



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Guilherme Lúcio de Abreu

**DIMENSIONAMENTO À REABILITAÇÃO DE PAVIMENTOS: ANÁLISE  
COMPARATIVA ENTRE OS MÉTODOS DO DNIT E MeDiNa**

Florianópolis, 2024.

Guilherme Lúcio de Abreu

**DIMENSIONAMENTO À REABILITAÇÃO DE PAVIMENTOS: ANÁLISE  
COMPARATIVA ENTRE OS MÉTODOS DO DNIT E MeDiNa**

Trabalho Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Civil do Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito para a obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientadora: Profa. Liseane Padilha Thives, Dra.  
Coorientadora: Poliana Tonieto Cittadella, MSc.

Florianópolis, 2024.

Abreu, Guilherme Lúcio de

DIMENSIONAMENTO À REABILITAÇÃO DE PAVIMENTOS:  
ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE OS MÉTODOS DO DNIT E  
MeDiNa/Guilherme Lúcio de Abreu; orientadora, Liseane Padilha Thives,  
coorientadora, Poliana Tonieto Cittadella, 2024.

104 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal  
de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Graduação em Engenharia Civil,  
Florianópolis, 2024.

Inclui referências.

1. Engenharia Civil. 2. MeDiNa. 3. Reabilitação. 4. Pavimentação. I. Thives,  
Liseane Padilha. II. Cittadella, Poliana Tonieto. III. Universidade Federal de  
Santa Catarina. Graduação em Engenharia Civil. IV. Título.

**Guilherme Lúcio de Abreu**

**DIMENSIONAMENTO À REABILITAÇÃO DE PAVIMENTOS: ANÁLISE  
COMPARATIVA ENTRE OS MÉTODOS DO DNIT E MeDiNa**

Este Trabalho Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de “Engenheiro Civil” e aprovado em sua forma final pelo Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina.

Florianópolis, 7 de fevereiro de 2024.

Prof<sup>ª</sup>. Lia Caetano Bastos, Dr<sup>ª</sup>.  
Coordenadora do TCC

Banca Examinadora:

---

Prof<sup>ª</sup>. Liseane Padilha Thives, Dr<sup>ª</sup>.  
Orientadora  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Poliana Tonieto Cittadella, MSc.  
Coorientadora  
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Enedir Ghisi, PhD.  
Universidade Federal de Santa Catarina

Eng. Felipe Zacchi Gómez, MSc.

Dedico este trabalho a meus familiares e amigos.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a meus pais, Janine e Wilson, pelo apoio e amor incondicional desde o início dessa jornada.

Agradeço a minha avó Maria Marta Martins Lúcio, em memória, e meu avô, José Lúcio, cuja presença e sabedoria foram essenciais durante a conclusão dessa jornada.

Agradeço a meus amigos e colegas que participaram, de alguma forma, desta minha caminhada, em especial, Leonardo Orlandi e Otávio Nobre.

Agradeço à minha orientadora, professora Liseane Padilha Thives, pela orientação valiosa, paciência e dedicação ao longo deste processo. Seus conhecimentos e *insights* foram fundamentais para a fase final desta jornada. Além de sempre ter uma palavra amiga, buscando extrair o melhor de mim durante a realização deste trabalho.

Agradeço à minha coorientadora, Poliana Tonieto Cittadella, pela sua orientação perspicaz, apoio e contribuição para o sucesso deste trabalho.

Aos membros da banca examinadora, Prof. Eneide Ghisi e Eng. Felipe Zacchi Gómez pela disponibilidade e interesse em contribuir com este trabalho.

Agradeço aos professores e demais servidores da Universidade Federal de Santa Catarina, por todos os conselhos e ensinamentos.

Por fim, agradeço à Universidade Federal de Santa Catarina, por ter me proporcionado uma educação de alto nível reconhecida internacionalmente.

## RESUMO

A infraestrutura rodoviária é importante para o desenvolvimento socioeconômico do Brasil, cujo modo rodoviário é predominante. Por outro lado, a falta de manutenção adequada resulta em acidentes, custos adicionais e aparecimento de defeitos precoces nos pavimentos. Os métodos de dimensionamento à reabilitação vigentes, DNER-PRO 269 e DNER-PRO 11, têm base empírica e carecem da consideração de novos materiais, aumento de carga em veículos pesados e análise de condições climáticas locais. O *software* MeDiNa, em implantação no país, permite uma abordagem empírico-mecanicista e busca superar as limitações dos métodos vigentes. Este trabalho tem por objetivo realizar um estudo comparativo entre os métodos de dimensionamento à reabilitação de pavimentos do DNIT (DNER-PRO 11, DNER-PRO 269) e MeDiNa. Foram utilizados dados de um pavimento de uma rodovia catarinense levantados por uma empresa. Inicialmente, os dados de avaliação funcional e estrutural foram tratados para caracterização do trecho em estudo e dimensionamento pelos métodos DNER-PRO 11 e DNER-PRO 269. A retroanálise para obtenção dos módulos de elasticidade das camadas do pavimento foi feita através do *software* BackMeDiNa e realizado o dimensionamento pelo MeDiNa. A partir dos resultados obtidos de cada método, foram estabelecidas as estruturas resultantes para atendimento do tráfego previsto em projeto. As principais diferenças e limitações dos métodos foram analisadas. A principal constatação foi relativa à diferença de espessura da camada de reforço. Para concreto asfáltico convencional, as espessuras pelos métodos DNER-PRO 11, DNER-PRO 269 e MeDiNa resultaram em 5,0 cm, 4,0 cm e 14,7 cm, respectivamente. O MeDiNa resultou em uma espessura maior, uma vez que se fundamenta em uma análise empírico-mecanicista e evidenciou a necessidade de camadas mais espessas para atender ao tráfego previsto. Também foi realizado o dimensionamento da camada de reforço em concreto asfáltico com asfalto borracha pelo MeDiNa. Houve a redução da espessura em relação ao concreto asfáltico convencional para 12,5 cm. Ficou evidente a influência de novos materiais no dimensionamento pelo MeDiNa, o que não foi observado nos métodos do DNIT. Assim, foram reveladas limitações nos métodos empíricos de dimensionamento à reabilitação de pavimentos atuais. O MeDiNa se mostrou como uma ferramenta mais abrangente e precisa para a análise de pavimentos, contribuindo significativamente para a eficácia de projetos rodoviários.

**Palavras-chave:** MeDiNa, Pavimentação, Reabilitação.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Distribuição de tensões em estruturas de pavimentos.....	21
Figura 2. Camadas genéricas da estrutura de um pavimento flexível. ....	22
Figura 3. Serventia e VSA.....	33
Figura 4. Faixas de variação do IRI para diferentes tipos de pavimentos e velocidades. ...	35
Figura 5. Deformações nas camadas do pavimento pela aplicação da carga. ....	37
Figura 6. Esquema do ensaio com a viga Benkelman .....	38
Figura 7. Princípio de funcionamento do deflectômetro de impacto .....	39
Figura 8. Exemplo de equipamento FWD .....	39
Figura 9. Exemplo de pontos de avaliação para determinação da bacia de deflexão. ....	40
Figura 10. Exemplo de raio de curvatura na bacia deflectométrica .....	40
Figura 11. Elementos necessários à retroanálise. ....	44
Figura 12. Estrutura de referência de segmento homogêneo.....	48
Figura 13. Eixos do sistema de coordenadas adotado pelo MeDiNa. ....	52
Figura 14. Interface do usuário MeDiNa.....	53
Figura 15. Propriedades da camada de revestimento existente .....	54
Figura 16. Propriedades de concreto asfáltico disponibilizado pelo MeDiNa. ....	54
Figura 17. Interface do software BackMeDiNa.....	56
Figura 18. Etapas metodológicas do trabalho.....	57
Figura 19. Planilha modelo disponibilizada pelo <i>software</i> BackMeDiNa. ....	63
Figura 20. <i>Interface</i> do <i>software</i> BackMeDiNa durante a retroanálise das bacias.....	64
Figura 21. Dados inseridos relativos à camada de revestimento existente.....	66
Figura 22. Dados de tráfego inseridos no MeDiNa.....	66
Figura 23. Estrutura resultante do dimensionamento pelo DNER-PRO 11. ....	71
Figura 24. Estrutura de referência no método DNER-PRO 269. ....	71
Figura 25. Estrutura resultante do dimensionamento pelo DNER-PRO 269. ....	73
Figura 26. Estruturas resultantes do dimensionamento pelo MeDiNa .....	75
Figura 27. Estruturas resultantes dos dimensionamentos pelo DNIT MeDiNa. ....	76



## LISTA DE QUADROS

Quadro 1. Tipos, causas e exemplos de deformações permanentes. ....	26
Quadro 2. Tipos de defeitos de pavimentos flexíveis.....	27
Quadro 3. Codificação e classificação dos defeitos. ....	30
Quadro 4. Outros defeitos.....	31
Quadro 5. Conceitos do IGG. ....	33
Quadro 6. Correlações entre medidas de FWD e viga Benkelman. ....	43
Quadro 7. Critérios de avaliação estrutural do método DNER-PRO 11. ....	46
Quadro 8. Quadro resumo dos resultados dos ensaios do subleito.....	58
Quadro 9. Seleção da alternativa de acordo com o método DNER-PRO 11.....	70
Quadro 10. Características para classificação resiliente do solo do subleito. ....	72

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Conceitos do estado de pavimento em função dos índices.....	35
Tabela 2. Valores de fator de correção sazonal.....	47
Tabela 3. Classificação do solo do subleito quanto a resiliência.....	48
Tabela 4. Unidades padrão do software MeDiNa.....	52
Tabela 5. Nível de confiabilidade e critério de parada por tipo de via.....	55
Tabela 6. Estrutura do pavimento.....	59
Tabela 7. Valor de z em relação ao número de levantamentos. ....	59
Tabela 8. Índices de avaliação funcional obtidos através do levantamento de defeitos.....	61
Tabela 9. Dados de Irregularidade Longitudinal.....	61
Tabela 10. Dados de entrada das camadas no <i>software</i> BackMeDiNa. ....	64
Tabela 11. Propriedades do concreto asfáltico “Classe 1”. ....	65
Tabela 12. Dados de entrada do dimensionamento pelo MeDiNa. ....	65
Tabela 13. Valores de referência para a realização da análise estatística.....	68
Tabela 14. Obtenção da deflexão característica. ....	68
Tabela 15. Conversão da deflexão medida por FWD para a medida por viga Benkelman. ....	68
Tabela 16. Obtenção da deflexão de projeto. ....	69
Tabela 17. Obtenção da deflexão admissível pelo método DNER-PRO 11. ....	69
Tabela 18. Resultado do cálculo do reforço pelo método DNER-PRO 11. ....	70
Tabela 19. Seleção do tipo de solo do subleito pelo DNER-PRO 269.....	72
Tabela 20. Obtenção da espessura efetiva. ....	73
Tabela 21. Obtenção da deflexão admissível pelo método DNER-PRO 269. ....	73
Tabela 22. Resultado do cálculo da camada de reforço no método DNER-PRO 269. ....	73
Tabela 23. Valores de módulo de elasticidade provenientes da retroanálise. ....	74
Tabela 24. Propriedades do concreto asfáltico com asfalto borracha “CAPFLEX B PG 64-22”. ....	75
Tabela 25. Área trincada das estruturas geradas pelo MeDiNa no final do período de projeto.....	76
Tabela 26. Área trincada das estruturas no final do período de projeto. ....	77

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AEMC	Análise Elástica de Múltiplas Camadas
cm	Centímetro
CNT	Confederação Nacional do Transporte
COPPE	Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia
D	Deflexão Média
DEINFRA	Departamento Estadual de Infraestrutura
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
FC-2	Trincas classe 2
FC-3	Trincas classe 3
FFM	Fator de Fadiga de Mistura Asfáltica
FV	Fator de Veículo
FWD	<i>Falling Weight Deflectometer</i>
g	Gramma
HR	Espessura da Camada de Reforço
HRB	<i>Highway Research Board</i>
ICPF	Índice de Condição de Pavimentos Flexíveis
IGG	Índice de Gravidade Global
IGI	Índice de Gravidade Individual
IP	Índice de Plasticidade
IPR	Instituto de Pesquisas Rodoviárias
IRI	Índice Internacional de Irregularidade
ISC	Índice de Suporte Califórnia
K	Fator de Redução
k <sub>1</sub> e k <sub>2</sub>	Coefficientes de Regressão
kgf	Quilograma-força
km	Quilômetro
kN	Quilo Newton
LD	Lado Direito
LE	Lado Esquerdo
LL	Limite de Liquidez
MeDiNa	Método de Dimensionamento Nacional

mm	Milímetro
n	Número de levantamentos
NBR	Normas Brasileiras
QI	Quociente de Irregularidade
R	Raio de Curvatura
RMS	<i>Root Mean Square</i>
SBS	<i>Styrene-Butadiene-Styrene</i> (Estireno-Butadieno-Estireno)
TR	Trincamento
Ton	Tonelada
UFRJ	Universidade Federal de Santa Catarina
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
USACE	<i>United States Army Corps of Engineers</i>
VB	Viga Benkelman
VMD	Volume Médio Diário
VSA	Valor de Serventia Atual
z	Parâmetro relacionado ao número de levantamentos

## LISTA DE SÍMBOLOS

%FC-2	Incidência de trincas classe 2
%FC-3	Incidência de trincas classe 3
°C	Grau Celsius
AT%	Percentual de área trincada
ATR <sub>médio</sub>	Afundamento de Trilhas de Rodas médio
D <sub>0</sub>	Deflexão Máxima
D <sub>120</sub>	Deflexão medida a 120 cm do ponto de aplicação da carga
D <sub>20</sub>	Deflexão medida a 20 cm do ponto de aplicação da carga
D <sub>25</sub>	Deflexão medida a 25 cm do ponto de aplicação da carga
D <sub>30</sub>	Deflexão medida a 30 cm do ponto de aplicação da carga
D <sub>45</sub>	Deflexão medida a 45 cm do ponto de aplicação da carga
D <sub>65</sub>	Deflexão medida a 65 cm do ponto de aplicação da carga
D <sub>90</sub>	Deflexão medida a 90 cm do ponto de aplicação da carga
D <sub>adm</sub>	Deflexão Admissível
D <sub>B</sub>	Deflexão Característica medida por viga Benkelman
D <sub>c</sub>	Deflexão Característica
D <sub>FWD</sub>	Deflexão Característica medida por FWD
D <sub>p</sub>	Deflexão de projeto
D <sub>x</sub>	Deflexão medida a x cm do ponto de aplicação de carga
F <sub>S</sub>	Fator de Correção Sazonal
H <sub>cg</sub>	Espessura da Camada Granular
h <sub>e</sub>	Espessura da Camada de Revestimento
h <sub>ef</sub>	Espessura Efetiva da Camada de Revestimento
I <sub>1</sub> , I <sub>2</sub>	constantes relacionadas a características resilientes do solo do subleito.
N <sub>80kN</sub>	Número de solicitações do eixo padrão de 80 kN
R <sup>2</sup>	Coefficiente de Determinação
μm	Micrômetro (10 <sup>-6</sup> m)
σ	Desvio Padrão

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	16
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	21
<b>2.1. Pavimentos flexíveis – Conceito e camadas constituintes</b> .....	21
2.1.1. Revestimento.....	22
2.1.2. Base.....	23
2.1.3. Sub-base .....	24
2.1.4. Reforço de Subleito.....	24
2.1.5. Subleito.....	24
<b>2.2. Deterioração de pavimentos flexíveis</b> .....	24
2.2.1. Mecanismos associados ao trincamento.....	25
2.2.2. Mecanismos de deformação .....	26
<b>2.3. Tipos de defeitos</b> .....	26
<b>2.4. Avaliação de pavimentos</b> .....	31
2.4.1. Avaliação funcional.....	31
2.4.2. Avaliação estrutural.....	35
<b>2.5. Dimensionamento à reabilitação</b> .....	45
2.5.1. Método DNER-PRO 11 .....	45
2.5.2. Método DNER-PRO 269 .....	47
2.5.3. MeDiNa.....	50
<b>3. MATERIAIS E MÉTODO</b> .....	57
<b>3.1. Caracterização do trecho</b> .....	58
<b>3.2. Dados de avaliação funcional e estrutural</b> .....	58
3.2.1 Dados de avaliação estrutural.....	58
3.2.2. Dados de avaliação funcional.....	60
<b>3.3. Dimensionamento pelos métodos do DNIT</b> .....	61
3.3.1. Dimensionamento pelo DNER-PRO 11.....	61
3.3.2. Dimensionamento pelo DNER-PRO 269.....	62
<b>3.5. Retroanálise pelo BackMeDiNa</b> .....	62
<b>3.6. Dimensionamento de reforço pelo MeDiNa</b> .....	64
<b>3.7. Comparativo entre as estruturas obtidas</b> .....	67
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	68
<b>4.1. Dados de avaliação estrutural</b> .....	68
4.1.1. Dados de deflexão.....	68
4.1.2. Raio de Curvatura .....	69

<b>4.2. Dimensionamento pelo método DNER-PRO 11</b> .....	69
<b>4.3. Dimensionamento pelo método DNER-PRO 269</b> .....	71
<b>4.4. Retroanálise pelo BackMeDiNa</b> .....	74
<b>4.5. Dimensionamento pelo MeDiNa</b> .....	75
<b>4.6. Comparativo de resultados entre os métodos DNIT e MeDiNa</b> .....	76
<b>5. CONCLUSÕES</b> .....	78
<b>5.1. Considerações Finais</b> .....	78
<b>5.2. Limitações do trabalho</b> .....	80
<b>5.3. Recomendações para Trabalhos Futuros</b> .....	80
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	82
<b>ANEXO - BACIAS DEFLECTOMÉTRICAS LEVANTADAS POR FWD</b> .....	91
<b>APÊNDICE A - DADOS DAS BACIAS DEFLECTOMÉTRICAS ADICIONADOS AO BACKMEDINA</b> .....	92
<b>APÊNDICE B – RELATÓRIO DO DIMENSIONAMENTO DE REFORÇO PELO MEDINA COM CONCRETO ASFÁLTICO “CLASSE 1”</b> .....	93
<b>APÊNDICE C – RELATÓRIO DO DIMENSIONAMENTO DE REFORÇO PELO MEDINA COM CONCRETO ASFÁLTICO COM ASFALTO BORRACHA “CAPFLEX B PG 64-22”</b> .....	97
<b>APÊNDICE D – RELATÓRIO DO DESEMPENHO DA ESTRUTURA RESULTANTE DO DNER-PRO 11.</b> .....	101

## 1. INTRODUÇÃO

A infraestrutura rodoviária desempenha um importante papel no desenvolvimento e contribui para o crescimento econômico dos países. A ampla cobertura territorial proporcionada pelo transporte rodoviário se mostra como um benefício, especialmente em um país com dimensões continentais como o Brasil. Por meio de rodovias, estradas e vias urbanas, o acesso a áreas e regiões remotas, rurais e de difícil acesso é possibilitado, sendo fundamental para a economia e qualidade de vida da população (Rodrigues, 2007).

O setor de transportes, especialmente o rodoviário, exerce impacto direto no desenvolvimento socioeconômico. As rodovias são fundamentais para o acesso a diversos bens, a expansão de mercados e a movimentação eficiente de cargas e passageiros (CNT, 2023). Desse modo, o pavimento em adequadas condições é vital em infraestruturas de transporte, com o objetivo de oferecer conforto e segurança aos usuários das vias. Mesmo com a importância que as rodovias representam, são diversos os desafios que o setor rodoviário enfrenta no Brasil, principalmente quanto à falta de manutenção adequada dos pavimentos. Muito frequentemente, os pavimentos não atingem a vida útil para os quais foram dimensionados e apresentam defeitos precoces como trincamento por fadiga e afundamentos (Rodrigues, 2007; Lehmert, 2020).

Uma recente avaliação das condições dos pavimentos flexíveis das rodovias brasileiras revelou que as más condições das vias eram notórias. A pesquisa realizada pela Confederação Nacional do Transporte (CNT) revelou que, numa extensão de 111.502 km, 56,8% da rede estadual e federal pavimentada apresentaram problemas no pavimento, cujas condições foram classificadas como regulares, ruins ou péssimas (CNT, 2023).

Dentre os principais defeitos, predominaram o desgaste em 55,8% da extensão total avaliada (62.278 km), trincas em malha e/ou remendos em 30,8% (34.304 km), afundamentos, ondulações ou buracos em 4,5% (5.053 km) e em 0,6% (628 km), a estrutura do pavimento estava completamente destruída. Destaca-se que a rede pavimentada do Brasil é de 213.500 km (DNIT, 2023) e a pesquisa da CNT avaliou em 2023, 111.502 km, que representa aproximadamente 52% do total.

A situação atual resulta em diversos problemas para a sociedade e ao país, como por exemplo, o aumento dos custos operacionais, danos aos veículos e aos usuários, o acréscimo da emissão de poluentes e a elevação das taxas de sinistros, bem como os gastos econômicos associados (CNT, 2023).

Pavimentos rodoviários são estruturas constituídas por camadas de diferentes tipos de materiais, sendo classificados como flexíveis, semi-rígidos e rígidos. No Brasil, há



predominância dos pavimentos flexíveis, os quais são compostos por camadas de revestimento em material asfáltico e camadas inferiores granulares, estabilizadas, assentes sobre o solo de fundação (subleito). No Brasil, os pavimentos flexíveis são dimensionados para um período de projeto de 10 anos, de acordo com o tráfego projetado, expresso em número de eixos equivalentes ao eixo padrão de 80 kN, denominado de número N (DNIT, 2006a).

O tráfego e a magnitude das cargas são os fatores que influenciam de forma mais importante o desempenho de um pavimento. No Brasil, o efeito do tráfego sobre a estrutura do pavimento é representado pelo “N”, ou seja, o número de repetições do eixo simples padrão de 80 kN em um período de projeto de 10 anos. O excesso de carga de transportes nas rodovias brasileiras está entre as principais causas da deterioração prematura dos pavimentos. Desta forma, por vezes o N pode ser atingido em menos de 10 anos ou há casos em que o N foi estimado de forma inadequada. Após o atingimento do número N e, de acordo com as manutenções realizadas ao longo do período de projeto, a condição do pavimento resultará em um determinado estado de deterioração, com a necessidade de reabilitação (Albano, 2005; Adlinge e Gupta, 2018).

Ainda, como resultado da ação de agentes de intemperismo, solicitações repetidas de tráfego e modificações químicas e físicas dos materiais componentes, a estrutura do pavimento sofre um processo progressivo de degradação, o que implica na redução progressiva da capacidade de carga e funcionalidade e na necessidade de reabilitação (DNIT, 2006b; Mikolaj *et al.*, 2019).

O Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) estabelece quatro procedimentos (métodos) de dimensionamento à reabilitação de pavimentos flexíveis. No entanto, atualmente, apenas dois métodos têm sido comumente utilizados, sendo o DNER-PRO 11 (DNER, 1979) e o DNER-PRO 269 (DNER, 1994c).

O método DNER PRO 11 constitui um procedimento de avaliação estrutural para pavimentos flexíveis, baseado em medidas deflectométricas. Este método permite a identificação das deficiências, determinação das causas e estimação da vida útil remanescente. Como resultado, em função das condições do pavimento são propostas alternativas de manutenção para prolongar a vida de serviço ou de reforços para um novo ciclo de vida (DNER, 1979). Por outro lado, o método DNER-PRO 269 estabelece diretrizes para a aplicação de projetos de restauração em pavimentos flexíveis usando o método da resiliência dos materiais, ao realizar uma análise estrutural de cada camada do pavimento (DNER, 1994c).

No entanto, os métodos atuais para dimensionamento à reabilitação não consideram a melhoria da capacidade estrutural da incorporação de novos materiais, bem como a avaliação das características mecânicas, a adaptação ao aumento da carga dos veículos pesados e a análise das condições climáticas locais. Essencialmente, são métodos com base empírica, desenvolvidos a partir de observações e investigações em campo, sendo recomendados apenas para replicação em locais com condições estruturais, de tráfego e ambientais semelhantes aos estudos originais (Machado, 2019).

Para minimizar os problemas da durabilidade dos pavimentos é fundamental que haja investimentos em infraestrutura, tecnologia e inovação, que inclui a construção, manutenção e reabilitação de rodovias com qualidade e a implantação de novas tecnologias de dimensionamento no país (Machado, 2019).

Considerando o desenvolvimento, em nível mundial, de métodos empírico-mecanicistas e a necessidade de atualização dos métodos do DNIT, foi desenvolvido um *software* de dimensionamento de pavimentos novos e reabilitação, denominado MeDiNa (Método de Dimensionamento Nacional). Trata-se de uma abordagem empírico-mecanicista, a partir de um modelo computacional. No modelo, considera-se cálculo de deformações, deslocamentos e tensões dos sistemas de camadas a partir da aplicação de um carregamento, juntamente com as características dos materiais, que devem ser obtidas através de ensaios de laboratório (IPR, 2020).

O *software* MeDiNa possui o modo “reforço”, adotado para dimensionamento à reabilitação, no qual é utilizado o programa BackMeDiNa que realiza a retroanálise das bacias deflectométricas. A análise das bacias de deflexão permite a obtenção dos módulos de elasticidade das camadas, cujo levantamento pode ser obtido por equipamentos como o *Falling Weight Deflectometer* (FWD) ou viga Benkelman. A partir do levantamento dos defeitos, o projetista pode propor as correções necessárias antes da aplicação da camada de reforço (IPR, 2020). No entanto, a metodologia de dimensionamento à reabilitação pelo *software* MeDiNa ainda está em implantação, de forma que avaliações contemplando este método contribuem para a formação de um banco de dados e comparativos.

Além da elaboração de novos métodos de dimensionamento à reabilitação, o aumento da densidade de tráfego e a adversidade climática têm levado ao desenvolvimento de novas tecnologias de construção e o uso de novos materiais (Barros, 2022). Nesse contexto, estão presentes os estudos sobre a utilização de concreto asfáltico com ligantes modificados nas camadas de revestimento.

Rodrigues e Carvalho (2020) verificaram que o concreto asfáltico com asfalto

borracha, proveniente de pneus inservíveis, em camadas de revestimentos, resultou em uma maior rigidez, menor custo de manutenção e ainda, como uma alternativa sustentável quando comparada às camadas em concreto asfáltico convencional.

Barros *et al.* (2016) verificaram que, em comparação com o concreto asfáltico convencional, o concreto asfáltico modificado por polímero Estireno-Butadieno-Estireno ou *Styrene-Butadiene-Styrene* (SBS) atendeu, de forma mais eficaz, a crescente demanda de solicitações de tráfego, uma vez que o ligante modificado tem ponto de amolecimento mais elevado, maior rigidez e menor susceptibilidade a elevadas temperaturas. Consequentemente, os revestimentos com concreto asfáltico modificado por polímero SBS apresentam maior resistência à deformação permanente e afundamentos de trilhas de rodas.

Os métodos de dimensionamento para reabilitação de pavimentos flexíveis vigentes no país, além de base empírica, não contemplam de forma direta o emprego de novos materiais, como de concreto asfáltico com ligantes modificados, por exemplo. Neste cenário, é importante avaliar o dimensionamento à reabilitação contemplando o *software* MeDiNa.

Este trabalho trata de um estudo comparativo entre três métodos de dimensionamento à reabilitação de pavimentos flexíveis, sendo os dois do DNIT (Método DNER-PRO 11 e Método DNER-PRO 269) e o MeDiNa.

No estudo, foram utilizados dados de um projeto executado por uma empresa para reabilitação de um trecho de uma rodovia do Estado de Santa Catarina. Foi realizado o dimensionamento pelos métodos do DNIT e a retroanálise pelo BackMeDiNa para o subsequente dimensionamento pelo MeDiNa. As estruturas dimensionadas pelos dois métodos do DNIT foram comparadas com a obtida pelo MeDiNa.

## 1.1. Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo geral realizar um estudo comparativo entre os métodos de dimensionamento à reabilitação de pavimentos do DNIT (DNER-PRO 11 e DNER-PRO 269) e MeDiNa.

## 1.2. Objetivos Específicos

Para atingir o objetivo geral, foram propostos os seguintes objetivos específicos:

- Conceituar os principais índices e parâmetros de avaliação de pavimentos flexíveis;
- Avaliar a eficiência da retroanálise pelo *software* BackMeDiNa;
- Demonstrar os dados de entrada do programa MeDiNa;
- Realizar uma avaliação comparativa entre as estruturas resultantes dos

dimensionamentos à reabilitação.

### **1.3. Estrutura do trabalho**

Este trabalho está estruturado em cinco capítulos cujos conteúdos são descritos a seguir:

O Capítulo 1, Introdução, apresenta uma contextualização acerca do tema. Os objetivos, justificativa e estrutura do trabalho.

No Capítulo 2, Revisão Bibliográfica, é apresentado o estado da arte relacionado aos temas essenciais para o desenvolvimento do trabalho.

O Capítulo 3, Materiais e Método, apresenta e descreve a metodologia adotada, apoiada em normas, critérios de dimensionamento, literatura consultada, etc. que embasam o estudo.

No Capítulo 4, Resultados e Discussão, são apresentados e comentados os resultados obtidos.

O Capítulo 5, Considerações Finais e Recomendações, apresenta um resumo das avaliações apresentadas e discutidas no trabalho, bem como, propostas e recomendações para futuras pesquisas na área.

Nas Referências constam as referências bibliográficas citadas e que serviram de base para a elaboração da metodologia adotada.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

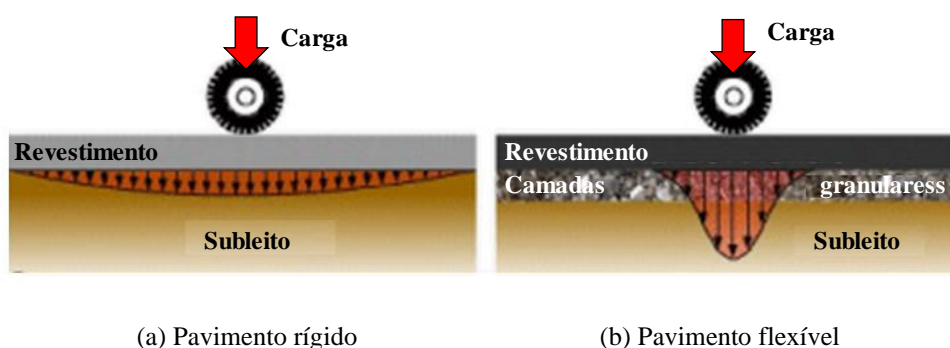
Este capítulo contemplou uma breve exposição sobre os pavimentos flexíveis e os materiais comumente utilizados nas camadas constituintes. Incluiu ainda uma descrição a respeito dos mecanismos de degradação de pavimentos flexíveis e principais defeitos. Foram apresentadas as metodologias de avaliação (funcional e estrutural) de pavimentos flexíveis a serem reabilitados e abordados os procedimentos dos métodos DNER PRO 11 e DNER PRO 269 e dos *softwares* BackMeDiNa e MeDiNa.

### 2.1. Pavimentos flexíveis – Conceito e camadas constituintes

Pavimento rodoviário é uma estrutura constituída por múltiplas camadas com espessuras finitas, construída sobre a superfície final de terraplenagem e projetada para resistir às solicitações geradas pelo tráfego e às condições climáticas. A estrutura dimensionada deve atender aos requisitos de economia e propiciar aos usuários melhorias nas condições de rolamento com conforto e segurança (Bernucci *et al.*, 2022).

Dependendo do tipo de revestimento e camadas constituintes, os pavimentos rodoviários podem ser rígidos, semi-rígidos ou flexíveis. O pavimento rígido é composto por placa de concreto de cimento Portland na camada de revestimento, que é o principal componente estrutural. O revestimento tem a função de receber de forma intensa e de aliviar as tensões nas camadas subjacentes (sub-base e subleito ou subleito) devido a sua elevada rigidez à flexão (Almeida, 2017). A distribuição das tensões é mostrada na Figura 1(a).

**Figura 1.** Distribuição de tensões em estruturas de pavimentos.



**Fonte:** Adaptado de TxDOT (2021).

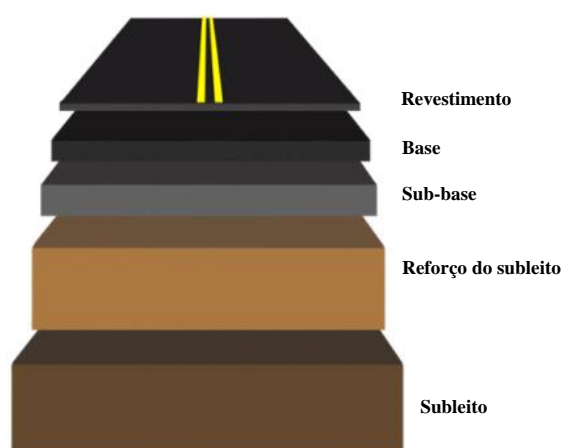
No Brasil, os pavimentos flexíveis têm vasta aplicação. Trata-se de uma estrutura cuja camada de revestimento é composta por materiais asfálticos e as demais camadas por materiais granulares e solo. A Figura 1(b) ilustra a distribuição das tensões ao longo da estrutura de um pavimento flexível. Quanto à distribuição das tensões geradas pelas

solicitações do tráfego, a camada de revestimento alivia a maior parcela e distribui para as demais camadas, as quais contribuem, em conjunto, para a resistência da estrutura (Almeida, 2017). No caso de uma estrutura com camada em material asfáltico e base rígida, a denominação é de pavimento semi-rígido. Sendo os pavimentos flexíveis foco deste trabalho, a estes foi dado detalhamento.

O pavimento flexível é projetado para receber e transmitir esforços de modo a aliviar as tensões sobre as camadas inferiores (Figura 1b), que geralmente são menos resistentes. Para que a estrutura se comporte de forma adequada frente às solicitações de tráfego e clima, todas as camadas devem suportar deformações compatíveis com sua natureza e capacidade portante. Dessa forma, cada camada no pavimento desempenha uma ou várias funções específicas, ao trabalhar em conjunto para garantir condições apropriadas de suporte e rolamento para os veículos, independentemente das condições climáticas (Balbo, 2007).

As camadas de um pavimento flexível, em número e tipo de material dependem do dimensionamento. Em geral, um pavimento flexível pode ser constituído pelas seguintes camadas (Figura 2): revestimento, base, sub-base, reforço do subleito e subleito (Medina e Motta, 2015). Em certas situações, um pavimento pode ser desprovido de camada de sub-base ou reforço do subleito. No entanto, a presença do revestimento e base assentes sobre o subleito são requisitos mínimos para caracterizar a estrutura como um pavimento flexível (Balbo, 2007). As camadas de um pavimento flexível (Figura 2) são a seguir descritas.

**Figura 2.** Camadas genéricas da estrutura de um pavimento flexível.



**Fonte:** Adaptado de Constro (2023).

### 2.1.1. Revestimento

A camada de revestimento é destinada a resistir diretamente às ações do tráfego e desgastes, proteger as camadas inferiores e propiciar uma superfície de rodagem que proporcione conforto aos usuários da rodovia (Cunha e Oliveira, 2021). Por razões técnicas,

construtivas, de custo e dependendo da espessura, a camada de revestimento pode ser dividida em duas ou mais camadas, denominadas de ligação ou *binder* (Balbo, 2007).

Na maioria dos pavimentos brasileiros usa-se como revestimento uma mistura de agregados minerais de várias dimensões, que podem variar quanto à fonte, com ligantes asfálticos, denominada de mistura asfáltica. De forma adequadamente proporcionada e processada, a mistura tem propriedades de impermeabilização, flexibilidade, durabilidade contra desagregação e envelhecimento e resistência à derrapagem dos pneus. O projeto da mistura inclui a avaliação da resistência à fadiga, às deformações permanentes e ao trincamento térmico. As propriedades devem ser adequadas às condições climáticas e ao tráfego previstos para a região onde o pavimento será implantado (Bernucci *et al.*, 2022).

Os revestimentos dos pavimentos flexíveis, constituídos por materiais asfálticos podem ser do tipo misturas asfálticas a quente ou concreto asfáltico, as quais são produzidas em usinas de asfalto. Dependendo da granulometria e tipo de asfalto, apresentam diferentes denominações de acordo com as especificações, como por exemplo:

- Concreto asfáltico – Norma DNIT 031-ES (DNIT, 2006c);
- Concreto asfáltico modificado com polímero – Norma DNER-ES 385 (DNER, 1999a);
- Camada porosa de atrito e pré-misturado a quente com asfalto polímero - Norma DNER-ES 386 (DNER, 1999b);
- Concreto asfáltico com asfalto borracha, via úmida, do tipo *terminal blending*- Norma DNIT 112-ES (DNIT, 2009);

Após a produção, estes materiais são espalhados e compactados por meio de rolos compressores em campo (Balbo, 2007). A camada de revestimento de pavimentos flexíveis também pode ser construída em campo, como por exemplo, sob a forma de tratamentos superficiais. O tratamento superficial consiste na aplicação, sobre a camada de base, de ligante asfáltico seguida de distribuição de agregado e compactação. O número de camadas classifica a técnica em tratamento superficial duplo ou triplo (Bernucci *et al.*, 2022).

### 2.1.2. Base

A base é a camada posicionada inferiormente ao revestimento (ou ligação) e auxilia na resistência dos esforços do tráfego e na distribuição para as camadas inferiores (DNIT, 2006a). Segundo Bernucci *et al.* (2022), entre os principais materiais granulares comumente empregados no Brasil para as camadas de base, destacam-se:

- Brita graduada simples - material de composição granulométrica bem-graduada;
- Macadame hidráulico - composto por agregados graúdos de composição aberta;
- Solo-brita - composto por material britado misturado com a areia, silte e argila;
- Rachão - constituído de partículas de maior dimensão, é a combinação de agregados na fração pedra e fração pedregulho.

### 2.1.3. Sub-base

A sub-base desempenha um papel suplementar à base. Esta camada é adotada quando não é viável, por motivos técnico-econômicos, construir a base diretamente sobre o subleito ou reforçá-lo, de modo que compartilhe a mesma função atribuída à base. Em geral, é constituída pelos mesmos tipos de materiais que compõem a base, porém, com características geotécnicas inferiores. A introdução da camada de sub-base pode auxiliar na redução do custo total da estrutura (Bernucci *et al.*, 2022; DNIT, 2006a).

### 2.1.4. Reforço de Subleito

O reforço do subleito é uma camada uniforme utilizada por motivos técnico-econômicos para melhorar a capacidade de suporte de carga do subleito, de acordo com a norma DNIT 138 - ES (DNIT, 2010c). Comumente, quando a capacidade de suporte de carga do subleito é insuficiente e caso se torne necessário reduzir espessuras elevadas da camada de sub-base, adota-se a camada de reforço (DNIT, 2006a; Bernucci *et al.*, 2022;).

### 2.1.5. Subleito

O solo de fundação, no qual as camadas do pavimento estão assentes, é denominado de subleito, após regularização. A norma DNIT 137-ES (DNIT, 2010b) é a especificação de serviço relativa à regularização do subleito.

Sendo a camada de terreno natural e de fundação para a estrutura do pavimento, o conhecimento de suas características geotécnicas e de resistência é fundamental para o dimensionamento da estrutura, reconhecimento do tipo de solo e perfis ao longo da rodovia (DNIT, 2006a). Um dos índices de resistência das camadas de solos e camadas granulares utilizados nos métodos de dimensionamento é o Índice de Suporte Califórnia (ISC), cujo ensaio para determinação segue a norma DNIT 172-ME (DNIT, 2016).

## 2.2. Deterioração de pavimentos flexíveis

A estrutura de um pavimento é dimensionada para um determinado período de vida durante o qual deve ter a capacidade de receber e transmitir esforços, sem apresentar degradações estruturais e funcionais precoces. Assim, a estrutura deve ser dimensionada para



resistir aos esforços compatíveis com as características e capacidade estrutural das camadas, de modo a não ocorrer ruptura prematura (Fontes, 2009).

Os pavimentos flexíveis são projetados para um determinado período de projeto, em geral de 10 anos. Ao longo do tempo, a estrutura, principalmente a camada de revestimento sofre degradação e perde serventia. O decréscimo da condição ou da serventia do pavimento ao longo do tempo é conhecida como deterioração do pavimento (DNIT, 2006b).

A adequada e fidedigna compreensão de aspectos relativos ao desempenho do pavimento e os mecanismos que regem o fenômeno de sua deterioração é importante para a tomada de decisão quanto à necessidade de restauração. Os dois principais mecanismos de degradação ocorrem por trincamento ou por deformação, a seguir descritos de acordo com DNIT (2006b).

### 2.2.1. Mecanismos associados ao trincamento

Os revestimentos asfálticos tendem a trincar em algum estágio de suas vidas sob as ações combinadas do tráfego e das condições ambientais, por meio de um ou mais mecanismos. A trinca é um defeito na superfície que enfraquece o revestimento e permite a entrada da água, provocando um enfraquecimento adicional da estrutura. Uma vez iniciado, o trincamento tende a aumentar sua extensão e severidade conduzindo eventualmente a desintegração do revestimento (DNIT, 2006b).

Em decorrência desses efeitos, a velocidade de deterioração de um pavimento aumenta consideravelmente com o surgimento de trincas, tendo um impacto significativo na evolução das deformações nas trilhas de roda e na formação de irregularidades longitudinais. Essa é a razão pela qual o trincamento tem sido, ao longo do tempo, um critério essencial para iniciar intervenções de restauração em pavimentos. Os principais tipos de trincas são (DNIT, 2006b):

- Trincamento por fadiga: decorrente dos efeitos cumulativos do carregamento sucessivo. Este tipo de trincamento é caracterizado em sua fase final pelas trincas “couro de jacaré”, usualmente confinadas nas trilhas de roda;
- Trincamento por envelhecimento: a causa é atribuída ao envelhecimento do ligante asfáltico, o qual perde seus componentes voláteis pela exposição ao ar, e vai ao longo do tempo tornando-se cada vez mais suscetível a rompimentos. O processo de endurecimento do ligante depende, portanto, do tipo e qualidade das condições climáticas e da dosagem da mistura asfáltica. Teores mais elevados de asfalto e baixa

quantidade de vazios têm efeitos benéficos sobre a vida de uma mistura asfáltica, pois dificultam o processo de oxidação e promovem maior durabilidade;

- Trincamento por reflexão: as trincas por reflexão ocorrem quando o trincamento existente em uma camada inferior propaga-se em direção à superfície, atingindo o revestimento asfáltico. Assim sendo, podem apresentar-se sob a forma de qualquer tipo de trinca (longitudinal, irregular ou mesmo interligada). A reflexão ocorre como consequência da concentração das tensões no entorno da região ocupada pela trinca existente, fazendo com que a vida de fadiga do revestimento seja extremamente reduzida. Estima-se que a velocidade de propagação de uma trinca oscila entre 20 mm e 50 mm por ano.

### 2.2.2. Mecanismos de deformação

Entre as deformações permanentes, incluem-se os afundamentos de trilhas de roda, as deformações plásticas e depressões. As causas das deformações permanentes podem estar associadas ao tráfego ou não, conforme descrito no Quadro 1.

**Quadro 1.** Tipos, causas e exemplos de deformações permanentes.

<b>Tipo</b>	<b>Causa</b>	<b>Exemplo de defeito</b>
Associada ao carregamento	Carregamento concentrado ou em excesso	Fluência plástica (ruptura por cisalhamento)
	Carregamento de longa duração ou estático	Deformações ao longo do tempo
	Grande número de repetições de carga	Afundamento nas trilhas de roda
Não associadas ao carregamento	Subleito constituído de solo expansivo	Inchamento ou empolamento
	Solos compressíveis na fundação do pavimento	Recalque diferencial

**Fonte:** DNIT (2006b).

### 2.3. Tipos de defeitos

Os defeitos são os danos ou deteriorações na superfície dos pavimentos que podem ser identificados a olho nu e classificados segundo uma terminologia normatizada. Representam a manifestação direta do processo de deterioração da rodovia (Krysinski e Sudyka, 2013; Bernucci *et. al.*, 2022).




O levantamento dos defeitos tem por finalidade avaliar o estado de conservação dos pavimentos e caracterizar a condição do estado de superfície e da rodovia. Desse modo, pode-se definir uma solução tecnicamente adequada e, em caso de necessidade, indicar a melhor ou melhores alternativas de restauração ou de reabilitação do pavimento (Devitte, 2021).

Os métodos adotados para este levantamento são relativamente menos onerosos em relação a avaliação estrutural, por exemplo. Os defeitos a serem quantificados devem ser primeiramente definidos, bem como as etapas posteriores ao seu levantamento (Basílio, 2002).




No Brasil, a identificação dos defeitos nos pavimentos flexíveis e semi-rígidos é realizada por meio da norma DNIT 005-TER (DNIT, 2003a). O Quadro 2 apresenta e ilustra os tipos de defeitos de pavimentos flexíveis, de acordo com a norma DNIT 005-TER (DNIT, 2003a).

A norma DNIT 005-TER (DNIT, 2003a) apresenta a classificação e a codificação de cada tipo de defeito (Quadro 3) e estabelece ainda outros tipos de defeitos (Quadro 4).

**Quadro 2.** Tipos de defeitos de pavimentos flexíveis.

Tipo de defeito	Definição (DNIT, 2003a)	Exemplo ilustrativo
Fissura	Fenda longitudinal, transversal ou oblíqua ao eixo da via. Possui largura capilar e é perceptível a olho nu somente a uma distância inferior a 1,50 m.	 <p data-bbox="1054 1176 1276 1211">Fonte: Souza (2020)</p>
Trincas transversais	Fenda na direção ortogonal ao eixo da via com abertura maior do que a fissura. Visível a olho nu. Denomina-se longa quando seu comprimento é superior a 1,00 m.	 <p data-bbox="1007 1570 1326 1608">Fonte: Farias e Corrêa (2023)</p>
Trincas longitudinais	Fenda na direção paralela ao eixo da via com abertura maior do que a fissura. Visível a olho nu. Denomina-se longa quando seu comprimento é superior a 1,00 m.	 <p data-bbox="1007 2018 1326 2056">Fonte: Farias e Corrêa (2023)</p>

## Continuação do Quadro 2

<p>Trincas em malha (tipo couro de jacaré)</p>	<p>Fendas transversais e longitudinais ligadas com abertura maior do que a fissura. Não tem um padrão geométrico e se assemelham ao aspecto de couro de jacaré.</p>	 <p>Fonte: Farias e Corrêa (2023)</p>
<p>Trincas em malha (tipo bloco)</p>	<p>Fendas transversais e longitudinais ligadas com abertura maior que a fissura. Possuem certa regularidade geométrica, com lados bem definidos, similares a blocos.</p>	 <p>Fonte: CNT (2017)</p>
<p>Afundamento plástico</p>	<p>Depressão da superfície do pavimento causado quando existe o fenômeno de fluência do pavimento com extensão inferior a 6,00 m.</p>	 <p>Fonte: CNT (2017)</p>
<p>Afundamento de trilha</p>	<p>Depressão da superfície do pavimento causado quando existe o fenômeno de fluência do pavimento com extensão superior a 6,00 m.</p>	 <p>Fonte: Farias e Corrêa (2023)</p>

## Continuação do Quadro 2

<p>Ondulação ou Corrugação</p>	<p>Ondulações ou corrugações transversais ao eixo da via na superfície do pavimento. As ondulações se diferenciam das corrugações por possuírem uma maior distância entre as elevações.</p>	 <p>Fonte: Souza (2020)</p>
<p>Escorregamento</p>	<p>Deslocamento do revestimento em relação à camada subjacente do pavimento, com aparecimento de fendas em forma de meia-lua.</p>	 <p>Fonte: Farias e Corrêa (2023)</p>
<p>Exsudação</p>	<p>Surgimento de excesso de ligante através da superfície pavimento devido ao excesso deste.</p>	 <p>Fonte: Souza (2020)</p>
<p>Desgaste</p>	<p>Efeito do desprendimento gradativo do agregado do pavimento, gera aspereza superficial no revestimento. É causado por esforços tangenciais provocados pelo tráfego</p>	 <p>Fonte: Souza (2020)</p>

## Continuação do Quadro 2

<p>Panela ou Buraco</p>	<p>Cavidade que se forma no revestimento devido a diversas razões, como a falta de aderência entre camadas superpostas, o que leva ao desprendimento e pode afetar as camadas inferiores, até resultar na desintegração do pavimento.</p>	 <p>Fonte: Farias e Corrêa (2023)</p>
<p>Remendo</p>	<p>Resultado do preenchimento de panela</p>	 <p>Fonte: Farias e Corrêa (2023)</p>

**Quadro 3.** Codificação e classificação dos defeitos.

Fendas				Codificação	Classe das Fendas		
Fissuras				FI	-	-	-
Trincas no revestimento geradas por deformação permanente excessivas e/ou decorrentes do fenômeno de fadiga	Trincas Isoladas	Transversais	Curtas	TTC	FC-1	FC-2	FC-3
			Longas	TTL	FC-1	FC-2	FC-3
		Longitudinais	Curtas	TLC	FC-1	FC-2	FC-3
			Longas	TLL	FC-1	FC-2	FC-3
	Trincas Interligadas	"Jacaré"	Sem erosão acentuada nas bordas das trincas	J	-	FC-2	-
			Com erosão acentuada nas bordas das trincas	JE	-	-	FC-3
Trincas no revestimento não atribuídas ao fenômeno de fadiga	Trincas Isoladas	Devido à retração térmica ou dissecação da base (solo-cimento) ou do revestimento		TRR	FC-1	FC-2	FC-3
	Trincas Interligadas	"Bloco"	Sem erosão acentuada nas bordas das trincas	TB	-	FC-2	-
			Com erosão acentuada nas bordas das trincas	TBE	-	-	FC-3

Fonte: DNIT (2003a)

Notas do Quadro 3: Nota 1: Classe das trincas isoladas: FC-1: são trincas com abertura superior à das fissuras e menores que 1,0mm. FC-2: são trincas com abertura superior a 1,0mm e sem erosão nas bordas. FC-3: são trincas com abertura superior a 1,0mm e com erosão nas bordas; Nota 2: Classe das trincas interligadas. As trincas interligadas são classificadas como FC-3 e FC-2 caso apresentem ou não erosão nas bordas.

**Quadro 4.** Outros defeitos.

Outros defeitos				Codificação
Afundamento	Plástico	Local	Devido à fluência plástica de uma ou mais camadas do pavimento ou do subleito	ALP
		da Trilha	Devido à fluência plástica de uma ou mais camadas do pavimento ou do subleito	ATP
	De consolidação	Local	Devido à consolidação diferencial ocorrente em camadas do pavimento ou do subleito	ALC
		da Trilha	Devido à consolidação diferencial ocorrente em camadas do pavimento ou do subleito	ATC
<b>Ondulação/Corrugação</b> - ondulações transversais causadas por instabilidade da mistura betuminosa constituinte do revestimento ou da base				O
<b>Escorregamento</b> (do revestimento betuminoso)				E
<b>Exsudação</b> do ligante betuminoso no revestimento				EX
<b>Desgaste</b> acentuado na superfície do revestimento				D
<b>"Painelas"</b> ou buracos decorrentes de desagregação do revestimento e às vezes de camadas inferiores				P
<b>Remendos</b>		Remendo Superficial		RS
		Remendo Profundo		RP

Fonte: DNIT (2003a)

## 2.4. Avaliação de pavimentos

O estudo da condição de um pavimento é feito por meio da avaliação do desempenho estrutural e funcional. O desempenho funcional refere-se à capacidade do pavimento de satisfazer a função de fornecer uma superfície com serventia adequada em termos de qualidade de rolamento. Serventia é a capacidade de um pavimento construído em um determinado trecho servir ao usuário em um dado momento quanto ao seu conforto ao rolamento. Por outro lado, o desempenho estrutural refere-se à capacidade de um pavimento em manter sua integridade estrutural, sem apresentar falhas significativas. Deve-se associar o desempenho estrutural com a preservação dos investimentos e considerar como o melhor momento para reabilitar o pavimento, aquele que conduza a um menor custo do ciclo de vida (DNIT, 2006b).

### 2.4.1. Avaliação funcional

A avaliação funcional está associada a aspectos da superfície do pavimento, como conforto do usuário, condição superficial, interação pneu-pavimento, defeitos e irregularidades. Esta avaliação se refere à capacidade do pavimento de satisfazer a sua principal função, que é fornecer uma superfície adequada em termos de qualidade de rolamento (Gontijo *et. al.*, 1994).

Os dados de avaliação funcional permitem compreender características de degradação superficial (defeitos: trincas, painelas, exsudações, desgastes, etc.) e de

irregularidades do pavimento existente. Através de procedimentos padronizados de medidas e de observações, descreve-se quantitativa e qualitativamente a condição funcional do pavimento (Gontijo *et. al*, 1994).

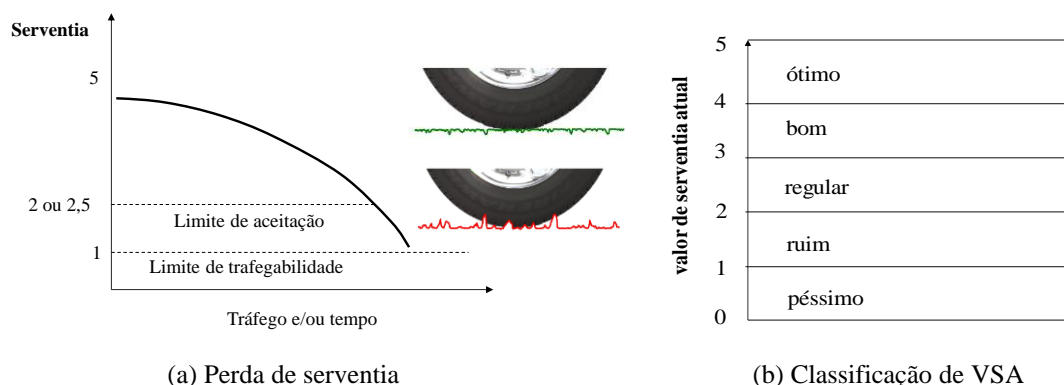
As normas para avaliação de pavimentos asfálticos preconizadas pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) são as seguintes:

- DNIT 005-TER (DNIT, 2003a) - Defeitos nos pavimentos asfálticos - Terminologia.
- DNIT 006-PRO (DNIT, 2003b) - Avaliação objetiva da superfície de pavimentos asfálticos - Procedimento.
- DNIT 007-PRO (DNIT, 2003c) - Levantamento para avaliação da condição de superfície de subtrecho homogêneo de rodovias de pavimento flexível e semirrígido para gerência de pavimentos e estudos e projetos - Procedimento.
- DNIT 008-PRO (DNIT, 2003d) - Levantamento visual contínuo para avaliação da superfície de pavimentos asfálticos - Procedimento.
- DNIT 009-PRO (DNIT, 2003e) - Levantamento para avaliação subjetiva da superfície do pavimento - Procedimento.

Lehmert (2020) considerou que os parâmetros obtidos através da avaliação funcional, como Valor de Serventia Atual (VSA), Índice de Gravidade Global (IGG), Quociente de Irregularidade (QI) e Índice Internacional de Irregularidade (IRI), são importantes para o monitoramento da qualidade funcional do pavimento e também como referência para seleção da correta intervenção a ser realizada.

O Valor de Serventia Atual (VSA) é um parâmetro definido no primeiro método avaliativo, desenvolvido em 1960 por Carey e Irick para as pistas experimentais da *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO). O VSA varia de 0 a 5 e é obtido por meio da média das notas dadas por avaliadores para o conforto do rolamento. No Brasil, a avaliação da serventia é feita pela norma DNIT 009-PRO (DNIT, 2003e), em termos de Valor de Serventia Atual (VSA). O VSA é definido logo após a abertura do pavimento ao tráfego, também avaliado para projeto de reabilitação (Bernucci *et al.*, 2022). A Figura 3(a) ilustra a perda de serventia ao longo do tempo e a Figura 3(b) mostra a classificação do VSA. Na Figura 3(b), observa-se que há exemplos de limites de VSA para aceitação (2,0 a 2,5) e de trafegabilidade (1,0), os quais dependem do órgão rodoviário.



**Figura 3. Serventia e VSA**

**Fonte:** Adaptado de DNIT (2011)

**Fonte:** Adaptado de DNIT (2003d)

Outro parâmetro utilizado para a avaliação funcional de pavimentos flexíveis é o Índice de Gravidade Global (IGG), preconizado pela norma DNIT 006-PRO (DNIT, 2003b). De acordo com Vieira *et al.* (2016), o IGG expressa o estado geral do pavimento em relação à incidência de defeitos que caracterizam seu grau de deterioração, resultante de um levantamento de superfície.

No cálculo do IGG, pesos e fatores de ponderação são multiplicados pelas frequências relativas de cada grupo de defeitos e medidas de trilha de roda, classificados segundo DNIT 005-TER (DNIT, 2003a), para a obtenção dos Índices de Gravidade Individuais (IGI). O somatório dos IGI resulta no IGG, que classifica a superfície do pavimento (DNIT, 2006b). Os conceitos do IGG são mostrados no Quadro 5.

**Quadro 5. Conceitos do IGG.**

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

Legenda: IGG – Índice de Gravidade Global.

**Fonte:** DNIT (2003b).

A irregularidade longitudinal, segundo a norma DNER - PRO 164 (DNER, 1994b) é definida como “o desvio da superfície da rodovia em relação a um plano de referência, que afeta a dinâmica dos veículos, a qualidade ao rolamento e as cargas dinâmicas sobre a via”. Trata-se de uma grandeza física mensurável, direta ou indiretamente, na superfície do pavimento, correlacionável com o custo operacional dos veículos, o conforto, a segurança,

a velocidade e a economia das viagens. A irregularidade longitudinal tem origem nas imperfeições no processo executivo ou de problemas ocorridos após a construção, como resultado da atuação do tráfego, do clima e outros fatores. Pode ser medida nas unidades: QI (Quociente de Irregularidade) ou IRI (Índice Internacional de Irregularidade) (DNIT, 2006b).

No Brasil, o Quociente de Irregularidade (QI), foi desenvolvido no ano de 1981, por Queiroz (1981) *apud* Barella (2008), e é expresso em contagens/km, o QI é uma escala-padrão que mede a irregularidade do pavimento, definida como o desvio da superfície da rodovia em relação a um plano de referência (DNER, 1986). O QI tem sido adotado como o índice padrão para avaliação de pavimentos no Brasil dentro de normas e modelos de desempenho.

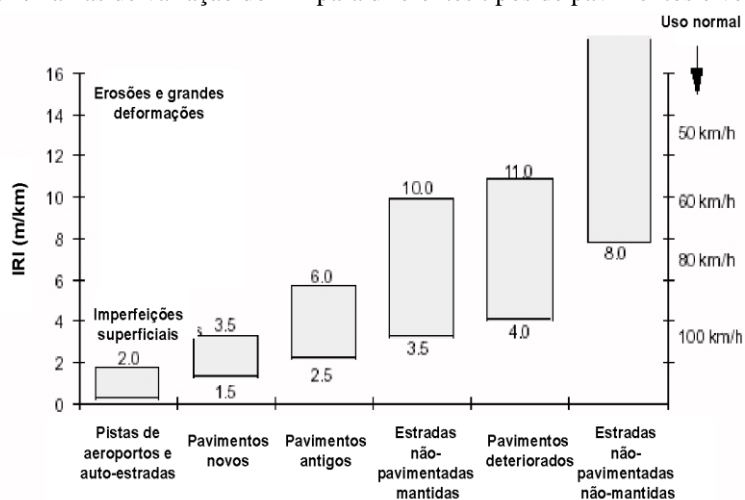
Um ano após o desenvolvimento do QI, em 1982, foi instituído no Brasil a escala do principal índice de quantificação de irregularidade de pavimento, o IRI (Índice de Rugosidade Internacional), padronizado pelo Banco Mundial em 1986. O IRI, expresso em m/km, é um índice que quantifica o acúmulo de desvios da superfície em relação a um plano longitudinal no eixo da via. Essa métrica é empregada tanto para avaliação funcional quanto como instrumento para aceitação e controle de obras (Bisconsini, 2016; Lehmert, 2020).

Segundo Lehmert (2020), o IRI é medido por vários equipamentos que possuem como resultado um valor de QI, que é então convertido para IRI. A Equação 1 demonstra a relação entre as unidades (DNIT, 2006b).

$$QI = 13 \times IRI \quad (1)$$

Em que: QI é o Quociente de Irregularidade (contagens/km); IRI é o Índice Internacional de Irregularidade (m/km).

A Figura 4 mostra as faixas de variação do Índice Internacional de Irregularidade (IRI) em relação a diferentes condições e tipos de pavimentos e velocidades. Nota-se que, no caso de pavimentos deteriorados, a variação do IRI situa-se entre 4 m/km e 11 m/km, com velocidades de tráfego variando de 50 km/h a 100 km/h.

**Figura 4.** Faixas de variação do IRI para diferentes tipos de pavimentos e velocidades.

**Fonte:** Adaptado de Sayers e Karamihas (1998).

O Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) incorpora, além do Quociente de Irregularidade (QI), o Índice de Gravidade Global (IGG) e o Índice de Rugosidade Internacional (IRI), outros parâmetros para a avaliação funcional. Entre eles, estão o Índice de Condições de Pavimentos Flexíveis (ICPF), preconizado pela norma DNIT 008-PRO (DNIT, 2003c), o Trincamento (TR) definido por DNIT (2006b) como a soma da incidência de trincas classe 1 e 2 (%FC-2 + %FC-3) e o percentual de Área Trincada (AT%), normatizada DNIT 433 - PRO (DNIT, 2021). A Tabela 1 apresenta os conceitos atribuídos com base nos valores dos índices (DNIT, 2006b).

**Tabela 1.** Conceitos do estado de pavimento em função dos índices.

Conceito	Irregularidade		ICPF	IGG	TR
	QI (cont./km)	IRI (m/km)			
Excelente	13 - 25	1 - 1,9	5 - 4	0 - 20	0 - 2
Bom	25 - 35	1,9 - 2,7	4 - 3	20 - 40	2 - 5
Regular	35 - 45	2,7 - 3,5	3 - 2	40 - 80	5 - 10
Ruim	45 - 60	3,5 - 4,6	2 - 1	80 - 160	10 - 25
Péssimo	> 60	> 4,6	1 - 0	> 160	> 25

Legenda: QI - Quociente de irregularidade (contagens/km), IRI - Índice Internacional de Irregularidade (m/km), ICPF - Índice de Condições de Pavimentos Flexíveis, IGG - Índice de Gravidade Global; TR - Trincamento (%).

**Fonte:** Adaptado de DNIT (2006b).

#### 2.4.2. Avaliação estrutural

A avaliação estrutural é complementada pela avaliação funcional e visual de defeitos. Segundo Bernucci *et al.* (2022), a avaliação estrutural está associada ao conceito de capacidade de carga, que pode ser vinculado diretamente ao projeto do pavimento e ao seu dimensionamento. Balbo (2007) afirmou que caracterizar a estrutura de pavimento existente

implica na determinação dos tipos de materiais e espessuras das camadas constituintes do pavimento e das condições de integridade.

Balbo (2007) considerou que além de auxiliar no entendimento das causas e dos padrões de defeitos da estrutura, a avaliação estrutural permite realizar conclusões sobre a integridade de camadas de materiais subjacentes ao revestimento, cujos defeitos, por vezes, não são detectados pela avaliação visual superficial.

O DNIT (2006b) recomenda a realização de métodos destrutivos e/ou não destrutivos para a avaliação das camadas em termos de espessura, tipo de material e coleta de amostra para ensaios.

#### 2.4.2.1. Métodos destrutivos

Um método destrutivo é usado para investigação das camadas que compõem o pavimento por abertura de trincheiras ou poços de sondagem. Assim, é possível a coleta de amostras de cada camada para identificação dos tipos de materiais, das espessuras de camadas e realização de ensaios de laboratório. Os ensaios envolvem, por exemplo, granulometria, teor de umidade e Índice de Suporte Califórnia (ISC), no caso de solos e camadas granulares. São também realizados ensaios mecânicos para determinação do módulo de resiliência, importante parâmetro de dimensionamento (Bernucci *et al.*, 2022).

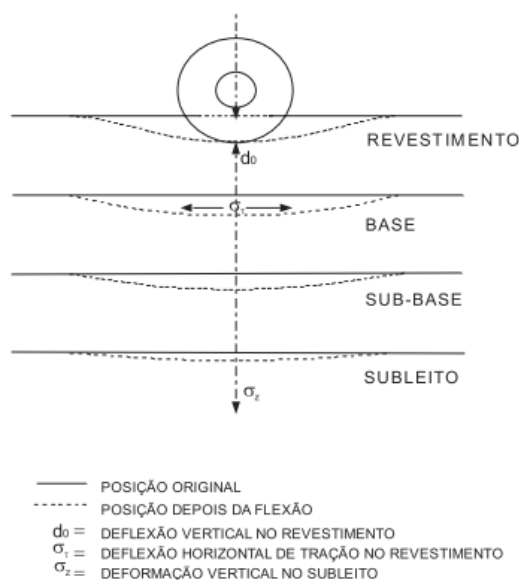
#### 2.4.2.2. Métodos não-destrutivos

Nos métodos não-destrutivos, não há necessidade de intervenções que danifiquem a integridade do pavimento (Bernucci *et al.*, 2022). A avaliação da capacidade estrutural consiste na realização de provas de carga para medida de parâmetros de resposta da estrutura às cargas de roda em movimento. A estrutura é submetida a um carregamento e são feitas as medições das deflexões. As deflexões medidas constituem-se na maneira mais apropriada para determinar a adequação estrutural do pavimento. Para medida das deflexões são utilizados equipamentos do tipo vigas de deflexão, equipamentos dinâmicos de vibração e de impacto. No Brasil, a viga Benkelman e o deflectômetro de impacto *Falling Weight Deflectometer* (FWD) são amplamente utilizados (Balbo, 2007).

Por meio das medidas de deflexão, pode-se avaliar os módulos de elasticidade por retroanálise. As ações das cargas sobre os pavimentos geram deformações permanentes e recuperáveis. As deformações permanentes, que permanecem mesmo após cessar o efeito da atuação da carga, têm caráter residual. Como exemplo, aquelas geradas nas trilhas de roda pela consolidação adicional pelo tráfego, bem como as rupturas de natureza plástica. As deformações ou deflexões recuperáveis representam um indicativo de comportamento

elástico da estrutura, deixando de existir alguns momentos após a retirada da carga. Durante a aplicação de carga provocam o arqueamento das camadas do pavimento (Figura 5) e cessada a carga, a deformação recuperável pode ser calculada por meio da medição da deflexão (Bernucci *et al.*, 2022).

**Figura 5.** Deformações nas camadas do pavimento pela aplicação da carga.

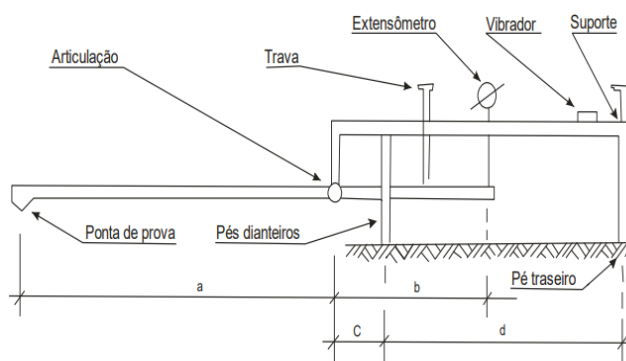


**Fonte:** DNIT, 2006b

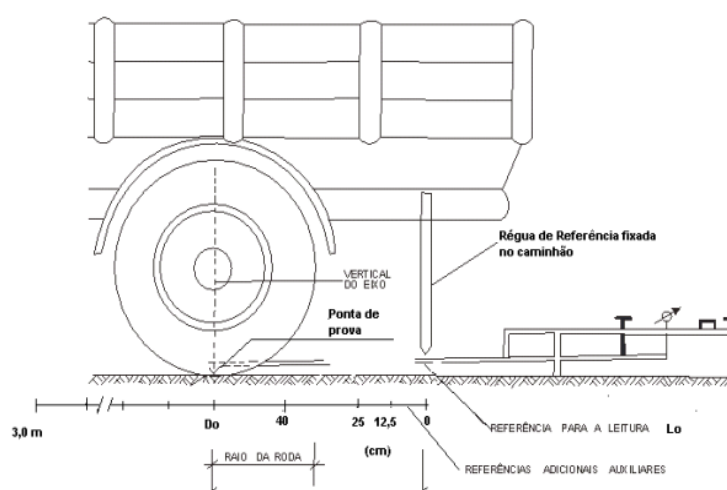
Na Figura 5, observa-se que a deflexão em cada camada diminui com a profundidade e com o distanciamento do ponto de aplicação da carga e depende do módulo de elasticidade das camadas.

### *Viga Benkelman*

A viga Benkelman é um equipamento versátil e de operação simples para avaliar as deflexões de pavimentos (Borges, 2001). O ensaio é especificado pela norma DNER-ME 024 (DNER, 1994a). A medição das deflexões pela viga Benkelman (Figura 6a) é feita por meio de um extensômetro acionado por uma alavanca interfixa, cuja relação entre os comprimentos dos braços é conhecida. A carga é promovida pelo eixo do veículo de prova (caminhão), que transmite ao pavimento o peso da carga necessária ao ensaio. No ensaio, uma das pontas da haste (ponta de prova) é colocada a meia-distância das rodas do semieixo traseiro do caminhão no local onde se deseja medir a deflexão. O caminhão apresenta o eixo traseiro simples de rodas duplas com carga de 80 kN (Figura 6b) (Bernucci *et al.*, 2022).

**Figura 6.** Esquema do ensaio com a viga Benkelman

(a) Esquema da viga Benkelman



(b) Eixo traseiro do veículo de prova

**Fonte:** DNER, 1994a.

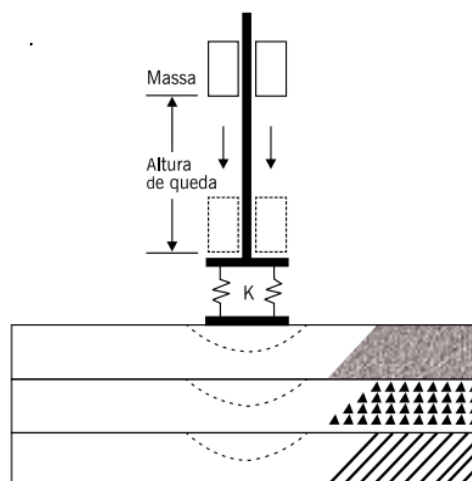
A viga utilizada no ensaio é equipada com um vibrador que tem a finalidade de eliminar a inércia inicial das partes móveis e prevenir possíveis restrições na leitura do extensômetro. Após posicionar o caminhão sobre a ponta de prova e ajustar a viga, o vibrador é ativado e é feita a leitura inicial no extensômetro. Em seguida, o caminhão se desloca para frente. Por meio de cálculos baseados na semelhança de triângulos, é determinado o valor dos deslocamentos expressos por deflexões (DNER, 1994a; Borges, 2001).

#### *Falling Weight Deflectometer (FWD)*

O *Falling Weight Deflectometer* (FWD) é um equipamento que realiza ensaios dinâmicos, no qual uma carga é aplicada por impacto de queda sobre uma placa de dimensões conhecidas, simulando o eixo padrão. A operação do ensaio consiste em um peso (carga) que é elevado a uma altura pré-estabelecida e solto em queda livre para atingir uma placa apoiada sobre a superfície do pavimento (Figura 7). A placa, de dimensões conhecidas,

transmite uma força de impulso à estrutura, que pode ser modificada, alterando-se o peso e/ou a altura de queda. A resposta do pavimento ao impacto é registrada por um conjunto de sensores posicionados longitudinalmente a partir do centro da placa. O equipamento é montado em um reboque e comandado por meio de um microcomputador instalado em um veículo de apoio (Balbo, 2007).

**Figura 7.** Princípio de funcionamento do deflectômetro de impacto



Fonte: Bernucci *et al.*, 2022.

Dessa forma, o ensaio consiste em se aplicar a carga de impacto e ler as deflexões em vários sensores (geofones) colocados ao longo de um suporte em posições convenientemente escolhidas para se obter a bacia deflectométrica (Bernucci *et al.*, 2022).

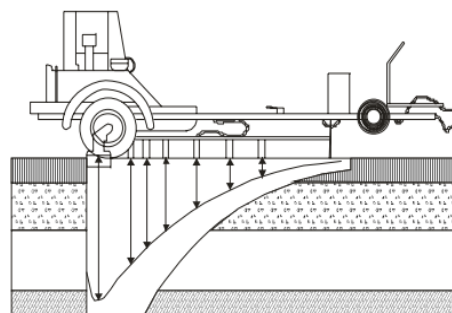
No Brasil, o procedimento a ser adotado na determinação das deflexões recuperáveis na superfície do pavimento com o equipamento tipo FWD está normatizado pelo DNER-PRO 273 (DNER, 1994d) e a norma que estabelece a calibração do equipamento é a DNIT 132-PRO (DNIT, 2010a). As Figuras 8(a) e 8(b) apresentam um exemplo de equipamento FWD em campo e sua representação, respectivamente.

**Figura 8.** Exemplo de equipamento FWD



(a) Equipamento FWD em campo

Fonte: Machado, 2019



(b) Representação do equipamento FWD

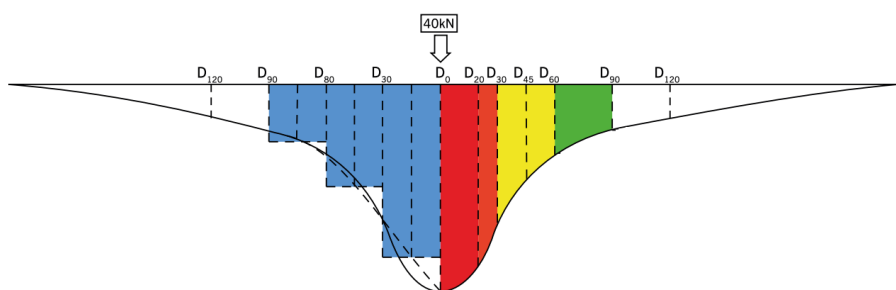
Fonte: Adaptado de DNIT (2006b)

### Bacia deflectométrica

A medida isolada da deflexão máxima ( $D_0$ ) não é suficiente para avaliar o comportamento estrutural e o processo de distribuição de esforços no interior do pavimento, uma vez que estruturas de pavimento distintas podem apresentar a mesma deflexão máxima, porém com arqueamentos diferentes nas camadas. Por este motivo, devem ser realizadas leituras complementares que permitem representar a configuração da bacia deflectométrica (Borges, 2001; DNIT, 2006b).

Obtida por meio das medidas de deflexão em pontos específicos (por exemplo:  $D_0$ ,  $D_{25}$ ,  $D_{50}$ , etc.), a bacia deflectométrica (Figura 9) permite a representação da resposta do comportamento estrutural do pavimento através da aplicação de um carregamento pontual. As normas NBR 8547 (ABNT, 1984) e DNER-ME 024 (DNER, 1994a) padronizam o método de ensaio para determinação da bacia deflectométrica por meio da viga Benkelman e a DNER-PRO 273 (DNER, 1994d) normatiza o levantamento através do FWD (Borges, 2001; Devitte, 2021).

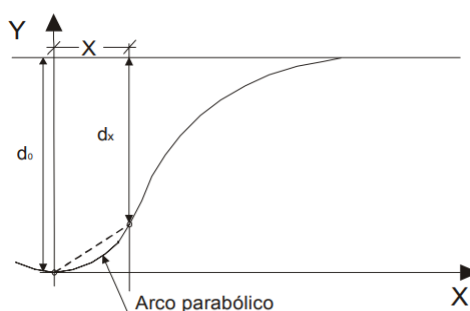
**Figura 9.** Exemplo de pontos de avaliação para determinação da bacia de deflexão.



**Fonte:** Adaptado de Ferri (2013)

Um dos parâmetros relacionados à forma das bacias deflectométricas é o Raio de Curvatura ( $R$ ) (Figura 10), o qual indica o arqueamento da bacia na sua porção mais crítica, em geral considerada a 25 cm do centro da carga.

**Figura 10.** Exemplo de raio de curvatura na bacia deflectométrica



**Fonte:** DNIT, 2006b



Uma das formas de cálculo corresponde ao ajuste de um arco parabólico que passa pelo ponto considerado, afastado genericamente do centro da carga de um valor  $x$ , e que depende da deflexão máxima e da deflexão no ponto considerado ( $D_x$ ). O raio de curvatura é calculado por meio da Equação 2 (DNIT; 2006b):

$$R = \frac{10 \times x^2}{2 \times (D_0 - D_x)} \quad (2)$$

Em que:  $R$  é o raio de curvatura (m);  $x$  é a distância da deflexão ao ponto de aplicação da carga (cm);  $D_0$  é a deflexão máxima (0,01 mm);  $D_x$  é a deflexão a  $x$  cm do ponto de aplicação da carga.

Como em geral o raio de curvatura é calculado considerando a distância de 25 cm do ponto de aplicação da carga, adota-se a Equação 3 (DNER, 1994a):

$$R = \frac{6250}{2 \times (D_0 - D_{25})} \quad (3)$$

Em que:  $R$  é o raio de curvatura;  $D_0$  é a deflexão máxima (0,01 mm);  $D_{25}$  é a deflexão a 25 cm do ponto de aplicação da carga (0,01 mm).

Um raio de curvatura reduzido evidencia um arqueamento severo na bacia deflectométrica, indicando uma condição estrutural crítica. A análise simultânea da deflexão máxima e do raio de curvatura proporciona uma compreensão mais aprimorada do comportamento complexo das estruturas de pavimentos. Esses parâmetros combinados oferecem uma avaliação mais abrangente da resposta estrutural, permitindo uma análise profunda das características da deformação sob carregamentos variados (Borges, 2001; DNIT, 2006b; Devitte, 2021)

#### *Correlações entre Viga Benkelman e FWD*

O objetivo de correlacionar as medidas entre os dois equipamentos é de propiciar o emprego das deflexões obtidas com o FWD nos métodos atuais do DNIT (de projeto de reforço de pavimentos flexíveis e Sistema de Gerência de Pavimentos) e no Modelo HDM (*Highway Design and Maintenance Standards Model*), adotado pelo Banco Mundial (DNIT, 2006b).

As correlações entre deflexões medidas com a viga Benkelman e com o FWD são influenciadas por diversos fatores, especialmente pela resposta elástica da estrutura do pavimento avaliado. Não há uma correlação única ou de aplicação generalizada. Projetistas que utilizam o FWD devem estabelecer correlações específicas com base em estudos locais

A seguir são apresentadas algumas correlações usadas no Brasil (DNIT, 2006b).

Pinto (1991) obteve a correlação apresentada na Equação 4, qual foi estabelecida entre as deflexões obtidas pela viga Benkelman, medidas de acordo com a metodologia do DNIT, e o FWD, utilizando uma carga equivalente ao método DNER-ME 024 (DNER, 1994a).

$$D_B = - 5,73 + 1,396 \times D_{FWD} \quad (4)$$

Em que:  $D_{FWD}$  é a deflexão característica medida por FWD (0,01 mm);  $D_B$  é a deflexão característica medida por viga Benkelman (0,01 mm).

Um estudo realizado por Duarte *et al.* (1996) estabeleceu as seguintes correlações entre as deflexões medidas por FWD para as medidas por viga Benkelman:

- Para  $D_{FWD} < 85 \times 10^{-2}$  mm, aplica-se a Equação 5, cujo coeficiente de determinação ( $R^2$ ) foi de 0,952:

$$D_B = 20,645 \times (D_{FWD} - 19)^{0,351} \quad (5)$$

- Para  $D_{FWD} > 85 \times 10^{-2}$  mm aplica-se a Equação 6, cujo coeficiente de determinação ( $R^2$ ) foi de 0,933:

$$D_B = 8,964 \times (D_{FWD} - 60)^{0,715} \quad (6)$$

Em que:  $D_{FWD}$  é a deflexão medida por FWD;  $D_B$  é a deflexão por viga Benkelman (0,01 mm).

Para obter correlações entre os dois equipamentos, Borges (2001) realizou levantamentos deflectométricos com o FWD e com a Viga Benkelman simulando a carga do eixo padrão rodoviário de 80 kN, em rodovias catarinenses, abrangendo 56 segmentos com 1 quilômetro (km) cada. Os trechos foram escolhidos de modo que englobassem as três regiões geológicas de Santa Catarina, oito estruturas de pavimento distintas e três níveis de condições deflectométricas. Os resultados demonstraram que, dependendo da estrutura de pavimento (materiais empregados e espessura das camadas), as comparações entre o FWD e a viga Benkelman apresentavam correlações distintas, conforme apresentado no Quadro 6.

**Quadro 6.** Correlações entre medidas de FWD e viga Benkelman.

Correlações obtidas por meio dos valores de:	Modelos de correlação	
Deflexões características de cada segmento	$D_{VB}=1,343 \times D_{FWD}-5,814$ $R^2=0,84$	$D_{VB}=1,248 \times D_{FWD}$ $R^2=0,83$
Deflexões de todos os segmentos	$D_{VB}=1,251 \times D_{FWD}-2,412$ $R^2=0,84$	$D_{VB}=1,205 \times D_{FWD}$ $R^2=0,74$
Deflexões médias de cada segmento	$D_{VB}=1,339 \times D_{FWD}-6,243$ $R^2=0,80$	$D_{VB}=1,210 \times D_{FWD}$ $R^2=0,79$
Deflexões - espessura de 5,0 cm de revestimento	$D_{VB}=1,180 \times D_{FWD}-0,710$ $R^2=0,73$	$D_{VB}=1,193 \times D_{FWD}$ $R^2=0,73$
Deflexões - espessura de 10,0 cm de revestimento	$D_{VB}=1,486 \times D_{FWD}-11,144$ $R^2=0,77$	$D_{VB} = 1,237 \times D_{FWD}$ $R^2=0,74$

Legenda:  $D_{FWD}$  - deflexão característica medida por FWD (0,01 mm);  $D_B$  - deflexão característica medida por viga Benkelman (0,01 mm);  $R^2$  - Coeficiente de determinação.

**Fonte:** Adaptado de Borges (2001)

### *Retroanálise em pavimentos flexíveis*

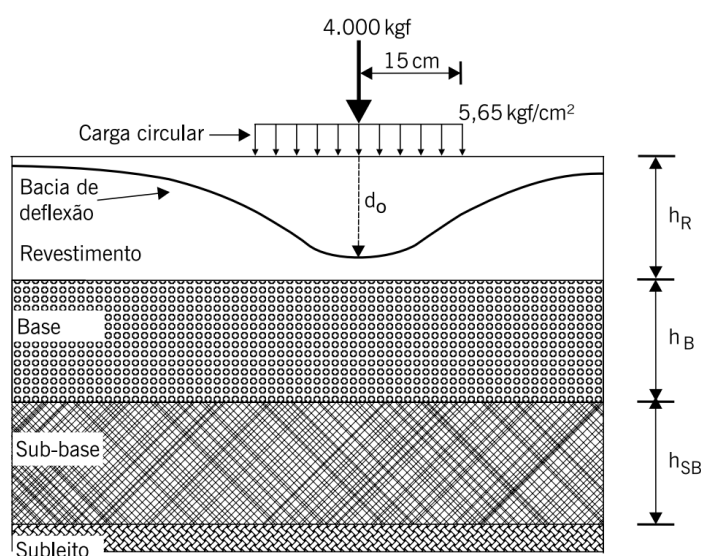
O entendimento do pavimento como um sistema cujas camadas operam em conjunto facilita a compatibilização dos materiais em termos de rigidez. Ao aplicar os princípios da mecânica dos pavimentos é possível realizar uma avaliação estrutural mais precisa das camadas e do subleito (Medina e Motta, 2015; Bernucci *et al.*, 2022).

No processo de cálculo das tensões e deformações para o dimensionamento adequado do reforço do pavimento, é importante conhecer a rigidez de todas as camadas e do subleito. Porém, os pavimentos são frequentemente dimensionados com base no ISC, assim, a princípio, dificilmente as características resilientes ou elásticas dos materiais são conhecidas. Mesmo que se conheçam os valores de módulo de resiliência da época de projeto e construção do pavimento, estes tendem a sofrer variação decorrente do tempo, uso e até condições climáticas. Uma solução para determinar esses parâmetros é a avaliação destrutiva por meio da abertura de poços de sondagem para a coleta de amostras e realização de ensaios. Um método eficaz, porém, lento e que pode causar transtornos ao tráfego e ao pavimento. Desse modo, foi desenvolvido o processo de retroanálise, que permite inferir as propriedades elásticas das camadas do pavimento e do subleito por interpretação de medidas obtidas por métodos não-destrutivos, como as bacias deflectométricas (Bernucci *et al.*, 2022).

A retroanálise de bacias deflectométricas é utilizada para estimar os módulos de elasticidade das camadas do pavimento, o que permite uma avaliação estrutural mais adequada e o cálculo do reforço estrutural, se necessário, pelos princípios da mecânica dos pavimentos. 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).

Realizada através de *softwares*, a retroanálise efetua deduções em busca de conciliar uma bacia teórica calculada com a bacia deflectométrica medida. Assume-se a hipótese de que existe um conjunto representativo de módulos para condições específicas de carregamento e de temperatura que faz coincidir a bacia teórica calculada com aquela obtida em campo. Ao ter informações sobre a carga externa aplicada e a bacia deflectométrica levantada, juntamente com as propriedades dos materiais e as espessuras de cada camada, é viável deduzir os módulos de elasticidade a partir das deflexões registradas (Marcon e Villela, 2001; Nóbrega, 2003, Bernucci *et al.*, 2022). A Figura 11 apresenta os elementos necessários para o processo de retroanálise.

**Figura 11.** Elementos necessários à retroanálise.



**Fonte:** Nóbrega, 2003.

A maioria dos processos de retroanálise segue as seguintes etapas:

- Etapa 1 - Inicialmente, são estimados módulos iniciais através de técnicas de aproximação, ensaios laboratoriais ou consulta a um banco de dados;
- Etapa 2 - São introduzidos os dados de entrada no *software*: configuração do carregamento, a bacia deflectométrica medida em campo, espessuras das camadas, materiais constituintes das camadas e subleito, coeficientes de Poisson, temperatura do pavimento e do ar no momento do levantamento da bacia deflectométrica e os valores dos módulos iniciais da Etapa 1.
- Etapa 3 - O *software* calcula a bacia deflectométrica usando os módulos introduzidos na Etapa 2.

- Etapa 4 - O *software* compara a bacia deflectométrica medida em campo com a calculada na Etapa 3.
- Etapa 5 - Ajustes nos módulos são feitos pelo *software* para reduzir as diferenças identificadas na Etapa 4.
- Etapa 6 – As Etapas 3, 4 e 5 são repetidas até que o erro entre as bacias medidas e calculadas atenda a um critério de tolerância pré-definido, até que o conjunto de módulos não varie além de um intervalo preestabelecido, ou até que o programa atinja um número específico de iterações.

O avanço tecnológico possibilitou o surgimento de diversos *softwares* de retroanálise para pavimentos asfálticos. No Brasil, alguns dos *softwares* comumente utilizados para retroanálise são os seguintes: ELMOD, EVERCALC, RETRAN2C, RETRAN5L, REPAV e BAKFAA. Uma adição mais recente é o *software* BackMeDiNa, que está alinhado com o novo método de dimensionamento em fase de implementação pelo DNIT (Souza Junior, 2018).

## **2.5. Dimensionamento à reabilitação**

Os métodos de dimensionamento à reabilitação de pavimentos flexíveis normatizados pelo DNIT (2006b) e atualmente utilizados são: DNER-PRO 11 (DNER, 1979) e o DNER-PRO 269 (DNER, 1994c). Também há o MeDiNa, que atualmente está em implantação no Brasil pelo DNIT.

### **2.5.1. Método DNER-PRO 11**

Esta seção está descrita com base na referência da norma DNER-PRO 11 - “Procedimento B” (DNIT, 1979)

O procedimento DNER-PRO 11 (DNER, 1979) foi desenvolvido pelo engenheiro argentino Bolívar Lobo Carneiro, ainda atualmente usado no Brasil, uma vez que tem fácil aplicação (DNIT, 2006b).

O método tem base no critério de deformabilidade de pavimentos e requer informações do levantamento histórico, prospecção preliminar e de estudos definitivos. Assume-se que o aparecimento de falhas nos pavimentos flexíveis está diretamente correlacionado com a magnitude das deflexões e o raio de curvatura correspondente. Portanto, o cálculo parte do princípio que, para que sejam evitadas as trincas no

revestimento, a deflexão do pavimento deve se manter inferior a um valor de deflexão admissível ( $D_{adm}$ ) (DNER, 1979).

Além da deflexão admissível são necessários outros três parâmetros, sendo, o raio de curvatura, o IGG e a deflexão de projeto. A partir desses dados, as diretrizes a serem adotadas do método são mostradas no Quadro 7. A análise dos defeitos de superfície é usada em conjunto para estabelecimento dos segmentos homogêneos (DNER, 1979).

**Quadro 7.** Critérios de avaliação estrutural do método DNER-PRO 11.

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

Legenda:  $D_{adm}$  – Deflexão admissível (0,01 mm),  $D_p$  – Deflexão de projeto (0,01 mm), R – Raio de curvatura (m), IGG – Índice de Gravidade Global.

**Fonte:** DNER (1979)

A partir do levantamento deflectométrico, é calculada uma deflexão característica ( $D_c$ ) do segmento, com a deflexão média (D) somada ao valor do desvio padrão ( $\sigma$ ) correspondente, conforme a Equação 7.

$$D_c = D + \sigma \quad (7)$$

Em que:  $D_c$  é a deflexão característica (0,01 mm); D é a deflexão média (0,01 mm);  $\sigma$  é o desvio padrão (0,01 mm).

O método recomenda que as deflexões sejam levantadas após estação chuvosa, quando o subleito está com o máximo de umidade. Para o caso em que tal condição não é possível, é aplicado um fator de correção sazonal ( $F_s$ ) à deflexão característica ( $D_c$ ), aplicando a Equação 8.

$$D_p = D_c \times F_s \quad (8)$$

Os valores de  $F_s$  são retirados da Tabela 2.

**Tabela 2.** Valores de fator de correção sazonal.

Natureza do subleito	Fator de correção sazonal	
	Estação seca	Estação chuvosa
Arenoso e permeável	1,10 - 1,30	1,00
Argiloso e sensível à umidade	1,20 - 1,40	1,00

**Fonte:** DNER (1979).

A deflexão admissível ( $D_{adm}$ ) é calculada pela Equação 9:

$$\log D_{adm} = 3,01 - 0,176 \times \log N \quad (9)$$

Em que:  $D_{adm}$  é a Deflexão admissível (0,01 mm);  $N$  é o Número de solicitações de eixo padrão de 80 kN.

Ao analisar o Quadro 7, caso a alternativa seja, por meio do critério deflectométrico, a aplicação do reforço, a espessura da camada é calculada pela Equação 10.

$$h_{CB} = K \times \log \left( \frac{D_p}{D_{adm}} \right) \quad (10)$$

Em que:  $h_{CB}$  é a espessura de reforço em concreto asfáltico (cm);  $D_p$  é a deflexão de projeto do subtrecho homogêneo (0,01 mm);  $D_{adm}$  é a Deflexão admissível (0,01 mm);  $K$  é o fator redução de deflexão ( $K=40$  para concreto asfáltico).

No caso de medidas corretivas, as alternativas dependem do tipo de defeito a ser corrigido. No caso de reconstrução, a camada existente é removida e a espessura da nova camada é calculada pela Equação 10.

### 2.5.2. Método DNER-PRO 269

Esta seção está descrita com base no disposto no método DNER-PRO 269 (DNIT, 1994c).

Conhecido como “Método da Resiliência”, este procedimento foi desenvolvido pelos engenheiros Salomão Pinto e Ernesto S. Preussler na década de 1980. O método possibilita a consideração objetiva das propriedades resilientes de solos e materiais que, usualmente, compõem as camadas de um pavimento executado no Brasil (Machado, 2019).

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

O levantamento de dados inclui a medição das deflexões recuperáveis, execução de sondagens e ensaios de caracterização, assim como a determinação e delimitação dos segmentos homogêneos. O solo do subleito é classificado quanto à resiliência, de acordo com dois parâmetros: ISC e o percentual de silte (S) como demonstra a Tabela 3 (DNER, 1994c).

**Tabela 3.** Classificação do solo do subleito quanto a resiliência.

ISC (%)	S (%)		
	≤ 35	35 a 45	> 45
≥ 10	I	II	III
6 a 9	II	II	III
2 a 5	III	III	III

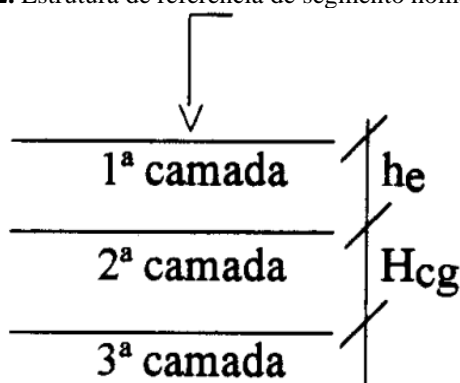
Legenda: ISC – Índice de Suporte Califórnia (%); S – Percentual de Silte (%).  
**Fonte:** Adaptado de DNER (1994c)

Na Tabela 3, os solos classificados como tipo I exibem baixa resiliência, logo, são indicados para camadas de pavimentos; os solos do tipo II apresentam resiliência intermediária e comportamento adequado para utilização como subleito, enquanto que os solos do tipo III possuem elevada resiliência, assim, é desaconselhável empregá-los em camadas de pavimentos (Pinto e Preussler, 2002).

O procedimento para cálculo do reforço de acordo com o DNER-PRO 269 (DNER, 1994c) segue as seguintes etapas:

- Determinação da deflexão característica ( $D_c$ ) através da Equação 7;
- Definição de uma estrutura de referência (Figura 12), integrada por três camadas, com espessuras definidas:
  - Primeira camada: camada de revestimento ( $h_e$ );
  - Segunda camada: camada granular ( $H_{cg}$ )
  - Terceira camada: subleito, classificado em tipo I, II ou III, conforme Tabela 3;

**Figura 12.** Estrutura de referência de segmento homogêneo.



**Fonte:** DNER (1994c)



- Determinação da espessura efetiva ( $h_{ef}$ ) de revestimento asfáltico pela Equação 11;

$$h_{ef} = -5,737 + \frac{807,961}{D_c} + 0,972 \times I_1 + 4,101 \times I_2 \quad (11)$$

Em que:  $h_{ef}$  é a espessura efetiva (cm);  $D_c$  é a deflexão característica (0,01 mm);  $I_1$  e  $I_2$  são constantes relacionadas a características resilientes do solo do subleito.

A espessura efetiva ( $h_{ef}$ ) corresponde à parcela do revestimento que realmente fornece resistência ao pavimento, sendo este um parâmetro que relaciona a deflexão característica dos materiais superficiais às características de resiliência da terceira camada da estrutura de referência, o subleito. A determinação da espessura efetiva ( $h_{ef}$ ) depende da obtenção das constantes  $I_1$  e  $I_2$ , relacionadas à resiliência do subleito, as quais devem ser obtidas com a identificação dos seguintes casos (DNER, 1994c):

Caso 1) Espessura da camada granular ( $H_{cg}$ ) inferior ou igual a 45 cm:

- Quando a 3ª camada for do tipo I:  $I_1 = 0$  e  $I_2 = 0$
- Quando a 3ª camada for do tipo II:  $I_1 = 1$  e  $I_2 = 0$
- Quando a 3ª camada for do tipo III:  $I_1 = 0$  e  $I_2 = 1$

Caso 2) Espessura da camada granular ( $H_{cg}$ ) é maior que 45 cm:

- Adotar:  $I_1 = 1$  e  $I_2 = 0$

Dessa forma, com as constantes obtidas, aplica-se a Equação 11 para o cálculo da espessura efetiva ( $h_{ef}$ ), a qual deve ser corrigida com as seguintes condições:

Condição 1) Se espessura efetiva ( $h_{ef}$ ) calculada não estiver no intervalo  $0 \leq h_{ef} \leq h_e$ :

- $h_{ef} < 0$ , adotar  $h_{ef} = 0$
- $h_{ef} > h_e$ , adotar  $h_{ef} = h_e$

Condição 2) Se o trincamento (TR) existente for superior a 50% ou  $\%FC-2 + \%FC-3 > 80\%$  e  $\%FC-3 > 50\%$ :

- Adotar  $h_{ef} = 0$ .

- Cálculo da deflexão Admissível ( $D_{adm}$ ) pela Equação 12;

$$\log D_{adm} = 3,148 - 0,188 \times \log N \quad (12)$$

Em que:  $D_{adm}$  é a deflexão admissível (0,01 mm);  $N$  é o Número de solicitações de eixo padrão de 80 kN.

- Determinação da espessura da camada de reforço em concreto asfáltico (HR) pela Equação 13;

$$HR = - 19,015 + \frac{238,14}{\sqrt{D_{adm}}} - 1,357 \times h_{ef} + 1,016 \times I_1 + 3,893 \times I_2 \quad (13)$$

Em que: HR é a espessura da camada de reforço em concreto asfáltico (cm);  $h_{ef}$  é a espessura efetiva (cm);  $D_{adm}$  é a deflexão admissível (0,01 mm);  $I_1$  e  $I_2$  são constantes relacionadas a características resilientes do solo do subleito.

A decisão para a solução de reforço é tomada com base no valor da espessura de reforço (HR) calculada e nos seguintes casos:

Caso 1) Para  $3,0 \text{ cm} < HR \leq 12,5 \text{ cm}$ , a subdivisão do reforço em camadas integradas de concreto asfáltico e pré-misturado ou camada única de concreto asfáltico, são alternativas que podem ser consideradas a partir das condições da superfície existente, contemplando características de deformabilidade das misturas asfálticas a serem utilizadas;

Caso 2) Para  $12,5 < HR \leq 25,0 \text{ cm}$  é recomendada a adoção de camadas integradas do tipo concreto asfáltico e pré-misturado. A espessura de pré-misturado deve equivaler a 60% do HR calculado

Caso 3) Para  $HR > 25,0 \text{ cm}$ , as camadas integradas não devem ser constituídas exclusivamente de misturas asfálticas. Deve-se verificar também a necessidade de remoção do revestimento existente ou camadas subjacentes, com reconstrução da estrutura do pavimento

Caso 4) Para  $HR \leq 3,0 \text{ cm}$  e a partir da análise da condição do pavimento, podem ser contempladas as soluções de lama asfáltica ou tratamento superficial.

### 2.5.3. MeDiNa

Por muitos anos, engenheiros e pesquisadores na área de pavimentação têm buscado métodos mais analíticos e menos empíricos para dimensionar e recuperar estruturas de pavimentos. Esses métodos se fundamentam no comportamento mecânico dos materiais presentes nas camadas do pavimento, ao destacar suas resistências mecânicas. O objetivo é representar de maneira mais fiel o que ocorre em campo, ao considerar as tensões presentes no pavimento e levar em conta as condições climáticas locais durante a construção. Esse enfoque visa antecipar o surgimento de defeitos (Franco, 2007).

Foi desenvolvido o *software* MeDiNa (Método de Dimensionamento Nacional), por meio de uma parceria entre Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR), o Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, da Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE/UFRJ) e o DNIT (IPR, 2020).

O MeDiNa é um conjunto de três programas com funções distintas, como: o MeDiNa, para dimensionamento pavimentos flexíveis novos; o AEMC (Análise Elástica de Múltiplas Camadas), para o cálculo tensões e deformações por meio da análise elástica multicamada; e o BackMeDiNa, para o cálculo de retroanálise de bacias deflectométricas e estimativa dos módulos de elasticidade das camadas (IPR, 2020).

A solução computacional tem suas hipóteses fundamentais embasadas nas considerações utilizadas na resolução de problemas de elasticidade linear em sistemas de multicamadas e contínuos, incluindo as seguintes (IPR, 2020):

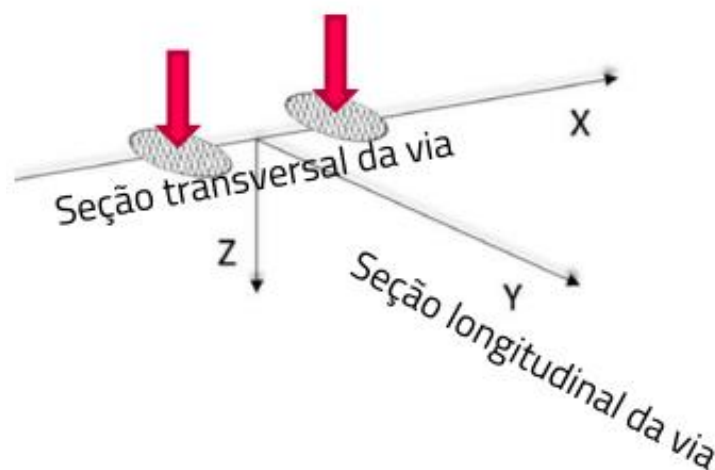
- Os materiais são elásticos lineares, isotrópicos e homogêneos (a modelagem elástica não linear é feita por interações elásticas lineares);
- A Lei de Hooke é válida e o módulo de compressão é semelhante ao módulo de tração;
- As camadas são ilimitadas na direção horizontal;
- Todas as camadas possuem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

Para a padronização da entrada de dados, são adotadas as unidades indicadas na Tabela 4 e a convenção de eixos apresentada na Figura 13, em que o plano xz e yz correspondem à seção transversal e longitudinal da via, respectivamente.

**Tabela 4.** Unidades padrão do *software* MeDiNa

Grandeza	Unidade
Espessuras e distâncias	cm
Raio do carregamento	cm
Deslocamentos	cm
Deformações específicas	m/m
Área de contato	cm <sup>2</sup>
Pressão de inflação e tensões	Mpa
Carga de eixo ou de roda	Ton
Erro quadrático médio (RMS)	%

Fonte: IPR, 2020

**Figura 13.** Eixos do sistema de coordenadas adotado pelo MeDiNa.

Fonte: Adaptado de IPR (2020).

#### 2.5.3.1. MeDiNa (Modo Reforço)

Além do dimensionamento de pavimentos novos, o *software* MeDiNa possui o “Modo Reforço”, para o dimensionamento da camada de reforço sobre pavimentos existentes. Neste modo, o *software* considera que a deformação permanente das camadas pré-existentes esteja estabilizada e que o limite de fadiga tenha sido alcançado (IPR, 2020).

São introduzidos os dados referentes à retroanálise das bacias e demais características do segmento, que podem ser adicionados manualmente ou por meio da importação de um arquivo, já retroanalisadas por um *software*, como o BackMeDiNa. Estes dados incluem as propriedades referentes a cada camada, como tipo de material, espessura, coeficiente de Poisson e módulos de elasticidade, como mostra a “Seção 1” da *interface* do programa ilustrada na Figura 14 (IPR, 2020).

O *software* também pode ser utilizado para calcular automaticamente o número N total equivalente de passagens do eixo padrão de 80 kN no final do período de projeto. Para tal, são inseridos na “Seção 2” (Figura 14) os dados referentes a: tipo de via, VMD (Volume

Médio Diário) referente ao primeiro ano, fator de veículo (FV), N anual do primeiro ano, percentual de veículos na faixa de projeto, taxa de crescimento do tráfego ao ano e período de projeto em anos.

**Figura 14.** Interface do usuário MeDiNa.

The screenshot displays the MeDiNa software interface with the following components:

- Header:** MeDiNa - v.1.1.9.0 - abr/2023
- Navigation:** Projeto, Editar, Análise, Ajuda
- Tabs:** ESTRUTURA, MODELAGEM, RESULTADOS
- Form Fields:**
  - RESPONSÁVEL: Nome do autor ou dos autores do projeto
  - EMPRESA: Nome da empresa projetista
  - PROJETO: Identificação da via, rodovia, trecho, km, estaca, etc
  - MODOS: Projeto de Reforço
- Section 1 (Seção 1):** A table listing material layers with the following data:

CAMADA	DESCRIÇÃO DO MATERIAL	TIPO	ESPESSURA (cm)	MÓDULO (MPa)	COEFICIENTE DE POISSON
>> 1 <<	CONCRETO ASFÁLTICO	RJ CAP 30/45 #12,5mm Sepetiba	5,0	9000	0,30
2	CAMADA ASFÁLTICA EXISTENTE	Camada Asfáltica Superficial	10,0	5000	0,30
3	CAMADA EXISTENTE	Camada Granular	20,0	400	0,35
SL	SUBLEITO	Subleito	0,0	150	0,45
- Section 2 (Seção 2):** A panel titled "EIXO PADRÃO RODOVIÁRIO" containing traffic data:

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

Fonte: Autor, 2024.

Para a camada de revestimento asfáltico existente, também devem ser inseridas informações sobre a idade do pavimento, o percentual de área trincada (AT%), Índice Internacional de Irregularidade (IRI) e espessura de fresagem, como demonstrado na Figura 15. Com base nestes valores, o programa emite avisos para que o projetista tome decisões para o projeto final (Knabben e Carpio, 2020).

Os valores de deflexão característica, módulo mínimo e máximo, desvio padrão e coeficiente de variação do módulo são calculados automaticamente pelo *software* ao importar o arquivo de retroanálise do BackMeDiNa. É importante ressaltar que o MeDiNa avalia apenas o consumo de fadiga da nova camada asfáltica. O *software* não possui modelos nem elementos para avaliar a reflexão de trincas do pavimento antigo sobre o novo (Souza Junior, 2018; Machado, 2019).

**Figura 15.** Propriedades da camada de revestimento existente

Propriedades da Camada 2

BASE DE DADOS	CAMADA ASFÁLTICA EXISTENTE
Camada Asfáltica Superficial	Material: Camada Asfáltica Superficial
	<b>Parâmetros</b>
	Espessura (cm): 10,0
	Coefficiente de Poisson: 0,30
	Contato: Não Aderido
	<b>Módulo (MPa)</b>
	Modelo Constituinte: Resiliente Linear
	Módulo (MPa): 5000
	<b>Características</b>
	Espessura de fresagem (cm): 0,0
	Espessura de campo (cm): 10,0
	Área Trincada (%): ...
	IRI (m/km): ...
	Deflexão característica (0,01mm): ...
	Idade do pavimento (anos): ...
	Módulo mínimo (MPa): ...
	Módulo máximo (MPa): ...
	MR - Desvio Padrão (MPa): ...
	Coeff. de Variação do Módulo (%): ...
	Comentários: ...

Excluir Atualizar Salvar OK Cancel

Fonte: Autor, 2024.

A camada de reforço inicial deve possuir uma espessura mínima de 5,0 cm. As propriedades do material constituinte também devem ser inseridas no *software*. Estas podem ser obtidas a partir de ensaios de laboratório ou por materiais disponibilizados no próprio programa, como por exemplo: concreto asfáltico, concreto asfáltico modificado por polímero e concreto asfáltico com asfalto borracha. A Figura 16 apresenta as propriedades de um exemplo de concreto asfáltico disponibilizado pelo *software* para a camada de reforço.

**Figura 16.** Propriedades de concreto asfáltico disponibilizado pelo MeDiNa.

Propriedades da Camada 1

BASE DE DADOS	CONCRETO ASFÁLTICO
Projeto	Material: RJ CAP 30/45 #12,5mm Sepetiba
Classe 1	<b>Parâmetros</b>
Classe 2	Espessura (cm): 5,0
Classe 3	Coefficiente de Poisson: 0,30
Classe 4	Contato: Não Aderido
RJ CAP 50/70 #12,5mm Sepetiba	<b>Módulo (MPa)</b>
RJ CAP 30/45 #12,5mm Sepetiba	Modelo Constituinte: Resiliente Linear
RJ CAP 30/45 #19,1mm Sepetiba	Módulo (MPa): 9000
RJ CAP 50/70 #19,1mm Sepetiba	<b>Características</b>
	Tipo de CAP: CAP 30/45 - PG 70-16
	Massa específica (g/cm³): 2,4
	Resistência à tração CD (MPa): 2,08
	Teor de asfalto (%): 6,0
	Volume de vazios (%): 5,0
	Faixa Granulométrica: #12,5mm
	Abrastão Los Angeles (%): 40,0
	Norma ou Especificação: DNIT ES 31
	<b>Curva de Fadiga</b>
	Modelo: k1 (et <sup>-k2</sup> )
	Coefficiente de Regressão (k1): 5,0e-14
	Coefficiente de Regressão (k2): -3,992
	Classe de Fadiga: 2
	FFM (100μ a 250μ): 0,75

Excluir Atualizar Salvar OK Cancel

Fonte: Autor, 2024.

Dependendo do tipo de via selecionado, definido em conformidade com a hierarquia dos sistemas funcionais do Manual de projeto geométrico de travessias urbanas (DNIT,

2010d), o *software* estabelece critérios de fadiga e níveis de confiabilidade para a realização do dimensionamento (Knabben e Carpio, 2020). A Tabela 5 demonstra os níveis de confiabilidade para cada tipo de via e o critério de fadiga baseado no percentual de área trincada:

**Tabela 5.** Nível de confiabilidade e critério de parada por tipo de via.

Tipo de via	Confiabilidade (%)	Área Trincada (%)
Sistema Arterial Principal	95	30
Sistema Arterial Primário	85	30
Sistema Arterial Secundário	75	30
Sistema Coletor Primário	85	30
Sistema Coletor Secundário	75	30
Sistema Local	65	30

**Fonte:** Adaptado de IPR (2020)

No modo "Reforço", apenas a nova camada de reforço passa pelo processo de dimensionamento. Durante essa etapa, o *software* realiza iterações, ajustando exclusivamente a espessura da camada e buscando a mais adequada para atender ao critério de fadiga. Admite-se espessura máxima de 15,0 cm para a camada de reforço, e caso não satisfaça, o projetista deve rever os dados e a estrutura, verificando se não é necessário adotar outra estratégia de restauração, como por exemplo, a fresagem (Franco, 2018).

#### 2.5.3.2. BackMeDiNa

O *software* BackMeDiNa realiza a retroanálise para a obtenção do módulo de elasticidade de todas as camadas do pavimento com base nas bacias deflectométricas obtidas pelo ensaio com o FWD (*Falling Weight Deflectometer*). Caso as bacias tenham sido obtidas pela viga Benkelman, devem ser usadas correlações. Para a determinação dos módulos de elasticidade, o *software* realiza cálculos iterativos, com o uso da análise elástica linear do AEMC, a fim de estabelecer a bacia teórica que mais se aproxima da bacia medida em campo (IPR, 2020)

O programa apresenta uma *interface* dividida em quatro seções (Figura 17). “A Seção 1” identifica a estaca correspondente a cada bacia no segmento, enquanto a “Seção 2” fornece os dados provenientes dos ensaios FWD. A “Seção 3” da *interface* especifica os materiais, espessuras das camadas na estrutura do pavimento, os respectivos coeficientes de Poisson e as condições de aderência. A “Seção 4” exibe gráficos que representam as bacias medidas em campo e as calculadas pela retroanálise. Inicialmente, todos os campos na *interface* são apresentados vazios, conforme ilustrado na Figura 17. Os dados necessários devem ser fornecidos por meio de uma planilha eletrônica no formato “.csv”, cujo modelo é disponibilizado no *software*, contendo informações dos ensaios de campo (IPR, 2020).

O erro da retroanálise é determinado pelo *software* através do método da raiz do valor quadrático médio das diferenças ou RMS (*root mean square*), dado em percentual (%). O *software* calcula o erro a partir das diferenças encontradas entre as deflexões calculadas e as deflexões medidas, sendo classificado da seguinte forma (IPR, 2020):

- Quando o erro for inferior a 5%, o *software* classifica a retroanálise como uma boa correlação;
- Quando o erro for inferior a 10%, mas superior a 5%, o *software* classifica a retroanálise como uma correlação razoável;
- Quando o erro for superior a 10%, o *software* indica que a retroanálise não conseguiu uma correlação satisfatória.

**Figura 17.** Interface do *software* BackMeDiNa.

The screenshot displays the BackMeDiNa software interface with four highlighted sections:

- Seção 1:** A table for 'SEÇÃO HOMOGÊNEA' with columns for 'BACIA', 'ESTACA', 'FADIA', and 'TRILHA'.
- Seção 2:** A data entry form for 'ENSAIO:' containing fields for 'CARGA (kgf)', 'RAIO (cm)', 'DISTÂNCIA (cm)', 'DEFLEXÕES (µm)', 'CALCULADAS (µm)', 'DIFERENÇAS (µm)', and 'ERRO (%)'. It also includes 'SENSORES' (0-8) and temperature fields 'T AR: °C' and 'T PAV: °C'.
- Seção 3:** A table for material properties with columns: 'CAMADA', 'MATERIAL', 'ESPESSURA (cm)', 'MÓDULO (MPa)', 'COEF POISSON', and 'ADERÊNCIA'. Row 1 is highlighted.
- Seção 4:** A graph titled 'DEFLEXÕES NORMALIZADAS' showing a grid for plotting data. The x-axis is labeled 'distância (cm)' and ranges from 0 to 180.

Fonte: Autor, 2024.



### 3. MATERIAIS E MÉTODO

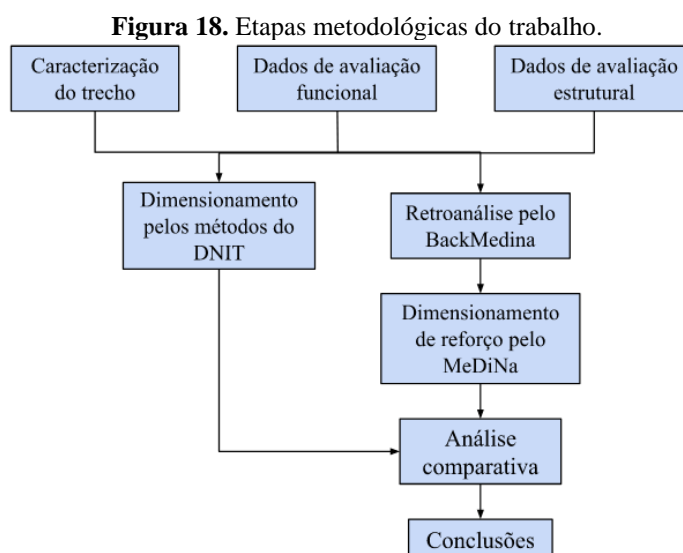
#### 3.1. Considerações iniciais

Neste trabalho, foi proposta uma análise comparativa entre os métodos de dimensionamento à reabilitação de pavimentos flexíveis DNER-PRO 11, DNER-PRO 269 e o MeDiNa. O comparativo foi realizado através de um estudo de caso.

Inicialmente, foram elencados e tratados todos os dados de avaliação funcional e estrutural necessários para os dimensionamentos, bem como a caracterização do trecho em estudo. Em seguida, foi realizado o dimensionamento à reabilitação por meio dos procedimentos DNER-PRO 11 (DNER, 1979) e DNER-PRO 269 (DNER, 1994c). Durante a realização dos dimensionamentos, não foi considerada a realização da fresagem, prática utilizada na reabilitação de pavimentos.

Na sequência, foi realizada a retroanálise para a obtenção dos módulos de elasticidade das camadas do pavimento existente, os quais foram utilizados no dimensionamento da camada de reforço pelo MeDiNa. Com os resultados das estruturas de ambos os métodos, realizou-se a análise comparativa através de simulações e relatórios emitidos pelo *software* MeDiNa.

Os dados empregados foram extraídos de levantamento realizado por uma empresa de projetos de engenharia rodoviária em 2014. Mantendo a confidencialidade do nome da empresa, neste trabalho, esta será referida como "Empresa". O fluxograma da Figura 18 ilustra as etapas metodológicas.



Fonte: Autor, 2024.

### 3.1. Caracterização do trecho

O trecho analisado possui 2.000 m de extensão e está localizado em uma rodovia com pista simples, no Estado de Santa Catarina. O estudo de caso foi realizado em um dos segmentos homogêneos estabelecidos pela Empresa através das características de tráfego e das medidas defletoométricas. Em relação à rodovia, não foi possível obter o histórico completo de restaurações, apenas o ano de implantação do pavimento, 1978.

No projeto da Empresa, o tráfego foi projetado para o período de 10 anos, expresso em número  $N_{80kN}$ , de  $9,53 \times 10^6$ , que corresponde a um tráfego médio.

### 3.2. Dados de avaliação funcional e estrutural

#### 3.2.1 Dados de avaliação estrutural

##### 3.2.1.1. Estrutura do pavimento

A Empresa realizou investigações geotécnicas a partir de poços de sondagem entre a pista e o acostamento e coleta de material para ensaios de laboratório. O Quadro 8 apresenta os resultados dos ensaios de caracterização, expansão e ISC do solo do subleito.

**Quadro 8.** Quadro resumo dos resultados dos ensaios do subleito.

Camada (m)		0,45-1,10	
Granulometria	% Passando nas peneiras	2"	89,2
		1"	67,1
		3/8"	48,4
		Nº 4	36,2
		Nº 10	29,6
		Nº 40	23,3
		Nº 200	18,8
LL <sup>1</sup> %		39,7	
IP <sup>2</sup> %		18,1	
IG <sup>3</sup>		0	
Classificação H.R.B <sup>4</sup>		A-2-6	
Equivalente de areia %		-	
Campo	MEAS <sup>5</sup> (t/m <sup>2</sup> )	-	
	Umidade Natural (%)	23,2	
Laboratório	Energia <sup>6</sup> (nº de golpes)	12	
	Umidade de Compactação (%)	17	
	Densidade Real	1,847	
	Expansão (%)	0,1	
	ISC (%) <sup>7</sup>	10,2	

<sup>1</sup>Limite de liquidez, <sup>2</sup>Índice de plasticidade, <sup>3</sup>Índice de grupo, <sup>4</sup>Highway Research Board, <sup>5</sup>Massa específica aparente seca, <sup>6</sup>Energia do ensaio de compactação, <sup>7</sup>Índice de Suporte Califórnia (%).

De acordo com o Quadro 8, o solo tem ISC de 10,2% e baixa expansibilidade (0,1%), com boas características para compor o subleito. O solo foi classificado como uma “argila silte pedregulhosa”.

A estrutura a ser reabilitada é composta por 5,0 cm de revestimento em concreto asfáltico, 15 cm de base de brita graduada e 25,0 cm de sub-base de rachão travado com brita, assente sobre um subleito composto por argila silte pedregulhosa. A Tabela 6 apresenta a estrutura do pavimento no trecho estudado.

**Tabela 6.** Estrutura do pavimento.

<b>Estrutura do pavimento</b>		
<b>Camada</b>	<b>Espessura (cm)</b>	<b>Material</b>
Revestimento	5,0	Concreto asfáltico
Base	15,0	Brita graduada
Sub-base	25,0	Rachão travado com brita
Subleito	-	Argila silte pedregulhosa

### 3.2.1.2. Dados de deflexão

A Empresa realizou o levantamento deflectométrico com o equipamento FWD conforme a norma DNER-PRO 273 (DNER, 1994d). As medidas de deflexão estão apresentadas no Anexo. No total, foram levantadas 51 bacias, de forma alternada nas duas faixas de tráfego, com espaçamento longitudinal de 40 metros ao longo da pista.

Com as bacias levantadas, foi realizada a análise estatística, em conformidade com o DNER-PRO 11 (DNER, 1979) para valores de deflexão em todos os sensores, verificando o intervalo de aceitação a partir da Equação 14.

$$D + z \times \sigma \geq \text{intervalo de deflexões} \geq D - z \times \sigma \quad (14)$$

Em que: D é a deflexão média no trecho (0,01 mm);  $\sigma$  é o desvio padrão dos valores; z é o valor relacionado ao número de amostras.

O parâmetro z é definido através de número de levantamentos, de acordo com a Tabela 7:

**Tabela 7.** Valor de z em relação ao número de levantamentos.

<b>n</b>	<b>z</b>
3	1
4	1,5
5 a 6	2
7 a 19	2,5
$\geq 20$	3

Legenda: n – Número de levantamentos, z – Parâmetro relacionado ao número de levantamentos

**Fonte:** DNER, 1979.

Os valores individuais dos sensores das bacias situados fora do intervalo definido devem ser eliminados, dando início a outro processo de cálculo de deflexão média ( $D$ ) e desvio padrão ( $\sigma$ ) para a fixação de um novo intervalo de aceitação através da Equação 14. Este procedimento deve ser repetido até que todos os valores individuais remanescentes estejam presentes no intervalo.

Após a análise estatística, através da média dos valores de deflexão máxima ( $D_0$ ) e o desvio padrão ( $\sigma$ ), foi aplicada a Equação 7 para determinar a deflexão característica ( $D_c$ ) do trecho.

Para viabilizar a aplicação dos procedimentos DNER-PRO 11 e DNER-PRO 269, foi utilizada a relação de Duarte *et al.* (1996), por meio da Equação 5, para converter o valor de deflexão característica medida por FWD, para o valor de deflexão por viga Benkelman. O resultado foi utilizado como deflexão característica ( $D_c$ ) nos métodos do DNIT.

### 3.2.1.3. Raio de curvatura

A Empresa não levantou bacias com deflexões distanciadas a 25 cm da deflexão máxima ( $D_0$ ). Logo, o raio de curvatura foi calculado por meio da Equação 2 partir das deflexões  $D_0$  e  $D_{20}$ .

### 3.2.2. Dados de avaliação funcional

#### 3.2.2.1. Levantamento do estado de superfície

Os dados do estado de superfície do pavimento foram levantados pela Empresa conforme as normas DNIT 006-PRO (DNIT, 2003b) e DNIT 005-TER (DNIT, 2003a).

O trincamento (TR) foi calculado pela soma das incidências de trincas classe 2 e 3 (%FC-2+%FC-3), em conformidade com a definição em DNIT (2006b), resultando em 16,2%. De acordo com o Quadro 5 o valor de trincamento (TR) está classificado como “Ruim”. O Afundamento de Trilhas de Roda médio ( $ATR_{\text{médio}}$ ) não demonstrou comprometimento estrutural do pavimento, pois apresentou um valor menor que 12 mm, conforme definido em DNIT (2006b).

Para o trecho, a Empresa obteve o Índice de Gravidade Global (IGG) de 148, calculado pela norma DNIT 006-PRO (DNIT, 2003b). De acordo com a classificação do Quadro 5, o valor de 148 é considerado “Ruim”. O percentual de área trincada (AT%) foi obtido a partir da incidência de defeitos e norma DNIT 433-PRO (DNIT, 2021), que resultou em 13,0%. A Tabela 8 apresenta os índices de avaliação funcional obtidos pela Empresa através do levantamento de defeitos no trecho.

**Tabela 8.** Índices de avaliação funcional obtidos através do levantamento de defeitos.

<b>%FC-2</b>	<b>%FC-3</b>	<b>TR</b>	<b>%Panela</b>	<b>%Remendo</b>	<b>%Desgaste</b>	<b>ATR<sub>médio</sub> (mm)</b>	<b>IGG</b>	<b>AT%</b>
6,7	9,5	16,2	0,0	1,3	71,8	6,2	148	13,0

Legenda: %FC-2 - Incidência trincas classe 2, %FC-3 – Incidência de trincas classe 3, TR – Trincamento (%), ATR<sub>médio</sub> – Afundamento de trilhas de rodas médio (mm), IGG – Índice de Gravidade Global, AT% - Percentual de área trincada (%).

### 3.2.2.2. Irregularidade Longitudinal

Para a obtenção das medidas de irregularidade longitudinal, a Empresa se baseou nos dados fornecidos pela SIE (Secretaria do Estado da Infraestrutura e Mobilidade) em novembro 2012. O trecho apresentou um Quociente de Irregularidade (QI) em 39 contagens/km.

Para expressar o QI em termos de IRI, foi aplicada a Equação 1, e obteve-se o valor de 3,0 m/km. Os dados de IRI e QI permitem classificar o pavimento como “Regular”, de acordo com o Quadro 5. A Tabela 9 demonstra os parâmetros de irregularidade longitudinal e seus conceitos correspondentes.

**Tabela 9.** Dados de Irregularidade Longitudinal.

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>	<b>Conceito</b>
QI	39,0	Regular
IRI	3,0	Regular

Legenda: QI – Quociente de irregularidade (contagens/km),

IRI – Índice Internacional de Irregularidade (m/km).

## 3.3. Dimensionamento pelos métodos do DNIT

### 3.3.1. Dimensionamento pelo DNER-PRO 11

Com a deflexão característica ( $D_c$ ) calculada, foi obtido o valor da deflexão de projeto ( $D_p$ ). O cálculo foi feito a partir da Equação 8, a qual efetua a correção do valor de deflexão característica ( $D_c$ ) com fator de correção sazonal ( $F_s$ ). No trabalho, foi considerado o  $F_s$  para subleito argiloso e sensível à umidade e estação chuvosa, cujo valor, de acordo com a Tabela 2, é 1,00.

Por meio da Equação 9, foi calculada a deflexão admissível ( $D_{adm}$ ), considerando o número  $N_{80kN}$  de  $9,53 \times 10^6$ .

Com os valores de Índice de Gravidade Global (IGG), deflexão de projeto ( $D_p$ ), deflexão admissível ( $D_{adm}$ ) e raio de curvatura, a análise estrutural foi realizada conforme o Quadro 7 e assim, selecionada a alternativa.

Em caso da necessidade de reconstrução do pavimento ou uma camada de reforço através do critério deflectométrico, é aplicada a Equação 10.

### 3.3.2. Dimensionamento pelo DNER-PRO 269

O dimensionamento pelo DNER-PRO 269 (DNER, 1994d) utilizou o mesmo valor da deflexão característica ( $D_c$ ) do método DNER-PRO 11/79 (DNER, 1979).

Para a aplicação do método, é necessário conhecer a estrutura do pavimento existente do trecho. A normativa distingue em três camadas para o cálculo: a primeira camada ( $h_e$ ) representa o revestimento asfáltico, a segunda camada ( $H_{cg}$ ) refere-se à soma das camadas granulares, e a terceira camada é associada ao subleito. A estrutura de referência foi definida a partir das camadas que caracterizaram o pavimento, apresentadas na Tabela 6.

A classificação resiliente do solo do subleito foi feita com base na Tabela 3. Através dos resultados de ensaio do Quadro 8, foi possível identificar o percentual de silte (S), determinado pela fração que passa pela peneira com abertura de 0,075 mm (nº 200), com o respectivo valor de ISC.

Em sequência, foi calculada a espessura efetiva ( $h_{ef}$ ) com a Equação 11. Foram identificadas as constantes  $I_1$  e  $I_2$  a partir da classificação resiliente e da estrutura de referência definida. Com a espessura efetiva ( $h_{ef}$ ) calculada, ainda foram verificadas as duas condições impostas pelo método para correção do valor, utilizando o de trincamento (TR) e incidência de trincas da Tabela 8.

A deflexão máxima admissível ( $D_{adm}$ ) foi calculada através da Equação 12, para o número  $N_{80kN}$  de  $9,53 \times 10^6$ .

A Equação 13 foi utilizada para calcular a espessura de reforço em concreto asfáltico (HR). Por fim, a solução definitiva é adotada conforme as orientações do DNER (1994a), baseada no valor de HR calculado.

### 3.5. Retroanálise pelo BackMeDiNa

Para obter os módulos elasticidade das camadas do pavimento foi empregado o *software* BackMeDiNa, uma vez que o programa calcula a diferença entre as bacias deflectométricas medidas e as bacias deflectométricas calculadas.

Os dados devem ser inseridos no programa através de uma planilha em Excel, no formato “.csv”, a qual é disponibilizada no *software*, como mostra a Figura 19. Nesta planilha, são colocadas informações das bacias como a data do levantamento, deflexões em cada sensor, raio do sensor do FWD, temperatura do ar e pavimento em °C, o número da estaca de cada bacia, deslocamento em m, carga aplicada em quilograma-força (kgf) e identificação da faixa da pista e da trilha (interna ou externa).

**Figura 19.** Planilha modelo disponibilizada pelo *software* BackMeDiNa.

Data de Ex	Temp. Do	Temp. Do	Carga	Estaca - N	Estaca - D	Estaca - F	Estaca - T	d0	d20	d30	d45	d65	d90	d120
17	18	4174,582	143	960 Dir	Ext			253	184	118	65	23	10	7
18	18	4109,692	144	0 Esq	Ext			482	341	240	133	57	18	7
18	18	4109,692	144	40 Dir	Ext			615	425	282	154	73	38	18
18	18	4138,532	144	80 Esq	Ext			523	312	187	89	33	13	6
18	17	4189,002	144	120 Dir	Ext			346	240	155	85	42	23	15
18	18	4167,372	144	160 Esq	Ext			608	400	277	160	93	56	36
18	18	4073,642	144	200 Dir	Ext			654	468	334	200	108	53	32
18	17	4167,372	144	240 Esq	Ext			456	329	248	163	96	50	24
18	17	4145,742	144	280 Dir	Ext			627	418	283	169	100	63	45
18	17	4088,062	144	320 Esq	Ext			564	363	237	117	47	20	13
18	18	4095,272	144	360 Dir	Ext			730	482	340	204	105	58	40

**Fonte:** Autor, 2024.

A unidade padrão para deflexões do BackMeDiNa é o micrômetro ( $\mu\text{m}$ ). Portanto, foi necessário converter os dados das bacias deflectométricas do Anexo, os quais estavam originalmente em 0,01 mm, mediante a multiplicação por 10.

Os valores de carga aplicada na unidade quilograma-força (kgf) foram obtidos ao se considerar o raio do carregamento do FWD de 15 cm, conforme o padrão da planilha modelo do BackMeDiNa. Dessa forma, foi obtida a área do carregamento, a qual foi multiplicada pelos valores das células de carga em kPa (Anexo) e convertidas de kN para kgf. Os valores de temperatura do pavimento e temperatura do ar disponibilizados em  $^{\circ}\text{C}$  também foram adicionados ao programa, bem como a identificação das faixas da pista e das trilhas. Os dados adicionados à planilha modelo do BackMeDiNa estão apresentados no Apêndice A.

Além da importação da planilha para o *software*, foi necessário caracterizar a estrutura do pavimento. Foram adicionadas as espessuras das camadas e selecionados os tipos de materiais. Os módulos de elasticidade iniciais e coeficientes de Poisson também foram inseridos na *interface* do *software* BackMeDiNa.

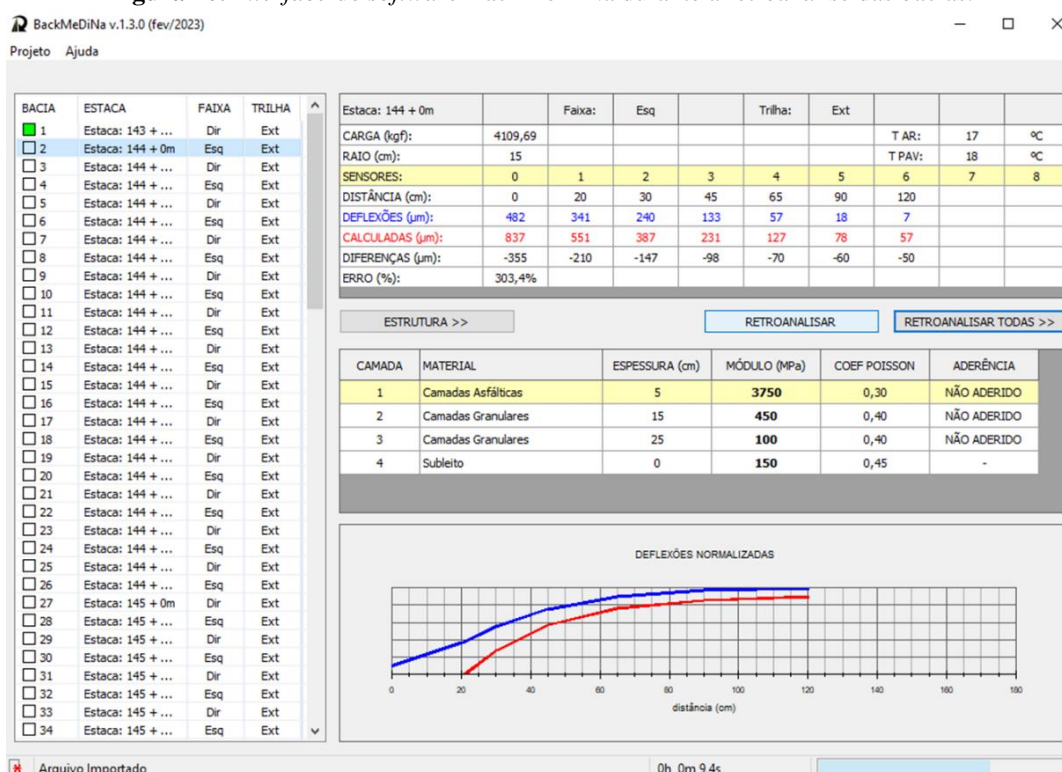
Por ser a mais utilizada em processos de retroanálise e considerar esforços maiores nas interfaces, a condição de aderência das camadas foi considerada como “Não aderido”. O MeDiNa não aceita a aderência entre a camada de revestimento e base ou revestimento e camadas granulares (Rocha, 2020).

A Tabela 10 apresenta as espessuras, os módulos de elasticidade iniciais, os coeficientes de Poisson e as condições de aderência adotados para cada camada do pavimento e inseridos no *software*.

**Tabela 10.** Dados de entrada das camadas no *software* BackMeDiNa.

Camada	Espessura (cm)	Módulo (MPa)	Coefficiente de Poisson	Aderência
Camada de revestimento (Concreto asfáltico)	5,0	3000	0,30	Não aderido
Camadas Granulares (Brita graduada)	15,0	300	0,40	Não aderido
Camadas Granulares (Rachão travado com brita)	25,0	200	0,40	Não aderido
Subleito (argila silte pedregulhosa)	-	100	0,45	-

O comando “Retroanalisar” foi selecionado e o *software* deu início aos cálculos. Nesse trabalho, foram aceitas somente as bacias retroanalizadas que obtiveram um erro menor do que 10%. A Figura 20 demonstra a *interface* do BackMeDiNa durante a retroanálise das bacias.

**Figura 20.** Interface do *software* BackMeDiNa durante a retroanálise das bacias.

Fonte: Autor, 2024.

### 3.6. Dimensionamento de reforço pelo MeDiNa

Para o dimensionamento da camada de reforço do pavimento, foi utilizado o *software* MeDiNa com a opção “Modo Reforço”. A etapa inicial compreendeu a importação da retroanálise feita pelo BackMeDiNa. Após a importação, a *interface* do *software* foi atualizada com informações sobre os materiais constituintes, espessuras, a média dos módulos de elasticidade obtidos pela retroanálise e coeficiente de Poisson de cada camada.



Foi necessário caracterizar o material da camada de reforço. Diante da impossibilidade da realização de ensaios de laboratório, o material foi selecionado da base de dados do MeDiNa. Optou-se pelo concreto asfáltico “Classe 1”, com espessura inicial definida como a mínima aceita pelo programa, de 5,0 cm. As propriedades que caracterizam o material da camada de reforço estão apresentadas na Tabela 11.

**Tabela 11.** Propriedades do concreto asfáltico “Classe 1”.

<b>Parâmetros</b>	<b>Classe 1</b>
Coefficiente de Poisson	0,3
Contato	Não aderido
Módulo de Resiliência (MPa)	5764,0
Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> )	2,4
Resistência Tração (MPa)	1,0
Fadiga - Coef. de Regressão (k <sub>1</sub> )	5,496 x 10 <sup>-12</sup>
Fadiga - Coef. de Regressão (k <sub>2</sub> )	-3,253
Classe de Fadiga	1,0
FFM (100μ a 250μ)	0,84

Legenda: k<sub>1</sub> e k<sub>2</sub> – coeficientes de regressão, FFM – Fator de Fadiga da Mistura Asfáltica.

Os valores de entrada das camadas estão apresentados na Tabela 12.

**Tabela 12.** Dados de entrada do dimensionamento pelo MeDiNa.

<b>Camada</b>	<b>Espessura (cm)</b>	<b>Módulo (MPa)</b>	<b>Coefficiente de Poisson</b>
Camada de Reforço (Concreto asfáltico “Classe 1”)	5,0	5764	0,30
Camada de revestimento existente (Concreto asfáltico)	5,0	4749	0,30
Camadas Granulares (Brita graduada)	15,0	646	0,40
Camadas Granulares (Rachão travado com brita)	25,0	163	0,40
Subleito (argila silte pedregulhosa)	-	323	0,45

Para a caracterização da camada de revestimento existente, os dados do Índice de Irregularidade Internacional (IRI) e percentual de área trincada (AT%) inseridos foram os apresentados nas Tabelas 8 e 9. Considerando o ano de implantação da rodovia em 1978, a idade do pavimento foi definida como 45 anos. A espessura de fresagem foi inserida como 0,0 cm. A Figura 21 mostra a *interface* do programa com os dados de entrada relativos à camada de revestimento existente.

**Figura 21.** Dados inseridos relativos à camada de revestimento existente.

Propriedades da Camada 2

BASE DE DADOS	
Camada Asfáltica Superficial	

CAMADA ASFÁLTICA EXISTENTE	
Material	Camada Asfáltica Superficial
<b>Parâmetros</b>	
Espessura (cm)	5,0
Coefficiente de Poisson	0,30
Contato	Não Aderido
<b>Módulo (MPa)</b>	
Modelo Constituinte	Resiliente Linear
Módulo (MPa)	4749
<b>Características</b>	
Espessura de fresagem (cm)	0,0
Espessura de campo (cm)	5,0
Área Trincada (%)	13
IRI (m/km)	3
Deflexão característica (0,01mm)	65
Idade do pavimento (anos)	45
Módulo mínimo (MPa)	1232
Módulo máximo (MPa)	13292
MR - Desvio Padrão (MPa)	2228
Coef de Variação do Módulo (%)	46,9
Comentários	...

Excluir    Atualizar    Salvar    OK    Cancel

Fonte: Autor, 2024.

Para que o dimensionamento fosse realizado com o mesmo  $N_{80kN}$  utilizado nos métodos do DNIT, somente o VMD do primeiro ano foi ajustado no *software* MeDiNa para que se atingisse o valor de  $9,53 \times 10^6$ , no período de projeto de 10 anos. O restante dos dados de tráfego foi mantido com os valores iniciais. A Figura 22 apresenta os dados do tráfego inseridos para o cálculo do  $N_{80kN}$ .

O tipo de via selecionado foi o “Sistema Arterial Primário”, o qual possui 85% de confiabilidade e critério de fadiga de 30%.

**Figura 22.** Dados de tráfego inseridos no MeDiNa

EIXO PADRÃO RODOVIÁRIO	
<b>DADOS DO TRÁFEGO</b>	
Tipo de Via:	Sistema Arterial Primário
VMD (1º ano):	2610
FV:	1,000
N anual (1º ano):	9,53e+05
% Veículos na faixa de projeto:	100
N Anual da faixa:	9,53e+05
Taxa de crescimento (%):	0,0
Período de projeto (anos):	10
N Total:	9,53e+06

Fonte: Autor, 2024.

Com todos os dados da estrutura existente e da camada de reforço, foi iniciado o dimensionamento por parte do *software*.

### 3.7. Comparativo entre as estruturas obtidas

A comparação entre as estruturas obtidas pelos métodos do DNIT e MeDiNa foi realizada utilizando a funcionalidade "avaliar a estrutura" disponível no MeDiNa.

Foi feita a inserção das estruturas resultantes dos dimensionamentos pelos métodos DNER-PRO 11 (DNER, 1979) e DNER-PRO 269 (DNER, 1994d) na aba "Reforço" do *software* MeDiNa. As informações para as camadas do pavimento existente como propriedades mecânicas (módulos e coeficientes de Poisson), espessuras e materiais constam na Tabela 12 e são as mesmas utilizadas para o dimensionamento realizado pelo MeDiNa. A caracterização da camada de revestimento existente foi representada pelos dados mostrados na Figura 21.

A camada de reforço teve a espessura resultante de seu respectivo método de dimensionamento (DNER-PRO 11 e DNER-PRO 269) e o material escolhido também foi o concreto asfáltico "Classe 1" (Tabela 11).

Foram adotados os dados de tráfego e tipo de via da Figura 22, assim, o *software* também trabalhou com o nível de confiabilidade de 85% e critério de fadiga de 30% para o percentual de área trincada (AT%).

Posteriormente, ao clicar em "Avaliar a Estrutura", o *software* MeDiNa gerou os relatórios para as duas estruturas provenientes dos dimensionamentos pelos métodos do DNIT, as quais foram comparadas com o relatório no dimensionamento pelo MeDiNa, a partir dos seguintes aspectos:

- Espessura da camada de reforço resultante;
- Percentual de área trincada no final do período de projeto (10 anos).

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1. Dados de avaliação estrutural

#### 4.1.1. Dados de deflexão

Na análise estatística, de acordo com a Tabela 7, foi adotado o valor de  $z$  de três, uma vez que o número de levantamentos ( $n$ ) for superior a vinte. A Tabela 13 apresenta a média aritmética ( $D$ ), o desvio padrão ( $\sigma$ ) e os limites do intervalo de aceitação de deflexões, em que  $D + 3\sigma$  é o limite superior e  $D - 3\sigma$  é o limite inferior.

**Tabela 13.** Valores de referência para a realização da análise estatística.

	Deflexões (0,01 mm)						
	D <sub>0</sub>	D <sub>20</sub>	D <sub>30</sub>	D <sub>45</sub>	D <sub>65</sub>	D <sub>90</sub>	D <sub>120</sub>
D	54,86	37,22	25,12	14,3	7,67	4,35	2,7
$\sigma$	9,90	7,42	5,97	4,33	2,89	1,96	1,33
$D + z \times \sigma$	84,56	59,48	43,03	27,29	16,34	10,23	6,69
$D - z \times \sigma$	25,16	14,96	7,21	1,31	-1,00	-1,53	-1,29

Legenda: D – Deflexão média (0,01 mm), os índices 0, 20, 30, 45, 65, 90 e 120 correspondem às distâncias em relação ao ponto de carga, em cm,  $\sigma$  – Desvio padrão (0,01 mm),  $z$  – Parâmetro relacionado ao número de levantamentos.

Logo, verificou-se que todos os valores das bacias de deflexão levantados (Anexo) se encontram dentro do intervalo de aceitação definido

A deflexão característica ( $D_c$ ) foi obtida com a média dos valores de deflexão máxima ( $D_0$ ), e o desvio padrão ( $\sigma$ ), aplicando a Equação 7, como demonstrado na Tabela 14.

**Tabela 14.** Obtenção da deflexão característica.

Deflexão (0,01 mm)		
D	$\sigma$	$D_c$
54,86	9,90	64,76

Legenda: D – Deflexão média (0,01 mm),  $\sigma$  – desvio padrão (0,01 mm),  $D_c$  – Deflexão característica (0,01 mm).

A aplicação da correlação de Duarte *et al.* (1996), a partir da Equação 4, converteu a deflexão característica medida pelo FWD para a deflexão pela viga Benkelman, como apresentado na Tabela 15.

**Tabela 15.** Conversão da deflexão medida por FWD para a medida por viga Benkelman.

D <sub>FWD</sub> (0,01mm)	D <sub>B</sub> (0,01mm)
64,76	79,00

Legenda: D<sub>FWD</sub>- Deflexão característica medida por FWD (0,01 mm), D<sub>B</sub>- Deflexão característica medida por viga Benkelman (0,01 mm).

O valor de deflexão característica pela viga Benkelman ( $D_B$ ) foi utilizado como Deflexão característica ( $D_c$ ) em ambos os métodos do DNIT.

#### 4.1.2. Raio de Curvatura

O raio de curvatura, calculado pela Equação 2, resultou em 113,0 m. Segundo DNER (1979), um valor de raio de curvatura maior do que 100 m é bom sinal relativo à condição estrutural do pavimento.

#### 4.2. Dimensionamento pelo método DNER-PRO 11

O valor de deflexão de projeto ( $D_p$ ), obtido pela Equação 8, está apresentado na Tabela 16.

**Tabela 16.** Obtenção da deflexão de projeto.

$D_c$ (0,01 mm)	$F_s$	$D_p$ (0,01 mm)
79,0	1,0	79,0

Legenda:  $D_{FWD}$ - Deflexão característica obtida em FWD,

$D_B$ - Deflexão característica pela viga Benkelman.

A Tabela 17 demonstra a deflexão admissível ( $D_{adm}$ ), calculada por meio da Equação 9, para  $N_{80kN}$  de  $9,53 \times 10^6$ ,

**Tabela 17.** Obtenção da deflexão admissível pelo método DNER-PRO 11.

$N_{80kN}$	$D_{adm}$ (0,01 mm)
$9,53 \times 10^6$	60,5

Legenda:  $N_{80kN}$  - número de eixos equivalentes ao eixo padrão de 80 kN,  $D_{adm}$  - Deflexão admissível (0,01 mm).

Por meio dos parâmetros de Índice de Gravidade Global (IGG) (Tabela 9), Deflexão de projeto ( $D_p$ ) (Tabela 16), Deflexão admissível ( $D_{adm}$ ) (Tabela 17), a seguir relacionados, e as hipóteses elencadas do Quadro 7, foi realizada a seleção da alternativa de restauração, como mostra o Quadro 9.

- $D_p \leq 3 \times D_{adm}$ : ( $79 (0,01 \text{ mm}) \leq 181,5 (0,01 \text{ mm})$ );
- $IGG < 180$ : ( $148 < 180$ );
- $R > 100 \text{ m}$ : ( $113 \text{ m} \geq 100 \text{ m}$ );

**Quadro 9.** Seleção da alternativa de acordo com o método DNER-PRO 11.

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

Legenda:  $D_{adm}$  – Deflexão admissível (0,01 mm),  $D_p$  – Deflexão de projeto (0,01 mm), R – Raio de curvatura (m), IGG – Índice de Gravidade Global.

A alternativa resultou na hipótese II, caracterizada por uma qualidade estrutural considerada "regular", tendo como medida corretiva a execução de reforço.

A espessura de reforço foi calculada pela Equação 10. Optou-se por arredondar o valor para o número inteiro superior mais próximo, como demonstra a Tabela 18.

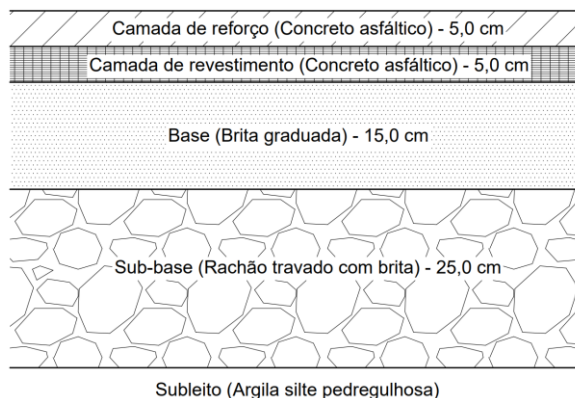
**Tabela 18.** Resultado do cálculo do reforço pelo método DNER-PRO 11.

Reforço	
$h_{CB}$ (cm)	$h_{CB}$ arredondado (cm)
4,63	5,00

Legenda:  $h_{CB}$  é a espessura de reforço em concreto asfáltico (cm).

A estrutura do pavimento resultante do dimensionamento pelo DNER-PRO 11 com a adição da camada de reforço está representada na Figura 23.

**Figura 23.** Estrutura resultante do dimensionamento pelo DNER-PRO 11.



Observa-se que o método de dimensionamento DNER-PRO 11 é simples, cujos índices utilizados na seleção das alternativas são o IGG, deflexão característica, deflexão de projeto e raio de curvatura. A análise dos critérios de avaliação funcional está presente apenas na definição dos segmentos homogêneos e na seleção da alternativa baseada no Quadro 7, em que o IGG só é considerado no caso da necessidade de reconstrução do pavimento.

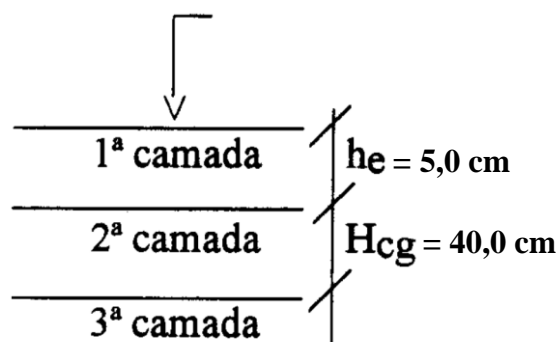
As características das camadas que compõem a estrutura do pavimento, como os materiais constituintes e espessuras, não foram consideradas nas etapas do dimensionamento pelo DNER-PRO 11.

Ressalta-se que apesar do método não fornecer instruções sobre o tratamento da camada existente, anteriormente à colocação da camada de reforço, é imprescindível a correção de todos os defeitos antes da reabilitação.

#### 4.3. Dimensionamento pelo método DNER-PRO 269

A estrutura de referência resultante está ilustrada na Figura 24.

**Figura 24.** Estrutura de referência no método DNER-PRO 269.



Com base no percentual de silte (S) e o ISC, presentes no Quadro 8, e as condições da Tabela 3, foi feita a classificação resiliente do solo, como indicam o Quadro 10 e a Tabela 19.

**Quadro 10.** Características para classificação resiliente do solo do subleito.

Camada (m)		0,45-1,10	
Granulometria	% Passando nas peneiras	2"	89,2
		1"	67,1
		3/8"	48,4
		N° 4	36,2
		N° 10	29,6
		N° 40	23,3
		N° 200	18,8
LL <sup>1</sup> %		39,7	
IP <sup>2</sup> %		18,1	
IG <sup>3</sup>		0	
Classificação H.R.B <sup>4</sup>		A-2-6	
Equivalente de areia %		-	
Campo	MEAS <sup>5</sup> (t/m <sup>2</sup> )	-	
	Umidade Natural (%)	23,2	
Laboratório	Energia <sup>6</sup> (n° de golpes)	12	
	Umidade de Compactação (%)	17	
	Densidade Real	1,847	
	Expansão (%)	0,1	
	ISC <sup>7</sup>	10,2	

<sup>1</sup>Limite de liquidez, <sup>2</sup>Índice de plasticidade, <sup>3</sup>Índice de grupo, <sup>4</sup>Highway Research Board, <sup>5</sup>Massa específica aparente seca, <sup>6</sup>Energia do ensaio de compactação, <sup>7</sup>Índice de Suporte Califórnia

**Tabela 19.** Seleção do tipo de solo do subleito pelo DNER-PRO 269.

ISC (%)	S (%)		
	≤ 35	35 a 45	> 45
≥ 10	I	II	III
6 a 9	II	II	III
2 a 5	III	III	III

Legenda: ISC – Índice de Suporte Califórnia (%), S – Percentual de Silte (%).

Portanto, foi verificado que o solo do subleito é do tipo I (ISC = 10,2% > 10 e S = 18,8% ≤ 35,0%).

A obtenção da espessura efetiva ( $h_{ef}$ ) está resumida na Tabela 20. Na determinação das constantes  $I_1$  e  $I_2$ , verificou-se que o trecho se encontrou no “Caso 1”, em que a espessura da camada granular ( $H_{cg}$ ) é inferior a 45 cm e o solo do subleito é do Tipo I. Neste caso, os valores das constantes relacionadas a resiliência do subleito foram os seguintes:  $I_1 = 0$  e  $I_2 = 0$ .

A Equação 11 foi aplicada e a espessura efetiva ( $h_{ef}$ ) obtida foi verificada de acordo com as condições impostas pelo método. As correções não foram necessárias pois os valores de espessura efetiva, trincamento e incidência de trincas se apresentaram dentro dos intervalos estabelecidos pelo método.



**Tabela 20.** Obtenção da espessura efetiva.

$h_e$ (cm)	$H_{cg}$ (cm)	Tipo de Solo	$I_1$	$I_2$	%FC-3	TR (%)	$h_{ef}$ (cm)
5,0	40,0	I	0	0	9,5	16,2	4,5

Legenda:  $h_e$  – Espessura da camada de revestimento (cm),  $H_{cg}$  – Espessura da camada granular (cm),  $I_1$  e  $I_2$  – Constantes relacionadas à resiliência da camada de subleito, FC-3 – Incidência de trincas classe 3, TR – Trincamento (%).

A determinação deflexão admissível ( $D_{adm}$ ), pela Equação 12, está demonstrada na Tabela 21. Foi observado que o valor resultante é menor do que a Deflexão característica, o que evidencia problemas estruturais no pavimento.

**Tabela 21.** Obtenção da deflexão admissível pelo método DNER-PRO 269.

$N_{80kN}$	$D_{adm}$ (0,01 mm)
$9,53 \times 10^6$	68,5

Legenda:  $N_{80kN}$  - Número de eixos equivalentes ao eixo padrão de 80 kN,  $D_{adm}$  – Deflexão admissível (0,01 mm)

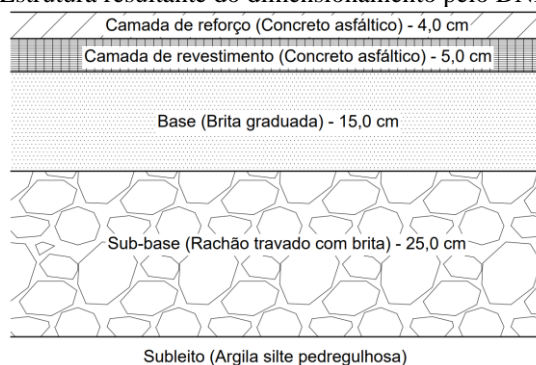
A espessura da camada de reforço em concreto asfáltico (HR), calculada a partir da Equação 13, está na Tabela 22. Como  $12,5 < HR \leq 25$  cm, a solução escolhida foi a aplicação de camada única em concreto asfáltico. Optou-se por arredondar o valor obtido para o número inteiro superior mais próximo.

**Tabela 22.** Resultado do cálculo da camada de reforço no método DNER-PRO 269.

HR (cm)	HR arredondado (cm)
3,65	4,00

Legenda: HR- espessura da camada de reforço em concreto asfáltico (cm).

A estrutura do pavimento resultante do dimensionamento pelo DNER-PRO 269 está apresentada na Figura 25.

**Figura 25.** Estrutura resultante do dimensionamento pelo DNER-PRO 269.

A espessura de reforço obtida pelo método DNER-PRO 269 foi menor em comparação com o método DNER-PRO 11. Este resultado pode ter sido influenciado pela classificação resiliente do solo do subleito. De acordo com Pinto e Preussler (2002), a

presença de solos do tipo I no subleito do pavimento não representa a situação mais crítica, e sim a presença de solos do tipo III. Se o solo do subleito neste estudo fosse do tipo III, a espessura da camada de reforço em concreto asfáltico poderia resultar em um valor maior.

Em comparação ao DNER-PRO 11, o DNER-PRO 269 aborda uma gama mais abrangente de análises do pavimento. Além da análise estrutural, que envolve o cálculo das deflexões e as características das camadas, também incorpora uma abordagem da parte funcional. Esta inclui a avaliação dos defeitos existentes, através dos parâmetros de trincamento (TR). Também é verificado o quanto a camada de revestimento ainda contribui para suportar a carga do tráfego, realizando a determinação da espessura efetiva.

O DNER-PRO 269 ainda possui orientações mais claras acerca da solução a ser adotada. No procedimento, a espessura HR calculada orienta o projetista para qual medida deve ser tomada para a restauração do pavimento. As medidas abrangem aplicação de lama asfáltica/tratamento superficial, reconstrução da estrutura do pavimento e camadas integradas de concreto asfáltico.

#### 4.4. Retroanálise pelo BackMeDiNa

Para proceder a retroanálise pelo BackMeDiNa, foram usados os dados constantes no Apêndice A, que são temperatura do ar e do pavimento, informações das estacas (número, deslocamento, lado e trilha) e as deflexões das bacias. Foram realizadas repetições para que o erro de cada estaca atingisse um valor menor do que o estabelecido de 10%. Das 51 bacias deflectométricas retroanalizadas, sete não obtiveram um valor menor do que o do critério de erro e por este motivo, foram excluídas. Assim, os módulos resultaram da média das retroanálises das 44 bacias.

Na Tabela 23 são apresentados os resultados obtidos nos módulos, o coeficiente de Poisson e espessuras utilizadas para calcular a espessura do reforço no MeDiNa.

**Tabela 23.** Valores de módulo de elasticidade provenientes da retroanálise.

Camada	Espessura (cm)	Módulo (MPa)	Coefficiente de Poisson
Camada de revestimento existente (Concreto Asfáltico)	5,0	4749	0,30
Camada Granular (Brita Graduada)	15,0	646	0,40
Camada Granular (Rachão Travado com Brita)	25,0	163	0,40
Subleito (Argila Silte Pedregulhosa)	-	323	0,45

#### 4.5. Dimensionamento pelo MeDiNa

Importando a retroanálise gerada pelo BackMeDiNa com os módulos obtidos, espessuras e coeficientes de Poisson, e adicionando os dados de tráfego e caracterização da camada de revestimento existente, foi realizado o dimensionamento de reforço com o MeDiNa. Obteve-se a estrutura representada sem escala na Figura 26(a) e o relatório presente no Apêndice B.

No trabalho, foi ainda verificada a influência do uso de um concreto asfáltico com ligante modificado no dimensionamento da camada de reforço pelo MeDiNa. Foi adotado o material denominado “CAPFLEX B PG 64-22”, da base de dados do *software*, classificado como concreto asfáltico com asfalto borracha, cujas propriedades estão na Tabela 24.

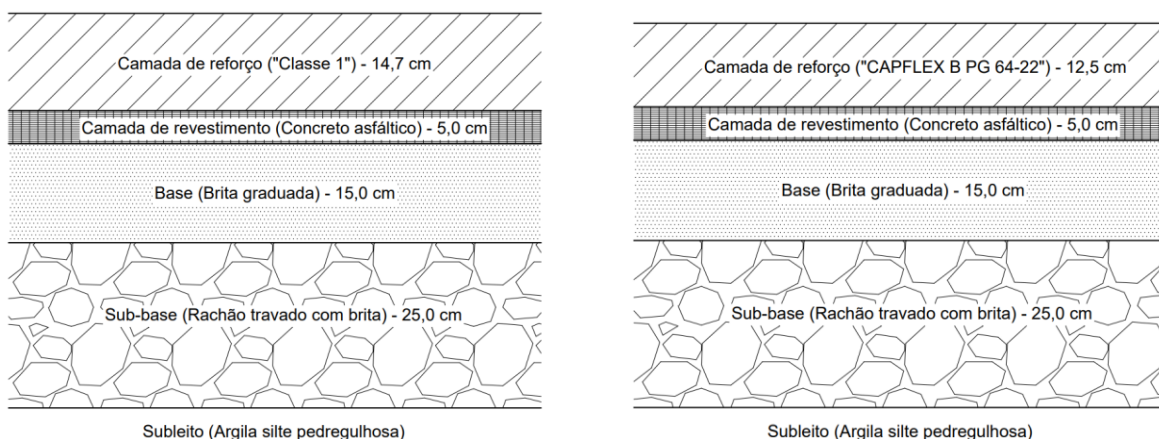
**Tabela 24.** Propriedades do concreto asfáltico com asfalto borracha “CAPFLEX B PG 64-22”.

Parâmetros	CAPFLEX B PG 64-22
Coefficiente de Poisson	0,3
Contato	Não aderido
Módulo de Resiliência (MPa)	4980,0
Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> )	2,4
Resistência Tração (MPa)	1,0
Fadiga - Coef. de Regressão (k <sub>1</sub> )	4,0 x 10 <sup>-12</sup>
Fadiga - Coef. de Regressão (k <sub>2</sub> )	-3,654
Classe de Fadiga	2,0
FFM (100μ a 250μ)	0,99

Legenda: k<sub>1</sub> e k<sub>2</sub> – coeficientes de regressão, FFM – Fator de Fadiga da Mistura Asfáltica.

Foi alterado o material da camada de reforço e ajustada a espessura inicial para 5,0 cm. Desse modo, foi realizado o dimensionamento com o novo material e obteve-se a estrutura apresentada sem escala na Figura 26(b). O relatório gerado pelo dimensionamento com concreto asfáltico com asfalto borracha está no Apêndice C.

**Figura 26.** Estruturas resultantes do dimensionamento pelo MeDiNa



(a) Estrutura com concreto asfáltico “Classe 1”

(b) Estrutura com concreto asfáltico com asfalto borracha “CAPFLEX B PG 64-22”

A Tabela 25 apresenta os valores de percentual de área trincada no final do período de projeto (10º ano) para cada uma das estruturas.

**Tabela 25.** Área trincada das estruturas geradas pelo MeDiNa no final do período de projeto.

Área trincada (%)	Material da camada de Reforço	
	Classe 1	CAPFLEX B PG 64-22
Valor máximo	30,00	30,00
Valor no 10º ano	29,83	28,84

Após o dimensionamento com o concreto asfáltico da “Classe 1”, foi obtida uma espessura de 14,7 cm, muito próxima do limite máximo de 15 cm imposto pelo MeDiNa. O relatório gerado (Apêndice B) revelou uma estimativa do percentual de área trincada no pavimento de 29,83% ao final do período de projeto, atendendo o critério de fadiga.

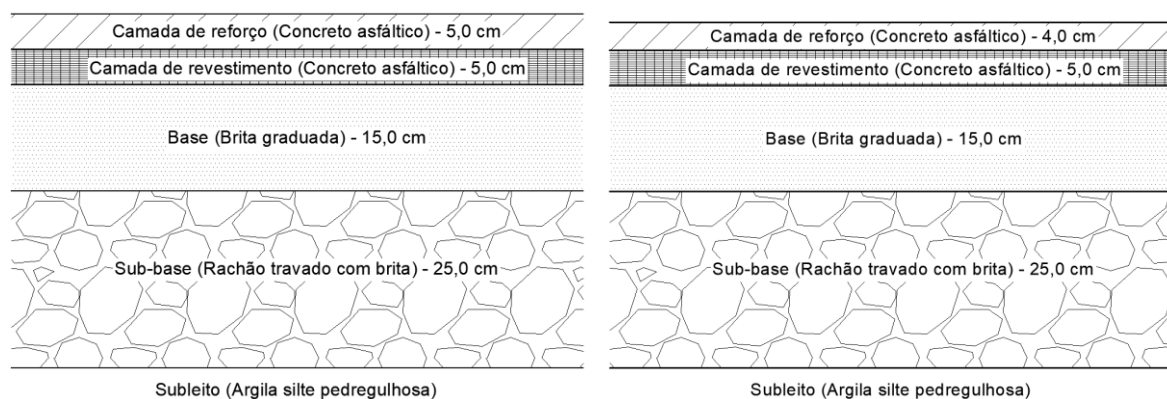
Ao empregar o concreto asfáltico com asfalto borracha “CAPFLEX B PG 64-22”, a espessura resultante do dimensionamento foi de 12,5 cm. Foi revelado pelo relatório no Apêndice C que a estimativa do percentual de área trincada ao final do período de projeto foi de 28,84%, também atendendo aos requisitos estabelecidos para critérios de fadiga.

Observou-se que, por meio do MeDiNa, foi possível realizar o dimensionamento da camada de reforço e a projeção do desempenho da estrutura considerando a incorporação de novos materiais com resistência superior, para além do concreto asfáltico convencional, algo que não é realizável através dos métodos de dimensionamento do DNIT. Nesse caso, a aplicação do concreto asfáltico com asfalto borracha resultou em uma espessura menor para camada de reforço e um melhor desempenho relacionado ao critério de fadiga.

#### 4.6. Comparativo de resultados entre os métodos DNIT e MeDiNa

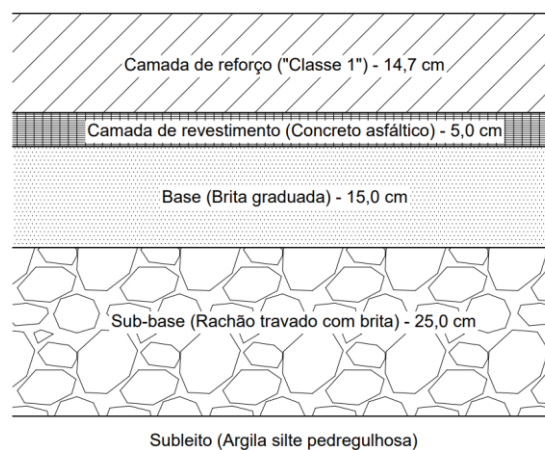
A Figura 27 demonstra a representação sem escala das estruturas resultantes dos métodos DNER-PRO 11 (Figura 27a), DNER-PRO 269 (Figura 27b) e MeDiNa (Figura 27c).

**Figura 27.** Estruturas resultantes dos dimensionamentos pelo DNIT MeDiNa.



(a) Estrutura resultante do DNER-PRO 11.

(b) Estrutura resultante do DNER-PRO 269.



(c) Estrutura resultante do MeDiNa.

A Tabela 26 demonstra os valores de percentual de área trincada no final do período de projeto para as estruturas de cada método de dimensionamento. É importante ressaltar que, das estruturas provenientes dos métodos do DNIT, foi gerado somente o relatório referente a do método DNER-PRO 11 (Apêndice D), pois a camada de reforço resultante do método DNER-PRO 269 apresentou uma espessura inferior a 5,0 cm, limite mínimo aceito pelo *software* MeDiNa.

**Tabela 26.** Área trincada das estruturas no final do período de projeto.

Área trincada (%)	Método de dimensionamento		
	DNER-PRO 11	DNER-PRO 269	MeDiNa
Valor máximo	30,00	30,00	30,00
Valor no 10º ano	68,71	-	28,84

Notou-se uma diferença significativa entre as espessuras obtidas pelos métodos do DNIT e pelo MeDiNa, em que o dimensionamento realizado pelo *software* resultou em uma camada de reforço mais de três vezes maior do que as dos métodos DNER-PRO 11 e DNER-PRO 269. Ficou evidente que para estes materiais, rigidez das camadas e tráfego, o MeDiNa determinou que a espessura da camada de reforço deveria ser significativamente maior para que a vida útil do pavimento alcançasse o período de projeto de 10 anos.

O relatório da estrutura do DNER-PRO 11 revelou uma inadequação no critério de fadiga, evidenciada pela ultrapassagem do percentual de área trincada de 30% após o 72º mês. O valor final do percentual de área trincada ao término do período de projeto foi mais do que o dobro em comparação com a estrutura do MeDiNa.

## 5. CONCLUSÕES

### 5.1. Considerações Finais

Para a elaboração do presente trabalho, foi realizado o dimensionamento de um pavimento a ser reabilitado de um trecho de rodovia no Estado de Santa Catarina. Por meio de dados levantados por uma empresa de engenharia, foram avaliados e calculados os parâmetros necessários para realizar a comparação das estruturas obtidas pelos métodos de dimensionamento à reabilitação vigentes no DNIT, DNER-PRO 11, DNER-PRO 269 e em implantação, MeDiNa.

Foram elencados os dados de avaliação funcional, através dos índices IGG, IRI, QI, parâmetros de trincamento superficial e incidência de defeitos como panelas, remendos, desgaste e afundamento de trilhas de roda. Quanto ao estado superficial, a partir do IGG e do trincamento, o pavimento foi classificado como “Ruim”. Por outro lado, os valores de IRI e QI indicaram que os valores de irregularidade longitudinal se encontraram dentro de limites aceitáveis, pois foram classificados como “Regular”.

A partir dos dados de avaliação estrutural, ou seja, levantamento deflectométrico e sondagens para caracterização das camadas do pavimento, foi realizada a retroanálise. Para o raio de curvatura do pavimento, indicador de arqueamento das bacias deflectométricas, o valor obtido não indicou a presença de problemas estruturais significativos.

No dimensionamento pelo método DNER-PRO 11, por meio dos dados de deflexão de projeto ( $D_p$ ) que foi maior do que a deflexão admissível ( $D_{adm}$ ), raio de curvatura menor do que 100 m e IGG menor do que 180, foi evidenciado que o pavimento apresentou qualidade estrutural “Regular”. Neste caso, o método indicou que a medida corretiva foi a aplicação da camada de reforço. A espessura da camada de reforço resultou em 5,0 cm. Foi observado que o método DNER-PRO 11 teve aplicação simples, ao considerar principalmente parâmetros de avaliação estrutural.

O dimensionamento pelo DNER-PRO 269 contemplou a caracterização resiliente do solo de fundação e, em parte, a fadiga da camada de reforço por meio da deflexão admissível ( $D_{adm}$ ), a qual foi inferior a deflexão característica ( $D_c$ ). A espessura da camada de reforço resultou em 4,0 cm. O método DNER-PRO 269 se demonstrou mais completo em termos de avaliação funcional em comparação ao DNER-PRO 11, por considerar as medidas de trincamento e a incidências de defeitos durante o dimensionamento. O DNER-PRO 269 também se demonstrou mais assistencial ao projetista, por fornecer orientações mais abrangentes na definição das medidas a serem adotadas, com base nos resultados obtidos por meio de cálculos.

Inferiu-se que diferença de 1,0 cm de espessura da camada de reforço entre os métodos DNER-PRO 11 e DNER-PRO 269, possa ser atribuída à classificação resiliente do solo de fundação como tipo I. Como o método se baseia na capacidade de suporte do solo de fundação e tendo este uma adequada classificação resiliente, a espessura foi menor.

A retroanálise das 51 bacias deflectométricas foi conduzida por meio do *software* BackMeDiNa, com a adoção de um critério de erro de 10% para cada estaca. No total, apenas 7 bacias foram excluídas da posterior importação para o dimensionamento pelo MeDiNa, demonstrando a eficácia do *software* BackMeDiNa na condução de uma retroanálise satisfatória.

Realizou-se o dimensionamento pelo MeDiNa, empregando concreto asfáltico convencional e concreto asfáltico com asfalto borracha na camada de reforço. Os relatórios indicaram que o reforço em concreto asfáltico com asfalto borracha "CAPFLEX B PG 64-22" alcançou a vida útil estabelecida com uma espessura menor, de 12,5 cm, em comparação com o concreto asfáltico convencional "Classe 1", que exigiu 14,7 cm. Além disso, ao término do período, também apresentou um percentual menor de área trincada. Esse resultado tornou evidente a sensibilidade do dimensionamento pelo MeDiNa ao tipo de concreto asfáltico empregado, uma variável que não é considerada nos métodos do DNIT, que não levam em conta a possibilidade de utilização dos novos materiais, em especial, camadas asfálticas com ligantes modificados.

Na comparação entre as estruturas com concreto asfáltico convencional provenientes dos métodos do DNIT e MeDiNa, ficou clara a diferença entre as espessuras da camada de reforço resultantes. O MeDiNa contemplou uma camada de 14,7 cm, significativamente maior do que as do método DNER-PRO 11 e DNER-PRO 269, de 5,0 cm e 4,0 cm, respectivamente. Notou-se também um desempenho melhor em relação ao critério de fadiga no final do período de projeto. Assim, percebeu-se que os métodos de dimensionamento de reforço de pavimentos existentes, que são predominantemente empíricos, apresentam uma certa insuficiência para as demandas atuais.

O MeDiNa, de caráter empírico-mecanicista revelou que as espessuras das camadas de revestimento para atendimento ao tráfego previsto devem ser necessariamente superiores àquelas obtidas pelos métodos empíricos. Talvez, por este motivo, os pavimentos brasileiros não têm alcançado a vida útil de projeto.

Ressalta-se que, embora seja um método de aplicação relativamente fácil, o MeDiNa demanda uma quantidade significativa de informações, principalmente na caracterização do material da camada de reforço. Sendo o *software* MeDiNa com base em método empírico-

mecanicista, cujos dados requeridos são aplicados em modelos de comportamento estrutural das camadas do pavimento por meio dos princípios da mecânica dos pavimentos, o mesmo apresentou fiabilidade em relação a espessura requerida para o período de projeto, tráfego e estrutura existente. Na prática, é desejável e necessária a realização dos ensaios para obter as propriedades do material, ao invés de depender exclusivamente dos dados disponibilizados pelo banco de dados *software*.

O MeDiNa se mostrou como uma ferramenta bastante adequada. Considera-se que à medida que o método seja aperfeiçoado, calibrado e “alimentado” por dados comparativos, será possível a elaboração de projetos cada vez mais consistentes. O *software* MeDiNa também se destacou por antecipar o desenvolvimento de patologias na estrutura do pavimento, como o percentual de área trincada, ao apresentar seu padrão de evolução.

Outro aspecto importante é que o MeDiNa foi desenvolvido por pesquisas brasileiras, que consideraram a realidade da pavimentação nacional, capaz de modelar o pavimento e as condições de contorno de maneira fidedigna, demandando um extenso conjunto de informações, incluindo características mecânicas como módulo de elasticidade, fatores de fadiga e condições de aderência entre as camadas. Sua abordagem abrangente resulta em dados mais precisos e fiéis à realidade, tornando-o uma ferramenta mais completa para a área de pavimentação.

## 5.2. Limitações do trabalho

Durante a realização deste trabalho foram observadas algumas limitações, tais como:

- Falta da realização de ensaios para a caracterização dos materiais componentes da camada de reforço e da camada de revestimento existente;
- Consideração de apenas um nível de tráfego para a realização dos dimensionamentos;
- Consideração de um trecho de rodovia curto para a realização dos dimensionamentos.

## 5.3. Recomendações para Trabalhos Futuros

Recomenda-se para trabalhos futuros:

- Realizar uma análise de custos do dimensionamento com o MeDiNa em relação aos métodos do DNIT e apontar os benefícios econômicos que seriam gerados;
- Analisar e comparar o desempenho de outros tipos de concretos asfálticos com ligantes modificados no MeDiNa;
- Realizar os dimensionamentos para diferentes níveis de tráfego e diferentes



valores de índice de avaliação de pavimentos (IGG, IRI, TR, raio de curvatura);

- Realizar e comparar os resultados de diferentes *softwares* de retroanálise.

## REFERÊNCIAS

ADLINGE, S.S.; GUPTA, A.K. **Pavement deterioration and its causes**. IOSR Journal of Mechanical & Civil Engineering (IOSR-JMCE), ISSN: 2278-1684, p. 09-15. 2015.

ALBERNAZ, C.A.V. **Método simplificado de retroanálise de módulos de resiliência de pavimentos flexíveis a partir da bacia de deflexão**. 1997. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 1997.

ALBANO, J. F. **Efeitos dos excessos de carga sobre a durabilidade dos pavimentos**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul: UFRGS, 2005.

ALMEIDA, H. **Dimensionamento de pavimentos flexíveis no Brasil: Comparativo entre o método DNER e mecanístico empírico - ME**. MBA Infraestrutura de Transportes e Rodovias Instituto de Pós-Graduação - IPOG Brasília, DF. 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8547: pavimentos flexíveis e semi-rígidos - delineamento da linha de influência longitudinal da bacia de deformação por intermédio da viga Benkelman**. Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 1984.

BALBO, J. T. **Pavimentação asfáltica: materiais, projetos e restauração**. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.

BARELLA, R. M. **Contribuição para a avaliação da irregularidade longitudinal de pavimentos com perfilômetros inerciais**. 362p. Tese (Doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Transportes. 2008.

BARROS, A.L.C.M.; SÍRIO, A.S.S.; MENIN, K.M.L.; GOMES, R.C.; SOUZA JUNIOR, R. C. **Estudo comparativo entre asfalto convencional e o asfalto modificado por polímero SBS**. Trabalho de conclusão de curso. UNIVERSIDADE VALE DO RIO DOCE – UNIVALE. Governador Valadares/ MG, Brasil. 2008.

BARROS, J.H.M. **Análise de propriedades mecânicas de mistura asfáltica usando ligante modificado por via seca com resíduo industrial e escória de cobre pós-jateada / Jéssica Horta Menezes Barros; orientadora Gisélia Cardoso**. - São Cristóvão, 2022.

BASÍLIO, R. **Análise do comportamento de pavimentos de rodovias estaduais de goiás - Estudo de caso.** UFSC - Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 2002.

BERNUCCI, L.B.; MOTTA, L.M.G.; CERATTI, J.A.P.; SOARES, J.B. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros.** 2ª ed. Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA, 2022.

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

BORGES, C. B. S. (2001). **Estudo comparativo entre medidas de delexão com viga Benkelman e FWD em pavimentos da malha rodoviária estadual de Santa Catarina.** Thesis (MSc). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, SC.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTES. **Transporte rodoviário: por que os pavimentos das rodovias do Brasil não duram?** Brasília: CNT, 2017.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTES. **Pesquisa CNT de rodovias 2023.** – Brasília: CNT: SEST SENAT: ITL, 2023.

CONSTRO. **Different layers of flexible pavement.** 2023. Disponível em: <https://constrofacilitator.com/different-layers-of-flexible-pavement/>

CUNHA, H.C.; OLIVEIRA, R. F. **Dimensionamento de um pavimento flexível entre os municípios de Monte Carmelo E Abadia dos dourados.** GETEC, v.10, n.26, p.17-34/2021

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ES 385/99. Pavimentação - concreto asfáltico com asfalto polímero.** Rio de Janeiro, RJ. 1999a. 15 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ES 386/99.**

**Pavimentação - pré-misturado a quente com asfalto polímero - camada porosa de atrito.** Rio de Janeiro, RJ. 1999b. 15 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-PRO 011/79. Avaliação Estrutural dos Pavimentos Flexíveis - Procedimento B.** 1979.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ES 173/86. Método de Nível e Mira para calibração de Sistemas Medidores de Irregularidade Tipo Resposta.** Rio de Janeiro, Brasil. 1986

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 024/94: Pavimento - determinação das deflexões pela viga Benkelman.** 1994a. 6 p

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-PRO 164/1994: Calibração e controle de sistemas de irregularidade de superfície de pavimento (Sistemas integradores IPR/USP e Maysmeter).** 1994b. 18 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-PRO 269/94. Projeto de Restauração de Pavimentos Flexíveis - TECNAPAV.** 1994c. 17 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-PRO 273/94. Determinação de Deflexões Utilizando Deflectômetro de Impacto Tipo “*Falling Weight Deflectometer*” (FWD),** Rio de Janeiro/RJ, 1994d. 4 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 031/2006 – ES. Pavimentos flexíveis - Concreto asfáltico - Especificação de serviço.** Rio de Janeiro – RJ. Rio de Janeiro: IPR, 2006c. 14 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 005/2003 - TER: Defeitos nos pavimentos flexíveis e semi-rígidos - Terminologia.** Rio de Janeiro: [s.n.], 2003a.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 006/2003 - PRO: Avaliação objetiva da superfície de pavimentos asfálticos -**

**Procedimento.** Rio de Janeiro: IPR, 2003b.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **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: IPR, 2003c.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 008/2003 - PRO: Levantamento visual contínuo para avaliação da superfície de pavimentos flexíveis e semi-rígidos - Procedimento.** Rio de Janeiro: IPR, 2003d.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 009/2003 - PRO: Avaliação subjetiva da superfície de pavimentos flexíveis e semi-rígidos - Procedimento,** Rio de Janeiro: IPR, 2003e.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 112/2009 – ES. Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico com asfalto borracha, via úmida, do tipo “Terminal Blending” - Especificação de serviço.** 2009. 13 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 132//2010 – PRO. Pavimentos – Calibração da célula de carga e de sensores de deflexão dos deflectômetros do tipo “Falling Weight Deflectometer (FWD)” - Procedimento.** Rio de Janeiro, RJ. 2010a. 21 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 137//2010 – ES. Pavimentação – Regularização do subleito - Especificação de serviço,** RJ. 2010b. 7 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 138//2010 – ES. Pavimentação – Reforço do subleito - Especificação de serviço.** Rio de Janeiro, RJ. 2010c. 7 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 172/2016 – ME. Solos – Determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando**

**amostras não trabalhadas – Método de ensaio**, Brasília/DF: IPR, 2016.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 433/2021 – PRO. Pavimentação - Levantamento do percentual de área trincada e de afundamento de trilha de roda de pavimento asfáltico em trechos experimentais, monitorados ou trechos homogêneos de curta extensão - Procedimento**. Instituto de Pesquisas Rodoviárias, Brasília. 2021.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de gerência de pavimentos**. Instituto de Pesquisas Rodoviárias, Publicação 745, Rio de Janeiro. 2011.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de Pavimentação**. 3. ed. Rio de Janeiro: IPR, 2006a. 274 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de restauração de pavimentos asfálticos**. Rio de Janeiro: IPR, 2006b. 313 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de projeto geométrico de travessias urbanas**. Rio de Janeiro, 2010d. 392p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Plano Nacional de Viação e Sistema Nacional de Viação**, 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/atlas-e-mapas/pnv-e-snv>.

DEVITTE, G; **Dimensionamento de reforço de pavimentos asfálticos urbanos: comparativo entre o método mecanístico empírico nacional e o DNER-PRO 269/94** - Giovani Devitte. - 2021. 165 p.

DUARTE, J.C.; SILVA, P.D.E.A.; FABRÍCIO, J.M. **Correlação entre deflexões características em pavimentos flexíveis medidos com viga Benkelman e com FWD - Failing Weight Deflectometer**. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 30., 1996, Salvador. Anais ... Rio de Janeiro: ABPv, 1996.

FARIAS, I.R.L.; CORREA, A.L.S.C., 2023. **Estudo de caso da análise visual de patologias encontradas no pavimento de uma rodovia no interior do Paraná**. Journal of Exact Sciences – JES. Maringá, Paraná, Brasil,

FERRI, S. **Critérios de aceitação e controle da qualidade da execução de camadas de fundação de pavimentos novos através de métodos deflectométricos**. 2013. 331 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

FONTES, L. P. T. L. **Optimização do desempenho de misturas betuminosas com betume modificado com borracha para reabilitação de pavimentos**. Tese (Doutorado) - Universidade do Minho, UM, Portugal, 2009.

FRANCO, F.A.C.P. **Método de dimensionamento mecanístico-empírico de pavimentos asfálticos - SISPAV**. 2007. 315 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia, Coppe, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007

FRANCO, F.A.C.P. **MeDiNa - Método de Dimensionamento Nacional. Manual de Utilização**. Versão 1.0.0. Rio de Janeiro, 2018.

GONTIJO, P.R.A., GUIMARÃES, F.H.R., NOGUEIRA, C.L. **Metodologias Brasileiras para Avaliações das Características Funcionais e Estruturais de Pavimentos Rodoviários - O Estado da Arte**. 28ª Reunião Anual de Pavimentação, Belo Horizonte, MG, set. 1994

INSTITUTO DE PESQUISAS RODOVIÁRIAS. **Execução de estudos e pesquisa para elaboração de método mecanístico - empírico de dimensionamento de pavimentos asfálticos: Manual para utilização do método mecanístico-empírico – MeDiNa**. Rio de Janeiro, 2020. 78 p.

KNABBEN, R. M.; CARPIO, J.A.V. **Como usar o *software* MeDiNa: o guia prático para a utilização do *software* MeDiNa de dimensionamento de pavimentos flexíveis**. 2020. E-Book.

KRYSINSKI, L.; SUDYKA, J., 2013. **GPR Abilities in Investigation of the Pavement Transversal Cracks**. Journal of Applied Geophysics, 97, 27-36. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0926985113000669?via%3Dihub#preview-section-cited-by>. Acesso em: 13/12/2023.

LEHMERT, M.B.S. **Análise comparativa de soluções entre os métodos brasileiros e o MEPDG para reabilitação de pavimentos flexíveis: Estudo de caso**. 416 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2020.

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

MEDINA, J. de; MOTTA, L. G. da. **Mecânica dos pavimentos**. Rio de Janeiro, RJ: Interciência, 3ed, 2015.

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

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

PINTO, D.E.B.; MATUTI, B.B. **Utilização da borracha no pavimento asfáltico como melhoria nas pistas de rolamento**. Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento. Ano 04, Ed. 05, Vol. 03, pp. 72-81. Maio de 2019. ISSN: 2448-0959

PINTO, S. **Estudo do comportamento à fadiga de misturas betuminosas e aplicação na avaliação estrutural de pavimentos**. Rio de Janeiro, 1991. Tese (Doutorado) - UFRJ/COPPE.

PINTO, S.; PINTO, I.E. **Pavimentação asfáltica: Conceitos Fundamentais sobre**



**Materiais e Revestimentos Asfálticos.** LTC 1ª ed. Rio de Janeiro, 2019.

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

RAO, S.; ABDULLA, H.; YU, T. **Design and Construction of Bases and Subbases for Concrete Pavement Performance,** 2021.

ROCHA, M.L. **Influência dos módulos de resiliência iniciais no procedimento de retroanálise de pavimentos flexíveis /** Marcos Lamha Rocha. -- 2020. 244 f

RODRIGUES, E.C.; CARVALHO, T.A. **Utilização do asfalto usinado a quente em comparação ao asfalto borracha.** Trabalho de Conclusão de Curso, Faculdade Presidente Antônio Carlos de Teófilo Otoni. Teófilo Otoni/ MG, Brasil, 2020.

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

SAYERS, M.W.; KARAMIHAS, M.S. **The Little Book of Profiling. The Regent of the University of Michigan,** Ann Arbor, 1998.

SCHEIBEL, **André Taveira da Silva. Pavimentação de Estradas.** Uberaba: Universidade de Uberaba, 2016. 159 p

SI, W.; LI, N.; MA, B.; TIAN, Y.; ZHOU, S. **Temperature Response to Tensile Characteristics of the Hot Asphalt Mixtures.** KSCE Journal of Civil Engineer, v.0, n.0. p. 1-11, 2015.

SILVA, J.E.G. **MÉTODO NACIONAL DE DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS - MEDINA: avaliação da duplicação da AL-145.** 2018. 79 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Alagoas - Ufal, Delmiro Gouveia, 2018.

SOUZA JUNIOR, J. G. **Aplicação do novo método de dimensionamento de pavimentos**

**asfálticos a trechos de uma rodovia federal.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2018.

SOUZA, M.C.R. **Levantamento de patologias em pavimentos asfálticos.** **Anais do V CONAPESC.** Campina Grande: Realize Editora, 2020. Disponível em: <https://editorarealize.com.br/artigo/visualizar/73120>. Acesso em: 12/12/2023.

TXDOT. **Pavement manual: Section 4: Pavement types.** **Texas Department of Transportation.** Austin, Texas, USA, 2023. Disponível em: [http://onlinemanuals.txdot.gov/TxDOTOnlineManuals/TxDOTManuals/pdm/p\\_types.htm](http://onlinemanuals.txdot.gov/TxDOTOnlineManuals/TxDOTManuals/pdm/p_types.htm). Acesso em: 12/10/2023.

VIEIRA, S.A.; PINHO Jr, A.A.E.; OLIVEIRA, F.H.L.; AGUIAR, M.F.P. (2016). **Análise comparativa de metodologias de avaliação de pavimentos através do IGG e PCI.** Revista Conexões, Ciência e Tecnologia. 10, n. 3, 20- 30pp, 2016.

## ANEXO - BACIAS DEFLECTOMÉTRICAS LEVANTADAS POR FWD

## LEVANTAMENTO DEFLECTOMÉTRICO - FWD



Rodovia: Estado: Santa Catarina

Segmento: Início:

Pista: Simples Extensão: :

POSIÇÃO Km	Faixa	BACIA DE DEFORMAÇÃO (x 0,01mm)							Temperatura		Célula de Carga (kPa)	Data	Observações
		0 Df1	20 Df2	30 Df3	45 Df4	65 Df5	90 Df6	120 Df7	Pavim.	Ar			
143 + 960	LD	25,3	18,4	11,8	6,5	2,3	1,0	0,7	18	17	579	10.07.13	
144 + 000	LE	48,2	34,1	24,0	13,3	5,7	1,8	0,7	18	17	570	10.07.13	
144 + 040	LD	61,5	42,5	28,2	15,4	7,3	3,8	1,8	18	18	570	10.07.13	
144 + 080	LE	52,3	31,2	18,7	8,9	3,3	1,3	0,6	18	18	574	10.07.13	
144 + 120	LD	34,6	24,0	15,5	8,5	4,2	2,3	1,5	17	18	581	10.07.13	
144 + 160	LE	60,8	40,0	27,7	16,0	9,3	5,6	3,6	18	18	578	10.07.13	
144 + 200	LD	65,4	46,8	33,4	20,0	10,8	5,3	3,2	19	18	565	10.07.13	
144 + 240	LE	45,6	32,9	24,8	16,3	9,6	5,0	2,4	17	18	578	10.07.13	
144 + 280	LD	62,7	41,8	28,3	16,9	10,0	6,3	4,5	17	18	575	10.07.13	
144 + 320	LE	56,4	36,3	23,7	11,7	4,7	2,0	1,3	17	18	567	10.07.13	
144 + 360	LD	73,0	48,2	34,0	20,4	10,5	5,8	4,0	18	18	568	10.07.13	
144 + 400	LE	59,0	41,8	29,1	18,1	11,4	7,5	5,0	18	18	565	10.07.13	
144 + 440	LD	54,3	36,1	25,1	15,1	8,8	5,3	3,7	19	18	573	10.07.13	
144 + 480	LE	45,4	30,1	20,5	11,3	4,9	2,3	1,2	18	18	575	10.07.13	
144 + 520	LD	58,6	39,9	26,9	14,3	6,2	3,0	2,5	17	18	572	10.07.13	
144 + 560	LE	64,0	44,0	30,7	18,5	10,6	6,7	4,4	18	18	565	10.07.13	
144 + 600	LD	47,3	31,8	22,5	12,6	5,6	2,5	1,2	16	18	577	10.07.13	
144 + 640	LE	51,9	29,7	18,0	8,3	3,9	2,6	1,9	16	18	579	10.07.13	
144 + 680	LD	40,6	29,9	21,1	12,5	6,2	3,0	1,9	16	18	584	10.07.13	
144 + 720	LE	60,5	42,1	29,5	17,0	8,5	4,7	3,1	17	18	578	10.07.13	
144 + 760	LD	59,5	34,8	20,0	8,2	5,3	3,9	2,5	17	18	576	10.07.13	
144 + 800	LE	55,3	37,2	19,8	10,5	6,2	4,3	3,3	17	18	574	10.07.13	
144 + 840	LD	54,4	40,6	23,6	14,2	9,5	6,2	3,1	18	18	576	10.07.13	
144 + 880	LE	39,3	18,3	9,1	4,9	3,2	1,8	1,3	16	18	573	10.07.13	
144 + 920	LD	53,6	39,3	26,2	12,8	6,3	3,4	1,5	16	18	552	10.07.13	
144 + 960	LE	71,5	49,9	34,7	21,4	14,0	9,0	5,5	16	18	574	10.07.13	
145 + 000	LD	67,7	47,0	33,2	20,0	10,6	5,7	3,4	17	18	561	10.07.13	
145 + 040	LE	56,0	36,3	22,9	10,5	3,8	0,9	0,6	16	18	565	10.07.13	
145 + 080	LD	41,5	27,7	17,6	8,8	3,4	1,4	0,6	17	18	567	10.07.13	
145 + 120	LE	43,1	31,5	23,0	14,4	7,6	4,0	2,2	18	18	566	10.07.13	
145 + 160	LD	50,4	33,9	22,9	12,3	5,8	2,7	1,6	18	18	567	10.07.13	
145 + 200	LE	60,0	42,4	27,7	15,0	7,5	3,9	2,4	18	18	568	10.07.13	
145 + 240	LD	66,1	46,8	33,1	19,2	10,0	5,4	3,5	18	18	576	10.07.13	
145 + 280	LE	46,9	31,0	19,7	9,7	5,6	3,8	2,7	17	18	576	10.07.13	
145 + 320	LD	48,3	25,3	13,6	7,0	4,0	2,9	1,7	16	18	567	10.07.13	
145 + 360	LE	67,6	45,1	31,8	18,6	10,3	5,5	2,5	19	18	556	10.07.13	
145 + 400	LD	53,0	37,9	26,7	17,6	11,6	8,3	6,1	20	18	554	10.07.13	
145 + 440	LE	53,4	37,9	25,7	14,1	7,4	5,5	4,3	18	18	559	10.07.13	
145 + 480	LD	65,8	44,5	30,5	18,3	10,5	6,6	4,3	18	18	557	10.07.13	
145 + 520	LE	63,8	45,0	32,5	20,5	11,8	6,8	4,0	18	19	562	10.07.13	
145 + 560	LD	70,8	47,7	32,6	19,1	10,8	6,4	3,7	18	19	565	10.07.13	
145 + 600	LE	53,8	31,3	18,9	6,8	3,5	1,9	1,2	19	19	567	10.07.13	
145 + 640	LD	44,9	32,6	24,5	15,4	8,6	4,3	2,5	19	19	580	10.07.13	
145 + 680	LE	56,8	42,2	26,5	13,6	8,9	5,0	3,0	19	19	567	10.07.13	
145 + 720	LD	46,5	33,8	23,7	14,5	8,0	4,3	2,5	19	19	576	10.07.13	
145 + 760	LE	48,5	38,0	29,8	20,8	12,8	7,1	4,0	19	19	574	10.07.13	
145 + 800	LD	47,3	30,4	20,0	11,2	6,3	4,1	2,8	19	19	575	10.07.13	
145 + 840	LE	65,4	42,7	29,8	17,5	7,8	4,3	2,4	19	19	567	10.07.13	
145 + 880	LD	61,6	41,9	27,3	14,7	6,6	3,2	2,1	19	19	578	10.07.13	
145 + 920	LE	60,8	43,8	31,4	19,2	10,8	6,5	4,3	20	19	577	10.07.13	
145 + 960	LD	56,7	39,9	28,6	17,1	9,2	5,0	3,0	19	19	580	10.07.13	

**APÊNDICE A - DADOS DAS BACIAS DEFLECTOMÉTRICAS ADICIONADOS AO  
BACKMEDINA**

Temp. Do Ar (°C)	Temp. Do Pav. (°C)	Carga (kgf)	Estaca (Núm.)	Estaca (Desloc.)	Estaca (Faixa)	Estaca (Trilha)	Deflexão (µm)						
							D <sub>0</sub>	D <sub>20</sub>	D <sub>30</sub>	D <sub>45</sub>	D <sub>65</sub>	D <sub>90</sub>	D <sub>120</sub>
17	18	4174,58	143	960	Dir	Ext	253	184	118	65	23	10	7
17	18	4109,69	144	0	Esq	Ext	482	341	240	133	57	18	7
18	18	4109,69	144	40	Dir	Ext	615	425	282	154	73	38	18
18	18	4138,53	144	80	Esq	Ext	523	312	187	89	33	13	6
18	17	4189	144	120	Dir	Ext	346	240	155	85	42	23	15
18	18	4167,37	144	160	Esq	Ext	608	400	277	160	93	56	36
18	19	4073,64	144	200	Dir	Ext	654	468	334	200	108	53	32
18	17	4167,37	144	240	Esq	Ext	456	329	248	163	96	50	24
18	17	4145,74	144	280	Dir	Ext	627	418	283	169	100	63	45
18	17	4088,06	144	320	Esq	Ext	564	363	237	117	47	20	13
18	18	4095,27	144	360	Dir	Ext	730	482	340	204	105	58	40
18	18	4073,64	144	400	Esq	Ext	590	418	291	181	114	75	50
18	19	4131,32	144	440	Dir	Ext	543	361	251	151	88	53	37
18	18	4145,74	144	480	Esq	Ext	454	301	205	113	49	23	12
18	17	4124,11	144	520	Dir	Ext	586	399	269	143	62	30	25
18	18	4073,64	144	560	Esq	Ext	640	440	307	185	106	67	44
18	16	4160,16	144	600	Dir	Ext	473	318	225	126	56	25	12
18	16	4174,58	144	640	Esq	Ext	519	297	180	83	39	26	19
18	16	4210,63	144	680	Dir	Ext	406	299	211	125	62	30	19
18	17	4167,37	144	720	Esq	Ext	605	421	295	170	85	47	31
18	17	4152,95	144	760	Dir	Ext	595	348	200	82	53	39	25
18	17	4138,53	144	800	Esq	Ext	553	372	198	105	62	43	33
18	18	4152,95	144	840	Dir	Ext	544	406	236	142	95	62	31
18	16	4131,32	144	880	Esq	Ext	393	183	91	49	32	18	13
18	16	3979,91	144	920	Dir	Ext	536	393	262	128	63	34	15
18	16	4138,53	144	960	Esq	Ext	715	499	347	214	140	90	55
18	17	4044,8	145	0	Dir	Ext	677	470	332	200	106	57	34
18	16	4073,64	145	40	Esq	Ext	560	363	229	105	38	9	6
18	17	4088,06	145	80	Dir	Ext	415	277	176	88	34	14	6
18	18	4080,85	145	120	Esq	Ext	431	315	230	144	76	40	22
18	18	4088,06	145	160	Dir	Ext	504	339	229	123	58	27	16
18	18	4095,27	145	200	Esq	Ext	600	424	277	150	75	39	24
18	18	4152,95	145	240	Dir	Ext	661	468	331	192	100	54	35
18	17	4152,95	145	280	Esq	Ext	469	310	197	97	56	38	27
18	16	4088,06	145	320	Dir	Ext	483	253	136	70	40	29	17
18	19	4008,75	145	360	Esq	Ext	676	451	318	186	103	55	25
18	20	3994,33	145	400	Dir	Ext	530	379	267	176	116	83	61
18	18	4030,38	145	440	Esq	Ext	534	379	257	141	74	55	43
18	18	4015,96	145	480	Dir	Ext	658	445	305	183	105	66	43
19	18	4052,01	145	520	Esq	Ext	638	450	325	205	118	68	40
19	18	4073,64	145	560	Dir	Ext	708	477	326	191	108	64	37
19	19	4088,06	145	600	Esq	Ext	538	313	189	68	35	19	12
19	19	4181,79	145	640	Dir	Ext	449	326	245	154	86	43	25
19	19	4088,06	145	680	Esq	Ext	568	422	265	136	89	50	30
19	19	4152,95	145	720	Dir	Ext	465	338	237	145	80	43	25
19	19	4138,53	145	760	Esq	Ext	485	380	298	208	128	71	40
19	19	4145,74	145	800	Dir	Ext	473	304	200	112	63	41	28
19	19	4088,06	145	840	Esq	Ext	654	427	298	175	78	43	24
19	19	4167,37	145	880	Dir	Ext	616	419	273	147	66	32	21
19	20	4160,16	145	920	Esq	Ext	608	438	314	192	108	65	43
19	19	4181,79	145	960	Dir	Ext	567	399	286	171	92	50	30

## APÊNDICE B – RELATÓRIO DO DIMENSIONAMENTO DE REFORÇO PELO MEDINA COM CONCRETO ASFÁLTICO “CLASSE 1”

### Programa MeDiNa v.1.1.9.0 - abr/2023

CÓPIA NÃO REGISTRADA

#### 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 Arterial Primário**  
Nível de confiabilidade: **85%**  
Período de projeto: **10** anos.

Análise realizada em **19/01/2024 às 02:46:06** no modo: **Projeto de Reforço**  
Área trincada prevista no pavimento no fim do período: **29,8%**

*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 Classe 1	14,7	Resiliente Linear MR = 5764 MPa	0,30
2	CAMADA ASFÁLTICA EXISTENTE Camada Asfáltica Superficial	5,0	Resiliente Linear MR = 4749 MPa	0,30
3	CAMADA EXISTENTE Camada Granular	15,0	Resiliente Linear MR = 646 MPa	0,40
4	CAMADA EXISTENTE Camada Granular	25,0	Resiliente Linear MR = 163 MPa	0,40
5	SUBLEITO Subleito	SL	Resiliente Linear MR = 323 MPa	0,45

#### Materiais

1 - CONCRETO ASFÁLTICO: Classe 1

Propriedades

Modelos

Propriedades	Modelos
Tipo de CAP = ... Massa específica (g/cm <sup>3</sup> ) = 2,4 Norma ou Especificação = DNIT ES 31 Comentários = Este material deve ser obtido em laboratório antes da obra e os resultados requerem uma nova análise no MeDiNa.	Ensaio de Fadiga -Modelo: <b><math>k1 \cdot (et \wedge k2)</math></b> -Coeficiente de Regressão (k1): <b>≥ 5,496e-11</b> -Coeficiente de Regressão (k2): <b>≥ -3,253</b> -Classe de Fadiga: <b>≥ 1</b> -FFM (100μ a 250μ): <b>≥ 0,84</b> Flow Number Mínimo - Condição de Tráfego Normal: <b>≥ 277</b> ciclos - Condição de Tráfego Severa: <b>≥ 750</b> ciclos

## 2 - CAMADA ASFÁLTICA EXISTENTE: Camada Asfáltica Superficial

Propriedades	Modelos
Espessura de fresagem (cm) = 0,0 Espessura de campo (cm) = 5,0 Área Trincada (%) = 13 IRI (m/km) = 3 Deflexão característica (0,01mm) = 65 Idade do pavimento (anos) = 45 Módulo mínimo (MPa) = 1232 Módulo máximo (MPa) = 13292 MR - Desvio Padrão (MPa) = 2228 Coef de Variação do Módulo (%) = 46,9 Comentários = ...	

## 3 - CAMADA EXISTENTE: Camada Granular

Propriedades	Modelos
Módulo mínimo (MPa) = 296 Módulo máximo (MPa) = 1525 MR - Desvio Padrão (MPa) = 284 Coef de Variação do Módulo (%) = 43,9 Comentários = ...	

## 4 - CAMADA EXISTENTE: Camada Granular

Propriedades	Modelos
Módulo mínimo (MPa) = 53 Módulo máximo (MPa) = 574 MR - Desvio Padrão (MPa) = 100 Coef de Variação do Módulo (%) = 61,5 Comentários = ...	

## 5 - SUBLEITO: Subleito

Propriedades	Modelos

**Propriedades****Modelos**

Módulo mínimo (MPa) = 138  
 Módulo máximo (MPa) = 1046  
 MR - Desvio Padrão (MPa) = 180  
 Coef de Variação do Módulo (%) = 55,7  
 Comentários = ...

**Definição do tráfego**

Volume Médio Diário no ano de abertura do tráfego: VMD (1º ano) = **2610**

Fator de veículo no ano de abertura do tráfego: FV = **1,00**

Número de passagens anual do eixo padrão (1º ano): **9,53e+05**

% Veículos na faixa de projeto: **100%**

Número de passagens anual do eixo padrão na faixa de projeto: **9,53e+05**

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

Número Equivalente total de passagens do eixo padrão na faixa de projeto: N Eq = **9,53e+06**

Eixo	Tipo	FE	Carga (ton)	FC	FVi
1	Eixo simples de roda dupla	100%	8,20	1,000	1,000

**Evolução dos danos no pavimento**

Mês	N Equiv	Área Trincada
1	7,939e+04	1,25%
6	4,763e+05	2,51%
12	9,527e+05	3,52%
18	1,429e+06	4,43%
24	1,905e+06	5,34%
30	2,382e+06	6,28%
36	2,858e+06	7,28%
42	3,334e+06	8,33%
48	3,811e+06	9,46%
54	4,287e+06	10,67%
60	4,763e+06	11,96%
66	5,240e+06	13,34%
72	5,716e+06	14,81%
78	6,192e+06	16,37%
84	6,669e+06	18,02%
90	7,145e+06	19,77%
96	7,621e+06	21,61%
102	8,098e+06	23,54%
108	8,574e+06	25,56%
114	9,050e+06	27,66%
120	9,527e+06	29,83%

## 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 - Classe 1

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	17	13	10	6	4	3	3
FWD Raio = 15,0 cm Carga = 4,0 ton	24	19	16	12	8	4	3	2	2



## APÊNDICE C – RELATÓRIO DO DIMENSIONAMENTO DE REFORÇO PELO MEDINA COM CONCRETO ASFÁLTICO COM ASFALTO BORRACHA “CAPFLEX B PG 64-22”

### Programa MeDiNa v.1.1.9.0 - abr/2023

CÓPIA NÃO REGISTRADA

#### 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 Arterial Primário**  
Nível de confiabilidade: **85%**  
Período de projeto: **10** anos.

Análise realizada em **19/01/2024 às 02:59:05** no modo: **Projeto de Reforço**  
Área trincada prevista no pavimento no fim do período: **28,8%**

*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 BORRACHA CAPFLEX B PG 64-22	12,5	Resiliente Linear MR = 4980 MPa	0,30
2	CAMADA ASFÁLTICA EXISTENTE Camada Asfáltica Superficial	5,0	Resiliente Linear MR = 4749 MPa	0,30
3	CAMADA EXISTENTE Camada Granular	15,0	Resiliente Linear MR = 646 MPa	0,40
4	CAMADA EXISTENTE Camada Granular	25,0	Resiliente Linear MR = 163 MPa	0,40
5	SUBLEITO Subleito	SL	Resiliente Linear MR = 323 MPa	0,45

#### Materiais

1 - CONCRETO ASFÁLTICO BORRACHA: CAPFLEX B PG 64-22

Propriedades

Modelos

Propriedades	Modelos
Tipo de CAP = CAPFLEX B PG 64-22 Aditivo Modificador = Borracha Massa específica (g/cm <sup>3</sup> ) = 2,4 Resistência à tração CD (MPa) = 1,0 Faixa Granulométrica = Faixa B DNIT Norma ou Especificação = -	Ensaio de Fadiga -Modelo: <b>k1 .(et ^ k2)</b> -Coeficiente de Regressão (k1): <b>≥ 4,0e-12</b> -Coeficiente de Regressão (k2): <b>≥ -3,654</b> -Classe de Fadiga: <b>≥ 2</b> -FFM (100μ a 250μ): <b>≥ 0,99</b> Flow Number Mínimo - Condição de Tráfego Normal: <b>≥ 277</b> ciclos - Condição de Tráfego Severa: <b>≥ 750</b> ciclos

## 2 - CAMADA ASFÁLTICA EXISTENTE: Camada Asfáltica Superficial

Propriedades	Modelos
Espessura de fresagem (cm) = 0,0 Espessura de campo (cm) = 5,0 Área Trincada (%) = 13 IRI (m/km) = 3 Deflexão característica (0,01mm) = 65 Idade do pavimento (anos) = 45 Módulo mínimo (MPa) = 1232 Módulo máximo (MPa) = 13292 MR - Desvio Padrão (MPa) = 2228 Coef de Variação do Módulo (%) = 46,9 Comentários = ...	

## 3 - CAMADA EXISTENTE: Camada Granular

Propriedades	Modelos
Módulo mínimo (MPa) = 296 Módulo máximo (MPa) = 1525 MR - Desvio Padrão (MPa) = 284 Coef de Variação do Módulo (%) = 43,9 Comentários = ...	

## 4 - CAMADA EXISTENTE: Camada Granular

Propriedades	Modelos
Módulo mínimo (MPa) = 53 Módulo máximo (MPa) = 574 MR - Desvio Padrão (MPa) = 100 Coef de Variação do Módulo (%) = 61,5 Comentários = ...	

## 5 - SUBLEITO: Subleito

Propriedades	Modelos

**Propriedades****Modelos**

Módulo mínimo (MPa) = 138  
 Módulo máximo (MPa) = 1046  
 MR - Desvio Padrão (MPa) = 180  
 Coef de Variação do Módulo (%) = 55,7  
 Comentários = ...

**Definição do tráfego**

Volume Médio Diário no ano de abertura do tráfego: VMD (1º ano) = **2610**  
 Fator de veículo no ano de abertura do tráfego: FV = **1,00**  
 Número de passagens anual do eixo padrão (1º ano): **9,53e+05**  
 % Veículos na faixa de projeto: **100%**  
 Número de passagens anual do eixo padrão na faixa de projeto: **9,53e+05**  
 Taxa de crescimento do tráfego: **0,0%**  
 Número Equivalente total de passagens do eixo padrão na faixa de projeto: N Eq = **9,53e+06**

Eixo	Tipo	FE	Carga (ton)	FC	FVi
1	Eixo simples de roda dupla	100%	8,20	1,000	1,000

**Evolução dos danos no pavimento**

Mês	N Equiv	Área Trincada
1	7,939e+04	1,24%
6	4,763e+05	2,49%
12	9,527e+05	3,47%
18	1,429e+06	4,37%
24	1,905e+06	5,26%
30	2,382e+06	6,17%
36	2,858e+06	7,14%
42	3,334e+06	8,16%
48	3,811e+06	9,25%
54	4,287e+06	10,42%
60	4,763e+06	11,66%
66	5,240e+06	12,99%
72	5,716e+06	14,40%
78	6,192e+06	15,90%
84	6,669e+06	17,49%
90	7,145e+06	19,17%
96	7,621e+06	20,94%
102	8,098e+06	22,79%
108	8,574e+06	24,73%
114	9,050e+06	26,74%
120	9,527e+06	28,84%

## 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 BO15,0ACHA - CAPFLEX B PG 64-22

<b>Equipamento</b>	<b>Sensor 1 0 cm</b>	<b>Sensor 2 20 cm</b>	<b>Sensor 3 30 cm</b>	<b>Sensor 4 45 cm</b>	<b>Sensor 5 60 cm</b>	<b>Sensor 6 90 cm</b>	<b>Sensor 7 120 cm</b>	<b>Sensor 8 150 cm</b>	<b>Sensor 9 180 cm</b>
Viga Benkelman Raio = 10,8 cm Carga = 8,2 ton	26	22	18	13	9	6	4	3	3
FWD Raio = 15,0 cm Carga = 4,0 ton	29	22	17	12	8	4	3	2	2

## APÊNDICE D – RELATÓRIO DO DESEMPENHO DA ESTRUTURA RESULTANTE DO DNER-PRO 11.

### Programa MeDiNa v.1.1.9.0 - abr/2023

CÓPIA NÃO REGISTRADA

#### Análise do reforço do pavimento

Empresa:  
Nome do Projeto:  
Responsável pelo projeto:

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

Tipo de via: **Sistema Arterial Primário**  
Nível de confiabilidade: **85%**  
Período de projeto: **10** anos.

Análise realizada em **26/01/2024 às 01:04:45** no modo: **Projeto de Reforço**  
Área trincada prevista no pavimento no fim do período: **68,7%**.

#### ALERTAS

- *Esta análise não constitui o dimensionamento do reforço do pavimento!*
- *Tráfego elevado para a estrutura proposta.*

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

*Dados da estrutura existente para auxiliar o projetista:*

- *Área Trincada: 13,0%*
- *Condição de tráfego: REGULAR (IRI = 3,0 m/km)*
- *Deflexão característica: dc = 65,0 (0,01mm)*

*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 Classe 1	5,0	Resiliente Linear MR = 5764 MPa	0,30
2	CAMADA ASFÁLTICA EXISTENTE Camada Asfáltica Superficial	5,0	Resiliente Linear MR = 4749 MPa	0,30
3	CAMADA EXISTENTE Camada Granular	15,0	Resiliente Linear MR = 646 MPa	0,40
4	CAMADA EXISTENTE Camada Granular	25,0	Resiliente Linear MR = 163 MPa	0,40

Cam	Material	Espessura (cm)	Módulo de Resiliência	Coef de Poisson
5	SUBLEITO Subleito	SL	Resiliente Linear MR = 323 MPa	0,45

## Materiais

### 1 - CONCRETO ASFÁLTICO: Classe 1

#### Propriedades

Tipo de CAP = ...  
 Massa específica (g/cm<sup>3</sup>) = 2,4  
 Norma ou Especificação = DNIT ES 31  
 Comentários = Este material deve ser obtido em laboratório antes da obra e os resultados requerem uma nova análise no MeDiNa.

#### Modelos

Ensaio de Fadiga  
 - Modelo:  $k1 \cdot (et \wedge k2)$   
 - Coeficiente de Regressão (k1):  $\geq 5,496e-11$   
 - Coeficiente de Regressão (k2):  $\geq -3,253$   
 - Classe de Fadiga:  $\geq 1$   
 - FFM (100 $\mu$  a 250 $\mu$ ):  $\geq 0,84$   
 Flow Number Mínimo  
 - Condição de Tráfego Normal:  $\geq 277$  ciclos  
 - Condição de Tráfego Severa:  $\geq 750$  ciclos

### 2 - CAMADA ASFÁLTICA EXISTENTE: Camada Asfáltica Superficial

#### Propriedades

Espessura de fresagem (cm) = 0,0  
 Espessura de campo (cm) = 5,0  
 Área Trincada (%) = 13  
 IRI (m/km) = 3  
 Deflexão característica (0,01mm) = 65  
 Idade do pavimento (anos) = 45  
 Módulo mínimo (MPa) = 1232  
 Módulo máximo (MPa) = 13292  
 MR - Desvio Padrão (MPa) = 2228  
 Coef de Variação do Módulo (%) = 46,9  
 Comentários = ...

#### Modelos

### 3 - CAMADA EXISTENTE: Camada Granular

#### Propriedades

Módulo mínimo (MPa) = 296  
 Módulo máximo (MPa) = 1525  
 MR - Desvio Padrão (MPa) = 284  
 Coef de Variação do Módulo (%) = 43,9  
 Comentários = ...

#### Modelos

### 4 - CAMADA EXISTENTE: Camada Granular

#### Propriedades

#### Modelos

**Propriedades****Modelos**

Módulo mínimo (MPa) = 53  
 Módulo máximo (MPa) = 574  
 MR - Desvio Padrão (MPa) = 100  
 Coef de Variação do Módulo (%) = 61,5  
 Comentários = ...

**5 - SUBLEITO: Subleito****Propriedades****Modelos**

Módulo mínimo (MPa) = 138  
 Módulo máximo (MPa) = 1046  
 MR - Desvio Padrão (MPa) = 180  
 Coef de Variação do Módulo (%) = 55,7  
 Comentários = ...

**Definição do tráfego**

Volume Médio Diário no ano de abertura do tráfego: VMD (1º ano) = **2610**  
 Fator de veículo no ano de abertura do tráfego: FV = **1,00**  
 Número de passagens anual do eixo padrão (1º ano): **9,53e+05**  
 % Veículos na faixa de projeto: **100%**  
 Número de passagens anual do eixo padrão na faixa de projeto: **9,53e+05**  
 Taxa de crescimento do tráfego: **0,0%**  
 Número Equivalente total de passagens do eixo padrão na faixa de projeto: N Eq = **9,53e+06**

Eixo	Tipo	FE	Carga (ton)	FC	FVi
1	Eixo simples de roda dupla	100%	8,20	1,000	1,000

**Evolução dos danos no pavimento**

Mês	N Equiv	Área Trincada
1	7,939e+04	1,54%
6	4,763e+05	3,31%
12	9,527e+05	4,94%
18	1,429e+06	6,63%
24	1,905e+06	8,48%
30	2,382e+06	10,57%
36	2,858e+06	12,92%
42	3,334e+06	15,56%
48	3,811e+06	18,49%
54	4,287e+06	21,72%
60	4,763e+06	25,23%
66	5,240e+06	29,00%
72	5,716e+06	33,02%

Mês	N Equiv	Área Trincada
78	6,192e+06	37,23%
84	6,669e+06	41,61%
90	7,145e+06	46,11%
96	7,621e+06	50,67%
102	8,098e+06	55,26%
108	8,574e+06	59,82%
114	9,050e+06	64,32%
120	9,527e+06	68,71%

## 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 - Classe 1

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	26	19	12	8	5	4	3	3
FWD Raio = 15,0 cm Carga = 4,0 ton	44	29	20	11	7	3	3	2	2