

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 Machado¹, Geraldo Luciano de Oliveira Marques²,
Marcos Lamha Rocha³

¹Laboratório de Pavimentação, Departamento de Geotecnia e Transportes, UFJF, thiago.favero@engenharia.ufff.br

²Laboratório de Pavimentação, Departamento de Geotecnia e Transportes, UFJF, geraldo.marques@ufff.edu.br

³Laboratório de Pavimentação, Departamento de Geotecnia e Transportes, UFJF, marcoslr94@gmail.com

Recebido:

19 de agosto de 2019

Aceito para publicação:

28 de outubro de 2019

Publicado:

30 de abril de 2020

Editor de área:

Jorge Barbosa Soares

Palavras-chaves:

Reforço,
Método mecanístico-empírico,
Retroanálise.

Keywords:

Reinforcement layer,
Mechanistic-empirical method,
Backcalculation process.

DOI:10.14295/transportes.v28i1.2144



RESUMO

O presente trabalho de pesquisa utiliza o novo programa de dimensionamento de pavimentos flexíveis no Brasil (MeDiNa), para o cálculo de reforço do pavimento do anel viário da Universidade Federal de Juiz de Fora visando o restabelecimento de propriedades funcionais. Esse pavimento é avaliado funcionalmente através de Levantamento Visual Contínuo Informatizado (LVCI) e ensaio de irregularidade longitudinal, e estruturalmente por meio de levantamento de deflexões realizado por equipamento FWD e abertura de poço de sondagem. Com os dados coletados na avaliação estrutural, é realizada a segmentação homogênea do trecho e uma retroanálise de dados para obtenção de parâmetros necessários ao referido cálculo. Após o devido dimensionamento 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.

ABSTRACT

In this present study, was used the new flexible pavements software in Brazil (MeDiNa), in order to calculate the overlay asphalt on ring road of University Federal from Juiz de Fora, aimed the rehabilitation of its functional proprieties. This pavement was evaluated functionally by Computerized Continuous Visual Survey (CCVS) and tests of longitudinal cracks, and structurally by survey deflection measurements (FWD) and shaft sinking. With the data collected in the structural evaluation, it was carried out the homogeneous segmentation of the stretch and the backcalculation of the data, aimed the acquisition of needed parameters for the calculation. After the appropriate design, it was concluded that the best solution for the overlay is the resurfacing along its entire length, with the use of project asphalt mixture with single thickness of 5,0 cm, observing the application of the anti-reflective cracking layer in some stretches.

1. INTRODUÇÃO

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 (MIKOLAJ, et al., 2019).

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. 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.

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).

No contexto atual, em que se está sendo proposto um novo método de dimensionamento de pavimentos novos e restaurados (o método de dimensionamento nacional, MeDiNa), é importante uma consolidação dos conceitos, análises e concepções de projetos para um aperfeiçoamento do programa. Diante disso, esse trabalho visa contribuir para uma ampliação dessa base dados, uma vez que em toda implementação de novos programas exigem melhoramentos contínuos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Avaliação Funcional – Subjetiva e Objetiva

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).

Já 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).

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 (ANTT, 2017).

2.2. Avaliação Estrutural

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”. Esse tipo de avaliação se divide em dois tipos, a do tipo destrutiva e a não-destrutiva.

A primeira, a avaliação 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. A segunda, a avaliação não-destrutiva, consiste na realização de provas-de-carga para medida de parâmetros de resposta da estrutura às cargas de roda em movimento.

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.

2.3. 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.

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. 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.

2.4. 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).

Um outro tipo de método de dimensionamento, mais atual e racional, é o mecanístico-empírico de dimensionamento, que se utiliza princípios derivados da Mecânica dos Pavimentos (especificamente aqueles provenientes da Teoria da Elasticidade). O objetivo é 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.

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).

2.4.1. Programa Computacional MeDiNa

Inicialmente, em sua tese de doutorado, Franco (2007) desenvolveu um método mecanístico-empírico de dimensionamento de pavimentos asfálticos, na COPPE/UFRJ, sendo consolidado em um software computacional denominado SisPav. Em 2013, por meio de estudos da Rede de Tecnologia em Asfaltos da Petrobrás, houve uma atualização do programa e o alterou para SisPavBR, fazendo análises bem mais sofisticadas, especialmente por estar calibrado e validado com dados de materiais e de desempenho dos materiais.

A partir de 2015, um Termo de Execução Descentralizada (TED) entre o IPR e o instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE/UFRJ) possibilitou o surgimento de uma nova atualização do software, denominado agora de MeDiNa, em homenagem também ao ex-professor titular da COPPE/UFRJ, Jacques de Medina. O TED do DNIT serviu para implementar/customizar o antigo programa para o DNIT e escrever as normas e procedimentos, além da capacitação de técnicos dos órgãos (SOUZA JUNIOR, 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.

3. MATERIAS E MÉTODOS

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.

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 1). 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.

Com relação ao tráfego, um estudo realizado no segundo semestre do ano de 2015 pela Faculdade de Engenharia da UFJF, aponta que o volume médio diário (VMD) do campus, em dias úteis, corresponde a, aproximadamente, 9.000 veículos, considerando 90% carros de passeio e 10% ônibus urbano, visto que caminhões são proibidos de trafegar no campus (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.

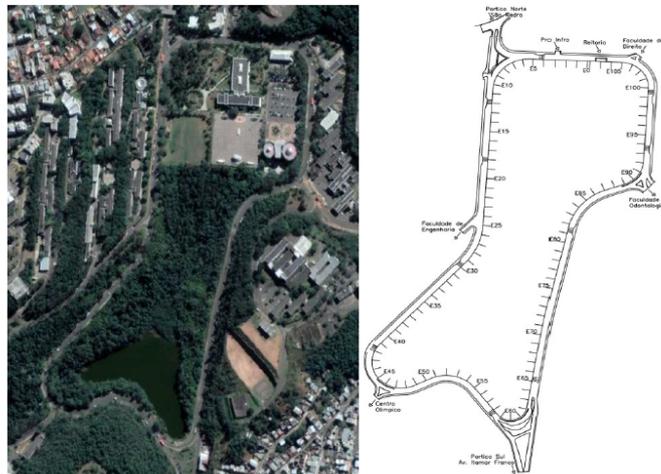


Figura 1. Imagem de satélite e representação esquemática do anel viário da UFJF

3.2. Avaliação Funcional

No presente trabalho de pesquisa, o LVCI foi realizado pela empresa ENGGEOTECH Consultores de Engenharia Ltda. utilizando-se o programa computacional HoleHunter 4.0, elaborado e desenvolvido pela mesma, no ano de 2018. Esse programa permite a visualização do registro em conjunto com a descrição das ocorrências 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 2).

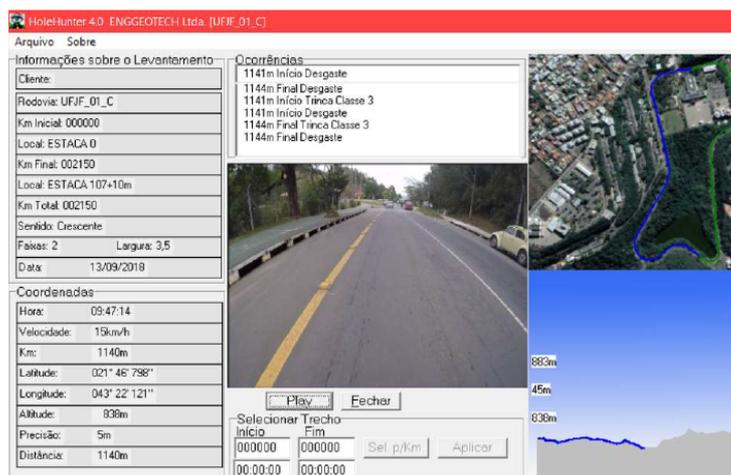


Figura 2. Tela do programa HoleHunter 4.0 exibindo o vídeo registro em conjunto com os defeitos catalogados, caminhamento e planialtimetria

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.

Em relação ao Índice de Irregularidade Longitudinal (IRI), no levantamento realizado no anel viário da UFJF, por uma equipe da COPPE/UFRJ, fez-se uso de um equipamento suspenso que utiliza o princípio da onda de luz do laser para as medidas de irregularidade. Esse dispositivo foi desenvolvido pela empresa Cibermétrica, 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 (Figura 3a) (FRITZEN E MOTTA, 2018).

3.3. Avaliação Estrutural

O modelo do equipamento FWD utilizado foi o 8833 da fabricante sueca Konsult & Utveckling AB (KUAB), sendo as deflexões do pavimento medidas com nove transdutores de deflexão absoluta, chamados sismômetros. Esses transdutores (LVDTs) localizam-se no centro da placa de carga e 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 (Figura 3b).



Figura 3. (a) Perfilômetro a laser instalado no veículo da COPPE/UFRJ (Fonte: Fritzen e Motta, 2018). (b) FWD KUAB modelo 8833 realizando as leituras

Em relação à 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. As amostras de materiais coletadas das camadas foram ensaiadas no laboratório da Fundação Centro Tecnológico de Juiz de Fora (FCT-JF) seguindo-se os procedimentos descritos nas normas para os ensaios de caracterização e de módulo de resiliência.

3.4. Retroanálise

Como primeira etapa do processo de retroanálise, dividiu-se o trecho em segmentos homogêneos, visando 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. O procedimento seguido foi o indicado pela AASHTO (1993), o qual faz uso das diferenças acumuladas e utiliza as deflexões máximas medidas como parâmetro.

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. Visando desenvolver um projeto o mais confiável possível, admitiu-se, nesse trabalho, apenas resultados cujos erros se apresentaram inferiores a 10 μm .

A estrutura do pavimento inserida no programa computacional corresponde àquela observada na prospecção, sendo que os coeficientes de Poisson (μ) 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 / $\mu = 0,45$;

3.5. Dimensionamento do Reforço

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.

O usuário então entra com os dados complementares da camada asfáltica existente do segmento homogêneo em questão sendo eles o percentual de área trincada, índice de irregularidade longitudinal, espessura de fresagem e idade do pavimento. A mistura asfáltica, a ser inserida no pavimento, foi dosada pelo método SUPERPAVE utilizando-se um tipo de ligante asfáltico que é comumente utilizado em Juiz de Fora, o CAP 50/70 fabricado pela Refinaria Duque de Caxias (Reduc). Essa dosagem foi realizada por Neumann (2018) no Laboratório de Pavimentação da Faculdade de Engenharia da UFJF, com uma porcentagem de ligante final de 5,90%.

Tabela 1 – Resumo dos dados de tráfego considerados no dimensionamento

Dados do Tráfego	
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
Período de projetos	10
N total	1,69e+6

A seguir, introduziu-se os dados relativos ao tráfego do trecho: tipo de via, VMD, FV, porcentagem de veículos na faixa de projeto, taxa de crescimento do tráfego e período de projeto em anos. O valor do VMD, como já apresentado, foi estabelecido, para o primeiro ano da análise

(2018), como sendo 9.300 veículos, considerando 90% carros de passeio e 10% ônibus urbanos, e uma estimativa de 50% de veículos na faixa de projeto (uma vez que o trânsito no campus é bem dividido entre as duas faixas). A Tabela 1, a seguir, resume os dados do tráfego inseridos no dimensionamento.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Segmentação Homogênea

Seguindo o processo de cálculo pelo método das diferenças acumuladas para a segmentação do trecho viário em estudo, obteve-se a curva das diferenças das deflexões pelos trechos. O resumo dos segmentos está descrito na Tabela 2.

Tabela 2 – Segmentos homogêneos definidos

Segmento	Extensão (m)	N de Estacas
1	537,0	26
2	100,0	3
3	300,0	14
4	160,0	8
5	320,0	14
6	263,0	12
7	280,0	15
8	140,0	6

4.2. Levantamento de Campo

4.2.1. Percentual da Área Trincada (Método da Varredura com uso de vídeo e registro)

A partir da análise das imagens coletadas no LVCI, definiu-se o percentual das áreas afetadas por trincas de classe 2 e 3. A seguir, na Tabela 3 apresenta-se um resumo dos valores de AT% característicos ($AT\% = \Delta + \sigma$) encontrados, onde “ Δ ” representa a média aritmética e “ σ ” o desvio padrão da amostra.

Tabela 3 – Percentual de área trincada característico dos segmentos

Segmento	Δ (%)	σ (%)	AT %	Segmento	Δ (%)	σ (%)	AT %
01	24,20	15,75	39,95	05	5,16	8,34	13,50
02	39,58	14,78	54,37	06	13,65	11,97	25,63
03	25,67	10,11	35,78	07	6,25	6,99	13,24
04	18,75	16,58	35,60	08	23,13	7,65	30,77

Foram consultadas tabelas fornecidas pela ANTT (2017) nesse trabalho para avaliar os estados funcional e estrutural do pavimento do trecho, sendo 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”.

4.2.2. Índice de Irregularidade Longitudinal (IRI)

Seguindo o processo de cálculo do índice de irregularidade longitudinal característico (IRI_c) para cada segmento homogêneo, obteve-se os valores constantes na Tabela 4, a seguir.

A ANTT (2017) também enquadra os trechos viários segundo seus respectivos IRI's característicos em 4 classes. De acordo com essa classificação, 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”. Além do mais, não se obteve uma boa correlação entre os valores de IRI e de área trincada ($R^2=0,033$), visto que embora o pavimento se apresente bastante trincado, este se apresenta com boa irregularidade longitudinal, fato que se comprova com valores de IRI.

Tabela 4 – IRIc dos segmentos homogêneos

IRIc (m/km)			
Segmento 01	4,31	Segmento 05	2,56
Segmento 02	4,16	Segmento 06	1,87
Segmento 03	3,39	Segmento 07	2,70
Segmento 04	4,14	Segmento 08	2,72

4.3. Ensaios de Laboratório

Os resultados dos ensaios realizados são descritos nas Tabela 5 a seguir.

Tabela 5 – Resumo dos ensaios de caracterização e de módulo de resiliência do material utilizado na pesquisa

Parâmetro	Revestimento	Base	Sub-Base	Reforço do Sub-Leito	Sub-Leito
Análise tátil-visual	-	Areia siltosa rosa	Areia siltosa bege	Argila marrom	Silte pouco argiloso com areia fina
Granulometria	d > 4,8mm	1%	1%	0%	0%
	4,8 ≤ d < 2,0 mm	8%	12%	1%	1%
	2,0 ≤ d < 0,42 mm	51%	47%	10%	18%
	0,42 ≤ d < 0,075 mm	23%	21%	13%	29%
	d ≤ 0,075 mm	18%	19%	77%	52%
	Umidade Ótima	-	12,90%	18,30%	21,70%
Densidade máxima (g/cm ³)	-	1930	1760	1487	1451
Módulo de Resiliência (MPa)	6447,0	261,8	212,2	153,4	126,0

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 (16%), ressaltando-se que os módulos das camadas granulares foram obtidos por meio da média dos módulos resultantes dos ensaios triaxiais dinâmicos. Com relação à mistura asfáltica de projeto, os resultados dos ensaios de módulo de resiliência e fadiga por compressão diametral (onde k_1 e k_2 são constantes do ensaio de fadiga da função $N_f = k_1 \varepsilon^{k_2}$) são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Resultados dos ensaios de módulo de resiliência e fadiga para a mistura asfáltica de projeto

Módulo de resiliência (MPa)	5963,00
k1	7,40E-11
k2	-3,3104

4.4. Retroanálise

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.

A Tabela 7 apresenta os valores de módulo de elasticidade efetivo obtidos na retroanálise, sendo que esses 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 7 – Valores de módulos obtidos na retroanálise (MPa)

Segmento	Revestimento	Base	Sub-Base	Reforço	Subleito
1	6023	343	341	399	302
2	4910	252	304	368	297
3	7099	480	466	478	368
4	4733	261	220	225	202
5	5174	364	426	509	335
6	4523	240	202	279	270
7	5591	324	427	369	247
8	4898	241	243	258	183

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. Com relação aos valores de desvio e padrão e coeficiente de variação entre as bacias do mesmo segmento, o procedimento não resultou em valores significativos, simbolizando uma baixa dispersão dos valores.

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, sendo que os seus parâmetros físicos foram considerados iguais para todos os segmentos homogêneos definidos. Os dados diferentes entres os segmentos, foram com relação ao comportamento mecânico dos materiais integrantes das camadas.

Inseriu-se então todos os dados referentes ao pavimento antigo, ao tráfego e a nova camada, e realizou-se o dimensionamento do reforço para o cálculo das espessuras. A Tabela 8 exhibe 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, com um nível de confiabilidade de 65%, devido ao sistema adotado ser o sistema local.

Tabela 8 – Resultados obtidos no dimensionamento do reforço de todos os segmentos homogêneos para 50% do tráfego passando na faixa de projeto

Segmento	Espessura do reforço (cm)	AT% no fim do período de projeto	Segmento	Espessura do reforço (cm)	AT% no fim do período de projeto
Segmento 01	5,0	6,8%	Segmento 05	5,0	6,8%
Segmento 02	5,0	8,3%	Segmento 06	5,0	9,9%
Segmento 03	5,0	5,4%	Segmento 07	5,0	7,0%
Segmento 04	5,0	9,8%	Segmento 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 ratificado 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 avaliarem 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, formando uma só faixa, e corroborando para 100% do tráfego nestes trechos. A Tabela 9 apresenta os resultados obtidos:

Tabela 9 – Resultados obtidos no dimensionamento do reforço de todos os segmentos homogêneos para 100% do tráfego passando na faixa de projeto

Segmento	Espessura do reforço (cm)	AT% no fim do período de projeto	Segmento	Espessura do reforço (cm)	AT% no fim do período de projeto
Segmento 01	5,0	18,8%	Segmento 05	5,0	18,8%
Segmento 02	5,0	24,2%	Segmento 06	9,4	28,4%
Segmento 03	5,0	14,1%	Segmento 07	5,0	19,6%
Segmento 04	9,4	29,2%	Segmento 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. À vista disso, uma alternativa para impedir ou retardar o processo de trincamento do pavimento é aplicação de camada de antirreflexão de trincas, podendo essa ser construída de diferentes formas.

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. Entretanto, o programa computacional MeDiNa não analisa a reflexão de trincas do pavimento antigo ao novo, devendo o projetista sugerir alternativas para solucionar o problema.

Nesse dimensionamento, considerou-se a execução de uma camada antirreflexão de trincas, por meio de uma mistura asfáltica densa e fina, entre o revestimento novo e o antigo. O material escolhido foi uma mistura asfáltica especialmente projetada (com dados de materiais usualmente utilizadas em Juiz de Fora) 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/cm³. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 – Resultados do dimensionamento dos segmentos 02, 04, 06 e 08 com camada antirreflexão de trincas para 100% do tráfego passando na faixa

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

Tendo em vista as três simulações efetuadas, constatou-se que a melhor solução de reforço, entre as testadas, 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 (com módulo e coeficientes de fadiga de acordo com a Tabela 6), observando a aplicação da camada antirreflexão de trincas nos trechos correspondentes aos segmentos homogêneos 02, 04, 06 e 08.

5. CONCLUSÕES

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.

Os resultados do ensaio de índice de irregularidade longitudinal corroboram com o fato do pavimento do anel viário de UFJF apresentar condições satisfatórias de tráfego, pois os valores de IRI encontrados para os diferentes segmentos homogêneos ainda são admissíveis, de acordo com as classes indicadas pela ANTT (2017), na maior parte do anel. Isso 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.

Numa primeira simulação, considerando 50% do VMD na faixa de projeto, 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 uma segunda situação (100% do VMD na faixa de projeto), 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 uma terceira situação, pela aplicação de uma camada de antirreflexão de trincas. Por conta da presença dessa nova camada, 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 (MR = 5963 MPa) em toda sua extensão, atentando para a utilização de uma

camada antirreflexão de trincas com 1,5 cm de espessura (MR = 3000 MPa) nos segmentos 02, 04, 06 e 08.

O planejamento de avaliações proposto representa a adoção de procedimentos padronizados do pavimento a ser construído/reformado. Portanto, acredita-se que a execução da operação de manutenção proposta, possibilitará que o anel viário da UFJF seja inserido como um trecho experimental, e consequentemente sirva como objeto de estudo para melhorias do programa MeDiNa.

REFERÊNCIAS

- AASHTO - American Association of State Highway and Transportation Officials (1993). AASHTO guide for design of pavement structures. *AASHTO*.
- ANTT - Agência Nacional de Transportes Terrestres (2017) – *Recurso de Desenvolvimento Tecnológico RDT: procedimento para levantamento visual contínuo informatizado (LVCI) pelo método da varredura*. Relatório Final, Nova Lima.
- ASTM – American Society for Testing and Materials. (2015) *ASTM D5858: Standard guide for calculating in situ equivalent elastic moduli of pavement materials using layered elastic theory*. West Conshohocken, PA., 7p.
- Balbo, J. T. (2007) *Pavimentação asfáltica: materiais, projeto e restauração*. 1ª ed. São Paulo: Oficina de Textos. 560p.
- Bernucci, L. B.; Motta, L. M. G.; Ceratti, J. A. P.; Soares, J. B. (2008) *Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros*. 3ª ed. Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA. 501p.
- Bezerra Neto, R. S. (2004) *Análise comparativa de pavimentos dimensionados através dos métodos empírico do DNER e mecânico e proposta de um catálogo simplificado de pavimentos para a região de Campo Grande (MS)*. 169f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Universidade de São Paulo, São Carlos/SP.
- Danieleski, M. L. (2004) *Proposta de metodologia para avaliação superficial de pavimentos urbanos: aplicação à rede viária de Porto Alegre*. 170f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- DNER (1998) *Guia de redução de acidentes com base em medidas de engenharia de baixo custo*. Rio de Janeiro: DCTec. 140p.
- DNIT (2003a) *PRO 005: defeitos nos pavimentos flexíveis e semi-rígidos – terminologia*. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes Rio de Janeiro. 12p.
- DNIT (2003b) *PRO 009: avaliação subjetiva da superfície de pavimentos flexíveis e semi-rígidos – procedimento*. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Rio de Janeiro. 6p.
- DNIT (2006) *Manual de estudos de tráfego. 2a ed. Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisas Rodoviárias, Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes*, 310p.
- Franco, F. A. C. P. (2007) *Método de dimensionamento mecânico-empírico de pavimentos asfálticos – SISPAV*. 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. (2018a) *BackMeDiNa. v.1.1.0*: Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, Programa computacional.
- Franco, F. A. C. P.; Fritzen, M. A.; Motta, L. M. G. (2018b). *MeDiNa. v.1.1.0*: Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, Programa computacional.
- Fritzen, M. A. (2016) *Desenvolvimento e validação de função de transferência para previsão do dano por fadiga em pavimentos asfálticos*. 262f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- Fritzen, M. A.; Motta, L. M. G. (2018). *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. 20p.
- Gonçalves, F.P. (1999) *O diagnóstico e a manutenção dos pavimentos. Passo Fundo: Universidade de Passo Fundo*, 1999. 75f. Material de Curso.
- Machado, T. F. O. (2016) *Estudo de soluções para reforço do pavimento do anel viário da Universidade Federal de Juiz de Fora*. 91f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora.
- Mikolaj, J., Remek, L., & Margorinova, M. (2019). *Road User Effects Related to Pavement Degradation Based on the Highway Development and Management Tools*. Transportation Research Procedia, 40, 1141-1149. DOI: 10.1016/j.trpro.2019.07.159
- Moraes, C. G. (2015) *Análise de bacias deflectométricas obtidas por 4 equipamentos do tipo falling weight deflectometer (FWD)*. 283f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- Neumann, G. P. (2018). *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.
- Souza Júnior, J. G. (2018) *Aplicação do novo método de dimensionamento de pavimentos asfálticos a trechos de uma rodovia federal*. 219f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.