de projeto foram adicionados – detalhes dessa dosagem podem ser vistos em Neumann (2018). A mistura considerada consiste em um concreto asfáltico apresentando uma composição granulométrica com um TMN (Tamanho Nominal Máximo) de 19,0 mm e um volume de vazios de 4%. Para representar um tráfego pesado, a energia de compactação utilizada foi de 100 giros. Os resultados da referida dosagem são apresentados na Tabela 4.15.

Tabela 4.15 – Resultados da dosagem SUPERPAVE da mistura asfáltica de projeto (Fonte: Neumann, 2018)

Resultado Dosagem SUPERPAVE					
Materiais		% agregados	% massa total	Parâmetros	
Agregados	Brita 0	25,00	23,53	$Pb_{proj} =$	<b>5,90</b>
	Brita 1	25,00	23,53	$RBV_{proj} =$	<b>68,00</b>
	Pó de pedra	50,00	47,05	$VAM_{proj} =$	<b>13,00</b>
Ligante	CAP 50/70	6,25	5,90	$Gmb_{proj} =$	<b>2,410</b>
	<b>Total</b>	<b>106,25</b>	<b>100</b>	$Gmm_{proj} =$	<b>2,511</b>



quantidade de veículos considerada de acordo com a porcentagem do tráfego que essa recebe. Porém, a contagem volumétrica não informa a respeito desse tipo de dado, e, por isso, admitiu-se uma tabela do DNIT como referência (Tabela 4.16).

Tabela 4.16 – Estimativa de percentual de veículos na faixa de tráfego de projeto (Fonte: DNIT, 2006c)

<b>Número de faixas de tráfego</b>	<b>% de veículos na faixa de projeto</b>
2	50
4	35 a 48
6 ou mais	25 a 48

A pista do anel viário possui duas faixas, ambas com o mesmo sentido de tráfego. Tendo isso em vista, adotou-se, como volume de veículos na faixa de tráfego de projeto, o valor de 50% do total. Assim, os valores de número N inicial e final foram corrigidos para  $1,61 \times 10^5$  e  $1,69 \times 10^6$ , respectivamente. A Tabela 4.17 apresenta um resumo das informações de tráfego utilizadas no dimensionamento do reforço.

Tabela 4.17 – Resumo dos dados de tráfego considerados no dimensionamento do reforço (Fonte: Autor, 2019)

<b>Dados do tráfego</b>	
Tipo de via:	Sistema Local
VMD (1° ano):	9300
FV:	0,095
N anual (1° ano):	3,22e+5
% de veículos na faixa de projeto:	50
N anual da faixa:	1,61e+5
Taxa de crescimento (%):	1,0
Período de projeto (anos):	10
N total:	1,69e+6

Tendo-se adicionado ao programa computacional MeDiNa todos os dados necessários, o cálculo do reforço foi executado automaticamente. A Tabela 4.18 exibe as espessuras obtidas para cada um dos 8 segmentos homogêneos, assim como o percentual de área trincada prevista no pavimento flexível ao fim do período de projeto.

Tabela 4.18 – Resultados obtidos no dimensionamento do reforço de todos os segmentos homogêneos para 50% do tráfego passando na faixa de projeto (Fonte: Autor, 2019)

Segmento homogêneo	Espessura de reforço (cm)	AT% prevista no pavimento ao fim do período de projeto
01	5,0	6,8%
02	5,0	8,3%
03	5,0	5,4%
04	5,0	9,8%
05	5,0	6,8%
06	5,0	9,9%
07	5,0	7,0%
08	5,0	9,4%

Notou-se que, para todos os segmentos considerados, o programa computacional MeDiNa indicou a espessura mínima de reforço (5,0 cm). Fato retificado pelas porcentagens previstas de área trincada, as quais apresentaram valores bem abaixo do limite de 30% admitido pelo programa para o último mês de projeto.

No intuito de se avaliar os limites superiores para as espessuras de projeto, um novo dimensionamento foi realizado considerando que 100% do tráfego passa na faixa de projeto, o que consiste na situação mais crítica possível. Além disso, vale destacar que, em dois trechos do anel viário (estaca 6 a 9 e estaca 59 a 62) a faixa da direita une-se à faixa da esquerda e, portanto, nesses casos, seria a análise correta a se fazer. A Tabela 4.19 apresenta os resultados obtidos:

Tabela 4.19 – Resultados obtidos no dimensionamento do reforço de todos os segmentos homogêneos para 100% do tráfego passando na faixa de projeto (Fonte: Autor, 2019)

Segmento homogêneo	Espessura de reforço (cm)	AT% prevista no pavimento ao fim do período de projeto
01	5,0	18,8%
02	5,0	24,2%
03	5,0	14,1%
04	9,4	29,2%
05	5,0	18,8%
06	9,4	28,4%
07	5,0	19,6%
08	8,8	29,5%

Pôde-se observar que apenas 3 segmentos apresentaram espessuras diferentes daquelas calculadas no primeiro dimensionamento, porém todos eles tiveram um aumento significativo nos valores percentuais da área trincada prevista.

Como comentado no item 2.10, o programa computacional MeDiNa não analisa a reflexão de trincas do pavimento antigo ao novo, devendo o projetista sugerir alternativas para

impedir ou retardar esse processo. Diante desse quadro, propôs-se um novo dimensionamento para os segmentos com espessuras de reforço maiores que 5,0 cm e/ou com área trincada prevista superior a 20% na situação em que se levou em conta 100% dos veículos passando na faixa de tráfego de projeto.

Nesse dimensionamento, considerou-se a execução de uma camada antirreflexão de trincas entre o revestimento novo e o antigo. O material escolhido foi uma mistura asfáltica especialmente projetada para absorver tensões com 1,5 cm de espessura, módulo de resiliência de 3000 MPa, coeficiente de Poisson de 0,25 e massa específica de 2,4 g/cm<sup>3</sup>. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 4.20.

Tabela 4.20 – Resultados obtidos no dimensionamento dos segmentos 02, 04, 06 e 08 com camada antirreflexão de trincas para 100% do tráfego passando na faixa de projeto (Fonte: Autor, 2019)

Segmento homogêneo	Espessura de reforço (cm)	AT% prevista no pavimento ao fim do período de projeto
02	5,0	15,6%
04	5,0	19,0%
06	5,0	19,0%
08	5,0	18,2%

Tendo em vista as três simulações efetuadas, constatou-se que a melhor solução de reforço para o pavimento flexível do anel viário da UFJF é a de se executar um recapeamento com uma camada de espessura única de 5,0 cm da mistura asfáltica de projeto, observando a aplicação da camada antirreflexão de trincas nos trechos correspondentes aos segmentos homogêneos 02, 04, 06 e 08. Os relatórios completos da análise referentes a essa solução de reforço encontram-se no Apêndice B.

Machado (2016) também realizou um dimensionamento de reforço para o referido anel viário, fundamentando-se nas metodologias empíricas homologadas pelo DNIT (comentadas nos itens 2.4.1 a 2.4.4) e tendo como base uma avaliação funcional objetiva executada conforme a norma técnica DNIT 006/2003-PRO e uma avaliação estrutural por levantamento de deflexões com a viga Benkelman.

Nesse estudo, o anel viário foi estaqueado da mesma maneira que aquela apresentada no item 3.1, porém, acabou sendo dividido em apenas 2 segmentos homogêneos, denominados de subtrecho A (estacas 0 a 48) e subtrecho B (estacas 48 a 107). Os resultados do projeto de reforço foram os seguintes:

- DNER-PRO 010/79: reforço composto unicamente por concreto betuminoso considerado inexecuível para ambos os subtrechos;
- DNER-PRO 011/79: 8,6 cm de concreto betuminoso para o subtrecho A e 12,3 cm para o subtrecho B;
- DNER-PRO 159/85: o dimensionamento conforme essa norma não foi executado;
- DNER-PRO 269/94: 7,4 cm de concreto betuminoso de 5000 MPa para o subtrecho A e 9,4 cm do mesmo concreto betuminoso para o subtrecho B, sendo que em ambos os trechos foi considerada uma espessura de fresagem de 4,0 cm.

Analisando os resultados de dimensionamento de reforço apresentados por Machado (2016) e os resultados do presente trabalho, percebeu-se que os aqui obtidos são menos conservativos e onerosos, além de possuírem maior simplicidade executiva.

## **4.6 Planejamento de avaliações**

Visando colaborar para um aperfeiçoamento do novo método de dimensionamento mecanístico-empírico nacional, principalmente via fornecimento de dados úteis para calibração e validação de seu modelo de desempenho, apresenta-se aqui um planejamento de avaliações e monitoramento do anel viário da UFJF.

Tomou-se como base o Manual de Execução de Trechos Monitorados, elaborado no âmbito da Rede Temática de Asfalto, no ano de 2010, pelo CENPES, setor de Gerência de Lubrificantes e Produtos Especiais – COPPE/UFRJ, pela Universidade Federal do Ceará (UFC), EPUSP e Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Esse manual descreve e padroniza os procedimentos que envolvem a construção de trechos experimentais, abrangendo as fases de pré-execução, execução e pós-execução.

Os dados coletados a partir das avaliações devem ser armazenados em um banco de dados denominado Sistema da Rede Temática de Asfalto (SRTA). Esse foi criado paralelamente ao Manual de Execução de Trechos Monitorados, tendo o objetivo de reunir informações provenientes de segmentos experimentais de diversas regiões do país para que possam ser usadas no desenvolvimento e aprimoramento do método de dimensionamento mecanístico-empírico nacional (REDE, 2010).

### **4.6.1 Pré-execução**

A etapa de pré-execução envolve a caracterização dos materiais disponíveis para aplicação no pavimento (e dos já existentes, em casos de restauração) por ensaios *in situ* e de

laboratório realizados antes da construção, de acordo com o tipo de seção – pavimento novo ou recapeamento. Além disso, nessa fase, apresentam-se dados sobre a dosagem de misturas asfálticas, dimensionamento (definição de espessuras) das camadas, e condições de tráfego da via.

Com relação ao asfalto, uma amostra de cerca de 40 litros de ligante asfáltico deve ser coletada para realizar a dosagem da mistura asfáltica do revestimento, vindo acompanhada pelo certificado de ensaio expedido pela empresa fornecedora, o qual tem de conter informações como: tipo, origem (refinaria), procedência (fornecedor: usina, empresa ou refinaria), data e hora de coleta da amostra, assim como características convencionais do ligante (ponto de amolecimento, viscosidade *Brookfield* nas temperaturas de 135°C, 150°C e 165°C, penetração, densidade, ductilidade, índice de susceptibilidade térmica, etc.). Evidencia-se a importância de se caracterizar, também, a pintura de ligação ou imprimação.

Além da caracterização convencional, a amostra de ligante do tipo CAP deve ser avaliada e classificada pela especificação SUPERPAVE (cisalhamento dinâmico, rigidez a fluência e envelhecimentos de curto e longo prazos).

Os agregados naturais usados na caracterização e dosagem da mistura asfáltica devem ter amostras representativas coletadas para que sejam submetidos aos seguintes ensaios principais:

- Durabilidade pelo emprego de soluções de sulfato de sódio ou de magnésio;
- Massa específica, massa específica aparente e absorção de agregados graúdos;
- Massa específica e absorção de agregados miúdos;
- Abrasão Los Angeles;
- Análise granulométrica de agregados;
- Angularidade de agregados miúdos;
- Lamelaridade da fração graúda: partículas chatas e alongadas;
- Equivalente de areia;
- Massa unitária e volume de vazios;
- Teor de umidade total, por secagem, de agregado graúdo.

Já no caso dos solos que constituem as camadas de base, sub-base, reforço do subleito e subleito, amostras significativas devem ser recolhidas, através de poços de sondagem, a fim de serem submetidas aos ensaios constantes da lista a seguir:

- No topo de cada camada: ensaio de frasco de areia e coleta de amostra para ensaio de umidade em laboratório;
- Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas;
- Análise granulométrica por peneiramento;
- Limite de plasticidade e limite de liquidez (método de referência e método expedito);
- Densidade real;
- Compactação utilizando amostras não trabalhadas;
- Deformação permanente e acomodamento de solos;
- Módulo de resiliência;
- Camadas de reforço do subleito e subleito: ensaio de sedimentação e, caso o solo for integralmente passante na peneira 2,0 mm (nº 10), ensaios para classificação geotécnica pela metodologia MCT;

Visto que o tipo de revestimento asfáltico escolhido para esse trabalho de pesquisa é o de mistura asfáltica a quente, o projeto executivo deve conter informações sobre o método de dosagem (Marshall ou SUPERPAVE), tipo de compactação empregada (compactador Marshall ou giratório) na preparação dos corpos de prova, número de golpes ou giros, teor de projeto, além de parâmetros volumétricos e mecânicos, como:

- Módulo de resiliência, resistência à tração e fadiga;
- Faixa granulométrica e tamanho máximo nominal;
- Densidade máxima da mistura asfáltica;
- Massa específica aparente;
- Volume de vazios;
- Vazios do agregado mineral – VAM;
- Relação betume-vazios – RBV;

No caso de seleção do método de dosagem SUPERPAVE, os seguintes procedimentos adicionais de análise das características da mistura asfáltica devem ser executados:

- Número de fluência ou Flow Number (FN);
- Índice de densificação na compactação ou Compaction Densification Index (CDI);
- Índice de densificação pelo tráfego ou Traffic Densification Index (TDI).

Após o devido dimensionamento do reforço do pavimento, deve-se elaborar um croqui contendo informações sobre a localização do segmento (coordenadas de início e fim),

estaqueamento realizado, número e carga de veículos, espessura das camadas, bem como um detalhamento de todos os materiais utilizados.

O projeto de dimensionamento de reforço do pavimento flexível do anel viário da UFJF apresentado neste trabalho de pesquisa pode ser considerado como parte integrante da fase de “Pré-execução” de um trecho experimental. Foram levantados dados do tráfego e da mistura asfáltica de projeto, assim como informações referentes às características físicas e propriedades mecânicas dos materiais que constituem as camadas de revestimento, base, sub-base, reforço do subleito e subleito. Assim sendo, pode-se considerar esse trabalho como um relevante ponto de partida para o processo de transformação do anel viário da UFJF em um trecho monitorado integrante do SRTA.

#### **4.6.2 Execução**

Na etapa de execução do projeto, divide-se os procedimentos de avaliação e monitoramento em duas partes. A primeira é a “confirmação dos materiais”, onde é realizada uma conferência sumária dos resultados encontrados na etapa de pré-execução para verificar se esses de fato correspondem aos materiais empregados na construção/reforma do trecho (os dados coletados nessa fase não geram registros no SRTA). A segunda parte é denominada “controle de execução”, o qual é realizado tanto na usina (quando houver) quanto em campo, e visa criar o “*as built*” da obra propriamente dita.

Caso seja constatada, na fase de confirmação dos materiais, alguma variação significativa em um material, ou caso esse não atenda ao projeto de pré-execução, sugere-se a adequação do mesmo ou a alteração do projeto considerando os novos materiais disponíveis. Porém, se não for possível efetuar uma dessas ações, deve-se dar continuidade ao processo executivo registrando a ocorrência.

Rede (2010) afirma que o mais importante ao final da execução é ter o “*as built*” bem-feito, principalmente o do revestimento, incluindo a caracterização completa do ligante asfáltico e a descrição das propriedades mecânicas das misturas asfálticas empregadas. Os demais materiais devem ser controlados pelos métodos de controle tradicionais e por deformabilidade (medidas de deflexão) sempre que possível.

Levando em consideração o procedimento de restauração do anel viário da UFJF, a fase de controle de execução deve ser feita especialmente na camada de revestimento asfáltico, já que não há a intenção de se fazer modificações nas demais camadas.

Resumidamente, esse controle deve ser composto de critérios sobre: amostragem (quanto e como), controle da usinagem com mapeamento detalhado do processo de produção da mistura asfáltica (granulometria, teor de ligante asfáltico, temperatura de usinagem e acompanhamento dos caminhões de massa até a chegada à pista, etc.) e controle de aplicação (temperatura de chegada, temperatura de compactação, espessura e distâncias longitudinal e transversal de espalhamento da massa).

Recomenda-se a coleta de 10 kg de mistura asfáltica usinada em cada caminhão que chega à pista visando obter material suficiente para a extração do ligante asfáltico e determinação/conferência da granulometria da mistura. Na usina, a quantidade coletada deve ser de 30 kg, sendo a amostra destinada a um laboratório de confiança da empresa executora para ser submetida a ensaios de dano por umidade induzida, verificação da adesividade e determinação da massa específica pelo método *Rice* (controle do grau de compactação efetivo).

Após a execução do trecho (ou, no caso, de seu recapeamento), orienta-se a realização dos seguintes levantamentos iniciais, cujas informações são a ligação com a etapa de pós-execução e o marco “zero” das próximas avaliações:

- Avaliação da condição estrutural através de medidas de deflexão em todas as estacas do trecho viário (com viga Benkelman ou equipamento FWD);
- Avaliação da condição funcional mediante a determinação da irregularidade longitudinal, conferindo-se, principalmente, a presença de segregação superficial;
- Avaliação de aderência pneu-pavimento por meio da macro e microtextura, sendo feitos os ensaios de mancha de areia e Pêndulo Britânico para mensurar seus valores, respectivamente;
- Recontagem do tráfego catalogando-se o volume médio diário de veículos e, se possível, as cargas médias dos eixos.

#### **4.6.3 Pós-execução**

Finalizado o procedimento de restauração e liberado o tráfego usual da via, deve se proceder ao levantamento periódico das condições do pavimento. Logo no primeiro mês de uso, deve-se fazer os ensaios de Pêndulo Britânico e mancha de areia, assim como o levantamento visual contínuo do trecho (levantamento de defeitos). No sexto mês, recomenda-se, além desses ensaios, a coleta de amostras do revestimento usinado (corpos de prova) e a execução de levantamentos deflectométrico e do índice de irregularidade longitudinal. Do primeiro ao

quinto ano e com intervalo de um ano, repete-se o mesmo controle feito no sexto mês (Tabela 4.21).

Tabela 4.21 – Planejamento de avaliações para o anel viário da UFJF (Fonte: Rede, 2010)

Levantamento	Tempo zero	1º mês	6º mês	1º ano	2º ao 5º ano
Amostras do revestimento usinado	x		x	x	x
Deflexão (Viga Benkelman ou FWD)	x		x	x	x
Pêndulo Britânico e mancha de areia	x	x	x	x	x
Índice de irregularidade longitudinal	x		x	x	x
Levantamento de defeitos (LVCI)	x	x	x	x	x

Na coleta de amostras do revestimento asfáltico, deve-se utilizar sonda rotativa de 10 cm de diâmetro sempre no entorno das mesmas estacas, a cada coleta, sendo retirados cinco corpos de prova por estaca, espaçados de pequena distância (de 15 a 30 cm). A altura dos corpos de prova deve compreender todas as camadas asfálticas existentes, as quais são separadas em laboratório através de corte com serra diamantada. Essas amostras devem então ser submetidas a ensaios de densidade aparente (para verificação de uma possível densificação pelo tráfego), módulo de resiliência e resistência à tração. Orienta-se a estocagem do resto de material quebrado que sobra após o ensaio de resistência à tração, a fim de que seja realizada uma posterior avaliação do envelhecimento do ligante asfáltico.

Todo esse monitoramento programado para a fase de pós-execução tem como objetivo acompanhar a evolução das condições funcional e estrutural do pavimento restaurado, identificando o período após sua abertura ao tráfego no qual começam a aparecer certos defeitos (como, por exemplo, trincamentos e desgaste superficial), bem como a taxa de evolução dos mesmos. As avaliações devem se suceder em toda a extensão do trecho, e as informações recolhidas devem ser inseridas no SRTA para compor o banco de dados que servirá de base para melhorias no programa computacional MeDiNa, principalmente no que concerne à calibração e validação do seu modelo de desempenho.

## 5 Conclusão

Esse trabalho fez um estudo a respeito de uma técnica de manutenção de pavimentos flexíveis que recebe o nome de reforço, a qual consiste na aplicação de uma camada de mistura asfáltica sobre o revestimento existente e visa restabelecer certas propriedades funcionais do pavimento, bem como evitar danos futuros à sua estrutura.

O trecho alvo foi o pavimento do anel viário da Universidade Federal de Juiz de Fora, o qual teve seus 2.140 m de extensão – relativos à faixa interna – divididos em 8 segmentos homogêneos através do método das diferenças acumuladas e utilizando como parâmetro base o valor de deflexão máxima medido para cada estaca inventariada.

A dimensão mínima recomendada por DNER (1998) para um segmento homogêneo é de 200 m, uma vez que trechos com tamanhos inferiores a esse podem apresentar inconvenientes construtivos, como intervalo insuficiente para transição de espessuras e oneração dos custos devido à necessidade de execução de um maior número de ensaios e possível diferença na especificação de materiais.

Contudo, pelo fato de o presente trabalho de pesquisa ter uma natureza acadêmica, admitiu-se que a dimensão dos segmentos homogêneos fosse inferior àquela proposta por DNER (1998), o que possibilitou uma análise mais detalhada e precisa das condições funcional e estrutural do pavimento.

O anel viário da UFJF serve à sociedade juiz-forana há mais de cinquenta anos, sendo a via local com maior tráfego da Cidade Alta. Até o presente momento, tem-se o registro de uma única operação de restauração do mesmo, datada de 1991, onde foi realizado um recapeamento de todo o revestimento. Apesar disso, o pavimento ainda apresenta condições satisfatórias de tráfego, o que aponta para o fato de que sua estrutura foi adequadamente projetada e construída com materiais de boa qualidade.

Os resultados do ensaio de índice de irregularidade longitudinal corroboram esse pressuposto, pois os valores de IRI encontrados para os diferentes segmentos homogêneos ainda são admissíveis na maior parte do anel viário, o que indica, também, baixos níveis de deformação permanente, em especial do subleito, que é a camada integrante do pavimento mais suscetível ao surgimento desse tipo de defeito.

Com relação à determinação dos percentuais de área trincada da superfície do revestimento, o LVCI, apesar de ser um método de levantamento relativamente novo,

apresentou grande eficácia e precisão, tendo em vista a consideração de toda a extensão do anel viário na análise, a utilização de imagens em alta resolução e com escala pré-definida, e a agilidade na mensuração das áreas afetadas por essa patologia.

Constata-se que os elevados valores de porcentagem de área trincada verificados pelo referido método se relacionam com a prolongada exposição da estrutura do pavimento ao carregamento dinâmico imposto pelos veículos e aos efeitos do intemperismo provocado pelos agentes do clima e das próprias alterações químicas inerentes aos materiais das camadas.

O levantamento das bacias deflectométricas pelo equipamento FWD permitiu a obtenção dos módulos elásticos efetivos *in situ* por meio da retroanálise, assim como das deflexões características de cada segmento. Apesar da alta porcentagem de área trincada do revestimento asfáltico, essas deflexões apresentaram-se com valores relativamente baixos. Tal fato indica que o revestimento sofreu danos por fadiga (constante e repetida sollicitação pelas cargas do tráfego) devido ao prolongado período sem intervenções de reparo e manutenção, e não essencialmente devido ao comportamento mecânico deficiente dos materiais componentes de suas camadas.

Notou-se uma forte correlação entre os valores de deflexão máxima e os valores de módulo de elasticidade efetivo obtidos na retroanálise. Os segmentos com módulos mais elevados (01, 03, 05 e 07) foram os mesmos que apresentaram as deflexões mais baixas, e vice-versa.

Além da avaliação estrutural não-destrutiva feita através dos ensaios com FWD, fez-se, a partir da abertura de um poço de sondagem no anel viário em estudo, uma avaliação estrutural destrutiva do mesmo. Os objetivos primários dessa prospecção eram o de se determinar as espessuras das camadas integrantes da estrutura do pavimento e de se coletar material para os ensaios de determinação de módulos de resiliência, os quais serviram como parâmetros de entrada no processo de retroanálise. Julga-se que o único poço aberto atendeu de forma satisfatória a esses objetivos.

Observando os altos valores médios do módulo elástico efetivo e do módulo de resiliência do revestimento asfáltico do anel viário da UFJF, pode-se dizer que, apesar da idade avançada, o mesmo ainda possui uma boa capacidade de suportar as sollicitações a que é submetido.

Os coeficientes de variação dos valores de módulo determinados na retroanálise apresentaram-se, em alguns casos, maiores que o valor limite de 30% sugerido pelo programa

computacional MeDiNa. Presume-se que isso tem relação com uma certa heterogeneidade de materiais dentro de um mesmo segmento homogêneo, o que ratifica a alegação de que mais poços de sondagem deveriam ser abertos para uma melhor discriminação desses materiais.

O dimensionamento de reforço com base no novo método mecanístico-empírico nacional foi realizado mediante a apreciação de três situações: 1) reforço com material asfáltico e consideração de 50% do VMD passando na faixa de projeto; 2) reforço com material asfáltico e consideração de 100% do VMD passando na faixa de projeto; e 3) reforço com material asfáltico e camada antirreflexão de trincas para alguns segmentos e consideração de 100% do VMD passando na faixa de projeto.

Na primeira situação, a espessura mínima de reforço admitida pelo programa computacional MeDiNa (5,0 cm) foi determinada para todos os segmentos analisados, e as previsões do percentual de área trincada para o último mês da análise situaram-se no intervalo de 5,4% a 9,9%. Esses resultados permitem concluir que essas espessuras poderiam ser ainda menores caso o limite de 30% de área trincada continuasse a ser levado em conta, porém, a execução de reforço com espessuras inferiores a 5,0 cm, além de não ser usual, não é recomendada pelo DNIT.

Com o intuito de se definir um limite superior para as espessuras de reforço examinando um cenário crítico, decidiu-se realizar o dimensionamento conforme a segunda situação, a qual retornou valores bastante elevados para as espessuras de reforço dos segmentos 04, 06 e 08, enquanto manteve em 5,0 cm as espessuras dos demais. O percentual de área trincada previsto aumentou consideravelmente para todos os segmentos, com destaque para os segmentos 02, 04, 06 e 08, cujos valores superaram 24% de área trincada.

Os segmentos pares evidenciam-se, então, como aqueles que inspiram maior cuidado do projetista. Tendo isso em vista e considerando o fato de que o programa computacional MeDiNa não analisa a reflexão de trincas do pavimento antigo ao novo, tomou-se a decisão de se suceder o dimensionamento de acordo com a terceira situação. Por conta da presença da camada antirreflexão de trincas, as espessuras de reforço desses segmentos voltaram a ter o valor mínimo de 5,0 cm, e suas áreas trincadas previstas apresentaram valores inferiores a 20%.

Ponderando as simulações efetuadas, conclui-se que a melhor solução para o reforço do pavimento do anel viário da UFJF é a de se adotar um recapeamento com 5,0 cm da mistura asfáltica de projeto ( $M_R = 5963$  MPa) em toda sua extensão, atentando para a utilização de uma camada antirreflexão de trincas com 1,5 cm de espessura ( $M_R = 3000$  MPa) nos segmentos 02,

04, 06 e 08. Vale ressaltar que, em comparação com os resultados apresentados por Machado (2016) em seu dimensionamento empírico baseado nas normas técnicas de projeto de reforço do DNIT, os resultados obtidos nesse trabalho de pesquisa convergiram para uma solução mais econômica e viável.

O planejamento de avaliações proposto representa a adoção de um procedimento padronizado que acompanha o desempenho do pavimento antes mesmo de ele ser construído/reformado. Portanto, acredita-se que a execução da operação de manutenção proposta, se devidamente pautada no referido planejamento, possibilitará que o anel viário da UFJF seja inserido como um trecho experimental no SRTA e, conseqüentemente, sirva como objeto de estudo para melhorias no programa MeDiNa.

## **5.1 Sugestões para trabalhos futuros**

Como sugestões para futuros trabalhos de pesquisa a serem desenvolvidos dentro da temática na qual essa dissertação se insere, citam-se:

- Dividir o anel viário em segmentos homogêneos tomando-se como base outros dados que não a deflexão máxima (como, por exemplo, os índices de irregularidade longitudinal e/ou os afundamentos de trilha de roda mensurados) e abrir um número suficiente de poços de sondagem para que seja possível uma caracterização mais completa das camadas integrantes de sua estrutura. Tais ações teriam a finalidade de viabilizar a comparação e combinação das diferentes segmentações para que a resultante tenha melhor representatividade, proporcionando um dimensionamento mais confiável e seguro;
- Analisar a sensibilidade do programa MeDiNa a diferentes parâmetros, como a carga dos eixos dos veículos considerados no cálculo do FV, os coeficientes de regressão da curva de fadiga da mistura asfáltica de projeto, a taxa de crescimento do tráfego e o período de projeto, os coeficientes de Poisson dos materiais componentes de alguma(s) camada(s), etc.
- Avaliar a aplicação de uma membrana geossintética como camada antirreflexão de trincas e contrastar os resultados com aqueles obtidos no presente trabalho de pesquisa.

## Referências

AASHTO – AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO guide for design of pavement structures**. Washington, DC: AASHTO, 1993. 624 p. (vol. 1).

ALBERNAZ, C. A. V.; CALDAS J. E. F.; OLIVEIRA, S. E. Avaliação estrutural simplificada de pavimentos através de retroanálise. In: Reunião Anual de Pavimentação, 30ª, 1996, Salvador. **Anais...** Rio de Janeiro: ABPv, 1996. p. 747-774.

ALBERNAZ, C. A. V.; MEDINA, J.; MOTTA, L. M. G. Retroanálise: uma útil ferramenta na avaliação estrutural de pavimentos. In: Reunião Anual de Pavimentação, 29ª, 1995, Cuiabá, MG. **Anais...** Rio de Janeiro: ABPv, 1995. p. 399-417.

ALMEIDA, L. C.; OLIVEIRA, F. H. L.; RAMOS, S. P.; AGUIAR, M. F. P. Abordagens sobre dimensionamento de pavimentos flexíveis rodoviários: uma visão prévia do profissional brasileiro. In: CONGRESSO TÉCNICO CIENTÍFICO DA ENGENHARIA E DA AGRONOMIA, 72., 2015, Fortaleza. **Anais...** Brasília: [s.n.], 2015. Disponível em: [http://www.confea.org.br/media/Civil\\_abordagens\\_sobre\\_dimensionamento\\_de\\_pavimentos\\_flexiveis\\_rodoviarios\\_uma\\_visao\\_previa\\_do\\_profissional\\_brasileiro.pdf](http://www.confea.org.br/media/Civil_abordagens_sobre_dimensionamento_de_pavimentos_flexiveis_rodoviarios_uma_visao_previa_do_profissional_brasileiro.pdf). Acesso em: 6 mar. 2018.

ANTT – AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES. **Recurso de Desenvolvimento Tecnológico RDT**: procedimento para levantamento visual contínuo informatizado (LVCI) pelo método da varredura. Relatório Final. Nova Lima: VIA040, 2017a. 11p.

\_\_\_\_\_. **Recurso de Desenvolvimento Tecnológico RDT**: desempenho dos pavimentos e relação campo-laboratório. Relatório Final. Nova Lima: VIA040, 2017b. 224p.

ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D5858**: Standard guide for calculating *in situ* equivalent elastic moduli of pavement materials using layered elastic theory. West Conshohocken, PA, 2015. 7p.

BALBO, J. T. **Pavimentação asfáltica**: materiais, projeto e restauração. 1ª ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2007. 560p.

BALBO, J. T.; BARELLA, R. M.; MASSARA, S. O. F. Irregularidade longitudinal de pavimentos: sensibilidade de perfis, correlação entre QI e IRI e comparação de equipamentos. In: ENACOR, 9ª, 2005, Natal. **Anais...** São Paulo: Escola Politécnica da USP, 2005. p. 1-12.

BARKSDALE, R. D. Laboratory evaluation of rutting in base course materials. In: International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, 3<sup>rd</sup>, 1972, London. **Proceedings...** Ann Arbor: University of Michigan, 1972. p. 161-174.

BASTOS, J. B. S. **Considerações sobre a deformação permanente de pavimentos asfálticos no dimensionamento mecanístico-empírico**. 2016. 200f. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

BERNUCCI, L. B.; CHAVES, J. M.; GASPAR, M. S.; SILVA, A. H. M.; VASCONCELOS, K. L. Comportamento mecânico de misturas tipo concreto asfáltico (CA) e mistura asfáltica antirreflexão de trincas (MAAT). In: Encontro de Asfalto, 21º, 2014, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: IBP, 2014. p. 1-12.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**. 3ª ed. Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA, 2008. 501p.

BEZERRA NETO, R. S. **Análise comparativa de pavimentos dimensionados através dos métodos empírico do DNER e mecanístico e proposta de um catálogo simplificado de pavimentos para a região de Campo Grande (MS)**. 2004. 169f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Universidade de São Paulo, São Carlos/SP.

BISCONSINI, D. R. **Avaliação da irregularidade longitudinal dos pavimentos com dados coletados por smartphones**. 2016. 182f. Dissertação (Mestrado em Ciências – Programa de Pós-graduação em Engenharia de Transportes) – Universidade de São Paulo, São Carlos/SP.

CARDOSO, S. H. **Procedure for flexible airfield pavement design based on permanent deformation**. 1987. 810f. Tese (PhD em Engenharia Civil) – University of Maryland, College Park.

CAREY JR., W. N.; IRICK, P. E. The pavement serviceability-performance concept. **Highway Research Board Bulletin**, v. 250, n. 3, p. 40-58, 1960.

CARVALHO, R. L. E.; PINTO, I. E., PREUSSLER, E. S.; VALE, A. F. Caracterização da condição elástica do subleito. In: Reunião Anual de Pavimentação, 32ª, 2000, Brasília. **Anais...** Rio de Janeiro: ABPv, 2000. p. 1119-1146.

CERATTI, J. A. P. **Estudo do comportamento a fadiga de solos estabilizados com cimento para utilização em pavimentos**. 1991. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. *apud* FRANCO, F. A. C. P. **Método de dimensionamento mecanístico-empírico de pavimentos asfálticos – SISPAV**. 2007. 294f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

COUTINHO, J. C. P. **Dimensionamento de pavimento asfáltico: comparação do método do DNER com um método mecanístico-empírico aplicada a um trecho**. 2011. 192f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geotécnica) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.

DANIELESKI, M. L. **Proposta de metodologia para avaliação superficial de pavimentos urbanos**: aplicação à rede viária de Porto Alegre. 2004. 170f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

DEUCHER, F. M. **Avaliação estrutural e funcional e estimativa de vida útil de segmento da SC-390 com camada de base de solo melhorado com cimento**: primeiro ano de abertura ao tráfego. 2016. 145f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

DNER – DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 080/94**: solos – análise granulométrica por peneiramento – método de ensaio. Rio de Janeiro, 1994b. 4p.

\_\_\_\_\_. **DNER-PRO 010/79 – Procedimento A**: avaliação estrutural dos pavimentos flexíveis: procedimento A. Rio de Janeiro, 1979a. 31p.

\_\_\_\_\_. **DNER-PRO 011/79 – Procedimento B**: avaliação estrutural dos pavimentos flexíveis: procedimento B Rio de Janeiro, 1979b. 16p.

\_\_\_\_\_. **DNER-PRO 159/85**: projeto de restauração de pavimentos flexíveis e semi-rígidos. Rio de Janeiro, 1985. 31p.

\_\_\_\_\_. **DNER-PRO 269/94 (TECNAPAV)**: projeto de restauração de pavimentos flexíveis - TECNAPAV. Rio de Janeiro, 1994a. 17p.

\_\_\_\_\_. **Guia de redução de acidentes com base em medidas de engenharia de baixo custo**. Rio de Janeiro: DCTec, 1998. 140p.

DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 005/2003-PRO**: defeitos nos pavimentos flexíveis e semi-rígidos – terminologia. Rio de Janeiro, 2003a. 12p.

\_\_\_\_\_. **DNIT 006/2003-PRO**: avaliação objetiva da superfície de pavimentos flexíveis e semi-rígidos – procedimento. Rio de Janeiro, 2003b. 10p.

\_\_\_\_\_. **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, 2003c. 11p.

\_\_\_\_\_. **DNIT 008/2003-PRO**: levantamento visual contínuo para avaliação da superfície de pavimentos flexíveis e semi-rígidos – procedimento. Rio de Janeiro, 2003d. 11p.

\_\_\_\_\_. **DNIT 009/2003-PRO**: avaliação subjetiva da superfície de pavimentos flexíveis e semi-rígidos – procedimento. Rio de Janeiro, 2003e. 6p.

\_\_\_\_\_. **DNIT 164/2013-ME**: solos – compactação utilizando amostras não trabalhadas – método de ensaio. Rio de Janeiro, 2013. 7p.

\_\_\_\_\_. **DNIT 134/2010-ME**: pavimentação – solos – determinação do módulo de resiliência – método de ensaio. Rio de Janeiro, 2010a. 11p.

\_\_\_\_\_. **DNIT 135/2010-ME**: pavimentação asfáltica – misturas asfálticas – determinação do módulo de resiliência – método de ensaio. Rio de Janeiro, 2010b. 6p.

\_\_\_\_\_. **DNIT 183/2018-ME**: pavimentação asfáltica – ensaio de fadiga por compressão diametral a tensão controlada – método de ensaio. Rio de Janeiro, 2018. 15p.

\_\_\_\_\_. **Manual de estudos de tráfego**. 2ª ed. Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisas Rodoviárias, 2006a. 310p.

\_\_\_\_\_. **Manual de restauração de pavimentos asfálticos**. 1ª ed. Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisas Rodoviárias, 2006c. 384p.

\_\_\_\_\_. **Projeto básico e executivo de engenharia para restauração/manutenção de rodovia - CREMA 2ª etapa**. Recife: JBR Engenharia, 2011. 210p. (DNIT, v. 1).

\_\_\_\_\_. **Roteiro básico para sistemas rodoviários estaduais**. 2ª ed. Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisas Rodoviárias, 2006b. 52p.

FERREIRA, F. A. **Análise do dimensionamento de pavimentos asfálticos utilizando o programa SisPavBR**. 2013. 110f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

FONSECA, L. F. S. **Análise das soluções de pavimentação do programa CREMA 2ª etapa do departamento nacional de infraestrutura de transportes**. 2013. 226f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

FRANCO, F. A. C. P. **Método de dimensionamento mecanístico-empírico de pavimentos asfálticos – SISPAV**. 2007. 294f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

FRANCO, F. A. C. P.; FRITZEN, M. A.; MOTTA, L. M. G. **BackMeDiNa**. v.1.1.0: Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 2018a. Programa computacional.

\_\_\_\_\_. **MeDiNa**. v.1.1.1.0: Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 2018b. Programa computacional.

FRITZEN, M. A. **Desenvolvimento e validação de função de transferência para previsão do dano por fadiga em pavimentos asfálticos**. 2016. 262f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

FRITZEN, M. A.; MOTTA, L. M. G. **Levantamento deflectométrico com o uso do FWD (Falling Weight Deflectometer) no anel viário principal do campus da Universidade Federal de Juiz de Fora**. Relatório Final. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 2018. 20p.

GILLESPIE, T. D. Everything you always wanted to know about the IRI, but were afraid to ask!. In: Road Profile Users Group Meeting, 1992, Lincoln. **Proceedings...** [S.l.: s.n.], 1992. p. 1-13.

GILLESPIE, T. D.; PATERSON, W. D. O.; SAYERS, M. W. **Guidelines for conducting and calibrating road roughness measurements**. World Bank Technical Paper Number 46. Washington, DC: The World Bank, 1986. 96p.

GONÇALVES, F.P. **O diagnóstico e a manutenção dos pavimentos**. Passo Fundo: Universidade de Passo Fundo, 1999. 75f. Material de Curso.

GUIMARÃES, A. C. R. **Um método mecanístico-empírico para a previsão da deformação permanente em solos tropicais constituintes de pavimentos**. 2009, 353f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

HAAS, R. C. G.; HUDSON, W. R. **Pavement management systems**. Original ed. New York, NY: McGraw-Hill, 1978. 457p. *apud* DANIELESKI, M. L. **Proposta de metodologia para avaliação superficial de pavimentos urbanos: aplicação à rede viária de Porto Alegre**. 2004. 170f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

HAAS, R. C. G.; HUDSON, W. R.; ZANIEWSKI, J. P. **Modern pavement management**. Original ed. Malabar, FL: Krieger Publishing Company, 1994. 583p. *apud* NÓBREGA, E. S. **Comparação entre métodos de retroanálise em pavimentos asfálticos**. 2003. 365f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

HEUKELOM, W.; KLOMP, A. J. G. Dynamic testing as a mean of controlling pavements during and after construction. In: International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, 1<sup>st</sup>, 1962, Ann Arbor. **Proceedings...** Ann Arbor: University of Michigan, 1962. p. 495-510.

HUANG, Y. H. **Pavement analysis and design**. 2<sup>nd</sup> ed. New Jersey, NJ: Prentice Hall Inc., 2003. 792p. *apud* MATTOS, J. R. G. **Monitoramento e análise do desempenho de pavimentos flexíveis da ampliação da rodovia BR-290/RS: a implantação do projeto rede temática de asfalto no Rio Grande do Sul**. 2014. 232f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

JUNQUEIRA, A. S. **Avaliação estrutural do pavimento do anel viário da Universidade Federal de Juiz de Fora pelo método da viga Benkelman**. 2014. 46f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora.

KARAMIHAS, S. M.; SAYERS, M. W. **The little book of profiling**: basic information about measuring and interpreting road profiles. Ann Arbor: Transportation Research Institute,

University of Michigan, 1998. Disponível em: <http://www.umtri.umich.edu/content/LittleBook98R.pdf>. Acesso em: 25 Nov. 2018

LOPES, F. M. **Pavimentos flexíveis com revestimento asfáltico**: avaliação estrutural a partir dos parâmetros de curvatura da bacia de deformação. 2012. 372f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

LUIS, A. D. **Utilização do equipamento tipo falling weight deflectometer para medição de deflexão recuperável para diferentes tipos de pavimentos asfálticos**. 2009. 209f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

MACÊDO, J. A. G. **Interpretação de ensaios deflectométricos para avaliação estrutural de pavimentos flexíveis**. 1996. 456f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

MACÊDO, J. A. G.; MEDINA, J.; MOTTA, L. M. G. Utilização de ensaios defletométricos e de laboratório para avaliação estrutural de pavimentos. In: Reunião Anual de Pavimentação, 28<sup>a</sup>, 1994, Belo Horizonte. **Anais...** Rio de Janeiro: ABPv, 1994. p. 595-625.

MACHADO, T. F. O. **Estudo de soluções para reforço do pavimento do anel viário da Universidade Federal de Juiz de Fora**. 2016. 91f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora.

MARANGON, M. **Notas de aula da disciplina elementos de geologia**. Juiz de Fora: Universidade Federal de Juiz de Fora, 2009. 93p.

MARCON, A. F.; VILLELA, A. R. A. Avaliação estrutural de pavimentos utilizando um método simplificado de retroanálise – Retran-2CL. In: Reunião Anual de Pavimentação, 33<sup>a</sup>, 2001, Florianópolis. **Anais...** Rio de Janeiro: ABPv, 2001. p. 622-633.

MATTOS, J. R. G. **Monitoramento e análise do desempenho de pavimentos flexíveis da ampliação da rodovia BR-290/RS**: a implantação do projeto rede temática de asfalto no Rio Grande do Sul. 2014. 232f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

MEDINA, J. **Mecânica dos pavimentos**. 1<sup>a</sup> ed. Rio de Janeiro: UFRJ, 1997. 380p.

MEDINA, J.; MOTTA, L. M. G. **Mecânica dos pavimentos**. 2<sup>a</sup> ed. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 2005. 572p.

MEDINA, J.; MOTTA, L. M. G. **Mecânica dos pavimentos**. 3<sup>a</sup> ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2015. 640p.

MONISMITH, C. L.; OGAWA, N; FREEME, C. R. Permanent deformation characteristics of subgrade soils due to repeated loading. In: Annual Meeting of TRB, 54<sup>th</sup>, 1975, Washington DC. **Proceedings...** [S.l.: s.n.], 1975. p. 1-17 *apud* FRANCO, F. A. C. P. **Método de dimensionamento mecanístico-empírico de pavimentos asfálticos – SISPAV**. 2007. 294f.

Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

MORAES, C. G. **Análise de bacias deflectométricas obtidas por 4 equipamentos do tipo falling weight deflectometer (FWD)**. 2015. 283f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

MOTTA, L. M. G. **Método de dimensionamento de pavimentos flexíveis: critério de confiabilidade e ensaios de cargas repetidas**. 1991. 366f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

MOTTA, L. M. G.; NÓBREGA, E. S. Comparação de métodos de retroanálise e sua influência no dimensionamento do reforço. In: Reunião Anual de Pavimentação, 34<sup>a</sup>, 2003, Campinas. **Anais...** Rio de Janeiro: ABPv, 2003. p. 1-15.

NASCIMENTO, L. A. H. **Implementation and validation of the viscoelastic continuum damage theory for asphalt mixture and pavement analysis in Brazil**. 2015, 304f. Tese (PhD em Engenharia Civil) – North Carolina State University, Raleigh.

NEUMANN, G. P. **Um exemplo de dosagem de concreto asfáltico por meio da metodologia SUPERPAVE**. 2018. 61f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora.

NÓBREGA, E. S. **Comparação entre métodos de retroanálise em pavimentos asfálticos**. 2003. 365f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

PINTO, R. L. **Comparação entre o dimensionamento de reforço de pavimentos asfálticos pelo método mecanístico-empírico e os métodos DNER-PRO 11/79 e DNER-PRO 269/94 para um segmento homogêneo da BR-222/CE e análise de sensibilidade do programa SisPavBR**. 2016. 111f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

PINTO, S.; PREUSSLER, E S. **Pavimentação rodoviária: conceitos fundamentais sobre pavimentos flexíveis**. 2<sup>a</sup> ed. Rio de Janeiro: Copiarte, 2002. 259p.

PRESTES, M. P. **Métodos de avaliação visual de pavimentos flexíveis: um estudo comparativo**. 2001. 127f. Dissertação (Mestrado Profissionalizante em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

PREUSSLER, E. S. **Estudo da deformação resiliente de pavimentos flexíveis e aplicação ao projeto de camadas de reforço**. 1983. 252f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

REDE TEMÁTICA DE ASFALTO. **Manual de execução de trechos monitorados**. Rio de Janeiro: Rede Temática de Asfalto, 2010. 95p.

RODRIGUES, R. M. **Engenharia de pavimentos: parte I – projeto de pavimentos**. São José dos Campos: Instituto Tecnológico da Aeronáutica, 2007a. 218f. Material de Curso.

\_\_\_\_\_. **Engenharia de pavimentos: parte II – gerência de pavimentos**. São José dos Campos: Instituto Tecnológico da Aeronáutica, 2007b. 207f. Material de Curso.

SILVA, R. C. **Levantamento visual contínuo informatizado (LVCI) pelo método da varredura – procedimento**. Juiz de Fora: ANTT, 2017. Disponível em: [http://www.antt.gov.br/backend/galeria/arquivos/V\\_\\_NORMA\\_LVCI\\_MET\\_VARREDURA.pdf](http://www.antt.gov.br/backend/galeria/arquivos/V__NORMA_LVCI_MET_VARREDURA.pdf). Acesso em: 12 Out. 2018

SOUZA JÚNIOR, J. G. **Aplicação do novo método de dimensionamento de pavimentos asfálticos a trechos de uma rodovia federal**. 2018. 219f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

TRICHÊS, G. Propriedades mecânicas de misturas de concreto cimento compactado a rolo. In: Reunião Anual de Pavimentação, 28<sup>a</sup>, 1994, Belo Horizonte. **Anais...** Rio de Janeiro: ABPv, 1994. p. 897-919.

TYROLIT. **Drill rig DRU160: operating instructions**. Pfäffikon, 2009. 14p.

UZAN, J. **JULEA – Jacob Uzan Layered Elastic Analysis Program**. USA: 1978. Programa computacional. *apud* FRANCO, F. A. C. P. **Método de dimensionamento mecanístico-empírico de pavimentos asfálticos – SISPAV**. 2007. 294f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

## Apêndice A – Planilha auxiliar do método das diferenças acumuladas para definição de segmentos homogêneos

Estaca Número	$D0 \mu m$	$Dm$	$\Delta li$	$\Sigma \Delta li$	$A_i$	$\Sigma A_i$	$Z_i$
0	410,0	0,0	0	0	0	0	0,00
1	421,0	415,5	20	20	8310	8310	-466,83
2	481,0	451,0	20	40	9020	17330	-223,66
3	422,0	451,5	20	60	9030	26360	29,51
5	361,0	391,5	40	100	15660	42020	-1864,14
6	289,0	325,0	20	120	6500	48520	-4140,97
7	332,0	310,5	20	140	6210	54730	-6707,80
8	422,0	377,0	20	160	7540	62270	-7944,63
9	550,0	486,0	20	180	9720	71990	-7001,46
10	498,0	524,0	20	200	10480	82470	-5298,29
11	585,0	541,5	20	220	10830	93300	-3245,11
13	326,0	455,5	40	260	18220	111520	-2578,77
14	294,0	310,0	20	280	6200	117720	-5155,60
15	343,0	318,5	20	300	6370	124090	-7562,43
16	253,0	298,0	20	320	5960	130050	-10379,26
17	290,0	271,5	20	340	5430	135480	-13726,09
19	309,0	299,5	40	380	11980	147460	-19299,74
20	330,0	319,5	20	400	6390	153850	-21686,57
21	429,0	379,5	20	420	7590	161440	-22873,40
22	369,0	399,0	20	440	7980	169420	-23670,23
23	357,0	363,0	20	460	7260	176680	-25187,06
24	227,0	292,0	20	480	5840	182520	-28123,89
25	149,0	188,0	20	500	3760	186280	-33140,71
26	268,0	208,5	20	520	4170	190450	-37747,54
27	258,0	263,0	20	540	5260	195710	-41264,37
28	502,0	380,0	20	560	7600	203310	-42441,20
29	554,0	528,0	20	580	10560	213870	-40658,03
31	777,0	665,5	40	620	26620	240490	-31591,69
32	976,0	876,5	20	640	17530	258020	-22838,51
33	915,0	945,5	20	660	18910	276930	-12705,34
34	472,0	693,5	20	680	13870	290800	-7612,17
35	514,0	493,0	20	700	9860	300660	-6529,00
36	432,0	473,0	20	720	9460	310120	-5845,83
37	365,0	398,5	20	740	7970	318090	-6652,66
38	415,0	390,0	20	760	7800	325890	-7629,49
39	319,0	367,0	20	780	7340	333230	-9066,31
40	324,0	321,5	20	800	6430	339660	-11413,14
41	289,0	306,5	20	820	6130	345790	-14059,97
43	523,0	406,0	40	860	16240	362030	-15373,63
44	329,0	426,0	20	880	8520	370550	-15630,46
45	357,0	343,0	20	900	6860	377410	-17547,29
46	401,0	379,0	20	920	7580	384990	-18744,11
47	342,0	371,5	20	940	7430	392420	-20090,94
48	326,0	334,0	20	960	6680	399100	-22187,77
49	327,0	326,5	20	980	6530	405630	-24434,60
50	308,0	317,5	20	1000	6350	411980	-26861,43
51	478,0	393,0	20	1020	7860	419840	-27778,26
52	419,0	448,5	20	1040	8970	428810	-27585,09
53	446,0	432,5	20	1060	8650	437460	-27711,91
54	529,0	487,5	20	1080	9750	447210	-26738,74

55	533,0	531,0	20	1100	10620	457830	-24895,57
56	627,0	580,0	20	1120	11600	469430	-22072,40
57	506,0	566,5	20	1140	11330	480760	-19519,23
59	542,0	524,0	40	1180	20960	501720	-16112,89
60	602,0	572,0	20	1200	11440	513160	-13449,71
61+3m	547,0	574,5	23	1223	13213,5	526373,5	-10329,57
62	470,0	508,5	20	1243	10170	536543,5	-8936,40
63	632,0	551,0	20	1263	11020	547563,5	-6693,22
64	621,0	626,5	20	1283	12530	560093,5	-2940,05
65	457,0	539,0	20	1303	10780	570873,5	-936,88
66	419,0	438,0	20	1323	8760	579633,5	-953,71
67	411,0	415,0	20	1343	8300	587933,5	-1430,54
68	357,0	384,0	20	1363	7680	595613,5	-2527,37
69	446,0	401,5	20	1383	8030	603643,5	-3274,20
70	471,0	458,5	20	1403	9170	612813,5	-2881,02
71	431,0	451,0	20	1423	9020	621833,5	-2637,85
72	484,0	457,5	20	1443	9150	630983,5	-2264,68
73	395,0	439,5	20	1463	8790	639773,5	-2251,51
74	369,0	382,0	20	1483	7640	647413,5	-3388,34
75	387,0	378,0	20	1503	7560	654973,5	-4605,17
76	426,0	406,5	20	1523	8130	663103,5	-5252,00
77	429,0	427,5	20	1543	8550	671653,5	-5478,82
78	395,0	412,0	20	1563	8240	679893,5	-6015,65
79	383,0	389,0	20	1583	7780	687673,5	-7012,48
80	497,0	440,0	20	1603	8800	696473,5	-6989,31
81	536,0	516,5	20	1623	10330	706803,5	-5436,14
82	653,0	594,5	20	1643	11890	718693,5	-2322,97
83	775,0	714,0	20	1663	14280	732973,5	3180,20
84	736,0	755,5	20	1683	15110	748083,5	9513,38
85	607,0	671,5	20	1703	13430	761513,5	14166,55
86	487,0	547,0	20	1723	10940	772453,5	16329,72
87	299,0	393,0	20	1743	7860	780313,5	15412,89
88	344,0	321,5	20	1763	6430	786743,5	13066,06
88+17m	527,0	435,5	17	1780	7403,5	794147	13009,26
90	204,0	365,5	20	1800	7310	801457	11542,43
91	221,0	212,5	20	1820	4250	805707	7015,60
92	356,0	288,5	20	1840	5770	811477	4008,77
93	381,0	368,5	20	1860	7370	818847	2601,94
95	449,0	415,0	40	1900	16600	835447	1648,29
96	372,0	410,5	20	1920	8210	843657	1081,46
97	443,0	407,5	20	1940	8150	851807	454,63
98	482,0	462,5	20	1960	9250	861057	927,80
99	431,0	456,5	20	1980	9130	870187	1280,97
101	473,0	452,0	40	2020	18080	888267	1807,31
102	414,0	443,5	20	2040	8870	897137	1900,49
103	353,0	383,5	20	2060	7670	904807	793,66
104	437,0	395,0	20	2080	7900	912707	-83,17
105	449,0	443,0	20	2100	8860	921567	0,00

$\text{tg}\alpha = 438,84$

## Apêndice B – Relatórios completos de análise para a solução de reforço escolhida

### B.1 – Segmento 01

#### Programa MeDiNa v.1.1.1.0 - nov/2018

Cópia registrada para Thiago Fávero (thiago.favero@engenharia.ufjf.br), da empresa UFJF.

#### Dimensionamento do reforço do pavimento

Empresa: UFJF

Nome do Projeto: Dimensionamento de reforço para o anel viário da UFJF

Responsável pelo projeto: Thiago Fávero

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

Tipo de via: Sistema Local

Nível de confiabilidade: 65%

Período de projeto: 10 anos.

Análise realizada em 18/02/2019 às 09:16:21 no modo: Projeto de Reforço

Área trincada prevista no pavimento no fim do período: 18,8%

**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 CAP 50/70 Reduc	5,0	Resiliente Linear MR = 5963 MPa	0,30
2	CAMADA ASFÁLTICA EXISTENTE Camada Asfáltica Superficial	8,0	Resiliente Linear MR = 6023 MPa	0,30
3	CAMADA EXISTENTE Camada em Solo Natural	10,0	Resiliente Linear MR = 343 MPa	0,35
4	CAMADA EXISTENTE Camada em Solo Natural	20,0	Resiliente Linear MR = 341 MPa	0,35
5	CAMADA EXISTENTE Camada em Solo Natural	40,0	Resiliente Linear MR = 400 MPa	0,45
6	SUBLEITO Subleito	SL	Resiliente Linear MR = 303 MPa	0,45

#### Materiais

1 - CONCRETO ASFÁLTICO: CAP 50/70 Reduc

##### Propriedades

Tipo de CAP = 50/70  
 Massa específica (g/cm<sup>3</sup>) = 2,41  
 Resistência à tração (MPa) = ...  
 Teor de asfalto (%) = 5,9  
 Volume de vazios (%) = 4,0  
 Faixa Granulométrica = #19,0mm  
 Abrasão Los Angeles (%) = ...  
 Norma ou Especificação = DNIT ES 31

##### Modelos

Ensaio de Fadiga  
 - Modelo:  $k_1 \cdot (et \wedge k_2)$   
 - Coeficiente de Regressão (k1):  $\geq 7,4e-11$   
 - Coeficiente de Regressão (k2):  $\geq -3.3104$   
 - Classe de Fadiga:  $\geq 0$   
 - FFM (100 $\mu$  a 250 $\mu$ ):  $\geq 0,51$   
 Flow Number Mínimo  
 - Condição de Tráfego Normal:  $\geq 176$  ciclos  
 - Condição de Tráfego Severa:  $\geq 489$  ciclos

**2 - CAMADA ASFÁLTICA EXISTENTE: Camada Asfáltica Superficial****Propriedades****Modelos**

Espessura de fresagem (cm) = 0,0  
 Espessura de campo (cm) = 8,0  
 Área Trincada (%) = 39,95  
 IRI (m/km) = 4,31  
 Deflexão característica (0,01mm) = 47,46  
 Idade do pavimento (anos) = 27  
 Módulo mínimo (MPa) = 3289  
 Módulo máximo (MPa) = 7600  
 MR - Desvio Padrão (MPa) = 1331,65  
 Coef de Variação do Módulo (%) = 22,11  
 Comentários = ...

**3 - CAMADA EXISTENTE: Camada em Solo Natural****Propriedades****Modelos**

Módulo mínimo (MPa) = 123  
 Módulo máximo (MPa) = 570  
 MR - Desvio Padrão (MPa) = 124,05  
 Coef de Variação do Módulo (%) = 36,08  
 Comentários = ...

**4 - CAMADA EXISTENTE: Camada em Solo Natural****Propriedades****Modelos**

Módulo mínimo (MPa) = 167  
 Módulo máximo (MPa) = 570  
 MR - Desvio Padrão (MPa) = 127,45  
 Coef de Variação do Módulo (%) = 37,33  
 Comentários = ...

**5 - CAMADA EXISTENTE: Camada em Solo Natural****Propriedades****Modelos**

Módulo mínimo (MPa) = 193  
 Módulo máximo (MPa) = 570  
 MR - Desvio Padrão (MPa) = 119,44  
 Coef de Variação do Módulo (%) = 29,87  
 Comentários = ...

**6 - SUBLEITO: Subleito****Propriedades****Modelos**

Módulo mínimo (MPa) = 193  
 Módulo máximo (MPa) = 400  
 MR - Desvio Padrão (MPa) = 62,19  
 Coef de Variação do Módulo (%) = 20,53  
 Comentários = ...

**Definição do tráfego**

Volume Médio Diário no ano de abertura do tráfego: VMD (1º ano) = 9300  
 Fator de veículo no ano de abertura do tráfego: FV = 0,10  
 Número de passagens anual do eixo padrão (1º ano): 3,22e+05  
 % Veículos na faixa de projeto: 100%

Número de passagens anual do eixo padrão na faixa de projeto: 3,22e+05  
 Taxa de crescimento do tráfego: 1,0%  
 Número Equivalente total de passagens do eixo padrão na faixa de projeto: N Eq = 3,37e+06

Eixo	Tipo	FE	Carga (ton)	FC	FVi
1	Eixo Simples	90%	2,00	0,003	0,003
2	Eixo Simples	5%	5,00	0,134	0,007
3	Eixo simples de roda dupla	5%	9,00	1,702	0,085

### Evolução dos danos no pavimento

Mês	N Equiv	Área Trincada
1	2,675e+04	0,46%
6	1,608e+05	1,02%
12	3,225e+05	1,52%
18	4,849e+05	2,02%
24	6,482e+05	2,53%
30	8,123e+05	3,08%
36	9,771e+05	3,67%
42	1,143e+06	4,31%
48	1,309e+06	5,00%
54	1,477e+06	5,75%
60	1,645e+06	6,57%
66	1,814e+06	7,45%
72	1,984e+06	8,40%
78	2,155e+06	9,43%
84	2,326e+06	10,53%
90	2,499e+06	11,71%
96	2,672e+06	12,97%
102	2,846e+06	14,31%
108	3,021e+06	15,73%
114	3,197e+06	17,23%
120	3,374e+06	18,82%

### 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 - CAP 50/70 Reduc

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	26	21	18	14	11	8	7	5	5
FWD Raio = 15,0 cm Carga = 4,0 ton	16	12	10	7	5	3	3	2	2

## B.2 – Segmento 02

### Programa MeDiNa v.1.1.1.0 - nov/2018

Cópia registrada para Thiago Fávero (thiago.favero@engenharia.uff.br), da empresa UFJF.

#### Dimensionamento do reforço do pavimento

Empresa:  
Nome do Projeto:  
Responsável pelo projeto:

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

Tipo de via: Sistema Local  
Nível de confiabilidade: 65%  
Período de projeto: 10 anos.

Análise realizada em 18/02/2019 às 09:18:23 no modo: Projeto de Reforço  
Área trincada prevista no pavimento no fim do período: 15,6%  
**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 CAP 50/70 Reduc	5,0	Resiliente Linear MR = 5963 MPa	0,30
2	ANTI-REFLEXÃO DE TRINCAS CAR	1,5	Resiliente Linear MR = 3000 MPa	0,25
3	CAMADA ASFÁLTICA EXISTENTE Camada Asfáltica Superficial	8,0	Resiliente Linear MR = 4910 MPa	0,30
4	CAMADA EXISTENTE Camada em Solo Natural	10,0	Resiliente Linear MR = 253 MPa	0,35
5	CAMADA EXISTENTE Camada em Solo Natural	20,0	Resiliente Linear MR = 304 MPa	0,35
6	CAMADA EXISTENTE Camada em Solo Natural	40,0	Resiliente Linear MR = 369 MPa	0,45
7	SUBLEITO Subleito	SL	Resiliente Linear MR = 297 MPa	0,45

#### Materiais

##### 1 - CONCRETO ASFÁLTICO: CAP 50/70 Reduc

###### Propriedades

Tipo de CAP = 50/70  
Massa específica (g/cm<sup>3</sup>) = 2,41  
Resistência à tração (MPa) = ...  
Teor de asfalto (%) = 5,9  
Volume de vazios (%) = 4,0  
Faixa Granulométrica = #19,0mm  
Abrasão Los Angeles (%) = ...  
Norma ou Especificação = DNIT ES 31

###### Modelos

Ensaio de Fadiga  
- Modelo:  $k_1 \cdot (e \cdot k_2)$   
- Coeficiente de Regressão (k1):  $\geq 7,4e-11$   
- Coeficiente de Regressão (k2):  $\geq -3.3104$   
- Classe de Fadiga:  $\geq 0$   
- FFM (100µ a 250µ):  $\geq 0,51$   
Flow Number Mínimo  
- Condição de Tráfego Normal:  $\geq 176$  ciclos  
- Condição de Tráfego Severa:  $\geq 489$  ciclos

## 2 - ANTI-REFLEXÃO DE TRINCAS: CAR

**Propriedades****Modelos**

Descrição do Material = ...  
 Massa específica (g/cm<sup>3</sup>) = 2,4  
 Norma ou Especificação = ...

## 3 - CAMADA ASFÁLTICA EXISTENTE: Camada Asfáltica Superficial

**Propriedades****Modelos**

Espessura de fresagem (cm) = 0,0  
 Espessura de campo (cm) = 8,0  
 Área Trincada (%) = 54,37  
 IRI (m/km) = 4,16  
 Deflexão característica (0,01mm) = 58,31  
 Idade do pavimento (anos) = 27  
 Módulo mínimo (MPa) = 2960  
 Módulo máximo (MPa) = 6967  
 MR - Desvio Padrão (MPa) = 1431,07  
 Coef de Variação do Módulo (%) = 29,15  
 Comentários = ...

## 4 - CAMADA EXISTENTE: Camada em Solo Natural

**Propriedades****Modelos**

Módulo mínimo (MPa) = 194  
 Módulo máximo (MPa) = 380  
 MR - Desvio Padrão (MPa) = 73,65  
 Coef de Variação do Módulo (%) = 29,16  
 Comentários = ...

## 5 - CAMADA EXISTENTE: Camada em Solo Natural

**Propriedades****Modelos**

Módulo mínimo (MPa) = 167  
 Módulo máximo (MPa) = 471  
 MR - Desvio Padrão (MPa) = 114,27  
 Coef de Variação do Módulo (%) = 37,56  
 Comentários = ...

## 6 - CAMADA EXISTENTE: Camada em Solo Natural

**Propriedades****Modelos**

Módulo mínimo (MPa) = 167  
 Módulo máximo (MPa) = 633  
 MR - Desvio Padrão (MPa) = 185,94  
 Coef de Variação do Módulo (%) = 50,45  
 Comentários = ...

## 7 - SUBLEITO: Subleito

**Propriedades****Modelos**

Módulo mínimo (MPa) = 167  
 Módulo máximo (MPa) = 381  
 MR - Desvio Padrão (MPa) = 107,41  
 Coef de Variação do Módulo (%) = 36,17  
 Comentários = ...

### Definição do tráfego

Volume Médio Diário no ano de abertura do tráfego: VMD (1º ano) = 9300

Fator de veículo no ano de abertura do tráfego: FV = 0,10

Número de passagens anual do eixo padrão (1º ano): 3,22e+05

% Veículos na faixa de projeto: 100%

Número de passagens anual do eixo padrão na faixa de projeto: 3,22e+05

Taxa de crescimento do tráfego: 1,0%

Número Equivalente total de passagens do eixo padrão na faixa de projeto: N Eq = 3,37e+06

Eixo	Tipo	FE	Carga (ton)	FC	FVi
1	Eixo Simples	90%	2,00	0,003	0,003
2	Eixo Simples	5%	5,00	0,134	0,007
3	Eixo simples de roda dupla	5%	9,00	1,702	0,085

### Evolução dos danos no pavimento

Mês	N Equiv	Área Trincada
1	2,675e+04	0,44%
6	1,608e+05	0,96%
12	3,225e+05	1,42%
18	4,849e+05	1,86%
24	6,482e+05	2,31%
30	8,123e+05	2,78%
36	9,771e+05	3,29%
42	1,143e+06	3,83%
48	1,309e+06	4,41%
54	1,477e+06	5,04%
60	1,645e+06	5,71%
66	1,814e+06	6,44%
72	1,984e+06	7,22%
78	2,155e+06	8,05%
84	2,326e+06	8,95%
90	2,499e+06	9,90%
96	2,672e+06	10,92%
102	2,846e+06	12,00%
108	3,021e+06	13,15%
114	3,197e+06	14,36%
120	3,374e+06	15,64%

### 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 - CAP 50/70 Reduc

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
-------------	------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	--------------------	--------------------	--------------------

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	27	22	19	15	12	8	7	6	5
FWD Raio = 15,0 cm Carga = 4,0 ton	17	13	10	8	6	4	3	2	2

## B.3 – Segmento 03

### Programa MeDiNa v.1.1.1.0 - nov/2018

Cópia registrada para Thiago Fávero (thiago.favero@engenharia.ufjf.br), da empresa UFJF.

#### Dimensionamento do reforço do pavimento

Empresa:  
Nome do Projeto:  
Responsável pelo projeto:

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

Tipo de via: **Sistema Local**  
Nível de confiabilidade: 65%  
Período de projeto: 10 anos.

Análise realizada em 18/02/2019 às 09:18:58 no modo: Projeto de Reforço  
Área trincada prevista no pavimento no fim do período: 14,1%  
**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 CAP 50/70 Reduc	5,0	Resiliente Linear MR = 5963 MPa	0,30
2	CAMADA ASFÁLTICA EXISTENTE Camada Asfáltica Superficial	8,0	Resiliente Linear MR = 7099 MPa	0,30
3	CAMADA EXISTENTE Camada em Solo Natural	10,0	Resiliente Linear MR = 480 MPa	0,35
4	CAMADA EXISTENTE Camada em Solo Natural	20,0	Resiliente Linear MR = 466 MPa	0,35
5	CAMADA EXISTENTE Camada em Solo Natural	40,0	Resiliente Linear MR = 478 MPa	0,45
6	SUBLEITO Subleito	SL	Resiliente Linear MR = 369 MPa	0,45

#### Materiais

1 - CONCRETO ASFÁLTICO: CAP 50/70 Reduc

##### Propriedades

Tipo de CAP = 50/70  
Massa específica (g/cm<sup>3</sup>) = 2,41  
Resistência à tração (MPa) = ...  
Teor de asfalto (%) = 5,9  
Volume de vazios (%) = 4,0  
Faixa Granulométrica = #19,0mm  
Abrasão Los Angeles (%) = ...  
Norma ou Especificação = DNIT ES 31

##### Modelos

Ensaio de Fadiga  
- Modelo:  $k_1 \cdot (e \cdot t)^{k_2}$   
- Coeficiente de Regressão (k1):  $\geq 7,4e-11$   
- Coeficiente de Regressão (k2):  $\geq -3,3104$   
- Classe de Fadiga:  $\geq 0$   
- FFM (100µ a 250µ):  $\geq 0,51$   
Flow Number Mínimo  
- Condição de Tráfego Normal:  $\geq 176$  ciclos  
- Condição de Tráfego Severa:  $\geq 489$  ciclos

## 2 - CAMADA ASFÁLTICA EXISTENTE: Camada Asfáltica Superficial

## Propriedades

Espessura de fresagem (cm) = 0,0  
 Espessura de campo (cm) = 8,0  
 Área Trincada (%) = 35,78  
 IRI (m/km) = 3,39  
 Deflexão característica (0,01mm) = 40,49  
 Idade do pavimento (anos) = 27  
 Módulo mínimo (MPa) = 3333  
 Módulo máximo (MPa) = 9500  
 MR - Desvio Padrão (MPa) = 1584,53  
 Coef de Variação do Módulo (%) = 22,32  
 Comentários = ...

## Modelos

## 3 - CAMADA EXISTENTE: Camada em Solo Natural

## Propriedades

Módulo mínimo (MPa) = 258  
 Módulo máximo (MPa) = 697  
 MR - Desvio Padrão (MPa) = 127,27  
 Coef de Variação do Módulo (%) = 26,49  
 Comentários = ...

## Modelos

## 4 - CAMADA EXISTENTE: Camada em Solo Natural

## Propriedades

Módulo mínimo (MPa) = 257  
 Módulo máximo (MPa) = 697  
 MR - Desvio Padrão (MPa) = 155,79  
 Coef de Variação do Módulo (%) = 33,40  
 Comentários = ...

## Modelos

## 5 - CAMADA EXISTENTE: Camada em Solo Natural

## Propriedades

Módulo mínimo (MPa) = 222  
 Módulo máximo (MPa) = 697  
 MR - Desvio Padrão (MPa) = 151,70  
 Coef de Variação do Módulo (%) = 31,74  
 Comentários = ...

## Modelos

## 6 - SUBLEITO: Subleito

## Propriedades

Módulo mínimo (MPa) = 250  
 Módulo máximo (MPa) = 471  
 MR - Desvio Padrão (MPa) = 67,26  
 Coef de Variação do Módulo (%) = 18,24  
 Comentários = ...

## Modelos

## Definição do tráfego

Volume Médio Diário no ano de abertura do tráfego: VMD (1º ano) = 9300  
 Fator de veículo no ano de abertura do tráfego: FV = 0,10  
 Número de passagens anual do eixo padrão (1º ano): 3,22e+05  
 % Veículos na faixa de projeto: 100%

Número de passagens anual do eixo padrão na faixa de projeto: 3,22e+05  
 Taxa de crescimento do tráfego: 1,0%  
 Número Equivalente total de passagens do eixo padrão na faixa de projeto: N Eq = 3,37e+06

Eixo	Tipo	FE	Carga (ton)	FC	FVi
1	Eixo Simples	90%	2,00	0,003	0,003
2	Eixo Simples	5%	5,00	0,134	0,007
3	Eixo simples de roda dupla	5%	9,00	1,702	0,085

### Evolução dos danos no pavimento

Mês	N Equiv	Área Trincada
1	2,675e+04	0,43%
6	1,608e+05	0,93%
12	3,225e+05	1,36%
18	4,849e+05	1,78%
24	6,482e+05	2,19%
30	8,123e+05	2,63%
36	9,771e+05	3,10%
42	1,143e+06	3,59%
48	1,309e+06	4,12%
54	1,477e+06	4,68%
60	1,645e+06	5,29%
66	1,814e+06	5,94%
72	1,984e+06	6,64%
78	2,155e+06	7,38%
84	2,326e+06	8,18%
90	2,499e+06	9,02%
96	2,672e+06	9,92%
102	2,846e+06	10,88%
108	3,021e+06	11,90%
114	3,197e+06	12,97%
120	3,374e+06	14,10%

### 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 - CAP 50/70 Reduc

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	21	17	14	11	9	7	5	5	4
FWD Raio = 15,0 cm Carga = 4,0 ton	14	10	8	6	4	3	2	2	1

## B.4 – Segmento 04

### Programa MeDiNa v.1.1.1.0 - nov/2018

Cópia registrada para Thiago Fávero (thiago.favero@engenharia.uff.br), da empresa UFJF.

#### Dimensionamento do reforço do pavimento

Empresa:  
Nome do Projeto:  
Responsável pelo projeto:

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

Tipo de via: Sistema Local  
Nível de confiabilidade: 65%  
Período de projeto: 10 anos.

Análise realizada em 18/02/2019 às 09:19:49 no modo: Projeto de Reforço  
Área trincada prevista no pavimento no fim do período: 19,0%  
**Análise encerrou por haver atingido a espessura mínima da camada.**

**ATENÇÃO:** O programa MeDiNa é apenas uma ferramenta de cálculo que auxilia o projetista na 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 CAP 50/70 Reduc	5,0	Resiliente Linear MR = 5963 MPa	0,30
2	ANTI-REFLEXÃO DE TRINCAS CAR	1,5	Resiliente Linear MR = 3000 MPa	0,25
3	CAMADA ASFÁLTICA EXISTENTE Camada Asfáltica Superficial	8,0	Resiliente Linear MR = 4734 MPa	0,30
4	CAMADA EXISTENTE Camada em Solo Natural	10,0	Resiliente Linear MR = 262 MPa	0,35
5	CAMADA EXISTENTE Camada em Solo Natural	20,0	Resiliente Linear MR = 221 MPa	0,35
6	CAMADA EXISTENTE Camada em Solo Natural	40,0	Resiliente Linear MR = 226 MPa	0,45
7	SUBLEITO Subleito	SL	Resiliente Linear MR = 202 MPa	0,45

#### Materiais

1 - CONCRETO ASFÁLTICO: CAP 50/70 Reduc

##### Propriedades

Tipo de CAP = 50/70  
Massa específica (g/cm<sup>3</sup>) = 2,41  
Resistência à tração (MPa) = ...  
Teor de asfalto (%) = 5,9  
Volume de vazios (%) = 4,0  
Faixa Granulométrica = #19,0mm  
Abrasão Los Angeles (%) = ...  
Norma ou Especificação = DNIT ES 31

##### Modelos

Ensaio de Fadiga  
-Modelo:  $k1 \cdot (et \wedge k2)$   
-Coeficiente de Regressão (k1):  $\geq 7,4e-11$   
-Coeficiente de Regressão (k2):  $\geq -3.3104$   
-Classe de Fadiga:  $\geq 0$   
-FFM (100 $\mu$  a 250 $\mu$ ):  $\geq 0,51$   
Flow Number Mínimo  
- Condição de Tráfego Normal:  $\geq 176$  ciclos  
- Condição de Tráfego Severa:  $\geq 489$  ciclos

## 2 - ANTI-REFLEXÃO DE TRINCAS: CAR

**Propriedades****Modelos**

Descrição do Material = ...  
 Massa específica (g/cm<sup>3</sup>) = 2,4  
 Norma ou Especificação = ...

## 3 - CAMADA ASFÁLTICA EXISTENTE: Camada Asfáltica Superficial

**Propriedades****Modelos**

Espessura de fresagem (cm) = 0,0  
 Espessura de campo (cm) = 8,0  
 Área Trincada (%) = 35,60  
 IRI (m/km) = 4,14  
 Deflexão característica (0,01mm) = 88,59  
 Idade do pavimento (anos) = 27  
 Módulo mínimo (MPa) = 3167  
 Módulo máximo (MPa) = 5771  
 MR - Desvio Padrão (MPa) = 849,37  
 Coef de Variação do Módulo (%) = 17,94  
 Comentários = ...

## 4 - CAMADA EXISTENTE: Camada em Solo Natural

**Propriedades****Modelos**

Módulo mínimo (MPa) = 64  
 Módulo máximo (MPa) = 471  
 MR - Desvio Padrão (MPa) = 130,65  
 Coef de Variação do Módulo (%) = 49,95  
 Comentários = ...

## 5 - CAMADA EXISTENTE: Camada em Solo Natural

**Propriedades****Modelos**

Módulo mínimo (MPa) = 91  
 Módulo máximo (MPa) = 293  
 MR - Desvio Padrão (MPa) = 67,40  
 Coef de Variação do Módulo (%) = 30,56  
 Comentários = ...

## 6 - CAMADA EXISTENTE: Camada em Solo Natural

**Propriedades****Modelos**

Módulo mínimo (MPa) = 67  
 Módulo máximo (MPa) = 507  
 MR - Desvio Padrão (MPa) = 161,02  
 Coef de Variação do Módulo (%) = 71,34  
 Comentários = ...

## 7 - SUBLEITO: Subleito

**Propriedades****Modelos**

Módulo mínimo (MPa) = 99  
 Módulo máximo (MPa) = 293  
 MR - Desvio Padrão (MPa) = 62,25  
 Coef de Variação do Módulo (%) = 34,26  
 Comentários = ...

### Definição do tráfego

Volume Médio Diário no ano de abertura do tráfego: VMD (1º ano) = 9300

Fator de veículo no ano de abertura do tráfego: FV = 0,10

Número de passagens anual do eixo padrão (1º ano): 3,22e+05

% Veículos na faixa de projeto: 100%

Número de passagens anual do eixo padrão na faixa de projeto: 3,22e+05

Taxa de crescimento do tráfego: 1,0%

Número Equivalente total de passagens do eixo padrão na faixa de projeto: N Eq = 3,37e+06

Eixo	Tipo	FE	Carga (ton)	FC	FVi
1	Eixo Simples	90%	2,00	0,003	0,003
2	Eixo Simples	5%	5,00	0,134	0,007
3	Eixo simples de roda dupla	5%	9,00	1,702	0,085

### Evolução dos danos no pavimento

Mês	N Equiv	Área Trincada
1	2,675e+04	0,46%
6	1,608e+05	1,02%
12	3,225e+05	1,53%
18	4,849e+05	2,03%
24	6,482e+05	2,55%
30	8,123e+05	3,10%
36	9,771e+05	3,70%
42	1,143e+06	4,34%
48	1,309e+06	5,04%
54	1,477e+06	5,80%
60	1,645e+06	6,62%
66	1,814e+06	7,52%
72	1,984e+06	8,48%
78	2,155e+06	9,52%
84	2,326e+06	10,63%
90	2,499e+06	11,82%
96	2,672e+06	13,10%
102	2,846e+06	14,46%
108	3,021e+06	15,90%
114	3,197e+06	17,42%
120	3,374e+06	19,02%

### 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 - CAP 50/70 Reduc

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
-------------	------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	--------------------	--------------------	--------------------

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	36	30	26	21	17	13	10	8	7
FWD Raio = 15,0 cm Carga = 4,0 ton	22	17	14	11	8	5	4	3	3

## B.5 – Segmento 05

### Programa MeDiNa v.1.1.1.0 - nov/2018

Cópia registrada para Thiago Fávero (thiago.favero@engenharia.ufjf.br), da empresa UFJF.

#### Dimensionamento do reforço do pavimento

Empresa:  
Nome do Projeto:  
Responsável pelo projeto:

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

Tipo de via: Sistema Local  
Nível de confiabilidade: 65%  
Período de projeto: 10 anos.

Análise realizada em 18/02/2019 às 09:20:25 no modo: Projeto de Reforço  
Área trincada prevista no pavimento no fim do período: 18,8%  
**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 CAP 50/70 Reduc	5,0	Resiliente Linear MR = 5963 MPa	0,30
2	CAMADA ASFÁLTICA EXISTENTE Camada Asfáltica Superficial	8,0	Resiliente Linear MR = 5175 MPa	0,30
3	CAMADA EXISTENTE Camada em Solo Natural	10,0	Resiliente Linear MR = 364 MPa	0,35
4	CAMADA EXISTENTE Camada em Solo Natural	20,0	Resiliente Linear MR = 426 MPa	0,35
5	CAMADA EXISTENTE Camada em Solo Natural	40,0	Resiliente Linear MR = 510 MPa	0,45
6	SUBLEITO Subleito	SL	Resiliente Linear MR = 336 MPa	0,45

#### Materiais

1 - CONCRETO ASFÁLTICO: CAP 50/70 Reduc

##### Propriedades

Tipo de CAP = 50/70  
Massa específica (g/cm<sup>3</sup>) = 2,41  
Resistência à tração (MPa) = ...  
Teor de asfalto (%) = 5,9  
Volume de vazios (%) = 4,0  
Faixa Granulométrica = #19,0mm  
Abração Los Angeles (%) = ...  
Norma ou Especificação = DNIT ES 31

##### Modelos

Ensaio de Fadiga  
- Modelo:  $k_1 \cdot (e^t)^{k_2}$   
- Coeficiente de Regressão (k1):  $\geq 7,4e-11$   
- Coeficiente de Regressão (k2):  $\geq -3,3104$   
- Classe de Fadiga:  $\geq 0$   
- FFM (100µ a 250µ):  $\geq 0,51$   
Flow Number Mínimo  
- Condição de Tráfego Normal:  $\geq 176$  ciclos  
- Condição de Tráfego Severa:  $\geq 489$  ciclos

## 2 - CAMADA ASFÁLTICA EXISTENTE: Camada Asfáltica Superficial

**Propriedades****Modelos**

Espessura de fresagem (cm) = 0,0  
 Espessura de campo (cm) = 8,0  
 Área Trincada (%) = 13,5  
 IRI (m/km) = 2,56  
 Deflexão característica (0,01mm) = 43,47  
 Idade do pavimento (anos) = 27  
 Módulo mínimo (MPa) = 3333  
 Módulo máximo (MPa) = 6500  
 MR - Desvio Padrão (MPa) = 890,10  
 Coef de Variação do Módulo (%) = 17,20  
 Comentários = ...

## 3 - CAMADA EXISTENTE: Camada em Solo Natural

**Propriedades****Modelos**

Módulo mínimo (MPa) = 222  
 Módulo máximo (MPa) = 507  
 MR - Desvio Padrão (MPa) = 115,07  
 Coef de Variação do Módulo (%) = 31,60  
 Comentários = ...

## 4 - CAMADA EXISTENTE: Camada em Solo Natural

**Propriedades****Modelos**

Módulo mínimo (MPa) = 222  
 Módulo máximo (MPa) = 633  
 MR - Desvio Padrão (MPa) = 127,52  
 Coef de Variação do Módulo (%) = 29,91  
 Comentários = ...

## 5 - CAMADA EXISTENTE: Camada em Solo Natural

**Propriedades****Modelos**

Módulo mínimo (MPa) = 329  
 Módulo máximo (MPa) = 633  
 MR - Desvio Padrão (MPa) = 67,95  
 Coef de Variação do Módulo (%) = 13,34  
 Comentários = ...

## 6 - SUBLEITO: Subleito

**Propriedades****Modelos**

Módulo mínimo (MPa) = 222  
 Módulo máximo (MPa) = 436  
 MR - Desvio Padrão (MPa) = 73,00  
 Coef de Variação do Módulo (%) = 21,74  
 Comentários = ...

**Definição do tráfego**

Volume Médio Diário no ano de abertura do tráfego: VMD (1º ano) = 9300  
 Fator de veículo no ano de abertura do tráfego: FV = 0,10  
 Número de passagens anual do eixo padrão (1º ano): 3,22e+05  
 % Veículos na faixa de projeto: 100%

Número de passagens anual do eixo padrão na faixa de projeto: 3,22e+05  
 Taxa de crescimento do tráfego: 1,0%  
 Número Equivalente total de passagens do eixo padrão na faixa de projeto: N Eq = 3,37e+06

Eixo	Tipo	FE	Carga (ton)	FC	FVi
1	Eixo Simples	90%	2,00	0,003	0,003
2	Eixo Simples	5%	5,00	0,134	0,007
3	Eixo simples de roda dupla	5%	9,00	1,702	0,085

### Evolução dos danos no pavimento

Mês	N Equiv	Área Trincada
1	2,675e+04	0,46%
6	1,608e+05	1,02%
12	3,225e+05	1,52%
18	4,849e+05	2,02%
24	6,482e+05	2,53%
30	8,123e+05	3,08%
36	9,771e+05	3,67%
42	1,143e+06	4,31%
48	1,309e+06	5,00%
54	1,477e+06	5,76%
60	1,645e+06	6,57%
66	1,814e+06	7,45%
72	1,984e+06	8,40%
78	2,155e+06	9,43%
84	2,326e+06	10,53%
90	2,499e+06	11,71%
96	2,672e+06	12,97%
102	2,846e+06	14,31%
108	3,021e+06	15,73%
114	3,197e+06	17,24%
120	3,374e+06	18,82%

### 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 - CAP 50/70 Reduc

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	23	19	16	12	10	7	6	5	4
FWD Raio = 15,0 cm Carga = 4,0 ton	15	11	9	6	5	3	2	2	2

## B.6 – Segmento 06

### Programa MeDiNa v.1.1.1.0 - nov/2018

Cópia registrada para Thiago Fávero (thiago.favero@engenharia.ufjf.br), da empresa UFJF.

#### Dimensionamento do reforço do pavimento

Empresa:  
Nome do Projeto:  
Responsável pelo projeto:

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

Tipo de via: Sistema Local  
Nível de confiabilidade: 65%  
Período de projeto: 10 anos.

Análise realizada em 18/02/2019 às 09:21:15 no modo: Projeto de Reforço  
Área trincada prevista no pavimento no fim do período: 19,0%  
**Análise encerrou por haver atingido a espessura mínima da camada.**

**ATENÇÃO:** O programa MeDiNa é apenas uma ferramenta de cálculo que auxilia a projetista na 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 CAP 50/70 Reduc	5,0	Resiliente Linear MR = 5963 MPa	0,30
2	ANTI-REFLEXÃO DE TRINCAS CAR	1,5	Resiliente Linear MR = 3000 MPa	0,25
3	CAMADA ASFÁLTICA EXISTENTE Camada Asfáltica Superficial	8,0	Resiliente Linear MR = 4523 MPa	0,30
4	CAMADA EXISTENTE Camada em Solo Natural	10,0	Resiliente Linear MR = 241 MPa	0,35
5	CAMADA EXISTENTE Camada em Solo Natural	20,0	Resiliente Linear MR = 203 MPa	0,35
6	CAMADA EXISTENTE Camada em Solo Natural	40,0	Resiliente Linear MR = 279 MPa	0,45
7	SUBLEITO Subleito	SL	Resiliente Linear MR = 271 MPa	0,45

#### Materiais

##### 1 - CONCRETO ASFÁLTICO: CAP 50/70 Reduc

###### Propriedades

Tipo de CAP = 50/70  
Massa específica (g/cm<sup>3</sup>) = 2,41  
Resistência à tração (MPa) = ...  
Teor de asfalto (%) = 5,9  
Volume de vazios (%) = 4,0  
Faixa Granulométrica = #19,0mm  
Abrasão Los Angeles (%) = ...  
Norma ou Especificação = DNIT ES 31

###### Modelos

Ensaio de Fadiga  
- Modelo:  $k_1 \cdot (et \wedge k_2)$   
- Coeficiente de Regressão (k1):  $\geq 7,4e-11$   
- Coeficiente de Regressão (k2):  $\geq -3.3104$   
- Classe de Fadiga:  $\geq 0$   
- FFM (100µ a 250µ):  $\geq 0,51$   
Flow Number Mínimo  
- Condição de Tráfego Normal:  $\geq 176$  ciclos  
- Condição de Tráfego Severa:  $\geq 489$  ciclos

## 2 - ANTI-REFLEXÃO DE TRINCAS: CAR

**Propriedades****Modelos**

Descrição do Material = ...  
 Massa específica (g/cm<sup>3</sup>) = 2,4  
 Norma ou Especificação = ...

## 3 - CAMADA ASFÁLTICA EXISTENTE: Camada Asfáltica Superficial

**Propriedades****Modelos**

Espessura de fresagem (cm) = 0,0  
 Espessura de campo (cm) = 8,0  
 Área Trincada (%) = 25,63  
 IRI (m/km) = 1,87  
 Deflexão característica (0,01mm) = 60,90  
 Idade do pavimento (anos) = 27  
 Módulo mínimo (MPa) = 3189  
 Módulo máximo (MPa) = 6000  
 MR - Desvio Padrão (MPa) = 706,65  
 Coef de Variação do Módulo (%) = 15,62  
 Comentários = ...

## 4 - CAMADA EXISTENTE: Camada em Solo Natural

**Propriedades****Modelos**

Módulo mínimo (MPa) = 167  
 Módulo máximo (MPa) = 380  
 MR - Desvio Padrão (MPa) = 76,48  
 Coef de Variação do Módulo (%) = 31,78  
 Comentários = ...

## 5 - CAMADA EXISTENTE: Camada em Solo Natural

**Propriedades****Modelos**

Módulo mínimo (MPa) = 129  
 Módulo máximo (MPa) = 300  
 MR - Desvio Padrão (MPa) = 47,26  
 Coef de Variação do Módulo (%) = 23,30  
 Comentários = ...

## 6 - CAMADA EXISTENTE: Camada em Solo Natural

**Propriedades****Modelos**

Módulo mínimo (MPa) = 167  
 Módulo máximo (MPa) = 471  
 MR - Desvio Padrão (MPa) = 101,57  
 Coef de Variação do Módulo (%) = 36,40  
 Comentários = ...

## 7 - SUBLEITO: Subleito

**Propriedades****Modelos**

Módulo mínimo (MPa) = 167  
 Módulo máximo (MPa) = 380  
 MR - Desvio Padrão (MPa) = 74,76  
 Coef de Variação do Módulo (%) = 27,61  
 Comentários = ...

### Definição do tráfego

Volume Médio Diário no ano de abertura do tráfego: VMD (1º ano) = 9300

Fator de veículo no ano de abertura do tráfego: FV = 0,10

Número de passagens anual do eixo padrão (1º ano): 3,22e+05

% Veículos na faixa de projeto: 100%

Número de passagens anual do eixo padrão na faixa de projeto: 3,22e+05

Taxa de crescimento do tráfego: 1,0%

Número Equivalente total de passagens do eixo padrão na faixa de projeto: N Eq = 3,37e+06

Eixo	Tipo	FE	Carga (ton)	FC	FVi
1	Eixo Simples	90%	2,00	0,003	0,003
2	Eixo Simples	5%	5,00	0,134	0,007
3	Eixo simples de roda dupla	5%	9,00	1,702	0,085

### Evolução dos danos no pavimento

Mês	N Equiv	Área Trincada
1	2,675e+04	0,46%
6	1,608e+05	1,02%
12	3,225e+05	1,53%
18	4,849e+05	2,03%
24	6,482e+05	2,55%
30	8,123e+05	3,10%
36	9,771e+05	3,70%
42	1,143e+06	4,34%
48	1,309e+06	5,05%
54	1,477e+06	5,81%
60	1,645e+06	6,63%
66	1,814e+06	7,52%
72	1,984e+06	8,49%
78	2,155e+06	9,53%
84	2,326e+06	10,64%
90	2,499e+06	11,84%
96	2,672e+06	13,12%
102	2,846e+06	14,48%
108	3,021e+06	15,92%
114	3,197e+06	17,44%
120	3,374e+06	19,05%

### 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 - CAP 50/70 Reduc

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
-------------	------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	--------------------	--------------------	--------------------

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	32	26	22	17	14	9	7	6	5
FWD Raio = 15,0 cm Carga = 4,0 ton	20	15	12	9	7	4	3	2	2

## B.7 – Segmento 07

### Programa MeDiNa v.1.1.1.0 - nov/2018

Cópia registrada para Thiago Fávero (thiago.favero@engenharia.uff.br), da empresa UFJF.

#### Dimensionamento do reforço do pavimento

Empresa:  
Nome do Projeto:  
Responsável pelo projeto:

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

Tipo de via: Sistema Local  
Nível de confiabilidade: 65%  
Período de projeto: 10 anos.

Análise realizada em 18/02/2019 às 09:22:13 no modo: Projeto de Reforço  
Área trincada prevista no pavimento no fim do período: 19,6%  
**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 CAP 50/70 Reduc	5,0	Resiliente Linear MR = 5963 MPa	0,30
2	CAMADA ASFÁLTICA EXISTENTE Camada Asfáltica Superficial	8,0	Resiliente Linear MR = 5596 MPa	0,30
3	CAMADA EXISTENTE Camada em Solo Natural	10,0	Resiliente Linear MR = 325 MPa	0,35
4	CAMADA EXISTENTE Camada em Solo Natural	20,0	Resiliente Linear MR = 427 MPa	0,35
5	CAMADA EXISTENTE Camada em Solo Natural	40,0	Resiliente Linear MR = 369 MPa	0,45
6	SUBLEITO Subleito	SL	Resiliente Linear MR = 247 MPa	0,45

#### Materiais

1 - CONCRETO ASFÁLTICO: CAP 50/70 Reduc

##### Propriedades

Tipo de CAP = 50/70  
Massa específica (g/cm<sup>3</sup>) = 2,41  
Resistência à tração (MPa) = ...  
Teor de asfalto (%) = 5,9  
Volume de vazios (%) = 4,0  
Faixa Granulométrica = #19,0mm  
Abrasão Los Angeles (%) = ...  
Norma ou Especificação = DNIT ES 31

##### Modelos

Ensaio de Fadiga  
-Modelo:  $k_1 \cdot (et \wedge k_2)$   
-Coeficiente de Regressão (k1):  $\geq 7,4e-11$   
-Coeficiente de Regressão (k2):  $\geq -3.3104$   
-Classe de Fadiga:  $\geq 0$   
-FFM (100µ a 250µ):  $\geq 0,51$   
Flow Number Mínimo  
- Condição de Tráfego Normal:  $\geq 176$  ciclos  
- Condição de Tráfego Severa:  $\geq 489$  ciclos

## 2 - CAMADA ASFÁLTICA EXISTENTE: Camada Asfáltica Superficial

**Propriedades****Modelos**

Espessura de fresagem (cm) = 0,0  
 Espessura de campo (cm) = 8,0  
 Área Trincada (%) = 13,24  
 IRI (m/km) = 2,70  
 Deflexão característica (0,01mm) = 45,40  
 Idade do pavimento (anos) = 27  
 Módulo mínimo (MPa) = 4400  
 Módulo máximo (MPa) = 7067  
 MR - Desvio Padrão (MPa) = 688,09  
 Coef de Variação do Módulo (%) = 12,30  
 Comentários = ...

## 3 - CAMADA EXISTENTE: Camada em Solo Natural

**Propriedades****Modelos**

Módulo mínimo (MPa) = 222  
 Módulo máximo (MPa) = 471  
 MR - Desvio Padrão (MPa) = 73,19  
 Coef de Variação do Módulo (%) = 22,54  
 Comentários = ...

## 4 - CAMADA EXISTENTE: Camada em Solo Natural

**Propriedades****Modelos**

Módulo mínimo (MPa) = 222  
 Módulo máximo (MPa) = 633  
 MR - Desvio Padrão (MPa) = 116,95  
 Coef de Variação do Módulo (%) = 27,36  
 Comentários = ...

## 5 - CAMADA EXISTENTE: Camada em Solo Natural

**Propriedades****Modelos**

Módulo mínimo (MPa) = 222  
 Módulo máximo (MPa) = 507  
 MR - Desvio Padrão (MPa) = 118,03  
 Coef de Variação do Módulo (%) = 31,98  
 Comentários = ...

## 6 - SUBLEITO: Subleito

**Propriedades****Modelos**

Módulo mínimo (MPa) = 193  
 Módulo máximo (MPa) = 329  
 MR - Desvio Padrão (MPa) = 41,32  
 Coef de Variação do Módulo (%) = 16,72  
 Comentários = ...

**Definição do tráfego**

Volume Médio Diário no ano de abertura do tráfego: VMD (1º ano) = 9300  
 Fator de veículo no ano de abertura do tráfego: FV = 0,10  
 Número de passagens anual do eixo padrão (1º ano): 3,22e+05  
 % Veículos na faixa de projeto: 100%

Número de passagens anual do eixo padrão na faixa de projeto: 3,22e+05

Taxa de crescimento do tráfego: 1,0%

Número Equivalente total de passagens do eixo padrão na faixa de projeto: N Eq = 3,37e+06

Eixo	Tipo	FE	Carga (ton)	FC	FVi
1	Eixo Simples	90%	2,00	0,003	0,003
2	Eixo Simples	5%	5,00	0,134	0,007
3	Eixo simples de roda dupla	5%	9,00	1,702	0,085

### Evolução dos danos no pavimento

Mês	N Equiv	Área Trincada
1	2,675e+04	0,46%
6	1,608e+05	1,03%
12	3,225e+05	1,55%
18	4,849e+05	2,05%
24	6,482e+05	2,58%
30	8,123e+05	3,15%
36	9,771e+05	3,76%
42	1,143e+06	4,42%
48	1,309e+06	5,14%
54	1,477e+06	5,92%
60	1,645e+06	6,77%
66	1,814e+06	7,68%
72	1,984e+06	8,68%
78	2,155e+06	9,75%
84	2,326e+06	10,90%
90	2,499e+06	12,13%
96	2,672e+06	13,44%
102	2,846e+06	14,84%
108	3,021e+06	16,33%
114	3,197e+06	17,90%
120	3,374e+06	19,56%

### 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 - CAP 50/70 Reduc

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	28	23	20	16	13	10	8	7	6
FWD Raio = 15,0 cm Carga = 4,0 ton	17	13	11	8	6	4	3	3	2

## B.8 – Segmento 08

### Programa MeDiNa v.1.1.1.0 - nov/2018

Cópia registrada para Thiago Fávero (thiago.favero@engenharia.ufjf.br), da empresa UFJF..

#### Dimensionamento do reforço do pavimento

Empresa:  
Nome do Projeto:  
Responsável pelo projeto:

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

Tipo de via: Sistema Local  
Nível de confiabilidade: 65%  
Período de projeto: 10 anos.

Análise realizada em 18/02/2019 às 09:23:00 no modo: Projeto de Reforço  
Área trincada prevista no pavimento no fim do período: 18,2%  
**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 CAP 50/70 Reduc	5,0	Resiliente Linear MR = 5963 MPa	0,30
2	ANTI-REFLEXÃO DE TRINCAS CAR	1,5	Resiliente Linear MR = 3000 MPa	0,25
3	CAMADA ASFÁLTICA EXISTENTE Camada Asfáltica Superficial	8,0	Resiliente Linear MR = 4898 MPa	0,30
4	CAMADA EXISTENTE Camada em Solo Natural	10,0	Resiliente Linear MR = 241 MPa	0,35
5	CAMADA EXISTENTE Camada em Solo Natural	20,0	Resiliente Linear MR = 244 MPa	0,35
6	CAMADA EXISTENTE Camada em Solo Natural	40,0	Resiliente Linear MR = 258 MPa	0,45
7	SUBLEITO Subleito	SL	Resiliente Linear MR = 183 MPa	0,45

#### Materiais

##### 1 - CONCRETO ASFÁLTICO: CAP 50/70 Reduc

###### Propriedades

Tipo de CAP = 50/70  
Massa específica (g/cm<sup>3</sup>) = 2,41  
Resistência à tração (MPa) = ...  
Teor de asfalto (%) = 5,9  
Volume de vazios (%) = 4,0  
Faixa Granulométrica = #19,0mm  
Abrasão Los Angeles (%) = ...  
Norma ou Especificação = DNIT ES 31

###### Modelos

Ensaio de Fadiga  
- Modelo:  $k_1 \cdot (e \cdot k_2)$   
- Coeficiente de Regressão (k1):  $\geq 7,4e-11$   
- Coeficiente de Regressão (k2):  $\geq -3.3104$   
- Classe de Fadiga:  $\geq 0$   
- FFM (100µ a 250µ):  $\geq 0,51$   
Flow Number Mínimo  
- Condição de Tráfego Normal:  $\geq 176$  ciclos  
- Condição de Tráfego Severa:  $\geq 489$  ciclos

## 2 - ANTI-REFLEXÃO DE TRINCAS: CAR

**Propriedades****Modelos**

Descrição do Material = ...  
 Massa específica (g/cm<sup>3</sup>) = 2,4  
 Norma ou Especificação = ...

## 3 - CAMADA ASFÁLTICA EXISTENTE: Camada Asfáltica Superficial

**Propriedades****Modelos**

Espessura de fresagem (cm) = 0,0  
 Espessura de campo (cm) = 8,0  
 Área Trincada (%) = 30,77  
 IRI (m/km) = 2,72  
 Deflexão característica (0,01mm) = 73,58  
 Idade do pavimento (anos) = 27  
 Módulo mínimo (MPa) = 3800  
 Módulo máximo (MPa) = 6333  
 MR - Desvio Padrão (MPa) = 849,65  
 Coef de Variação do Módulo (%) = 17,35  
 Comentários = ...

## 4 - CAMADA EXISTENTE: Camada em Solo Natural

**Propriedades****Modelos**

Módulo mínimo (MPa) = 167  
 Módulo máximo (MPa) = 507  
 MR - Desvio Padrão (MPa) = 122,24  
 Coef de Variação do Módulo (%) = 50,63  
 Comentários = ...

## 5 - CAMADA EXISTENTE: Camada em Solo Natural

**Propriedades****Modelos**

Módulo mínimo (MPa) = 164  
 Módulo máximo (MPa) = 471  
 MR - Desvio Padrão (MPa) = 121,29  
 Coef de Variação do Módulo (%) = 49,74  
 Comentários = ...

## 6 - CAMADA EXISTENTE: Camada em Solo Natural

**Propriedades****Modelos**

Módulo mínimo (MPa) = 97  
 Módulo máximo (MPa) = 507  
 MR - Desvio Padrão (MPa) = 155,96  
 Coef de Variação do Módulo (%) = 60,38  
 Comentários = ...

## 7 - SUBLEITO: Subleito

**Propriedades****Modelos**

Módulo mínimo (MPa) = 150  
 Módulo máximo (MPa) = 247  
 MR - Desvio Padrão (MPa) = 36,13  
 Coef de Variação do Módulo (%) = 19,7  
 Comentários = ...

### Definição do tráfego

Volume Médio Diário no ano de abertura do tráfego: VMD (1º ano) = 9300

Fator de veículo no ano de abertura do tráfego: FV = 0,10

Número de passagens anual do eixo padrão (1º ano): 3,22e+05

% Veículos na faixa de projeto: 100%

Número de passagens anual do eixo padrão na faixa de projeto: 3,22e+05

Taxa de crescimento do tráfego: 1,0%

Número Equivalente total de passagens do eixo padrão na faixa de projeto: N Eq = 3,37e+06

Eixo	Tipo	FE	Carga (ton)	FC	FVi
1	Eixo Simples	90%	2,00	0,003	0,003
2	Eixo Simples	5%	5,00	0,134	0,007
3	Eixo simples de roda dupla	5%	9,00	1,702	0,085

### Evolução dos danos no pavimento

Mês	N Equiv	Área Trincada
1	2,675e+04	0,45%
6	1,608e+05	1,01%
12	3,225e+05	1,50%
18	4,849e+05	1,99%
24	6,482e+05	2,49%
30	8,123e+05	3,02%
36	9,771e+05	3,60%
42	1,143e+06	4,21%
48	1,309e+06	4,88%
54	1,477e+06	5,61%
60	1,645e+06	6,40%
66	1,814e+06	7,25%
72	1,984e+06	8,16%
78	2,155e+06	9,15%
84	2,326e+06	10,21%
90	2,499e+06	11,34%
96	2,672e+06	12,55%
102	2,846e+06	13,84%
108	3,021e+06	15,20%
114	3,197e+06	16,65%
120	3,374e+06	18,17%

### 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 - CAP 50/70 Reduc

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
-------------	------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	--------------------	--------------------	--------------------

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	36	31	27	22	18	14	11	9	8
FWD Raio = 15,0 cm Carga = 4,0 ton	22	17	14	11	9	6	4	3	3

# Anexo A – Planilha de dados coletados pelo LVCI

RODOVIA	Percurso	km L.Od.	km F.Od.	TTC	TTL	TLC	TLL	TR 2 (m³)	TR 2 (%)	TR 3 (m³)	TR 3 (%)	TR (m³)	TR (%)	PAI	PECI	PAI	MEN	PAI	GRA	II	P	OB	BEM	OND	EXSUD	DESG	AF	TRIL	AF	LOC	ESC	CO	TB	Latitude	Longitude	Altitude					
ufrr_FX1	20	0	20	0	0	0	0	10,50	15,00%	19,25	27,50%	29,75	42,50%	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	2	S021466394	W04322144	863						
ufrr_FX1	40	20	40	0	1	0	0	15,75	22,50%	7,00	10,00%	22,75	32,50%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	S021466394	W04322152	862					
ufrr_FX1	60	40	60	0	0	0	0	0,00	0,00%	47,25	67,50%	47,25	67,50%	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	S021466395	W04322164	863				
ufrr_FX1	80	60	80	0	0	0	0	0,00	0,00%	21,00	30,00%	21,00	30,00%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	S021466400	W04322176	859					
ufrr_FX1	100	80	100	0	0	0	1	3,50	5,00%	10,50	15,00%	14,00	20,00%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	S021466402	W04322185	857				
ufrr_FX1	120	100	120	0	0	0	0	26,25	37,50%	3,50	5,00%	29,75	42,50%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	S021466403	W04322197	859				
ufrr_FX1	140	120	140	0	0	0	0	28,25	37,50%	1,75	2,50%	28,00	40,00%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	S021466409	W04322208	857				
ufrr_FX1	160	140	160	0	0	0	0	22,75	32,50%	8,75	12,50%	31,50	45,00%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	S021466419	W04322216	856				
ufrr_FX1	180	160	180	0	0	0	0	28,00	40,00%	7,00	10,00%	35,00	50,00%	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	S021466429	W04322222	856				
ufrr_FX1	200	180	200	0	0	0	0	24,50	35,00%	8,75	12,50%	33,25	47,50%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	S021466441	W04322220	855				
ufrr_FX1	220	200	220	0	0	0	0	22,75	32,50%	12,25	17,50%	35,00	50,00%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	S021466452	W04322220	853				
ufrr_FX1	240	220	240	0	0	0	0	0,00	0,00%	22,75	32,50%	22,75	32,50%	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	S021466462	W04322216	853				
ufrr_FX1	260	240	260	0	0	0	0	8,75	12,50%	0,00	0,00%	8,75	12,50%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	S021466472	W04322213	855				
ufrr_FX1	280	260	280	0	0	1	1	17,50	25,00%	0,00	0,00%	17,50	25,00%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	S021466482	W04322211	855				
ufrr_FX1	300	280	300	0	0	0	0	0,00	0,00%	21,00	30,00%	21,00	30,00%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	S021466492	W04322209	856			
ufrr_FX1	320	300	320	0	1	0	0	8,75	12,50%	5,25	7,50%	14,00	20,00%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	S021466503	W04322206	858			
ufrr_FX1	340	320	340	0	0	0	0	5,25	7,50%	10,50	15,00%	15,75	22,50%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	S021466515	W04322204	859			
ufrr_FX1	360	340	360	0	0	0	0	5,25	7,50%	15,75	22,50%	21,00	30,00%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	S021466525	W04322201	860			
ufrr_FX1	380	360	380	0	0	0	0	0,00	0,00%	0,00	0,00%	0,00	0,00%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	S021466536	W04322199	860			
ufrr_FX1	400	380	400	0	1	0	0	21,00	30,00%	5,25	7,50%	26,25	37,50%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	S021466547	W04322196	861			
ufrr_FX1	420	400	420	0	0	0	0	8,75	12,50%	0,00	0,00%	8,75	12,50%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	S021466556	W04322194	861			
ufrr_FX1	440	420	440	0	0	0	1	21,00	30,00%	0,00	0,00%	21,00	30,00%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	S021466568	W04322192	862			
ufrr_FX1	460	440	460	0	0	0	1	10,50	15,00%	5,25	7,50%	15,75	22,50%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	S021466578	W04322189	863				
ufrr_FX1	480	460	480	0	0	0	0	17,50	25,00%	0,00	0,00%	17,50	25,00%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	S021466588	W04322187	863			
ufrr_FX1	500	480	500	0	0	0	1	26,25	37,50%	1,75	2,50%	28,00	40,00%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	S021466600	W04322184	864			
ufrr_FX1	520	500	520	0	0	0	0	8,75	12,50%	7,00	10,00%	15,75	22,50%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	S021466610	W04322182	864		
ufrr_FX1	540	520	540	0	0	0	1	19,25	27,50%	3,50	5,00%	22,75	32,50%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	S021466620	W04322183	864		
ufrr_FX1	560	540	560	0	0	0	0	21,00	30,00%	3,50	5,00%	24,50	35,00%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	S021466634	W04322186	861			
ufrr_FX1	580	560	580	0	0	0	0	1,75	2,50%	3,50	5,00%	5,25	7,50%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	S021466643	W04322189	861		
ufrr_FX1	600	580	600	0	0	0	0	8,75	12,50%	0,00	0,00%	8,75	12,50%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	S021466653	W04322195	859		
ufrr_FX1	620	600	620	0	0	0	1	7,00	10,00%	15,75	22,50%	22,75	32,50%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	S021466673	W04322206	860	
ufrr_FX1	640	620	640	0	0	0	0	0,00	0,00%	29,75	42,50%	29,75	42,50%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	S021466679	W04322205	860
ufrr_FX1	660	640	660	0	0	0	0	0,00	0,00%	28,00	40,00%	28,00	40,00%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	S021466682	W04322211	860
ufrr_FX1	680	660	680	0	0	0	0	3,50	5,00%	3,50	5,00%	7,00	10,00%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	S021466693	W04322218	859
ufrr_FX1	700	680	700	0	0	0	0	0,00	0,00%	0,00	0,00%	0,00	0,00%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	S021466702	W04322223	859	





## Anexo B – Planilha do ensaio de índice de irregularidade longitudinal com perfilômetro a laser

Realização:	UFJF IRI 2018
Data:	19-03-2018
Contratantes:	
Equipamento:	Perfilômetro CiberLaser
Operador:	Marcos
Localização:	UFJF CAMPUS
Sentido:	-
Faixa:	E
Trecho:	Anel viário
Distância entre Sensores (cm):	72 -64 209 161

Início (km)	Fim (km)	IRI Módulo 1	IRI Módulo 2	IRI Módulo 3	IRI Módulo 4	IRI Módulo 5	MPD (mm)	ATR Esq (mm)	ATR Dir (mm)	Vel. (km/h)	Obs
0,00	0,02	7,97	8,31	9,06	10,01	9,45	0,95	2,7	0,9	18	ESTACA 0
0,02	0,04	2,60	2,72	2,51	3,40	5,29	1,01	3,9	3,9	28	1
0,04	0,06	2,62	1,76	2,11	1,74	1,49	0,79	3,6	0,7	37	2
0,06	0,08	3,75	3,22	2,26	5,63	6,57	1,09	2,3	1,0	38	3
0,08	0,10	17,81	18,37	19,12	13,63	20,33	2,28	3,2	4,9	32	QUEBRA MOLA
0,10	0,12	13,30	11,97	13,40	14,02	16,34	0,00	1,9	11,6	14	5
0,12	0,14	2,54	2,97	3,27	3,61	3,73	1,35	1,1	2,9	27	6
0,14	0,16	2,80	3,49	2,58	3,87	3,43	1,04	3,3	2,1	33	7
0,16	0,18	2,15	2,68	2,65	3,74	3,08	1,00	2,4	1,2	38	8
0,18	0,20	2,78	3,14	4,08	4,28	7,25	0,90	3,8	4,1	39	PANELA
0,20	0,22	5,62	3,59	4,68	3,05	3,56	1,02	3,0	2,6	37	10
0,22	0,24	2,31	2,91	2,78	4,12	3,72	1,66	2,3	3,4	38	REMENDO
0,24	0,26	10,76	11,73	12,02	14,50	14,15	1,81	5,2	7,8	34	QUEBRA MOLA
0,26	0,28	13,32	12,09	13,88	13,01	12,58	1,72	3,5	1,2	14	13
0,28	0,30	1,56	1,36	2,18	1,59	1,37	0,89	3,6	0,6	23	14
0,30	0,32	3,53	2,91	1,40	6,17	2,93	0,66	2,8	1,7	35	REMENDO
0,32	0,34	2,80	4,40	3,30	3,08	3,07	0,99	4,8	0,8	38	16
0,34	0,36	2,66	1,68	1,79	2,15	1,73	0,64	5,4	0,7	41	17
0,36	0,38	9,81	9,43	10,96	10,75	12,11	0,78	2,7	2,9	34	18

0,38	0,40	12,41	12,41	14,30	13,83	12,98	0,00	5,5	3,0	18	QUEBRA MOLA
0,40	0,42	2,84	2,31	3,62	3,12	2,32	1,09	6,0	0,8	28	20
0,42	0,44	2,21	2,22	1,73	2,01	1,31	1,21	7,6	0,8	35	21
0,44	0,46	1,55	1,25	1,44	1,47	1,10	1,00	6,3	0,5	38	22
0,46	0,48	2,02	2,35	3,10	4,75	4,67	0,90	5,2	4,1	41	23
0,48	0,50	2,43	3,41	2,09	5,20	5,40	1,00	5,6	1,7	41	24
0,50	0,52	3,21	3,08	3,13	2,74	3,68	1,18	3,0	1,0	40	25
0,52	0,54	5,90	7,54	4,89	5,84	7,83	0,78	3,4	2,1	39	26
0,54	0,56	6,42	6,70	3,69	4,86	6,73	1,30	3,6	1,5	38	27
0,56	0,58	2,41	5,40	4,27	6,98	8,27	1,80	4,3	3,2	38	28
0,58	0,60	3,33	2,05	4,10	5,63	4,63	1,63	4,3	4,6	36	29
0,60	0,62	17,09	17,24	18,28	16,79	16,84	1,10	2,1	3,4	26	QUEBRA MOLA
0,62	0,64	5,90	5,27	5,08	6,64	8,08	1,33	4,2	3,3	19	31
0,64	0,66	3,63	3,41	2,41	1,85	1,96	1,10	3,4	6,1	33	32
0,66	0,68	2,92	4,35	2,71	2,97	2,10	1,02	4,3	3,5	37	33
0,68	0,70	2,86	2,86	2,84	1,46	1,67	1,16	7,1	0,6	40	34
0,70	0,72	2,00	1,57	3,71	2,22	2,57	0,92	6,6	1,0	40	35
0,72	0,74	1,79	1,71	1,12	1,48	1,06	1,16	4,6	0,6	40	36
0,74	0,76	1,32	1,38	0,70	0,92	1,19	0,97	2,7	0,5	40	37
0,76	0,78	2,46	2,42	3,07	1,70	2,72	0,91	3,9	4,5	39	38
0,78	0,80	2,68	1,35	1,55	1,69	2,60	1,02	0,8	0,4	39	39
0,80	0,82	1,84	1,19	2,52	1,02	1,04	1,11	2,1	0,4	39	40
0,82	0,84	4,28	4,61	6,90	5,08	4,32	0,97	3,5	1,4	37	41
0,84	0,86	19,36	16,55	17,89	15,17	15,53	1,52	5,2	2,6	21	QUEBRA MOLA
0,86	0,88	5,32	5,55	5,12	10,37	9,64	1,27	3,2	2,4	26	43
0,88	0,90	1,55	1,55	2,37	2,49	2,51	1,21	2,5	0,7	34	44
0,90	0,92	1,91	1,60	2,04	1,96	1,25	1,21	0,7	3,8	35	45

0,92	0,94	3,67	3,17	2,64	1,69	2,15	1,31	1,9	2,2	34	46
0,94	0,96	1,50	2,23	1,71	1,31	2,42	1,27	0,7	0,8	34	47
0,96	0,98	3,67	1,92	2,59	2,46	2,08	1,56	1,1	0,8	35	48
0,98	1,00	2,80	1,59	2,30	1,89	1,65	1,24	2,3	1,5	38	49
1,00	1,02	4,54	2,00	2,00	2,07	1,89	1,01	2,5	0,7	38	50
1,02	1,04	3,32	2,17	2,87	1,82	1,84	1,11	4,0	0,8	40	51
1,04	1,06	1,32	1,33	3,35	1,80	1,49	1,24	2,5	0,9	39	52
1,06	1,08	1,50	2,06	2,16	1,84	4,90	1,12	1,2	3,6	38	53
1,08	1,10	0,95	1,03	1,55	2,41	1,64	1,16	1,3	1,0	37	54
1,10	1,12	1,56	1,31	2,22	2,58	1,31	1,32	2,4	3,6	38	55
1,12	1,14	2,30	2,37	3,42	1,80	1,31	1,37	3,4	0,9	38	56
1,14	1,16	1,40	1,52	2,62	1,42	3,04	1,35	3,1	2,5	38	57
1,16	1,18	28,68	29,61	23,73	19,91	26,42	1,20	2,2	7,5	31	QUEBRA MOLA
1,18	1,20	7,87	6,65	7,07	6,16	5,90	1,56	2,9	4,7	18	SAIDA SUL
1,20	1,22	9,02	7,23	2,58	3,54	3,50	1,84	3,9	4,1	27	60
1,22	1,24	4,49	5,87	4,38	2,24	3,43	1,94	2,3	4,8	29	61
1,24	1,26	6,04	5,34	7,08	3,45	3,54	1,41	2,1	3,8	29	62
1,26	1,28	5,09	5,68	5,11	7,94	5,32	1,42	2,2	6,8	27	63
1,28	1,30	4,25	2,65	2,47	2,39	1,83	1,21	4,4	2,3	29	64
1,30	1,32	1,74	1,82	1,99	1,26	1,76	0,94	2,8	0,0	29	65
1,32	1,34	21,84	20,85	20,52	19,35	20,49	1,13	2,7	2,0	18	QUEBRA MOLA
1,34	1,36	4,00	3,60	4,35	3,75	3,52	1,19	3,8	0,9	14	67
1,36	1,38	1,87	1,63	2,36	1,63	1,70	1,07	2,8	0,5	21	68
1,38	1,40	3,12	2,46	2,58	2,37	2,68	0,82	5,9	0,9	31	69
1,40	1,42	1,42	1,65	1,55	3,33	3,61	1,30	4,8	2,2	31	70
1,42	1,44	2,34	2,49	3,92	1,92	3,83	1,02	4,8	0,6	33	71
1,44	1,46	1,30	1,35	1,83	4,24	4,06	1,38	3,7	1,5	33	72
1,46	1,48	0,72	0,84	1,74	1,17	0,84	1,07	5,6	0,6	32	73
1,48	1,50	1,97	1,51	2,20	1,92	1,71	1,04	7,7	0,5	31	74
1,50	1,52	1,19	1,48	1,95	3,29	3,75	1,07	5,9	3,9	31	75
1,52	1,54	3,00	3,25	2,66	3,18	3,19	1,04	5,2	2,7	31	76
1,54	1,56	1,19	1,20	2,24	2,42	1,90	0,90	4,0	1,8	32	77
1,56	1,58	1,68	1,22	2,64	3,97	4,22	0,76	8,7	4,4	33	78

1,58	1,60	2,00	2,03	2,44	1,93	1,72	1,08	3,8	0,8	33	79
1,60	1,62	1,65	1,15	2,68	1,26	1,08	0,84	6,8	0,6	35	80
1,62	1,64	3,73	2,02	5,40	2,04	2,01	0,95	10,5	0,6	32	81
1,64	1,66	23,95	26,54	23,06	22,28	26,30	0,96	5,6	4,9	18	QUEBRA MOLA
1,66	1,68	5,53	6,42	5,47	3,77	6,29	1,11	1,0	2,2	19	83
1,68	1,70	2,07	2,31	2,29	4,48	2,45	0,95	3,1	1,5	30	84
1,70	1,72	3,08	2,19	3,68	2,63	2,01	1,05	4,6	1,0	33	85
1,72	1,74	5,14	3,24	6,22	3,14	2,79	0,99	3,7	1,5	33	86
1,74	1,76	5,35	5,70	2,13	3,90	4,23	1,01	6,6	2,0	33	87
1,76	1,78	2,06	2,03	2,08	2,11	3,08	0,64	1,8	2,3	32	88
1,78	1,80	4,05	3,50	3,75	3,72	2,95	1,48	2,1	2,6	32	89
1,80	1,82	2,56	3,70	2,28	5,43	4,83	1,09	2,6	1,0	31	90
1,82	1,84	2,33	2,09	3,09	2,97	1,83	0,88	1,6	1,1	30	91
1,84	1,86	5,59	7,76	4,67	6,91	6,81	1,13	3,1	1,5	31	92
1,86	1,88	1,88	3,56	2,26	2,96	2,97	0,75	2,0	1,0	30	93
1,88	1,90	20,15	18,32	18,81	17,49	19,37	1,18	4,8	3,4	25	QUEBRA MOLA
1,90	1,92	5,10	4,73	3,94	5,24	6,06	0,87	3,6	1,0	19	95
1,92	1,94	3,21	2,76	1,61	2,39	2,25	0,93	3,9	0,9	30	96
1,94	1,96	1,53	1,29	4,80	2,13	1,16	0,93	6,1	0,7	33	97
1,96	1,98	2,96	2,01	5,00	2,05	1,86	0,95	6,8	1,1	33	98
1,98	2,00	4,00	3,16	2,93	2,86	2,88	0,89	3,8	0,7	30	99
2,00	2,02	22,54	22,76	21,38	21,45	25,10	0,99	2,7	1,7	22	QUEBRA MOLA
2,02	2,04	3,14	3,28	2,63	9,71	6,26	1,05	1,3	2,9	21	101
2,04	2,06	3,13	3,28	2,20	3,42	3,71	1,09	1,8	1,3	30	102
2,06	2,08	1,99	2,13	2,33	3,05	2,78	1,18	4,1	0,9	31	103
2,08	2,10	4,12	5,02	3,52	5,69	4,16	1,17	3,8	3,0	31	104
2,10	2,12	10,27	8,74	10,49	11,34	8,38	1,38	5,4	5,1	30	TRAFFIC CALM
2,12	2,14	3,32	3,51	4,97	3,33	5,71	1,70	2,9	3,3	30	106
2,14	2,16	6,87	3,16	11,84	2,94	3,49	1,28	5,7	0,0	32	FINAL DA FAIXA ESQUERDA

## Anexo C – Planilha do levantamento deflectométrico feito com equipamento do tipo FWD

KUAB	UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA														
Operador	MARCOS ANTONIO														
Local	CAMPUS UFRJ														
Clima	DIA SOL / NUBLADO														
Data	10/03/2018														
Raio (cm)	150														
Numero Sensores	1	2	3	4	5	6	7	8	9						
Distancia Sensores (cm)	0	20	30	45	60	90	120	150	180						
Posicao Sensor	Centro	Atras													
Off set referencia (m)	0														
Espacamento entre medidas (	20														
Distancia (m Estaca	Load	D0	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	Air	Pave	Emod	Time	
m	Numero kgf	$\mu\text{m}$	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	MPa										
0	0	4097	410	294	212	126	92	61	45	34	26	19	25	312	07:50:16
20	1	4098	421	274	193	109	87	66	48	40	32	19	26	304	07:53:43
40	2	4109	481	322	217	108	65	42	35	32	28	20	26	266	07:54:54
60	3	4072	422	281	199	105	64	34	27	24	19	20	24	301	07:55:59
100	5	4091	361	257	193	108	63	38	28	22	19	20	23	354	07:57:16
120	6	4121	289	208	160	100	70	44	33	29	22	19	26	444	07:58:24
140	7	4086	332	215	154	93	62	34	24	21	18	20	24	384	07:59:31
160	8	4054	422	279	183	100	63	33	24	22	19	20	26	300	08:00:30
180	9	4009	550	409	315	204	142	81	55	45	35	20	24	227	08:01:22
200	10	4013	498	343	254	155	111	66	48	36	29	20	22	251	08:02:14
220	11	3925	585	379	238	107	66	32	21	17	15	20	23	209	08:03:03
260	13	4074	326	217	155	91	62	37	27	24	20	20	24	390	08:04:18
280	14	4085	294	198	148	85	56	36	28	25	22	20	27	434	08:05:40
300	15	4063	343	228	156	94	64	38	27	23	19	20	27	370	08:06:33
320	16	4082	253	168	125	80	60	40	31	27	23	20	25	504	08:07:29
340	17	4068	290	190	134	81	57	36	28	24	21	20	25	438	08:08:27
380	19	4086	309	221	163	99	64	35	23	21	17	20	26	413	08:09:36
400	20	4074	330	234	175	104	67	34	23	20	17	20	25	386	08:10:23

420	21	4060	429	295	214	126	83	44	31	25	21	20	25	296	08:11:08
440	22	4064	369	265	203	125	81	43	31	27	24	20	25	344	08:11:56
460	23	4054	357	254	192	118	84	51	39	32	27	20	26	354	08:12:41
480	24	4122	227	153	112	71	55	37	28	25	21	20	24	566	08:13:26
500	25	4108	149	108	87	64	53	40	31	29	25	20	22	859	08:14:17
520	26	4040	268	176	122	70	51	36	28	25	21	20	24	470	08:15:08
540	27	4052	258	162	113	68	51	36	28	23	19	20	20	490	08:15:55
560	28	4011	502	317	224	118	71	37	27	24	18	20	24	249	08:16:49
580	29	4015	554	396	292	172	110	58	40	30	24	20	25	226	08:17:40
620	31	3981	777	574	429	254	164	73	44	34	28	21	25	160	08:18:53
640	32	3979	976	735	557	348	230	105	63	49	40	20	25	127	08:19:41
660	33	4161	915	713	584	405	290	151	89	70	60	21	26	142	08:23:06
680	34	4247	472	330	251	155	107	60	41	32	27	21	27	281	08:23:56
700	35	4250	514	351	253	142	90	47	33	27	23	21	26	258	08:24:53
720	36	4094	432	291	204	122	83	50	37	31	27	21	27	295	08:27:31
740	37	4099	365	237	161	95	73	49	35	29	25	21	26	351	08:28:20
760	38	4081	415	275	198	117	84	55	40	34	29	22	28	307	08:29:10
780	39	4104	319	201	136	80	56	34	24	21	18	22	23	402	08:29:57
800	40	4089	324	215	154	92	65	38	24	20	16	22	27	393	08:30:44
820	41	4091	289	190	138	81	59	39	30	29	22	22	24	442	08:31:54
860	43	4059	523	356	258	146	101	61	39	30	24	22	28	242	08:33:42
880	44	4100	329	210	144	74	50	31	22	20	17	22	25	388	08:36:19
900	45	4118	357	238	167	95	63	37	27	22	20	22	24	360	08:37:16
920	46	4054	401	276	187	100	66	36	28	20	18	23	27	315	08:38:16
940	47	4077	342	226	152	80	50	33	23	20	17	23	29	372	08:39:16
960	48	4096	326	212	147	79	55	36	26	21	19	22	28	392	08:40:07
980	49	4084	327	212	149	83	60	40	29	24	19	23	25	390	08:41:19
1000	50	4092	308	210	156	99	78	53	38	31	26	24	30	414	08:44:39

1020	51	4046	478	304	205	121	90	60	43	35	30	24	33	264	08:45:43
1040	52	4046	419	280	199	118	88	56	38	30	24	24	33	301	08:46:42
1060	53	4047	446	305	223	137	99	61	40	30	22	24	32	283	08:47:42
1080	54	4028	529	374	282	181	130	80	53	40	30	24	32	237	08:48:39
1100	55	4036	533	357	264	156	108	69	51	43	35	24	32	237	08:49:39
1120	56	3987	627	460	345	211	145	83	60	50	41	24	33	198	08:50:30
1140	57	4046	506	342	239	137	91	51	36	31	26	24	27	250	08:51:19
1180	59	3950	542	371	256	128	72	35	25	22	20	24	33	228	08:52:25
1200	60	4062	602	400	265	129	68	22	20	17	16	24	31	211	08:53:46
1223	61+3m	4050	547	377	271	138	81	37	27	23	19	24	32	231	08:55:51
1240	62	4046	470	324	239	128	73	29	20	18	16	23	32	269	08:56:59
1260	63	4011	632	429	315	173	102	37	26	20	18	24	31	198	08:58:17
1280	64	4015	621	403	285	151	88	41	31	25	21	24	31	202	08:59:27
1300	65	4073	457	302	219	121	77	45	32	27	24	23	30	278	09:00:34
1320	66	4090	419	278	203	114	77	46	34	30	25	24	30	305	09:01:42
1340	67	4058	411	264	187	110	74	45	31	26	23	24	29	308	09:02:41
1360	68	4069	357	231	165	92	66	42	29	25	22	23	28	356	09:06:14
1380	69	4002	446	314	242	160	119	71	47	37	30	23	27	280	09:07:15
1400	70	4037	471	341	264	168	119	66	43	34	27	23	27	268	09:08:18
1420	71	4027	431	306	234	154	114	71	46	37	31	23	29	292	09:09:14
1440	72	4037	484	346	265	170	123	70	45	37	32	23	29	260	09:10:08
1460	73	4048	395	276	207	137	102	62	43	36	30	23	28	320	09:11:06
1480	74	4074	369	248	182	113	82	48	31	26	21	23	28	344	09:12:10
1500	75	4036	387	272	203	129	92	57	39	33	28	23	28	325	09:13:26
1520	76	4058	426	301	222	146	105	65	46	38	32	23	28	297	09:14:21
1540	77	4042	429	298	221	139	100	59	41	33	28	23	29	294	09:15:14
1560	78	4055	395	275	210	133	94	55	38	30	25	23	28	320	09:16:07
1580	79	4048	383	261	193	122	90	61	46	39	33	23	29	330	09:17:04
1600	80	3988	497	361	272	171	124	77	56	46	38	23	29	250	09:17:55
1620	81	3985	536	393	302	191	132	75	52	42	34	23	28	232	09:18:53

1640	82	3959	653	470	357	213	141	73	48	40	33	23	29	189	09:19:55
1660	83	4009	775	577	443	273	187	93	58	42	35	24	30	162	09:22:03
1680	84	4017	736	528	399	246	163	79	49	40	32	23	29	170	09:23:18
1700	85	4045	607	434	324	184	113	46	30	26	21	24	29	208	09:24:15
1720	86	4085	487	348	266	164	110	57	36	27	24	23	27	262	09:25:09
1740	87	4115	299	207	156	100	73	46	33	29	24	23	25	430	09:26:08
1760	88	4148	344	239	180	118	86	52	35	29	25	23	27	376	09:26:55
1777	88+17m	4109	527	387	301	187	120	59	41	33	29	24	27	243	09:27:59
1800	90	4177	204	148	121	84	69	49	36	30	26	23	29	638	09:29:01
1820	91	4133	221	170	141	100	76	43	28	23	19	24	30	582	09:29:55
1840	92	4161	356	266	205	127	83	43	30	27	24	24	31	365	09:30:43
1860	93	4109	381	283	224	142	96	46	30	27	25	23	31	336	09:31:32
1900	95	4149	449	298	203	104	65	37	28	25	23	24	31	289	09:33:05
1920	96	4129	372	257	185	98	59	33	26	23	21	24	32	346	09:34:01
1940	97	4103	443	312	219	116	70	33	23	20	17	24	34	289	09:35:07
1960	98	4115	482	323	223	126	81	45	30	24	20	24	33	266	09:35:54
1980	99	4116	431	308	231	136	87	39	23	20	17	24	35	298	09:36:43
2020	101	4094	473	312	221	121	74	38	28	24	21	24	32	270	09:37:52
2040	102	4114	414	270	182	97	62	41	30	26	22	24	33	310	09:38:47
2060	103	4158	353	235	165	91	61	42	33	26	23	24	33	367	09:39:34
2080	104	4115	437	309	228	148	112	79	59	50	39	24	35	294	09:40:28
2100	105	4119	449	303	223	129	94	64	49	41	33	24	34	286	09:41:38