



**CENTRO UNIVERSITÁRIO CHRISTUS
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

ARTHUR ARAUJO PORTO

**MÉTODO DE DIMENSIONAMENTO DNIT x MÉTODO MECANÍSTICO-EMPÍRICO:
COMPARAÇÃO DIRETA DA SIMULAÇÃO DO DESEMPENHO MECÂNICO DE
UM TRECHO DE RODOVIA**

FORTALEZA

2021

ARTHUR ARAUJO PORTO

MÉTODO DE DIMENSIONAMENTO DNIT x MÉTODO MECANÍSTICO-EMPÍRICO:
COMPARAÇÃO DIRETA DA SIMULAÇÃO DO DESEMPENHO MECÂNICO DE UM
TRECHO DE RODOVIA

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC)
apresentado ao curso de Engenharia Civil
do Centro Universitário Christus, como
requisito parcial para obtenção do título de
bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. MSc. Fernando Dácio de
Almeida.

FORTALEZA

2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Centro Universitário Christus - Unichristus
Gerada automaticamente pelo Sistema de Elaboração de Ficha Catalográfica do
Centro Universitário Christus - Unichristus, com dados fornecidos pelo(a) autor(a)

P839m Porto, Arthur Araújo.

Método de dimensionamento DNIT x método mecanístico-empírico : comparação direta da simulação do desempenho mecânico de um trecho de rodovia / Arthur Araújo Porto. - 2021.
93 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Centro Universitário Christus - Unichristus, Curso de Engenharia Civil, Fortaleza, 2021.

Orientação: Prof. Me. Fernando Dácio de Almeida.

1. Pavimentos flexíveis. 2. MeDiNa. 3. Retroanálise. 4. Dimensionamento. I. Título.

CDD 624

ARTHUR ARAUJO PORTO

MÉTODO DE DIMENSIONAMENTO DNIT x MÉTODO MECANÍSTICO-EMPÍRICO:
COMPARAÇÃO DIRETA DA SIMULAÇÃO DO DESEMPENHO MECÂNICO DE UM
TRECHO DE RODOVIA

TCC apresentado ao curso de Engenharia Civil do Centro Universitário Christus, como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. MSc. Fernando Dácio de Almeida.

Aprovado em 03 / 07 / 2021

BANCA EXAMINADORA

Prof. MSc. Fernando Dácio de Almeida
Centro Universitário Christus (UNICHRISTUS)

Prof^a. MSc. Alessandra Honório Oliveira
Centro Universitário Christus (UNICHRISTUS)

Prof. MSc. Lucas Cavalcante de Almeida
Centro Universitário Christus (UNICHRISTUS)

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus e à Virgem Maria por terem me guiado até aqui e por serem os mais importantes pilares de toda a minha vida.

Agradeço aos meus pais, Cida e Daniel, por sempre serem meus exemplos de força, coragem, determinação, fé e amor. Vocês foram de uma importância incomensurável para que eu vencesse mais essa etapa em minha vida. Muito obrigado, de todo o coração.

Agradeço ao meu irmão, Bernardo, por sempre estar ao meu lado em todas as fases da minha vida. Sem você, meu irmão, a vida não seria completa.

Agradeço à minha namorada, Raissa, por sempre me motivar a ser melhor em todos os sentidos e por viver intensamente essa fase final de graduação junto a mim, sendo uma pessoa forte, leve e corajosa nesses mais de cinco anos em que estamos juntos.

Agradeço aos meus avós, tias, tios, primas e primos por serem pacientes e compreensíveis comigo nesse período tão importante em minha vida. Vocês são essenciais para a completude do meu ser.

Agradeço aos inúmeros amigos, colegas e professores que tive o prazer de conhecer e conviver nesses anos de graduação, pois todos me ensinaram importantes lições que levarei comigo por toda a vida.

Por fim, agradeço ao meu orientador, Fernando Dácio, por ter aceitado me acompanhar no que foi, até agora, o maior desafio acadêmico e profissional que enfrentei na vida. Obrigado por toda a paciência, dedicação e atenção demandada a realização deste trabalho, sendo a pessoa indispensável para me fazer chegar até o final dessa etapa. Obrigado por todos os ensinamentos, conselhos, ajudas e, claro, pela sua amizade.

RESUMO

O presente estudo trata da análise e comparação de dois métodos de dimensionamento de pavimentos flexíveis: o método empírico e o método mecanístico-empírico, com o objetivo de analisar, por meio de simulação computacional, a estrutura do pavimento de uma rodovia, comparando os métodos. O objeto de estudo foi a rodovia BR-304, localizada no estado do Rio Grande do Norte, onde dados de tráfego e materiais da estrutura do pavimento foram utilizados para realizar os dimensionamentos com dados de CBR e com o *software* MeDiNa. Além disso, foram analisados os dados de um ensaio estrutural não-destrutivo, por meio da utilização do equipamento FWD, para realizar o procedimento de retroanálise do pavimento, utilizando o *software* BackCAP para a obtenção do módulo de resiliência (MR) das camadas do pavimento da BR-304. Nos resultados, obteve-se que a estrutura era incompatível com o tráfego calculado. Na retroanálise, conseguiu-se obter valores de MR que foram utilizados em um novo dimensionamento com o MeDiNa, apresentando resultado compatível com o que foi observado anteriormente no dimensionamento com o *software* mecanístico-empírico. Analisando os resultados, concluiu-se que o método empírico, pelo CBR, não consegue estimar, de forma correta, a estrutura ideal para atender ao tempo de projeto e ao tráfego, gerando a ocorrência de pavimentos sub ou superdimensionados. Outrossim, viu-se que o MeDiNa é mais confiável frente ao método usual, pois utiliza de teorias e cálculos matemáticos que conseguem prever o comportamento do pavimento, disponibilizando relatórios detalhados que permitem a execução de um planejamento para possíveis intervenções de reforço na estrutura do pavimento. A respeito da retroanálise, os resultados obtidos mostram que, por meio da sua forma de obtenção não-destrutiva, indireta e otimizada, a retroanálise funciona bem, apresentando, de forma rápida e satisfatória, a situação atual do pavimento.

Palavras-chave: Pavimentos flexíveis. MeDiNa. Retroanálise. Dimensionamento.

ABSTRACT

The present study deals with the analysis and comparison of two design methods for flexible sidewalks: the empirical method and the mechanistic-empirical method, with the objective of analyzing, through computer simulation, the sidewalk structure of a highway, comparing the methods. The object of study was the BR-304 highway, located in the state of Rio Grande do Norte, where traffic and material data of the sidewalk structure were used to perform the design with the CBR data and the MeDiNa software. In addition, data from a non-destructive structural test, using FWD equipment, were analyzed to perform the sidewalk backanalysis procedure, using the BackCAP software to obtain the modulus of resilience (MR) of the sidewalk layers of BR-304. In the results, it was obtained that the structure was incompatible with the calculated traffic. In the backcalculation, it was possible to obtain MR values that were used in a new design with MeDiNa, presenting a result compatible with what was previously observed in the design with the mechanistic-empirical software. Analyzing the results, it was concluded that the empirical method, by the CBR, can not correctly estimate the ideal structure to meet the design time and traffic, generating the occurrence of under or over dimensioned sidewalks. On the other hand, it was seen that MeDiNa is more reliable than the usual method, because it uses theories and mathematical calculations that can predict the behavior of the sidewalk, providing detailed reports that allow the execution of a planning for possible interventions for strengthening the sidewalk structure. Regarding the backanalysis, the results obtained show that, through its non-destructive, indirect and optimized form of obtaining, the backanalysis works well, presenting, in a fast and satisfactory way, the sidewalk's current situation.

Keywords: Flexible pavements. MeDiNa. Retro analysis. Design.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Estrutura de um pavimento rígido.....	18
Figura 2 – Estrutura de um pavimento flexível.....	19
Figura 3 – Corte transversal do pavimento.....	20
Figura 4 – Camadas do pavimento flexível.....	20
Figura 5 – Representação fotográfica de uma trinca transversal.....	24
Figura 6 – Representação fotográfica de uma trinca longitudinal.....	24
Figura 7 - Representação fotográfica de uma trinca interligada tipo bloco.....	25
Figura 8 - Representação fotográfica de uma trinca interligada tipo couro de jacaré.....	26
Figura 9 – Afundamento de trilha de roda (1).....	27
Figura 10 – Afundamento de trilha de roda (2).....	27
Figura 11 – Afundamento de consolidação local (1).....	28
Figura 12 – Afundamento de consolidação local (2).....	28
Figura 13 – Corrugação no eixo da pista.....	29
Figura 14 – Desgaste do revestimento asfáltico do pavimento.....	29
Figura 15 – Defeito panela acometendo o revestimento de um pavimento.....	30
Figura 16 – Variação da serventia com o tráfego ou com o tempo de utilização da via.....	33
Figura 17 – Diversas faixas de variação do IRI.....	34
Figura 18 – Esquema de viga Benkelman.....	37
Figura 19 – Viga Benkelman atrelada a um caminhão.....	37
Figura 20 – Ensaio com a viga Benkelman.....	39
Figura 21 – Deflectômetro de impacto (FWD).....	40
Figura 22 – Barra de sensores e prato de aplicação de carga do FWD.....	40
Figura 23 – Corte transversal do FWD.....	41
Figura 24 – Bacia de deformação FWD.....	43
Figura 25 – Amplitude dos deslocamentos lidos nos sensores do FWD.....	43
Figura 26 – Elementos para entendimento do conceito de retroanálise.....	44
Figura 27 – Representação do esquema da carga repetida com frequência de 1Hz...48	
Figura 28 – Equipamento utilizado no ensaio triaxial de cargas repetidas.....	51
Figura 29 – Ábaco para determinação de espessuras do pavimento.....	55
Figura 30 – Camadas do pavimento e suas correlações.....	56

Figura 31 – Interface principal do software MeDiNa.....	59
Figura 32 – Local para seleção do tipo de projeto no software MeDiNa.....	60
Figura 33 – Interface do programa BackMeDiNa.....	61
Figura 34 – Eixo padrão rodoviário de 8,2tf.....	62
Figura 35 – Espaço apropriado para informar o número N no software MeDiNa.....	62
Figura 36 - Representação do trecho da BR-304 entre Beberibe/CE e Natal/RN.....	65
Figura 37 – Características do trecho em estudo.....	65
Figura 38 – Representação dos cinco quilômetros da rodovia utilizados no estudo.....	66
Figura 39 – Classificação e nomenclatura de acordo com o tipo do veículo.....	70
Figura 40 – Cálculo do Fator de Veículo no MeDiNa.....	72
Figura 41 – Valor do Número N.....	72
Figura 42 – Interface do BACKCAP.....	74
Figura 43 – Configuração das camadas no MeDiNa.....	78
Figura 44 – Resultado do dimensionamento no MeDiNa (1).....	79
Figura 45 – Resultado do dimensionamento no MeDiNa (2).....	79
Figura 46 - Resultado do dimensionamento no MeDiNa (3).....	80
Figura 47 – Alerta relativo ao redimensionamento da camada de revestimento.....	81
Figura 48 - Alerta relativo ao redimensionamento da camada de revestimento.....	81
Figura 49 – Estrutura de pavimento com subleito de CBR 6% e 10%.....	82
Figura 50 – Resultado da estrutura com subleito de CBR 6% e 10% (1).....	82
Figura 51 – Resultado da estrutura com subleito de CBR 6% e 10% (2).....	83
Figura 52 – Resultado da estrutura com subleito de CBR 6% e 10% (3).....	83
Figura 53 – Resultado da estrutura com subleito de CBR 6% e 10% (4).....	83
Figura 54 – Formatação dos dados para entrada no BACKCAP.....	84
Figura 55 – Estrutura do pavimento no BACKCAP.....	85
Figura 56 – Resultado da deflexão das camadas no BACKCAP.....	85
Figura 57 – Resultado do MR das camadas no BACKCAP.....	86
Figura 58 – Informações colocadas no <i>software</i> MeDiNa.....	87
Figura 59 – Resultado obtido no MeDiNa com o MR da retroanálise.....	87

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Níveis de serventia.....	32
Quadro 2 – Localização dos pontos para obtenção das deflexões do pavimento.....	38
Quadro 3 – Sequência de tensões para fase de condicionamento.....	50
Quadro 4 – Materiais das camadas do pavimento e suas características.....	53
Quadro 5 – Espessura da camada de revestimento do pavimento.....	54
Quadro 6 – Estrutura do pavimento utilizada no estudo.....	73
Quadro 7 – Resumo do valor das espessuras das camadas do pavimento pelo CBR.....	76
Quadro 8 – Caracterização das camadas.....	78
Quadro 9 – MR adotado para cada camada do pavimento.....	86
Quadro 10 – Materiais utilizados para retroanálise no MeDiNa.....	86

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Classificação do estado geral das rodovias.....	21
Gráfico 2 – Classificação do pavimento.....	22
Gráfico 3 – Percentuais de veículos passantes na BR-304.....	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação do estado geral das rodovias.....	21
Tabela 2 – Classificação do pavimento.....	22
Tabela 3 – Faixas granulométricas para materiais de base.....	53
Tabela 4 – Coeficiente de equivalência estrutural.....	56
Tabela 5 – Critérios de parada e nível de confiabilidade dos tipos de vias.....	62
Tabela 6 – Volume diário da Br-304, no km 191.....	67
Tabela 7 – Volume diário adaptado.....	70

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Problemática	16
1.2	Justificativa	16
1.3	Objetivos de pesquisa	17
1.3.1	Objetivo geral	17
1.3.2	Objetivos específicos	18
2	REFERENCIAL TEÓRICO	19
2.1	Definição e classificação do pavimento	19
2.1.1	Pavimentos rígidos	19
2.1.2	Pavimentos semirrígidos	19
2.1.3	Pavimentos flexíveis	20
2.1.4	Revestimento asfáltico	20
2.1.5	Base	20
2.1.6	Sub-base	21
2.1.7	Reforço do subleito	21
2.2	Situação atual da pavimentação no Brasil	22
2.3	Defeitos em pavimentos flexíveis	24
2.3.1	Fendas	24
2.3.1.1	Fissuras	24
2.3.1.2	Trincas	24
2.3.1.2.1	Trinca Transversal	25
2.3.1.2.2	Trinca Longitudinal	25
2.3.1.2.3	Trinca de Retração	26
2.3.1.2.4	Trinca tipo “Bloco”	26
2.3.1.2.5	Trinca tipo “Couro de Jacaré”	26
2.3.2	Afundamentos	27
2.3.2.1	Afundamento plástico	27
2.3.2.2	Afundamento de consolidação	28
2.3.3	Corrugações ou ondulações	29
2.3.4	Desgastes	30
2.3.5	Panela (Buraco)	30
2.4	Avaliação dos pavimentos flexíveis	31

2.4.1	<i>Avaliação Funcional</i>	32
2.4.1.1	VSA	32
2.4.1.2	IRI.....	34
2.4.2	<i>Avaliação Estrutural</i>	35
2.4.2.1	Método destrutivo	36
2.4.2.2	Método semidestruativo	36
2.4.2.3	Método não-destrutivo.....	36
2.5	Equipamentos usados na avaliação do pavimento	36
2.5.1	<i>Deflectômetro quase-estático</i>	37
2.5.1.1	Viga Benkelman	37
2.5.2	<i>Deflectômetro por impacto</i>	40
2.5.2.1	Falling Weight Deflectometer (FWD)	40
2.6	Noções de retroanálise	44
2.7	Módulo de Resiliência (MR)	47
2.7.1	<i>Fatores que afetam o comportamento resiliente de solos</i>	50
2.7.2	<i>Ensaio triaxial de carga repetida</i>	50
2.8	Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis	53
2.8.1	<i>Método de Dimensionamento DNIT</i>	53
2.8.2	<i>Método Mecânico-Empírico</i>	58
2.8.2.1	Método de Dimensionamento Nacional de Pavimentos – MeDiNa.....	59
3	METODOLOGIA	65
3.1	Descrição das etapas	67
3.1.1	<i>Revisão bibliográfica</i>	67
3.1.2	<i>Dados do ensaio</i>	67
3.1.3	<i>Dados de tráfego</i>	68
3.1.4	<i>Parâmetros das camadas do pavimento</i>	73
3.1.5	<i>Parâmetros para retroanálise</i>	73
3.1.6	<i>Proposições para obtenção dos resultados</i>	74
4	RESULTADOS	75
4.1	Dimensionamento do pavimento com CBR	75
4.2	Dimensionamento do pavimento com MeDiNa	77
4.3	Resultados da Retroanálise	84
5	CONCLUSÃO	88
	REFERÊNCIAS	91

1 INTRODUÇÃO

De acordo com o dicionário Michaelis, estrada é um caminho que liga duas ou mais localidades por meio de uma via destinada ao trânsito de homens, animais e veículos. Essa via, pavimentada ou não, possibilita o desenvolvimento econômico, urbano e comercial de uma determinada localidade onde esteja inserida.

Existem relatos de que uma das mais arcaicas vias pavimentadas foi usada para a construção das pirâmides do Egito no período datado entre 2.600 a 2.400 a.C., usando lajes de tamanho avantajado, aplicadas a uma base com boa capacidade de suporte de cargas (BERNUCCI *et al.*, 2010).

Além dos egípcios, os romanos também usavam vias pavimentadas para diversos fins, dentre eles, o militar, deslocando tropas para localidades estratégicas, estabelecendo um sistema de ataque e defesa consistente com capacidade para grandes embates.

Ainda nesse contexto, no período da segunda guerra mundial, especificamente no ano de 1942, houve contato do engenheiro Murillo Lopes de Souza com profissionais do Corpo de Engenheiros do Exército Americano (USACE) e com os procedimentos realizados na pista experimental da *Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO), fornecendo base teórica para a implantação do método empírico em solo brasileiro (BERNUCCI *et al.*, 2010).

O método empírico ainda é o que é usado atualmente no dimensionamento de pavimentos asfálticos flexíveis no Brasil. Diz-se empírico, justamente pelo fato de se tratar de uma metodologia baseada nas observações realizadas na pavimentação de vias de acesso e de pistas de pouso e decolagem de aeronaves americanas durante o período de rivalidade mundial, também com a análise desempenhada pela AASHTO em suas pistas de experimentos.

Outrossim, o método empírico, como qualquer outro recurso decorrente de prática experimental, precisa de melhorias para manter-se atualizado junto às tecnologias que vão surgindo com a evolução da engenharia. Por conta disso, está sendo desenvolvido e testado, em rodovias brasileiras, o novo Método Mecanístico-empírico de Dimensionamento Nacional de Pavimentos Asfálticos (MeDiNa).

Por fim, serão feitas simulações, comparando os dois métodos, de uma estrutura de pavimento rodoviário, com o objetivo de mostrar as lacunas existentes no

antigo método, que utiliza o CBR e as perspectivas que se tem quanto ao uso do novo método mecanístico e para o conhecimento de suas vantagens.

1.1 Problemática

Tendo em vista a infraestrutura rodoviária deficitária do Brasil frente a evolução da pavimentação a nível global, onde parte disso se deve a pavimentos mal dimensionados por conta de um método que tende a superdimensionar ou subdimensionar a estrutura pelos parâmetros que considera. Entende-se que o novo método de dimensionamento nacional de pavimentos flexíveis pode melhorar a qualidade do pavimento da malha rodoviária brasileira. Visto que a renovação do método traz uma nova abordagem do uso de métodos e de materiais no dimensionamento.

1.2 Justificativa

O desenvolvimento de um país está diretamente ligado à infraestrutura de transporte, que tem a capacidade de conectar pessoas, lugares, transportar cargas e ofertar serviços, impulsionando diversos setores, dentre eles, o da economia.

Um sistema de transporte eficiente e de qualidade, promove o progresso do setor produtivo e traz, como consequência, incontáveis benefícios para toda a sociedade. No Brasil, o modal rodoviário é, dentre os existentes, o que possui a maior participação na matriz de transporte, apresentando números aproximados de 61% da movimentação de mercadorias e 95% da movimentação de passageiros (CNT, 2019). Esses dados colocam em evidência a importância da infraestrutura rodoviária para o desenvolvimento do País e para a garantia do cumprimento do inciso XV do artigo 5 da Constituição Federal de 1988, que diz que qualquer pessoa, em tempos de paz, tem o direito à livre locomoção no território nacional.

Ocorre, porém, que as estradas brasileiras não estão, em sua maioria, em bom ou ótimo estado de conservação. De acordo com a pesquisa realizada no ano de 2019 pela Confederação Nacional do Transporte (CNT), ao longo dos 108.863 quilômetros avaliados, a qualidade das rodovias brasileiras teve piora quando comparada ao ano de 2018. Ainda de acordo com a pesquisa, no ano de 2019, o percentual do estado geral de rodovias brasileiras problemáticas atingiu a marca de 59%, frente aos 57% obtidos em 2018, sendo a condição péssima, ruim e regular responsáveis por, respectivamente, 6,9%, 17,5% e 34,6% do total apresentado. Trazendo esses

números para a região nordeste do Brasil – estritamente para o estado do Ceará -, com 3.608 quilômetros de via pesquisados, pode-se notar um aumento nesses índices (péssimo, ruim e regular atingindo 5,3%, 23,5% e 42,9%, nessa ordem), explicitando a má qualidade das vias pavimentadas cearenses.

Esses números reforçam a ideia de que toda a sociedade paga o preço da ineficiência da infraestrutura de transporte nacional. Pois, se as rodovias têm problemas, o consumo de combustível aumenta bastante, além do maior desgaste dos pneus, acarretando na troca precoce dos mesmos, onerando os custos com veículos e impactando, negativamente, o custo operacional do transporte no Brasil. CNT (2019) informa que o país gasta, em média, 28,5% a mais do que deveria para transportar seus insumos, bens de produção e bens de consumo por rodovias, apenas em razão de problemas no pavimento, sendo esse aumento refletido no preço do produto final repassado ao consumidor.

Dito isso, a iniciativa de desenvolver esse trabalho justifica-se pela tentativa de buscar soluções para a atenuação das patologias que castigam o pavimento rodoviário brasileiro, tentando entender, e divulgar, a metodologia – e as vantagens - do novo método mecanístico-empírico de dimensionamento nacional de pavimentos flexíveis, pensando sempre em disponibilizar informações importantes que suscitem a vontade de investir em uma malha rodoviária de qualidade, proporcionando uma melhor experiência para os usuários e ofertando, a preços acessíveis, bons serviços e produtos para a sociedade em geral.

1.3 Objetivos de pesquisa

1.3.1 Objetivo geral

O objetivo geral desse Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) é analisar, por meio de simulação computacional, do ponto de vista do desempenho mecânico, a estrutura de um trecho do pavimento de uma rodovia, comparando os métodos de dimensionamento empírico – utilizado atualmente e datado de meados do século XX – e o novo método mecanístico-empírico que está em fase de testes para implantação definitiva.

1.3.2 *Objetivos específicos*

- Promover o conhecimento acessível a respeito das metodologias de dimensionamento de pavimentos flexíveis do método empírico e do novo método mecanístico-empírico.
- Comparar os métodos de dimensionamento, empírico e MeDiNa, e explicar sobre suas diferenças.
- Mostrar as vantagens de se dimensionar um pavimento flexível por meio do novo Método de Dimensionamento Nacional de pavimentos asfálticos.
- Apontar facilidades e dificuldades da utilização do software MeDiNa, apresentando suas métricas principais para dimensionamento asfáltico.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Definição e classificação do pavimento

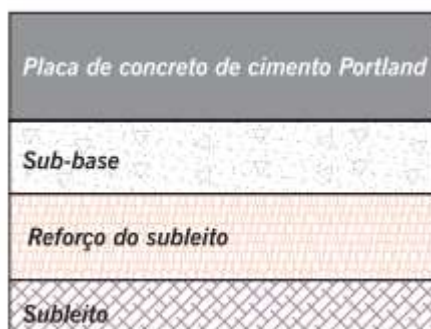
Pavimento é uma estrutura constituída por camadas distintas de espessuras diferentes alçado sobre a superfície final de terraplanagem. Essas camadas devem distribuir as solicitações de carga advindas da ação do tráfego, ou seja, resistir aos desgastes e impactos diretos do movimento de pessoas e cargas, limitando as tensões e deformações com o objetivo de garantir o adequado desempenho da via por um período de tempo previamente estimado em projeto (BERNUCCI *et al.*, 2010; CNT, 2019).

A finalidade de executar esse pavimento é proporcionar uma melhor qualidade nas condições de fluxo da via e proporcionar segurança, conforto e economia aos usuários. DNIT (2006a) classifica os pavimentos, de uma forma geral, em rígidos, semirrígidos e flexíveis.

2.1.1 Pavimentos rígidos

É o tipo de pavimento em que o revestimento tem uma elevada rigidez em relação às camadas inferiores, conseguindo absorver praticamente todas as tensões provenientes do carregamento ao qual o pavimento está sendo submetido (DNIT, 2006a). Está representado na Figura 1.

Figura 1 – Estrutura de um pavimento rígido



Fonte: Bernucci *et al* (2010).

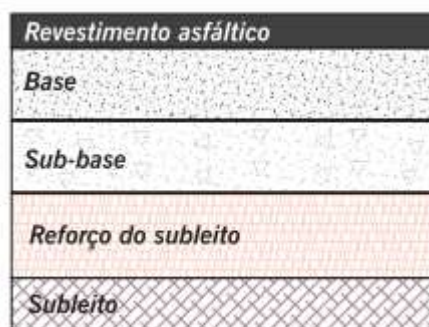
2.1.2 Pavimentos semirrígidos

São caracterizados pela existência de uma base cimentada por algum aglutinante com propriedades cimentícias (DNIT, 2006a).

2.1.3 Pavimentos flexíveis

É aquele em que todas as camadas sofrem deformação elástica sob o carregamento aplicado, fazendo que a carga se distribua em parcelas aproximadamente equivalentes entre as camadas (DNIT, 2006a). Está representado na Figura 2.

Figura 2 – Estrutura de um pavimento flexível



Fonte: Bernucci *et al* (2010).

Os pavimentos flexíveis são formados por quatro camadas principais: revestimento asfáltico, base, sub-base e reforço do subleito que serão melhor descritas a seguir.

2.1.4 Revestimento asfáltico

Segundo a Confederação Nacional do Transporte, o revestimento asfáltico é a camada responsável por resistir às ações do tráfego em um primeiro momento, devendo ser impermeável e confortável para atender, da melhor forma, às condições de rolamento e oferecer segurança ao usuário (CNT, 2019). Ademais, essa é a parte da estrutura do pavimento que é visível.

2.1.5 Base

Ainda em conformidade com CNT (2019), a camada chamada de base é aquela que possui – também - a finalidade de resistir às ações do tráfego, todavia, de maneira a aliviar as tensões no revestimento e distribuí-las para as camadas inferiores.

2.1.6 Sub-base

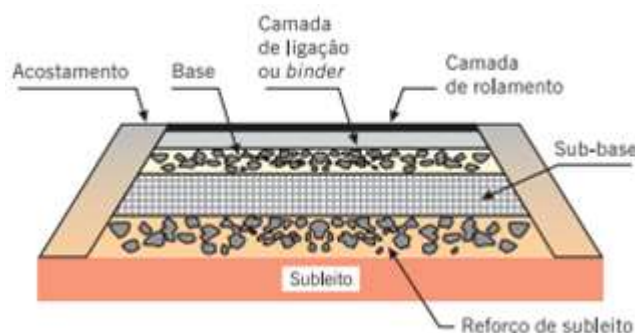
Segundo CNT (2019), a sub-base é a camada complementar à base, exercendo as mesmas funções, e sendo executada quando, por circunstâncias técnicas e econômicas, não seja aconselhável construir o pavimento diretamente sobre o reforço do subleito.

2.1.7 Reforço do subleito

Consoante com CNT (2019), o reforço do subleito é a camada que é executada sobre o subleito devidamente compactado e regularizado, sendo utilizada para reduzir espessuras elevadas da camada da sub-base caso haja necessidade.

As camadas de base, sub-base e reforço do subleito são de grande importância estrutural e estão representadas na Figura 3 e Figura 4, por meio da visualização de um corte transversal no pavimento.

Figura 3 – Corte transversal do pavimento



Fonte: Bernucci *et al.* (2010).

Figura 4 – Camadas do pavimento flexível



Fonte: Adaptado de CNT (2019).

2.2 Situação atual da pavimentação no Brasil

O desempenho do motorista na condução de um veículo depende de vários fatores, dentre eles o estado de uso e características da via a qual se trafega. No Brasil, em 2019, foram avaliados pela Confederação Nacional do Transporte (CNT) um total de 108.863 quilômetros de rodovias espalhadas em todo o país.

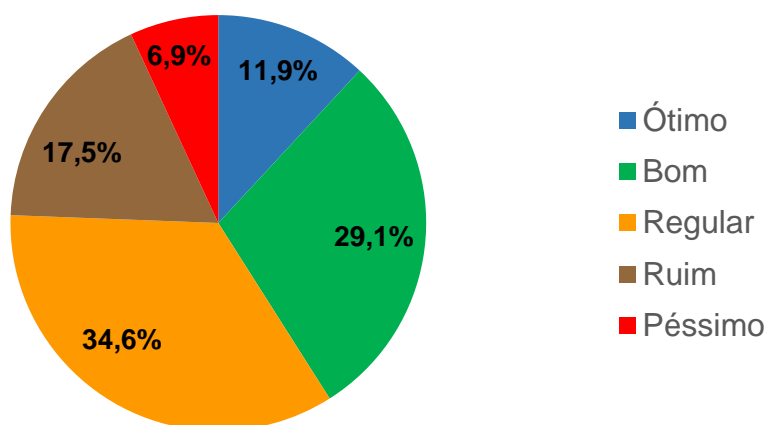
Para a avaliação do estado geral das rodovias, é feita a análise conjunta das características do pavimento, sinalização e geometria da via. Desse total pesquisado, 64.198 quilômetros, valor equivalente a 59,0%, apresentaram algum tipo de problema no Estado Geral, sendo classificados como regular, ruim e péssimo, representados, na Tabela 1 e no Gráfico 1 seguinte, pelos valores respectivos: 37.628km, 19.039km e 7.531km (CNT, 2019).

Tabela 1 – Classificação do estado geral das rodovias

ESTADO GERAL	EXTENSÃO TOTAL	
	KM	%
Ótimo	12.951	11,9
Bom	31.714	29,1
Regular	37.628	34,6
Ruim	19.039	17,5
Péssimo	7.531	6,9
TOTAL	108.863	100

Fonte: Adaptado de CNT (2019).

Gráfico 1 – Classificação do estado geral das rodovias



Fonte: Adaptado de CNT (2019).

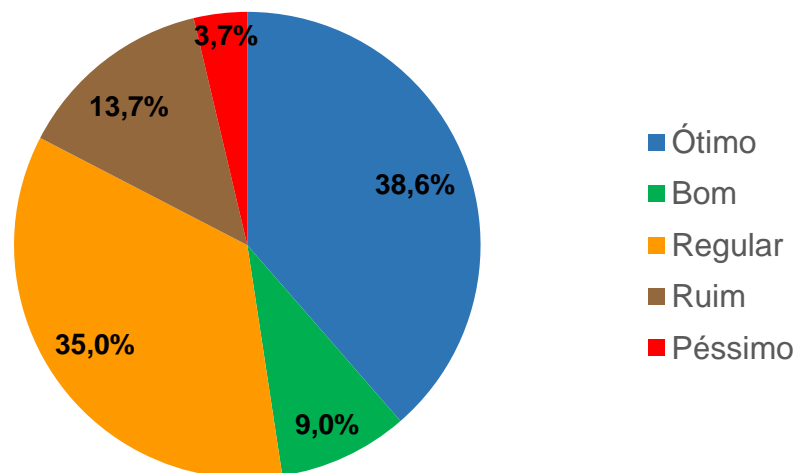
Trazendo os dados da pesquisa para o fator pavimento, da extensão total avaliada na pesquisa, 57.080 quilômetros, equivalente a 52,4%, apresentou algum tipo de problema, sendo considerados regular, ruim e péssimo os valores respectivos de 35,0%, 13,7% e 3,7%. Em 38,6% do total pesquisado, o pavimento encontra-se em ótimo estado e em apenas 9,0%, é considerado bom (CNT, 2019). Os seguintes valores apresentados estão expressos na Tabela 2 e no Gráfico 2.

Tabela 2 – Classificação do pavimento

ESTADO GERAL	EXTENSÃO TOTAL	
	KM	%
Ótimo	42.015	38,6
Bom	9.768	9,0
Regular	38.060	35
Ruim	14.965	13,7
Péssimo	4.055	3,7
TOTAL	108.863	100

Fonte: Adaptado de CNT (2019).

Gráfico 2 – Classificação do pavimento



Fonte: Adaptado de CNT (2019).

2.3 Defeitos em pavimentos flexíveis

O pavimento é projetado para durar determinado intervalo de tempo. Durante seu ciclo de utilização, conforme CNT (2019), caso não ocorra algum tipo de intervenção, o pavimento migra de uma condição considerada ótima até alcançar uma condição ruim.

Os defeitos – ou deteriorações - na superfície dos pavimentos asfálticos são aqueles que podem ser visualizados a olho nu. Segundo Pinto e Preussler (2010), com as diferentes condições ambientais e com a variedade de pavimentos existentes, dispõe-se de manuais de identificação de diversos defeitos que abrangem vias nacionais e internacionais. Porém, existem irregularidades principais que acometem a estrutura do pavimento e que são notadas de forma recorrente, são elas: fendas, fissuras, trincas, afundamentos, corrugações, desgastes e panelas (buracos).

2.3.1 Fendas

DNIT (2003a), define fenda como sendo qualquer descontinuidade na superfície do pavimento que conduza a aberturas de menor ou maior porte, podendo ramificar-se em fissuras e trincas. Segundo Bernucci *et al.* (2010), as fendas são subdivididas dependendo do tipo e da gravidade que apresentam, representando um dos defeitos mais significativos dos pavimentos asfálticos.

2.3.1.1 Fissuras

Fissuras são fendas de largura capilar existentes na camada de revestimento do pavimento e se posicionam de forma oblíqua, transversal ou longitudinal ao eixo da via. Somente são visíveis a olho nu a uma distância que seja menor ou igual a 1,50m. Além disso, as fissuras são caracterizadas por não causarem problemas funcionais ao revestimento, não sendo consideradas quanto à gravidade nos métodos de avaliação atuais de condição da superfície asfáltica (DNIT, 2003a).

2.3.1.2 Trincas

Trincas são fendas existentes no revestimento e que são facilmente visíveis, com aberturas de tamanhos superiores às fissuras, podendo apresentar-se de forma isolada ou com trincas interligadas (DNIT, 2003a).

Ainda segundo DNIT (2003a), as trincas isoladas subdividem-se em: transversal, longitudinal e de retração. As trincas interligadas, de acordo com Bernucci *et al.* (2010), são subdivididas em: trincas de bloco, quando tendem a uma regularidade geométrica, ou trincas tipo couro de jacaré, quando não seguem um padrão de reflexão geométrica de trincas. Além disso, são, de forma comum, derivadas da fadiga do revestimento asfáltico.

2.3.1.2.1 Trinca Transversal

São aquelas que apresentam direção ortogonal ao eixo da via. Esse tipo de patologia está representado na Figura 5.

2.3.1.2.2 Trinca Longitudinal

São aquelas que apresentam direção paralela ao eixo da via. Esse tipo de patologia está representado na Figura 6.

Figura 5 – Representação fotográfica de uma trinca transversal



Fonte: DNIT (2003a).

Figura 6 – Representação fotográfica de uma trinca longitudinal



Fonte: DNIT (2003a).

2.3.1.2.3 Trinca de Retração

De acordo com DNIT (2003a), são trincas atribuídas aos fenômenos de retração térmica: do material do revestimento ou do material de base subjacentes ao revestimento trincado.

2.3.1.2.4 Trinca tipo “Bloco”

É o conjunto de trincas interligadas que são caracterizadas pela configuração de blocos formados com lados bem definidos (DNIT, 2003a). Pode ser causado pela alternância diária de temperatura e umidade ou pela união de trincas longitudinais e transversais (PINTO; PREUSSLER, 2010). Esse tipo de defeito está representado na Figura 7.

2.3.1.2.5 Trinca tipo “Couro de Jacaré”

São um conjunto de trincas interligadas sem direções preferenciais, que se assemelham ao aspecto de couro de jacaré (DNIT, 2003a). Ainda, segundo Pinto e Preussler (2010), esse defeito é causado, possivelmente, pela ação repetida das cargas de tráfego na via, podendo ser agravado pela condição ambiental local de umidade e temperatura. Esse defeito está representado na Figura 8.

Figura 7 - Representação fotográfica de uma trinca interligada tipo bloco



Fonte: DNIT (2003a).

Figura 8 - Representação fotográfica de uma trinca interligada tipo couro de jacaré



Fonte: DNIT (2003a).

2.3.2 Afundamentos

É a deformação permanente que é descrita como uma depressão da superfície do pavimento, podendo ser acompanhada, ou não, de solevamento, e apresentando-se sob a forma de afundamento plástico ou de consolidação (DNIT, 2003a).

2.3.2.1 Afundamento plástico

É causado pela fluência plástica de uma ou mais camadas do pavimento ou do subleito, acompanhado de soerguimento. Além disso, é subdividido em relação à sua extensão, sendo denominado afundamento plástico local quando ocorre em extensão de até 6m, e afundamento plástico da trilha de roda quando a extensão for superior a 6 m e estiver localizado ao longo da trilha de roda (DNIT, 2003a).

Uma característica desse tipo de afundamento é que existe certa compensação volumétrica, acarretando em um erguimento da massa asfáltica junto as bordas do local afetado (BERNUCCI *et al.*, 2010). Abaixo, na Figura 9 e 10, tem-se a representação fotográfica do afundamento de trilha de roda.

Figura 9 – Afundamento de trilha de roda (1)



Fonte: DNIT (2003a).

Figura 10 – Afundamento de trilha de roda (2)



Fonte: Bernucci *et al.* (2010).

2.3.2.2 Afundamento de consolidação

É causado pela consolidação diferencial de uma ou mais camadas do pavimento ou subleito sem estar acompanhado de levantamento. Da mesma forma citada no afundamento plástico, o de consolidação é subdividido em relação à sua extensão, sendo nomeado de afundamento de consolidação local quando ocorre em extensão de até 6m, e quando a extensão for superior a 6m, e estiver localizado ao longo da trilha de roda, é denominado afundamento de consolidação da trilha de roda (BERNUCCI *et al.*, 2010; DNIT, 2003a). A seguir, na Figura 11 e 12, tem-se a representação fotográfica do afundamento de consolidação local.

Figura 11 – Afundamento de consolidação local (1)



Fonte: Bernucci *et al.* (2010).

Figura 12 – Afundamento de consolidação local (2)



Fonte: DNIT (2003a).

2.3.3 *Corrugações ou ondulações*

Segundo Bernucci *et al.* (2010), corrugações são deformações transversais ao longo do eixo da pista com incidência de depressões intercaladas de elevações, com comprimento de onda entre duas cristas de algumas dezenas de centímetros. Patologia representada fotograficamente na Figura 13.

Figura 13 – Corrugação no eixo da pista



Fonte: DNIT (2003a).

2.3.4 *Desgastes*

É o efeito do arrancamento progressivo do agregado do pavimento, sendo caracterizado por aspereza superficial do revestimento e provocado por esforços causados pelo tráfego (DNIT, 2003a). Patologia representada fotograficamente na Figura 14.

Figura 14 – Desgaste do revestimento asfáltico do pavimento



Fonte: DNIT (2003a)

2.3.5 *Panela (Buraco)*

São cavidades formadas, de modo inicial, no revestimento do pavimento e apresenta variadas dimensões e profundidades, podendo alcançar as camadas

inferiores do pavimento, podendo provocar a desagregação dessas camadas. Esse defeito pode ser causado pela falta de aderência entre camadas superpostas, acarretando no deslocamento das camadas, trincamentos ou evolução de outros defeitos (BERNUCCI *et al.*, 2010; DNIT, 2003a). A Figura 15 apresenta um exemplo de panela em um pavimento.

Figura 15 – Defeito panela acometendo o revestimento de um pavimento



Fonte: DNIT (2003a)

2.4 Avaliação dos pavimentos flexíveis

A condição de um pavimento é representada pelo nível de degradação que é resultado dos processos que estão correlacionados ao uso continuado pelo tráfego e ao que ocorre no meio em que está inserido (DNIT, 2006b). Por intermédio de normas, ou seja, pelo conhecimento de numerosos parâmetros, é possível avaliar o pavimento e determinar suas condições estruturais e de superfície, visando a manutenção da garantia do conforto e da segurança para o usuário da via.

De acordo com Bernucci *et al.* (2010), a avaliação funcional está relacionada com a análise da superfície dos pavimentos e de como esse estado de utilização influencia no conforto ao rolamento da via. Já a avaliação estrutural está conexas aos danos ligados à capacidade de carga do pavimento.

2.4.1 Avaliação Funcional

Os defeitos no pavimento surgem principalmente pelas solicitações do tráfego, comprometendo a capacidade estrutural, e pelas ações climáticas, desgastando a superfície (DNIT, 2011).

A avaliação funcional pode ser tratada de forma subjetiva, pelo Valor de Serventia Atual (VSA) ou de forma objetiva, com o Índice de Gravidade Global (IGG) e o Índice de Irregularidade Internacional (IRI) (PINTO; PREUSSLER, 2010).

Para esse trabalho em questão, serão detalhados os processos do VSA e do IRI, por serem, de acordo com DNIT (2011), dois parâmetros de avaliação bastante consistentes.

2.4.1.1 VSA

DNIT (2003b) define VSA como sendo uma medida subjetiva das condições de superfície de um pavimento, realizada por um grupo de avaliadores que percorrem trechos homogêneos com extensão máxima de dois quilômetros, arrolando suas opiniões a respeito da capacidade do pavimento de suportar às exigências do tráfego que atua diretamente sobre ele, quanto ao conforto e a suavidade.

Além disso, conforme DNIT (2011), o VSA é uma atribuição numérica compreendida em uma escala de 0 a 5, obtida pela média das notas das avaliações do grupo, compreendendo cinco níveis de serventia, são eles: excelente, bom, regular, ruim e péssimo. O Quadro 1 demonstra a relação desses números com os níveis apresentados.

Segundo DNIT (2003b), para a obtenção dessa média, utiliza-se a seguinte equação:

$$VSA = \frac{\sum X}{n} \quad (1)$$

Onde:

VSA – Valor de Serventia Atual;

X – Valores de Serventia Atual individuais atribuídos por cada membro do grupo;

n – Número de membros do grupo de avaliação.

Quadro 1 – Níveis de serventia

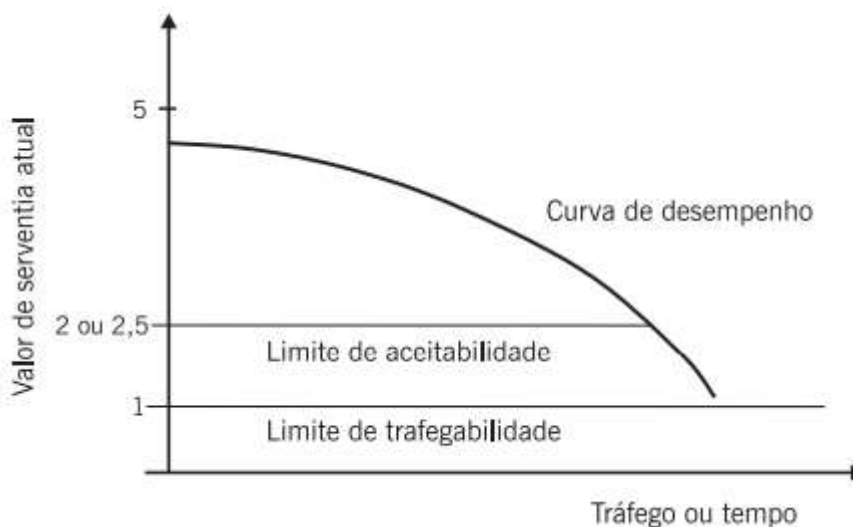
Padrão de conforto ao rolamento	Avaliação (faixa de notas)
Excelente	4 a 5
Bom	3 a 4
Regular	2 a 3
Ruim	1 a 2
Péssimo	0 a 1

Fonte: Adaptado de Bernucci *et al.* (2010).

O VSA do pavimento acaba por diminuir com o passar do tempo por decorrência de dois fatores principais: o tráfego e as intempéries (DNIT, 2011). Quanto maior for a magnitude da carga aplicada ao pavimento, maior é a progressão dos defeitos, provocando irregularidades ou queda da serventia. O clima e a temperatura também contribuem diretamente para a deterioração do pavimento, pois afetam o comportamento dos materiais, diminuindo a capacidade de suporte e reduzindo – em casos de alta temperatura – a resistência das misturas asfálticas e a viscosidade dos ligantes asfálticos (BERNUCCI *et al.*, 2010).

Além do discorrido anteriormente, o VSA indica dois limites importantes: de aceitabilidade e de trafegabilidade. O limite de aceitabilidade, que depende da categoria da rodovia e do tráfego, demonstra as condições de rolamento do pavimento, abaixo do qual o nível de conforto passa a ser inaceitável, tendo o VSA em 2,5 para as vias de alto volume de tráfego e 2,0 para as demais vias (BERNUCCI *et al.*, 2010). Já o limite de trafegabilidade é enquadrado na situação na qual se torna necessária a reconstrução do pavimento, sendo por falta de manutenção ou prática inadequada desta, estando o VSA próximo ou igual a 1,0 (DNIT, 2011). A Figura 16 evidencia esses dois limites, relacionando o VSA com o decorrer do tempo ou tráfego.

Figura 16 – Variação da serventia com o tráfego ou com o tempo de utilização da via



Fonte: Bernucci *et al.* (2010).

2.4.1.2 IRI

A irregularidade longitudinal é o somatório dos desvios da superfície de um pavimento em relação a um plano de referência ideal de projeto geométrico, que prejudica a dinâmica dos veículos, o efeito dinâmico das cargas e a qualidade ao rolamento (DNIT, 2011).

O *International Roughness Index* (IRI) é definido como sendo um parâmetro utilizado para obter a medição da irregularidade e quantificar os desvios da superfície do pavimento, tratando-se de um índice estático, expresso em m/km, sendo medido ao longo de uma linha imaginária que é paralela ao eixo da via e que coincide com as regiões de trilha de roda (BERNUCCI *et al.*, 2010; DNIT, 2006b; DNIT, 2011).

Bernucci *et al.* (2010) afirmam que a irregularidade pode ser levantada com medidas topográficas ou por equipamentos medidores do perfil longitudinal, ou por equipamentos do tipo resposta. DNIT (2011) define os equipamentos desse tipo como sendo aqueles que fornecem um somatório de desvios do eixo de um veículo em relação à sua suspensão.

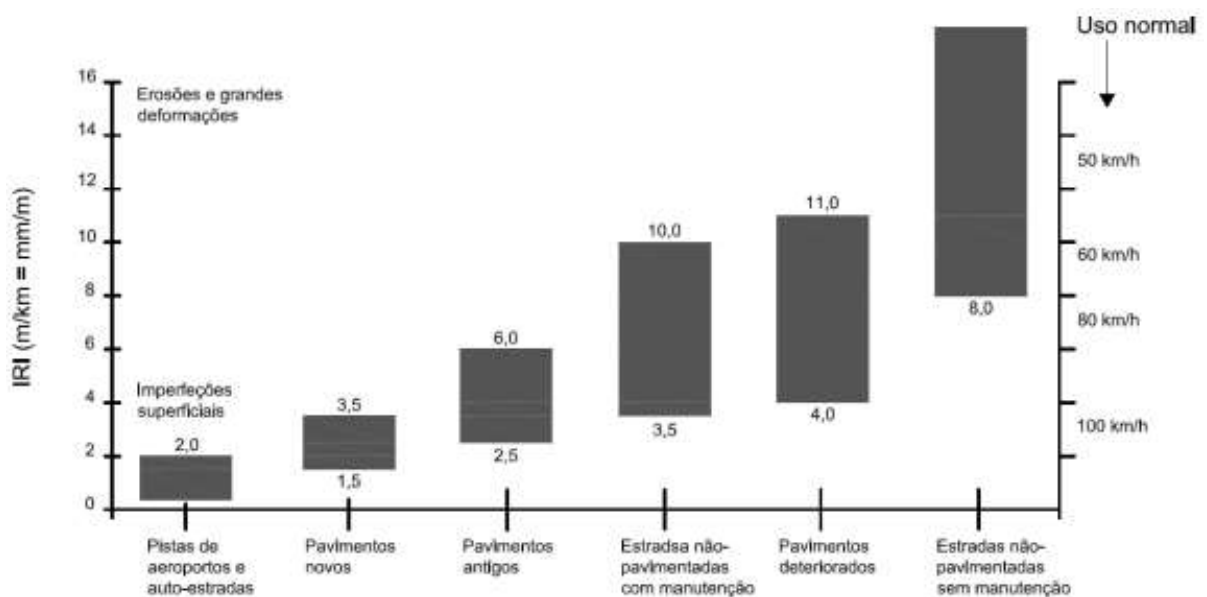
Segundo Sayers e Karamilhas (1998), tem-se empregado a seguinte classificação:

- Avaliação direta: por meio de equipamentos de classe I (nível e mira; Dipstick, perfilômetro do TRL etc.) e classe II (perfilógrafos, equipamentos com sensores a laser, APL francês etc.);

- Avaliação indireta: equipamentos de classe III do tipo-resposta (TRL Bump integrator, Maysmeter, Merlin etc.).

Outrossim, é significativo pontuar que o IRI é considerado bom para valores abaixo de 3m/km, regular entre 3 e 4m/km, ruim entre 4 e 5,5m/km, e péssimo acima de 5,5m/km, além de ser um parâmetro utilizado como ferramenta de controle e aceitação de obras que abrangem essa metodologia (DNIT, 2011), sendo apresentada as suas faixas de variação na Figura 17.

Figura 17 – Diversas faixas de variação do IRI



Fonte: DNIT (2011).

2.4.2 Avaliação Estrutural

A avaliação da condição estrutural do pavimento concede informações valiosas quanto ao grau de restauração, a adequação estrutural e permite, ainda, selecionar a opção de restauração que seja mais adequada para o pavimento em questão (DNIT, 2006b).

Esse tipo de avaliação está associado à ideia de capacidade de carga e pode ser vinculada ao projeto do pavimento e ao seu dimensionamento (BERNUCCI *et al.*, 2010). A avaliação estrutural pode ser realizada por método destrutivo, semidestruutivo ou não-destrutivo.

2.4.2.1 Método destrutivo

É o método que investiga a condição estrutural de cada camada que compõe o pavimento por abertura de trincheiras, permitindo recolher amostras de cada material até o subleito e realizar ensaios de capacidade de carga (BERNUCCI *et al.*, 2010). Devido ao fato da propriedade destrutiva do método, só pode ser realizado em alguns pontos estipulados para a avaliação de cada segmento do pavimento que se deseja obter resultado.

2.4.2.2 Método semidestrutivo

É o método onde são feitas aberturas menores de janelas no pavimento que permitam utilizar um instrumento portátil de pequenas dimensões para avaliar a capacidade de carga do pavimento (BERNUCCI *et al.*, 2010).

2.4.2.3 Método não-destrutivo

É o método que utiliza equipamentos de medida não-destrutiva, representadas por medidas de deflexão, para acompanhar a variação da capacidade de carga do pavimento com o tempo. Além disso, é o método de avaliação mais adequado para ser feito em grandes extensões de pistas e com possibilidade de diversas repetições no ponto que está sendo estudado (BERNUCCI *et al.*, 2010; FONSECA, 2013).

Segundo Medina e Motta (2015), esse tipo de método fornece informações que, se aplicadas como dados de entrada em softwares específicos, podem estimar a rigidez do sistema de camadas, os módulos de elasticidade de cada camada, ou algum módulo equivalente dos materiais componentes do pavimento, sendo capaz de serem usados na avaliação mecânica do pavimento e no cálculo de reforço do mesmo.

2.5 Equipamentos usados na avaliação do pavimento

Os equipamentos do método não-destrutivo que são utilizados para a obtenção de levantamentos da condição de pavimentos, para análises de rotina ou para projeto de reabilitação são divididos em três: carregamento quase estático, vibratório e por impacto (BERNUCCI *et al.*, 2010; SOUZA JÚNIOR, 2018).

De acordo com Balbo (2007), os dois tipos de equipamentos amplamente utilizados no Brasil com a finalidade de medir a deflexão são a viga Benkelman e o

deflectômetro de impacto (FWD). Logo, para esse trabalho em questão, serão abordados os deflectômetros quase-estáticos e por impacto.

2.5.1 Deflectômetro quase-estático

São equipamentos baseados na tradicional viga Benkelman. A característica fundamental desse tipo de deflectômetro é que as cargas que são aplicadas ao pavimento se movem em baixas velocidades, na ordem de 3km/h, e são cargas de eixos de caminhões em verdadeira grandeza (DNIT, 2006a). Além disso, são equipamentos que se correlacionam bem com o desempenho dos pavimentos semirrígidos e flexíveis, tendo precisão na ordem de 0,01mm.

Os equipamentos dessa categoria são: viga Benkelman, deflectógrafo Lacroix e *California Traveling Deflectometer*.

2.5.1.1 Viga Benkelman

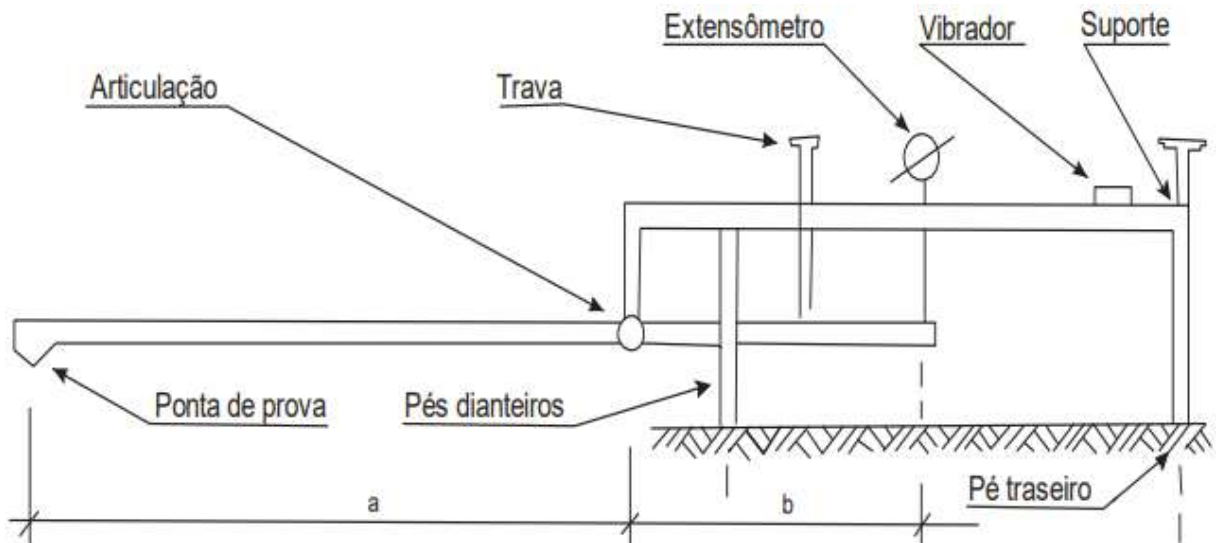
Na década de 1950, foi criada por A. C Benkelman, engenheiro do Departamento de Transportes da Califórnia, sendo trazida ao Brasil no ano de 1962 (CARNEIRO, 1965 apud BERNUCCI *et al.*, 2010).

Consoante a DNER (1994), a aparelhagem da viga Benkelman é constituída por um conjunto de sustentação em que articula uma alavanca interfixa que forma dois braços, cujos comprimentos a e b obedecem às relações de $2/1$, $3/1$ ou de $4/1$, conforme a Figura 18 demonstra.

A ponta de prova da viga fica na extremidade do braço maior. Já a extremidade do braço menor, dispõe de um extensômetro com precisão de 0,01 mm. Além disso, a viga ainda possui um pequeno vibrador destinado a evitar eventuais inibições no extensômetro e dispõe de uma trava de proteção a ser utilizada por ocasião do transporte (DNIT, 2010).

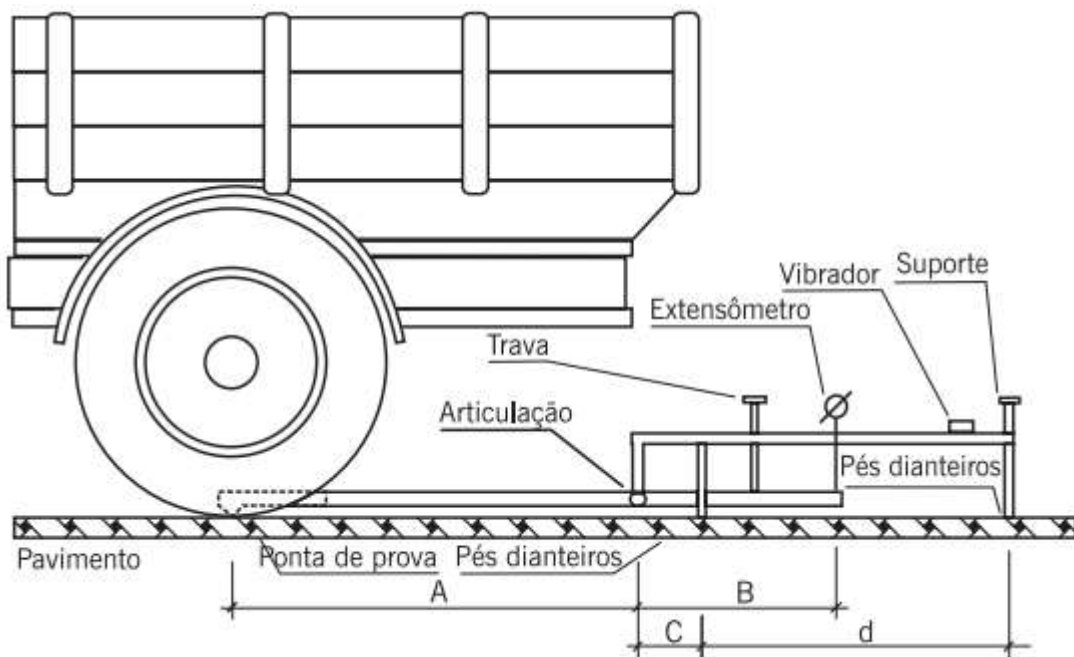
Ademais, ainda é necessário um caminhão com eixo traseiro simples de roda dupla, carregado com 8,2 toneladas simetricamente distribuídas em relação às rodas, para aplicar a carga sob a qual será medida a deformação elástica (BERNUCCI *et al.*, 2010; DNER, 1994). A Figura 19 mostra um esquema desse equipamento junto ao caminhão.

Figura 18 – Esquema de viga Benkelman



Fonte: DNIT (2010).

Figura 19 – Viga Benkelman atrelada a um caminhão



Fonte: Bernucci *et al.* (2010).

Para o início da execução do ensaio, os pontos do pavimento em que se deseja medir as deflexões devem ser marcados previamente e localizados a uma distância prefixada da borda do revestimento que varia de acordo com a largura da faixa de tráfego, representado pelo Quadro 2 a seguir.

Quadro 2 – Localização dos pontos para obtenção das deflexões do pavimento

LARGURA DA FAIXA DE TRÁFEGO (m)	DISTÂNCIA DA BORDA DO REVESTIMENTO (m)
2,70	0,45
3,00	0,60
3,30	0,75
3,50 ou mais	0,90

Fonte: Adaptado de DNER (1994).

Após a marcação dos pontos, a viga Benkelman deve ser posicionada exatamente entre os pneus traseiros da roda dupla e sua localização deve ser conferida por meio de um sistema de referência (régua) fixado no caminhão.

Posteriormente ao processo acima, destrava-se a viga Benkelman e liga-se o vibrador para que a leitura inicial (L_o) possa ser efetuada pelo operador. Para a obtenção da leitura final (L_f), o caminhão deve ser lentamente deslocado, fazendo que o eixo simples com rodas duplas atinja 10 metros a partir do ponto inicial (L_o) (DNIT, 2010). A Figura 20 representa o ensaio, em campo, da utilização da viga Benkelman.

Para a obtenção da deflexão do pavimento no ponto de prova, aplica-se a seguinte equação:

$$D_o = (L_o - L_f) \times a/b \quad (2)$$

Onde:

D_o – deflexão real ou verdadeira, em centésimos de milímetro;

L_o – leitura inicial, em centésimos de milímetro;

L_f – leitura final, em centésimos de milímetro;

a e b – dimensões da viga Benkelman.

Outrossim, também pode-se determinar o raio de curvatura da bacia de deformação, bastando deslocar o eixo das rodas duplas do caminhão para 25 centímetros a frente do ponto de prova inicial do pavimento e efetuar a leitura adicional (DNER, 1994).

Para a obtenção do raio de curvatura da bacia de deformação, utiliza-se a seguinte equação:

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

Onde:

R – raio de curvatura, em metros;

D_o – deflexão real ou verdadeira, em centésimos de milímetro;

D_{25} – deflexão a 25cm do ponto de prova, em centésimos de milímetro.

Figura 20 – Ensaio com a viga Benkelman



Fonte: Bernucci *et al.* (2010).

2.5.2 Deflectômetro por impacto

Segundo DNIT (2006a), são equipamentos que aplicam cargas impulsivas no pavimento, simulando cargas de roda a velocidade da ordem de 70km/h e que são denominados de *Falling Weight Deflectometers* (FWD's).

2.5.2.1 Falling Weight Deflectometer (FWD)

O deflectômetro de impacto é um equipamento totalmente automatizado, rebocado por um veículo que carrega parte do sistema de aquisição de dados em um computador, conectado aos sensores instalados no deflectômetro (SOUZA JÚNIOR, 2018). A visualização do instrumento pode ser observada na Figura 21.

Figura 21 – Deflectômetro de impacto (FWD)



Fonte: Bernucci *et al.* (2010).

O equipamento em questão é projetado para simular o efeito de cargas de roda em movimento, com o fito de determinar as deflexões em pontos do pavimento que sejam determinados. Isso é obtido pela queda de um conjunto de massas, com altura pré-fixada, sobre um sistema de amortecedores que transmitem a força aplicada a uma placa circular que está apoiada no pavimento (DNER, 1996).

Após a aplicação da carga de impacto, os deslocamentos são lidos nos vários sensores, em posições já definidas, colocados ao longo de um suporte, para se obter a linha de deslocamentos (BERNUCCI *et al.*, 2010).

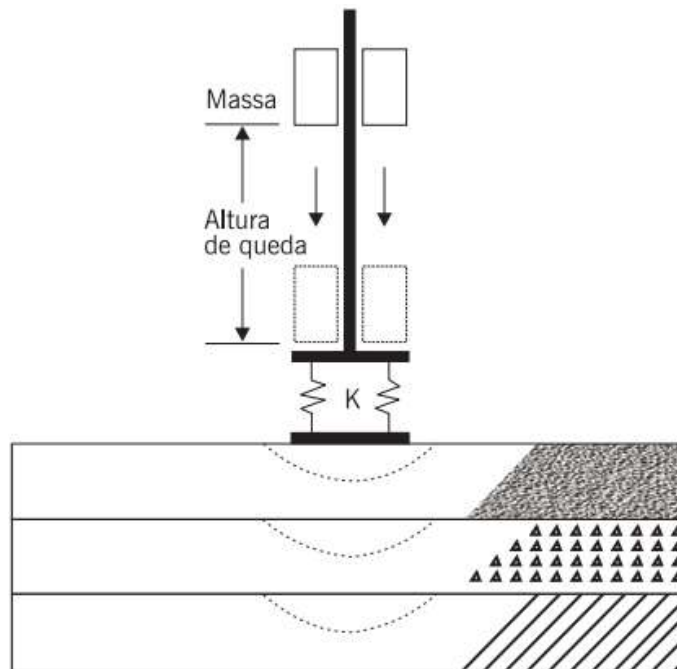
A Figura 22 representa, em detalhe, a barra de sensores e o prato de aplicação de carga do FWD. Já a Figura 23 demonstra um corte transversal do equipamento, facilitando o entendimento a respeito do seu funcionamento.

Figura 22 – Barra de sensores e prato de aplicação de carga do FWD



Fonte: Astec Engenharia (2020).

Figura 23 – Corte transversal do FWD



Fonte: Bernucci *et al.* (2010).

Quando comparado à viga Benkelman, o FWD dispõe de vantagens importantes que devem ser levadas em consideração no momento de optar pelo equipamento a ser usado no ensaio não-destrutivo (BERNUCCI *et al.*, 2010; MORAES, 2015; SOUZA JÚNIOR, 2018). São elas:

- Ensaio não influenciado pelo operador;
- Apresentam acurácia e repetibilidade em qualquer tipo de estrutura de pavimento;
- Maior produtividade (mais pontos levantados por dia);
- Registro automático de temperatura e de distâncias do ponto de ensaio;
- As deflexões por ele produzidas são as que mais se aproximam das geradas por um caminhão em movimento, medidas a partir de acelerômetros instalados no pavimento.

Apesar de apresentar todas as vantagens listadas acima, o FWD também apresenta algumas limitações que serão listadas a seguir:

- Custo de aquisição;
- Necessidade de calibrações frequentes e mais sofisticadas;

- A presença de uma camada rígida pode alterar a bacia de deflexões, embora também possa influenciar os resultados de quaisquer outros ensaios não destrutivos de medida de deflexões;
- A aceleração produzida pela carga do FWD é maior que a de uma carga de roda em movimento, podendo a inércia da massa do pavimento desempenhar um papel importante para o FWD, sendo desprezível para uma roda em movimento, embora aparentemente este fato não pareça influenciar a boa concordância das deflexões medidas.

Além do elucidado acima sobre o FWD, segundo Moraes (2015), consegue-se calcular a força de pico aplicada ao pavimento, por meio da placa de carga, pela seguinte equação:

$$F = \sqrt{2Mghk} \quad (4)$$

Onde:

F – Força de pico;

M – Massa do peso que cai;

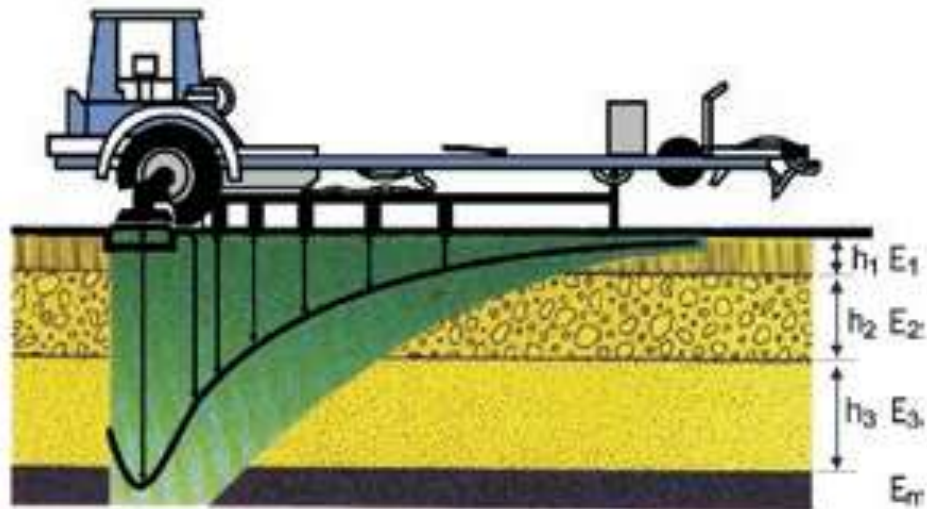
g – Aceleração da gravidade;

h – Altura de queda;

k – Constante do sistema de amortecedores

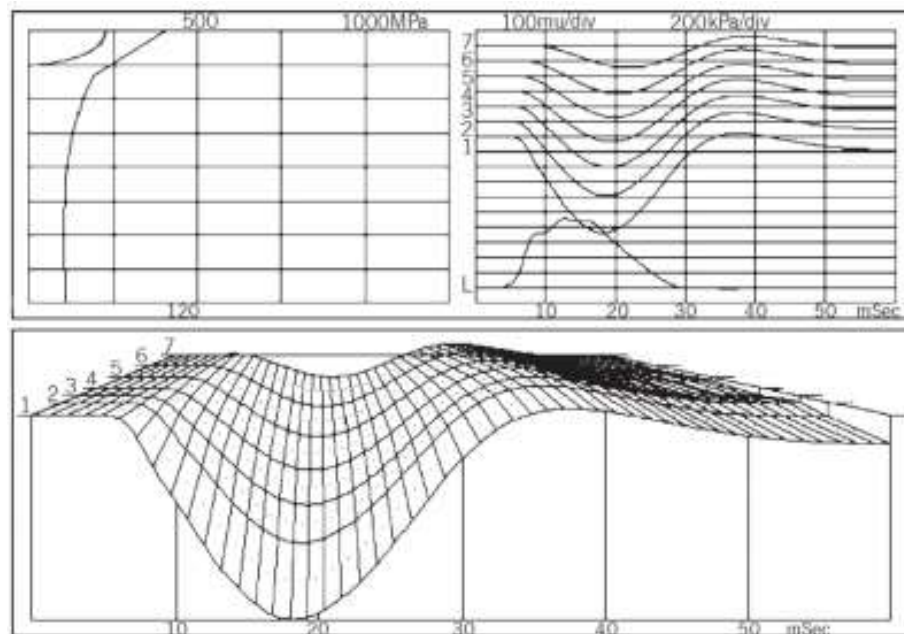
Logo, o impacto causado (Figura 24) pela carga no pavimento com uma duração de 25 a 33 milissegundos gera resultados nos sensores do FWD que são apresentados na Figura 25.

Figura 24 – Bacia de deformação FWD



Fonte: Medina e Motta (2015).

Figura 25 – Amplitude dos deslocamentos lidos nos sensores do FWD



Fonte: Bernucci *et al.* (2010).

2.6 Noções de retroanálise

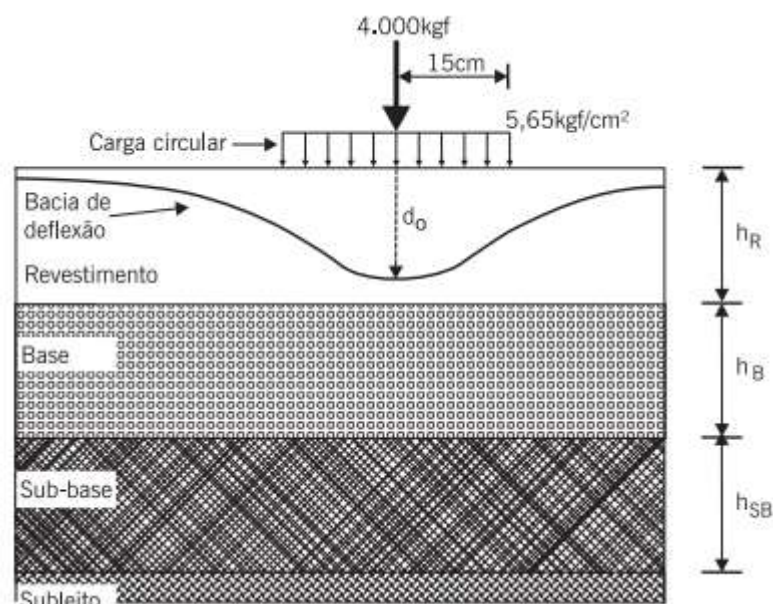
Para aplicar o cálculo de tensões e deformações em um dimensionamento de pavimento, é imprescindível que a rigidez das camadas de um pavimento e de seu subleito sejam conhecidas. Porém, como a grande parte dos pavimentos nacionais foi dimensionada usando-se o CBR, não é conhecida, a princípio, essa característica dos materiais que são utilizados em trechos. Por conta disso, um método foi desenvolvido

para inferir os módulos de elasticidade das camadas do pavimento e foi denominado de retroanálise (BERNUCCI *et al.*, 2010).

Retroanálise é um método que permite inferir, por meio de interpretação das bacias de deflexão, os módulos de elasticidade do subleito e das camadas do pavimento (BERNUCCI *et al.*, 2010). A determinação é feita com base nas bacias deflectométricas que um pavimento apresenta quando é submetido a um carregamento externo (NÓBREGA, 2003). O carregamento externo pode ser simulado por meio de ensaios não-destrutivos e equipamentos como a Viga Benkelman e FWD são os indicados para uso, sendo, este último, capaz de obter determinações mais precisas.

A Figura 26 demonstra os elementos que são necessários para o entendimento do conceito de retroanálise. Conhecendo-se as características básicas dos materiais presentes nas camadas do pavimento e a intensidade da carga externa aplicada no pavimento, é possível inferir os módulos de elasticidade a partir das deflexões obtidas, considerando-se uma combinação de módulos das camadas de modo que coincidam a bacia teórica calculada e a bacia de campo determinada (NÓBREGA, 2003; BERNUCCI *et al.*, 2010).

Figura 26 – Elementos para entendimento do conceito de retroanálise



Fonte: Bernucci *et al.* (2010).

Segundo Nóbrega (2003), a retroanálise é um procedimento importante pelos seguintes motivos:

- Proporciona a elaboração de projetos mais racionais, que acabam convertendo-se em pavimentos mais duráveis e de custo mais baixo;
- Projetos mais confiáveis reprimem restaurações prematuras e os altos custos advindos de manutenções e/ou restaurações;
- Proporciona a avaliação estrutural comparativa entre trechos de uma mesma rodovia ou de rodovias diferentes.

Além disso, a retroanálise dos módulos de resiliência de um pavimento, se comparada com outros processos de avaliação, apresenta as seguintes vantagens (NÓBREGA, 2003; BERNUCCI *et al.*, 2010):

- Representação do estado real da estrutura;
- Determinação de estimativas dos módulos resilientes dos materiais nas condições reais de campo;
- Possibilita o uso pleno da bacia deflectométrica, não só a deflexão máxima como é preconizado nas técnicas de avaliação estrutural do DNER;
- Minimiza o uso de sondagens para determinação das espessuras e coletas de amostras para determinação dos parâmetros desejados, que são de difícil reprodução em laboratório, além de serem onerosas, perigosas e demoradas;
- Redução de gastos, pelo fato dos ensaios não-destrutivos serem menos onerosos e demorados que os ensaios destrutivos.

Assim como vantagens são observadas no processo de retroanálise dos módulos de resiliência de um pavimento, em contrapartida tem-se algumas desvantagens que, segundo Bernucci *et al* (2010), são importantes de serem citadas:

- A confiabilidade dos instrumentos e dos procedimentos operacionais de medição das deflexões deve ser continuamente verificada;
- Os módulos de elasticidade retroanalizados não representam, necessariamente, os módulos reais dos materiais das camadas, mas sim os módulos equivalentes;

- O conjunto de módulos retroanalisados não é único, depende do programa utilizado para obtê-los, das hipóteses simplificadoras, dos níveis de ajustes atingidos, etc.

Métodos de retroanálise datam desde 1970 e, com o avanço da computação, houve um desenvolvimento acelerado dessa tecnologia, existindo, atualmente, uma série de métodos computacionais que proporcionam a análise de estruturas de pavimentos com n camadas. Esses softwares comparam as deflexões medidas e as calculadas, retornando os módulos, espessuras de camadas, somatório de erros e outros dados como resultado final (NÓBREGA, 2003).

DNIT (2006b) explica como se dá o procedimento para a obtenção dos dados esperados. Primeiro, deve-se realizar o levantamento das bacias de deformação que representam um certo segmento homogêneo, com o uso da VB ou do FWD, devendo estar devidamente aferidas e calibradas. Segundo, buscas com informações a respeito das espessuras das camadas integrantes da estrutura devem ser feitas, realizando sondagens diretas ou pesquisa histórico-cadastral.

Com os dados acima em mãos, busca-se determinar, por tentativas sucessivas com um *software* que permita o cálculo de tensões, deformações e deslocamentos, o conjunto de valores dos módulos de resiliência das camadas do pavimento que conseguem reproduzir o resultado obtido nos ensaios em campo. Os valores que são encontrados podem ser utilizados em análises mecânicas da estrutura existente (DNIT, 2006b).

2.7 Módulo de Resiliência (MR)

Resiliência significa energia armazenada num corpo deformado elasticamente, sendo devolvida a este quando as tensões que causam as deformações são cessadas, ou seja, é a energia potencial de deformação de um corpo (MEDINA; MOTTA, 2015).

MR é definido como sendo a relação entre a carga aplicada, de forma cíclica, e a deformação recuperável do material, sendo um parâmetro que caracteriza o comportamento elástico dos materiais pelas ações das cargas dos veículos diretamente sobre o pavimento. Segundo Medina e Motta (2015), é um dado importante que é utilizado nas metodologias mecânicas-empíricas de

dimensionamento de pavimentos asfálticos, tendo seus primeiros ensaios realizados no Brasil no ano de 1977, na Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Na Mecânica dos Pavimentos, o MR é empregado em teorias elásticas lineares e não-lineares aplicadas no cálculo da resposta física de pavimentos estruturados como um sistema de camadas (SANT'ANNA, 2002).

Estudos sobre o comportamento resiliente dos materiais foram introduzidos na década de 1930 por Francis Hveem, tendo sido o primeiro a relacionar as deformações recuperáveis com as fissuras surgidas nos revestimentos asfálticos (SANT'ANNA, 2002; BERNUCCI *et al.*, 2010).

Para a obtenção do módulo de resiliência em solos é utilizado o ensaio triaxial de cargas repetidas, que foi incorporado aos estudos de pavimentação por Bolton Seed, na década de 1950, em Berkeley, por meio de investigações da deformabilidade do subleito da pista experimental da AASHO (MEDINA; MOTTA, 2015). Esse ensaio, que tem por finalidade reproduzir, em laboratório, as condições de carregamento das cargas de tráfego na estrutura do pavimento no campo, é útil para a determinação de propriedades mecânicas do solo que são utilizadas para prever o desempenho dos materiais e para calcular a resposta estrutural do pavimento (DNIT, 2018; NORBACK, 2018).

De acordo com Medina e Motta (2015), DNIT (2018) e Norback (2018), por definição, o módulo de resiliência é a relação entre a tensão desvio aplicada e a correspondente deformação resiliente axial, sendo apresentada na equação a seguir.

$$MR = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_r} \quad (5)$$

Onde:

MR – Módulo de Resiliência;

σ_d – Tensão desvio;

ε_r – Deformação resiliente.

A tensão desvio é aquela que é aplicada repetidamente no corpo de prova durante um pulso em um ciclo da carga repetida a determinada frequência. O pulso é o tempo de duração da carga em que o corpo de prova é submetido a tensão desvio, durando 0,1 segundo. O ciclo da carga repetida é o intervalo de tempo que abrange o pulso e o tempo de repouso, 0,1 e 0,9 segundo, respectivamente, tendo a duração

total de 1,0 segundo. A frequência corresponde a quantidade de ciclos de carga que são aplicados por minuto, no caso desse ensaio, utilizam-se 60 ciclos por minuto, sendo equivalente a 1Hz. A representação desse esquema pode ser visualizada na Figura 27. O cálculo da tensão desvio pode ser obtido pela aplicação da seguinte equação:

$$\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3 \quad (6)$$

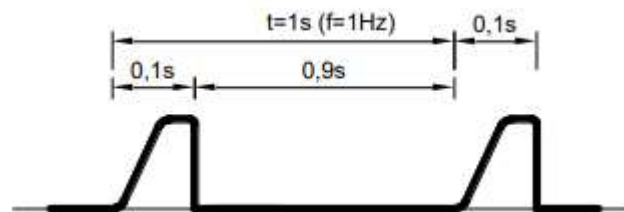
Onde:

σ_d – Tensão desvio;

σ_1 – Tensão principal maior;

σ_3 – Tensão principal menor (ou tensão de confinamento).

Figura 27 – Representação do esquema da carga repetida com frequência de 1Hz



Fonte: DNIT (2018).

Por sua vez, a deformação resiliente pode ser calculada por meio da seguinte equação:

$$\varepsilon_r = \frac{\delta_r}{H_0} \quad (7)$$

Onde:

ε_r – Deformação resiliente;

δ_r – Deslocamento resiliente ou recuperável;

H_0 – Altura inicial de referência do corpo de prova cilíndrico.

Norback (2018) afirma que existem vários modelos para a representação do módulo de resiliência em função das tensões atuantes no solo e que cada um tem

suas vantagens e desvantagens, se adequando de forma melhor ou pior aos dados dos ensaios.

2.7.1 Fatores que afetam o comportamento resiliente de solos

DNIT (2006a) afirma que as deformações resilientes são deformações elásticas, ou seja, recuperáveis, não variando, necessariamente, de forma linear com as tensões que são aplicadas, dependendo de fatores que não se consideram no conceito convencional de elasticidade. A seguir, para um melhor entendimento, uma breve descrição dos fatores que afetam o comportamento resiliente dos solos granulares será apresentada. São eles:

- Número de repetição da Tensão-Desvio: o módulo resiliente aumenta e diminui com o número de repetição de tensão-desvio. Essa variação depende de algumas razões: o índice de vazios, grau de saturação, densidade do material e do valor da tensão repetida que é aplicada;
- Duração e frequência do carregamento: a frequência de aplicação é função das condições de tráfego da estrada estudada, sendo o tempo de duração de carga estabelecido em função da velocidade dos veículos e do ponto no interior do pavimento onde se deseja calcular o MR;
- Nível de tensão aplicada: o módulo resiliente de solos não-coesivos - que são submetidos a tensões axiais repetidas - aumenta muito com a pressão confinante e é pouco atingido pelo valor da tensão desvio.

2.7.2 Ensaio triaxial de carga repetida

Nos ensaios de carga repetida, a força vertical – tensão desvio – que é aplicada atua sempre no mesmo sentido de compressão, partindo de zero a um valor máximo e diminuindo gradualmente até descarregar-se totalmente, para atuar novamente após um intervalo de tempo determinado, tentando reproduzir as condições reais que ocorrem no pavimento quando submetido ao tráfego. A velocidade e o volume de tráfego são simulados pelo tempo de pulso e frequência da carga aplicada (MEDINA; MOTTA, 2015).

O ensaio é pautado na norma DNIT 134/2018-ME, sendo dividido em duas partes: o condicionamento e o ensaio propriamente dito. No condicionamento, uma sequência de carregamentos cíclicos é executada para reduzir ao máximo as deformações permanentes que podem ocorrer nas primeiras aplicações da tensão

desvio. São aplicados 500 repetições de cada tensão desvio apresentadas no Quadro 3 para alcançar o objetivo da fase de condicionamento.

Quadro 3 – Sequência de tensões para fase de condicionamento

Tensão Confinante σ_3 (Mpa)	Tensão Desvio σ_d (Mpa)	Razão de Tensões σ_1/σ_3
0,070	0,070	2
0,070	0,210	4
0,105	0,315	4

Fonte: DNIT (2018).

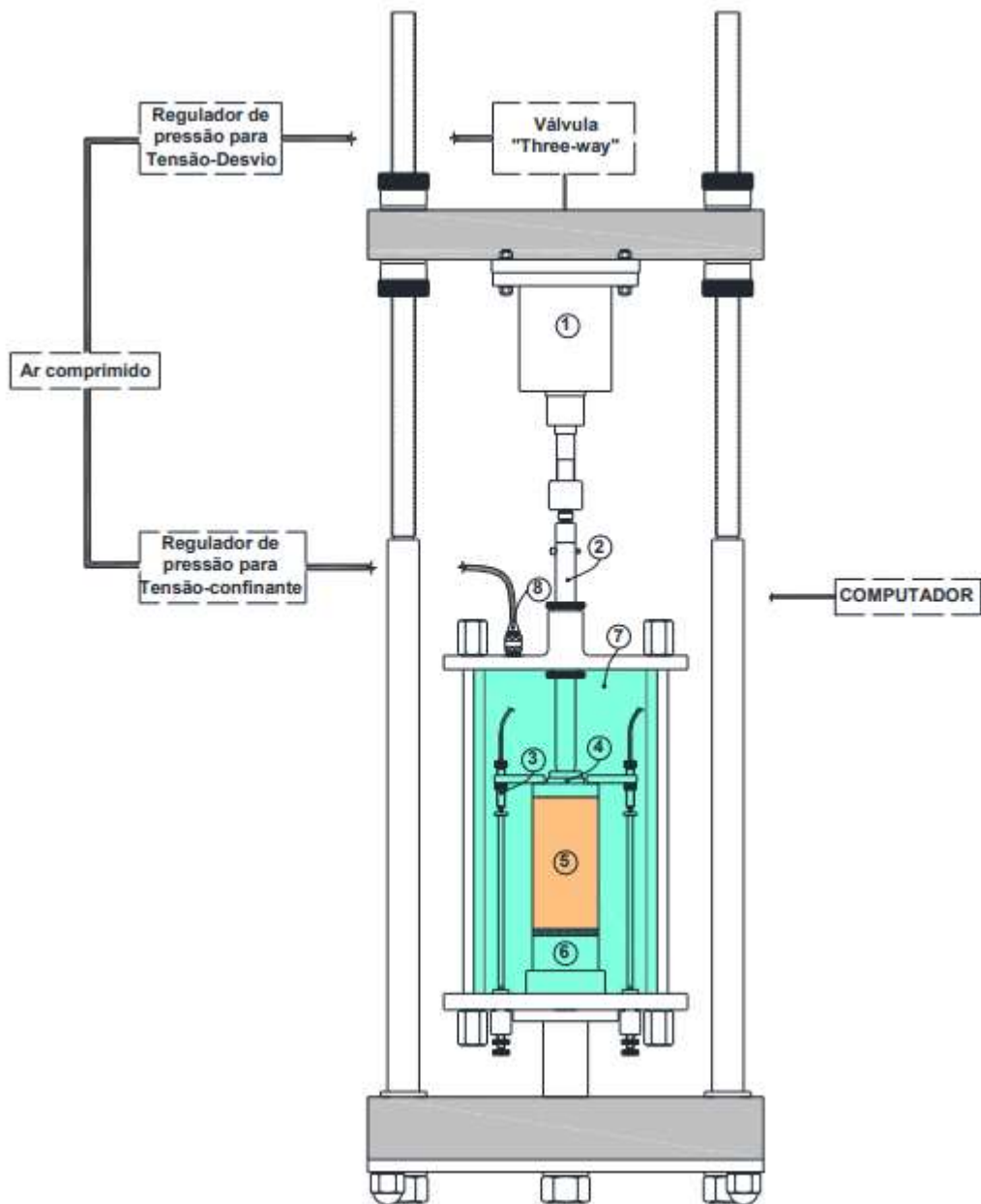
Após o condicionamento, o procedimento para a realização da determinação do módulo de resiliência é iniciado, aplicando uma sequência de pares de tensões – desvio e de confinamento – e medindo a deformação resiliente resultante dessas aplicações (DNIT, 2018; NORBACK, 2018).

Para a realização dos ensaios, os corpos de prova relativos às bases e sub-bases devem ser compactados na energia do Proctor intermediária ou modificada, já os corpos de prova de subleito devem ser compactados na energia Proctor intermediária, de acordo com o anexo D da norma DNIT 134/2018-ME.

Para o caso de materiais granulares, os corpos de prova devem ser de 100mm de diâmetro e 200mm de altura para amostras integralmente passantes na peneira de 25,4mm e de 150mm de diâmetro e 300mm de altura para amostras de até 38,1mm. Além disso, é importante frisar que a compactação deve ser feita com os materiais estando na umidade ótima para que, posteriormente, os corpos de provas possam ser submetidos às tensões aplicadas no ensaio.

O equipamento para a realização do ensaio triaxial de cargas repetidas teve sua primeira versão instalada na COPPE/UFRJ no ano de 1977. Desde então, avanços tecnológicos puderam ser agregados ao equipamento, visto que, desde 2001, o equipamento foi totalmente automatizado no que diz respeito ao sistema de mudança de níveis de aplicação de cargas e aos registros dos deslocamentos, tornando obsoletos os manômetros e registrador gráfico que eram usados nos ensaios praticados a mais de 20 anos (MEDINA; MOTTA, 2015). Abaixo, na Figura 28, está a representação do equipamento utilizado para o ensaio de obtenção do módulo de resiliência dos materiais granulares.

Figura 28 – Equipamento utilizado no ensaio triaxial de cargas repetidas



1 - Cilindro de Pressão	5 - Corpo de prova
2 - Pistão de Carga	6 - Base de apoio
3 - LVDT	7 - Câmara triaxial
4 - Cabeçote (<i>Top-cap</i>)	8 - Aplicação da tensão confinante

Fonte: DNIT (2018).

2.8 Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis

Balbo (2007) trata o dimensionamento de pavimentos como sendo a determinação da espessura das camadas a serem executadas e a composição dos materiais que farão parte dessas, possibilitando, desse modo, a construção de uma estrutura que seja capaz de suportar o carregamento imposto por um volume de tráfego conhecido e em situações climáticas do ambiente em que está inserido.

Um modelo de previsão de desempenho é chamado empírico quando é constituído de uma correlação direta entre parâmetros relacionados ao desempenho do pavimento e a evolução dos defeitos ou queda da serventia do mesmo (BEZERRA NETO, 2004; DNIT, 2006b).

Bezerra Neto (2004) afirma que os métodos empíricos têm a vantagem de serem facilmente empregados pelo fato dos ensaios de caracterização serem simples e por não exigirem uma aparelhagem sofisticada.

Todavia, esse método demonstra algumas limitações, pois os materiais de construção, clima da região e condições de tráfego são variáveis de acordo com a localidade, não permitindo uma generalização mais ampla para tais condições de contorno (BEZERRA NETO, 2004; MORAIS, 2014).

2.8.1 Método de Dimensionamento Empírico

O método empírico de dimensionamento de pavimentos flexíveis do DNER foi elaborado pelo engenheiro Murillo Lopes de Souza na década de 1960, tendo como base algumas conclusões obtidas na pista experimental da AASHO e a experiência do Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos (USACE), por meio do trabalho de Turnbull, Foster e Ahlvin, que utiliza o ensaio de CBR, designado “Design of Flexible Pavements Considering Mixed Loads and Traffic Volume”, datado de 1962 (SOUZA, 1981; DNIT, 2006a; MEDINA; MOTTA, 2015).

Para Bezerra Neto (2004), o método de dimensionamento está segmentado em três etapas: definição dos materiais utilizados, determinação do tráfego e dimensionamento das camadas do pavimento.

Para a definição dos materiais utilizados, o ensaio CBR (California bearing ratio) é o responsável pela determinação da capacidade de suporte do subleito e das camadas granulares que compõem o pavimento, devendo ser realizado de acordo com o que foi normatizado pelo DNER em 1964 (MEDINA; MOTTA, 2015; SOUZA, 1981). Dessa forma, para garantir que não haja uma ruptura precoce do pavimento,

Souza (1981) correlacionou os materiais das camadas do pavimento com as características que devem ser respeitadas, sendo apresentadas no Quadro 4 e determinou, ainda, faixas granulométricas em que devem estar enquadrados os materiais de base, expostas na Tabela 3.

Quadro 4 – Materiais das camadas do pavimento e suas características

Camadas	Características
Material de subleito	CBR \geq 2% Expansão menor que 2%
Material para reforço do subleito	CBR maior que o do subleito Expansão menor que 1%
Material para sub-base	CBR \geq 20% Expansão menor que 1% Índice de Grupo (IG) igual a zero.
Material para base	CBR \geq 80% Expansão menor que 0,5% LL \leq 25% IP \leq 6%

Fonte: DNIT (2006a).

Tabela 3 – Faixas granulométricas para materiais de base

Tipos	Para $N > 5 \times 10^6$			Para $N < 5 \times 10^6$			Tolerâncias da faixa de projeto
	A	B	C	D	E	F	
	% em peso passando						
2"	100	100	-	-	-	-	± 7
1"	-	75-90	100	100	100	100	± 7
3/8"	30-65	40-75	50-85	60-100	-	-	± 7
Nº 4	25-55	30-60	35-65	50-85	55-100	10-100	± 5
Nº 10	15-40	20-45	25-50	40-70	40-100	55-100	± 5
Nº 40	8-20	15-30	15-30	25-45	20-50	30-70	± 2
Nº 200	2-8	5-15	5-15	10-25	6-20	8-25	± 2

Fonte: DNIT (2006a).

Para a determinação do tráfego, Souza (1981), DNIT (2006a), Medina e Motta (2015) e Bezerra Neto (2004) propõem que o pavimento seja dimensionado em função do número equivalente (N) de operações de um eixo padrão de 8,2tf durante o período de projeto que foi determinado anteriormente. Para o cálculo do número N, empregue-se a equação:

$$N = 365 \times P \times V_m \times FV \times FR \quad (8)$$

Onde:

N – Número de operações do eixo padrão de 8,2tf;

P – Período do projeto, em anos;

V_m – Volume médio diário de tráfego durante a vida de projeto;

FV – Fator de veículo da frota;

FR – Fator climático regional (Adota-se FR=1,0).

Para o dimensionamento do pavimento, deve-se, inicialmente, determinar a espessura total do pavimento, sendo obtida pelo ábaco representado na Figura 29, onde relaciona o número N e o índice de suporte (CBR), obtendo-se a espessura total (Hm), em termos de material granular (K=1,00) (SOUZA, 1981; DNIT, 2006a).

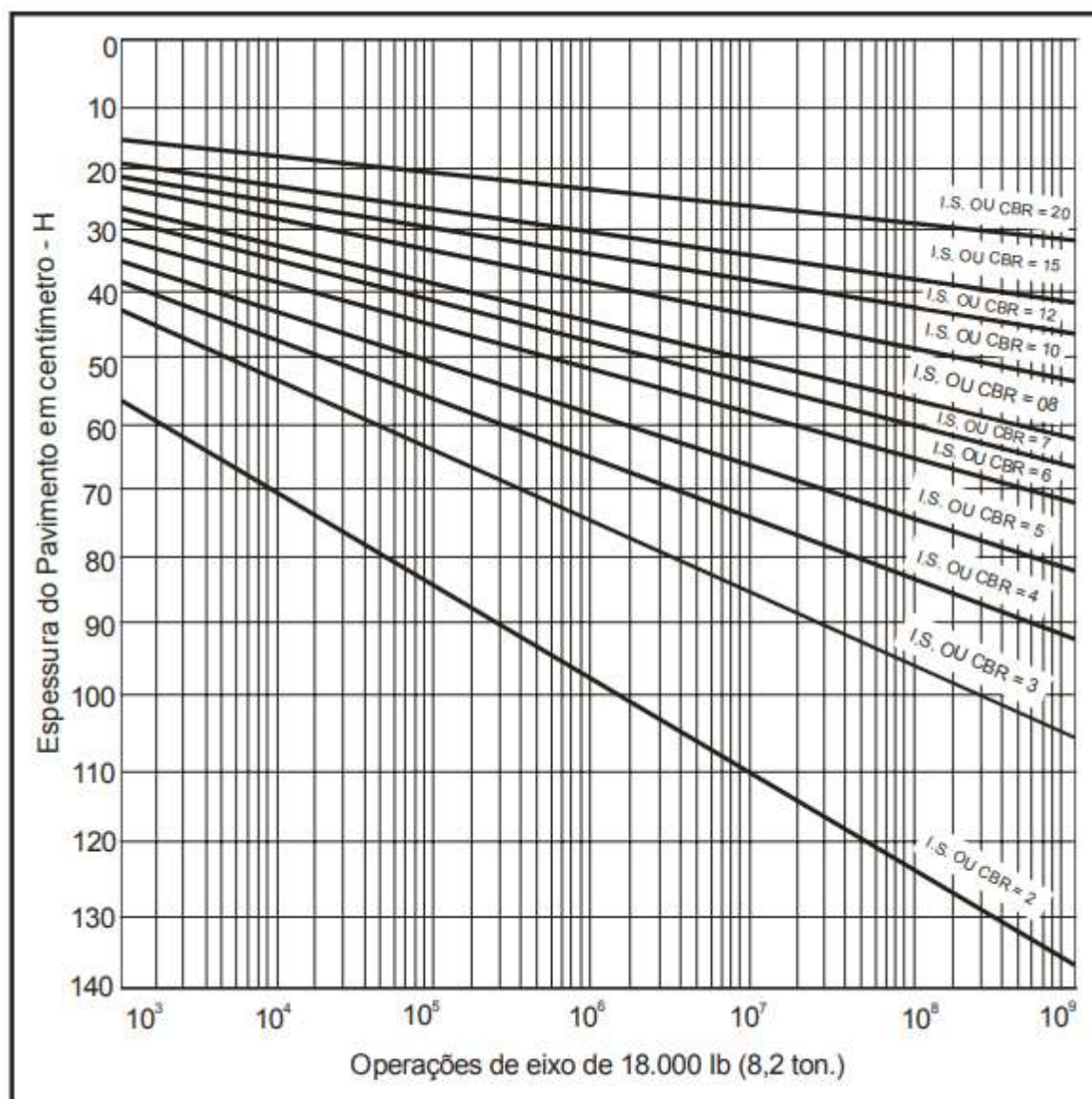
Após a determinação de Hm, define-se o tipo de revestimento e sua espessura (R) seguindo o Quadro 5 demonstrado a seguir, levando em consideração o valor do número N calculado.

Quadro 5 – Espessura da camada de revestimento do pavimento

N	Espessura Mínima de Revestimento Betuminoso
$N \leq 10^6$	Tratamentos superficiais betuminosos
$10^6 < N \leq 5 \times 10^6$	Revestimentos betuminosos com 5,0cm de espessura
$5 \times 10^6 < N \leq 10^7$	Concreto betuminoso com 7,5cm de espessura
$10^7 < N \leq 5 \times 10^7$	Concreto betuminoso com 10,0cm de espessura
$N > 5 \times 10^7$	Concreto betuminoso com 12,5cm de espessura

Fonte: DNIT (2006a).

Figura 29 – Ábaco para determinação de espessuras do pavimento



Fonte: DNIT (2006a).

Com os valores de H_m e R já encontrados, pode-se determinar o valor da espessura das camadas de base, sub-base e reforço de subleito, apenas aplicando as equações a seguir – que são equações obtidas por meio da Figura 30 - e utilizando o ábaco demonstrado anteriormente, com a observação de que essas espessuras devem ser, no mínimo, de 15 centímetros (DNIT, 2006a). Os coeficientes de equivalência são demonstrados na Tabela 4.

$$R \times K_R + B \times K_B \geq H_{20} \quad (9)$$

$$R \times K_R + B \times K_B + h_{20} \times K_S \geq H_n \quad (10)$$

$$R \times K_R + B \times K_B + h_{20} \times K_S + h_n \times K_{Ref} \geq H_m \quad (11)$$

Onde:

R – Espessura do revestimento;

K_R – Coeficiente de equivalência estrutural do revestimento;

B – Espessura da camada de base;

K_B – Coeficiente de equivalência estrutural da base;

H_{20} – Espessura do pavimento necessária para proteger a sub-base;

h_{20} – Espessura da camada de sub-base;

K_S – Coeficiente de equivalência estrutural da sub-base;

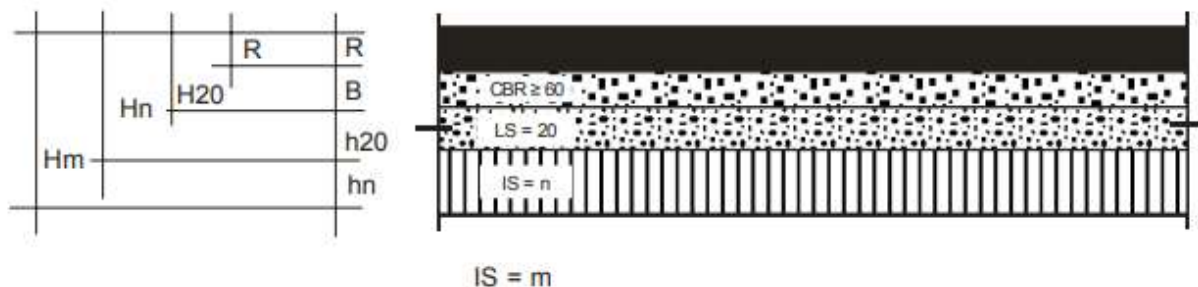
H_n – Espessura de pavimento necessária para proteger o reforço de subleito;

h_n – Espessura do reforço do subleito;

K_{Ref} – Coeficiente de equivalência estrutural do reforço de subleito;

H_m – Espessura total de pavimento que é necessária para proteger um subleito com $CBR = m\%$.

Figura 30 – Camadas do pavimento e suas correlações



Fonte: DNIT (2006a).

Tabela 4 – Coeficiente de equivalência estrutural

COMPONENTES DO PAVIMENTO	COEFIC. K
Base ou revestimento de concreto betuminoso	2,00
Base ou revestimento pré-misturado a quente, de graduação densa	1,70
Base ou revestimento pré-misturado a frio, de graduação densa	1,40
Base ou revestimento betuminoso por penetração	1,20
CAMADAS GRANULARES	1,00
Solo cimento com resistência à compressão a 7 dias, superior a 45kg/cm	1,70
Solo cimento com resistência à compressão a 7 dias, entre 45kg/cm e 28 kg/cm	1,40
Solo cimento com resistência à compressão a 7 dias, entre 28kg/cm e 21 kg/cm	1,20

Fonte: Adaptado de DNIT (2006a).

2.8.2 Método Mecânico-Empírico

A utilização de análises mecânicas apresenta a vantagem de proporcionar ao projetista condições de trabalhar com parâmetros específicos da estrutura em estudo, apresentando maior flexibilidade em relação aos métodos empíricos (DNIT, 2006b).

Para Bezerra Neto (2004), um método de dimensionamento mecânico é aquele que, por meio do uso de uma teoria, consegue prever as tensões e as deformações que são ocasionadas no pavimento por conta do clima em que está inserido e das ações provenientes do tráfego, buscando fazer compatibilizações com as tensões resistentes dos materiais.

De acordo com DNIT (2006b), outra vantagem desses modelos, em relação àqueles puramente empíricos, é a possibilidade de se otimizar o dimensionamento da estrutura, tomando-se partido da capacidade de cada camada em resistir aos processos de deterioração provocados pelas cargas do tráfego.

Ao adotar esse tipo de observação tem-se uma ideia do aspecto funcional da estrutura quando solicitada, o que pode dar lugar a modificações quanto à natureza dos materiais constituintes, bem como quanto às espessuras das camadas utilizadas no pavimento, de modo que o conjunto seja solicitado de forma equilibrada, sem que esforços demasiados atinjam uma das camadas e ocasione uma ruptura precoce da estrutura (BEZERRA NETO, 2004; MORAIS, 2014).

O guia da AASHTO (1986), descreve as seguintes vantagens de se utilizar um método mecânico no dimensionamento de pavimentos flexíveis:

- Melhor confiabilidade no projeto;
- Possibilidade de prever defeitos específicos;
- Possibilidade de extrapolação de resultados de laboratório e de campo;
- Maior compatibilização entre custo e benefício das obras;
- Possibilidade de prever as consequências de novas configurações de carregamento;
- Melhor utilização dos materiais disponíveis;
- Possibilidade de se considerar explicitamente os defeitos sazonais.

2.8.2.1 Método de Dimensionamento Nacional de Pavimentos – MeDiNa

O novo método de dimensionamento nacional de pavimentos flexíveis foi denominado MeDiNa em homenagem ao Professor Jacques de Medina, tendo sido um nome importante para o conhecimento de novas técnicas e para o avanço geral da pavimentação no Brasil. O programa foi desenvolvido pelo Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR) e pelo Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE), contando com contribuições do Centro de Pesquisas da Petrobrás (CENPES) e de universidades nacionais (FRANCO; MOTTA, 2018).

O MeDiNa é um suporte lógico que realiza a verificação de estruturas de pavimentos asfálticos e opera o dimensionamento mecanístico-empírico delas, realizando a análise desse sistema por meio do processamento dos cálculos matemáticos que são efetuados a partir da entrada de dados no *software*.

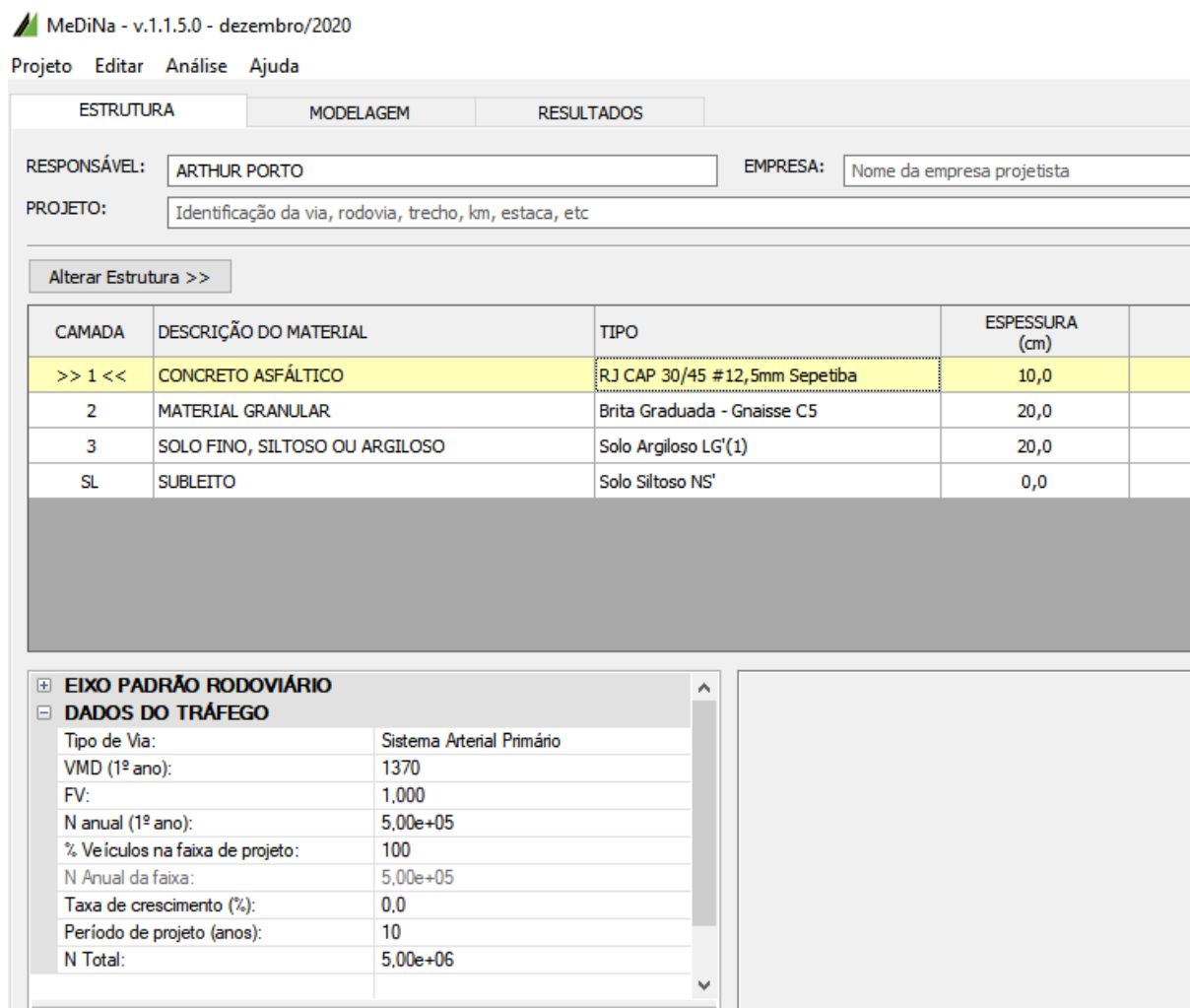
Para uma correta verificação da estrutura do pavimento, é importante que os materiais de suas camadas sejam conhecidos, assim como as informações peculiares de cada uma, como: módulo (em MPa) e deformação permanente. Além disso, a definição do número N – ou Número Equivalente de Eixos – é de fundamental importância para o correto funcionamento do programa, visto que o mesmo é sensível a pequenas variações de N, podendo apresentar resultados destoantes caso a estimativa desse número não seja muito apurada (FRANCO; MOTTA, 2018). A versão 1.1.0 é a inicial e data de outubro de 2018. No momento, encontra-se na versão 1.1.5, tendo sido atualizada em dezembro de 2020 e, portanto, será essa a utilizada neste trabalho.

A interface principal do *software* MeDiNa é dividida em abas com o objetivo de facilitar a navegação e identificar as características do pavimento. Essas abas são nomeadas de estrutura, modelagem e resultados, expostas na Figura 31. Na aba de estrutura é onde são inseridas as informações de identificação do projeto (rodovia, trecho, estaca, etc), dados da estrutura do pavimento (número de camadas, tipo e descrição do material utilizado, módulo, etc) e informações a respeito do tráfego. Além disso, há um painel onde o programa registra o resumo dos resultados dos dimensionamentos ou análises (FRANCO; MOTTA, 2018; SOUZA JÚNIOR, 2018).

Além disso, ainda na tela inicial, a estrutura apresentada é composta por quatro camadas: subleito, sub-base, base e revestimento. É possível alterar essa configuração no próprio programa, porém, permite-se um pavimento de, no máximo, oito camadas e, no mínimo, três (FRANCO; MOTTA, 2018). Os materiais que

compõem as camadas também podem ser modificados, tanto pelo cadastro de novos materiais - sendo necessário o preenchimento de informações específicas, a exemplo de: resistência, características físicas e deformação permanente – como pela utilização de vários tipos de materiais já catalogados na memória do programa (SOUZA JÚNIOR, 2018).

Figura 31 – Parte da interface principal do software MeDiNa



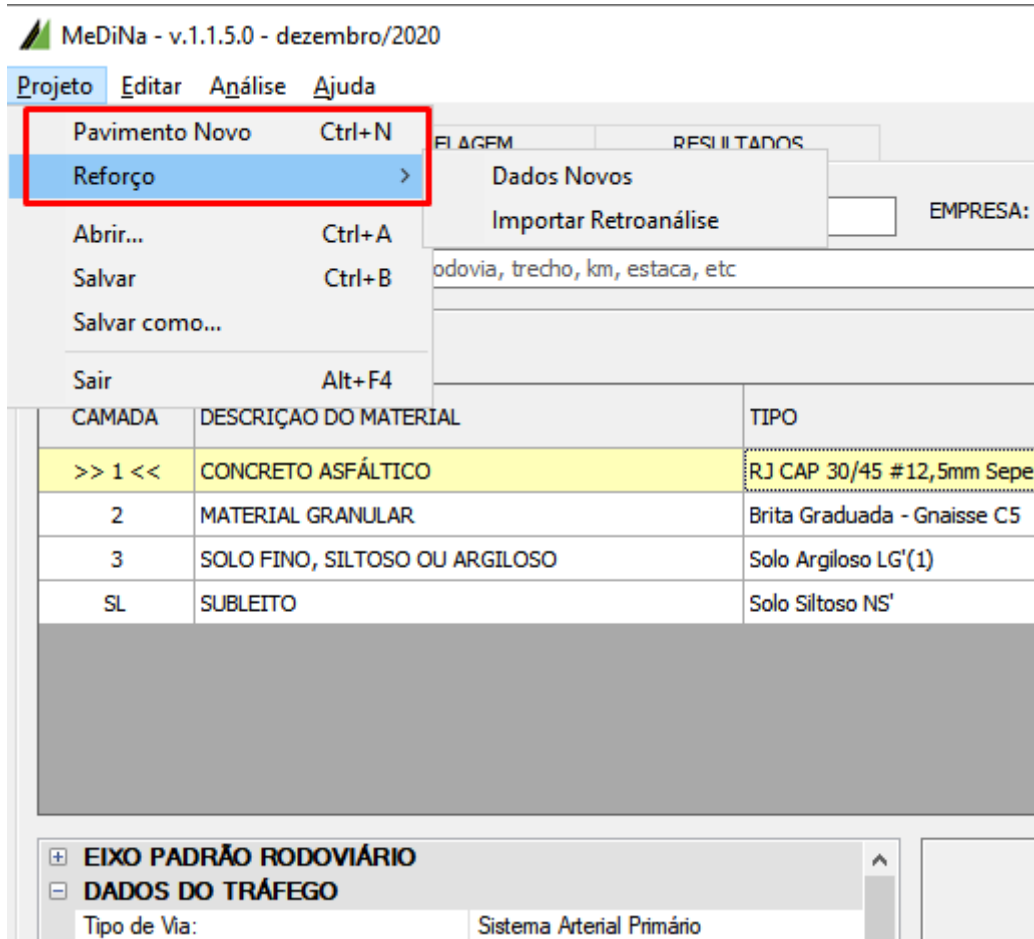
Fonte: Acervo do Autor (2021).

Antes que os dados do projeto sejam preenchidos, é necessário definir em qual modo o *software* tratará os dados informados. Na versão que está sendo utilizada para estudo, dois modos (Figura 32) estão disponíveis para serem selecionados:

- Pavimento novo: utiliza-se para a elaboração de projetos de pavimentos novos, onde as propriedades das camadas são obtidas por ensaios feitos em laboratório;

- Projeto de Reforço: utilizado para a elaboração do projeto de reforço do pavimento. Nesse modo, as propriedades das camadas existentes devem ser obtidas por meio de retroanálise de bacias deflectométricas.

Figura 32 – Local para seleção do tipo de projeto no software MeDiNa



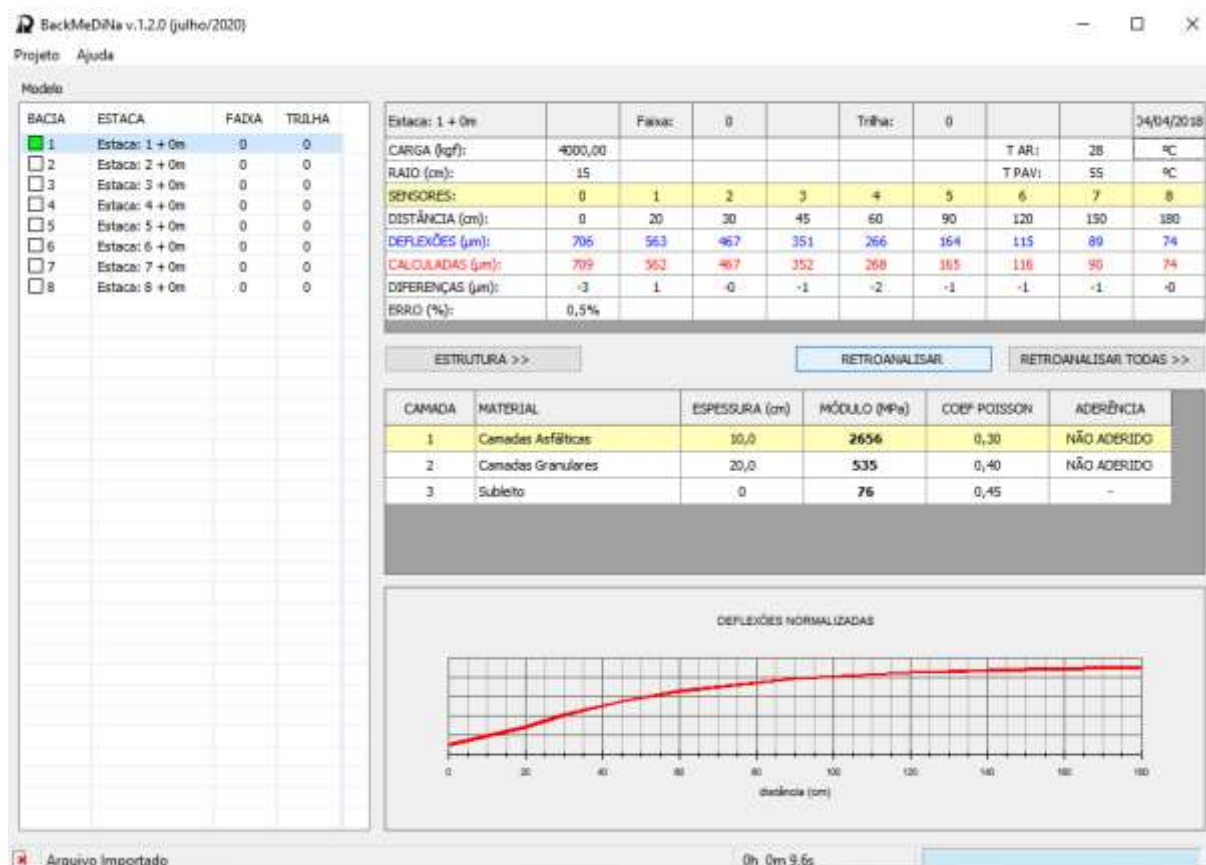
Fonte: Acervo do Autor (2021).

Caso a opção escolhida seja “Projeto de Reforço”, o *software* exige que a entrada de valores das bacias deflectométricas, que foram retroanalisadas por equipamento FWD, sejam inseridos. Pode-se realizar esse processo fazendo a importação desses dados por meio do BackMeDiNa ou preencher as informações de forma manual.

O BackMeDiNa é um programa computacional utilizado como componente do MeDiNa e que tem o objetivo de realizar a retroanálise dos módulos de resiliência das camadas de um pavimento, utilizando dados obtidos por FWD, das bacias deflectométricas. O *software* executa a comparação da raiz do valor quadrático médio das diferenças entre as medidas de deflexão de campo e as calculadas, buscando a

obtenção de uma bacia teórica que seja mais próxima da bacia de campo (FRANCO; MOTTA, 2018). A Figura 33 apresenta a interface do programa.

Figura 33 – Interface do programa BackMeDiNa



Fonte: Acervo do Autor (2021).

Segundo Franco e Motta (2018), o eixo utilizado nas análises e dimensionamento das estruturas do pavimento é o eixo padrão rodoviário de 8,2tf que está representado na Figura 34. Essa consideração foi definida baseando-se na comparação da área trincada da via com o número estimado de passagens do eixo padrão (FRANCO; MOTTA, 2018; SOUZA JÚNIOR, 2018).

Além disso, o *software* tem a capacidade para calcular, de forma automática, o número N, bastando que sejam informados os dados de volume médio diário (VMD) e o fator de veículo (FV). Porém, caso o projetista já tenha o valor anual do número N, pode digitá-lo no espaço correspondente dentro da caixa demonstrada na Figura 35.

Figura 34 – Eixo padrão rodoviário de 8,2tf



Fonte: Franco e Motta (2018).

Figura 35 – Espaço apropriado para informar o número N no software MeDiNa

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

Projeto novo

Fonte: Acervo do Autor (2021).

Além de todos os dados explanados que devem ser inseridos, é necessário que se informe o tipo de via que será analisado ou dimensionado. Os tipos é que definem o critério de parada do dimensionamento, assim como os graus de confiabilidade das análises realizadas pelo programa. Esses tipos foram definidos de acordo com a hierarquia dos sistemas funcionais publicadas pelo DNIT (FRANCO; MOTTA, 2018). A Tabela 5 a seguir demonstra a síntese das vias: seus critérios e confiabilidade.

Tabela 5 – Critérios de parada e nível de confiabilidade dos tipos de vias (continua)

Tipo de via	Confiabilidade	Área trincada	Deformação permanente
Sistema Arterial Principal	95%	30%	10mm
Sistema Arterial Primário	85%	30%	13mm
Sistema Arterial Secundário	75%	30%	20mm

Tabela 5 – Critérios de parada e nível de confiabilidade dos tipos de vias (continuação)

Tipo de via	Confiabilidade	Área trincada	Deformação permanente
Sistema Coletor Primário	85%	30%	13mm
Sistema Coletor Secundário	75%	30%	20mm
Sistema Local	65%	30%	20mm

Fonte: Franco e Motta (2018).

O dimensionamento dos pavimentos pode ser realizado após inserido todos os dados da estrutura e do tráfego, bastando clicar a tecla F2, ou ir no menu Análise e clicar na função Dimensionar. O pavimento também pode ser analisado, tendo que efetuar procedimento semelhante ao dimensionamento, diferindo apenas na tecla a ser clicada, nesse caso, a F2 (SOUZA JÚNIOR, 2018). A análise realiza os cálculos e verifica os critérios de área trincada e/ou deformação permanente de acordo com o tipo de via escolhido. Franco e Motta (2018), explicitam que, no final, o *software* apresenta um relatório que pode ser acessado e avaliado pelo projetista na aba resultados, sendo disponibilizado nas seguintes opções:

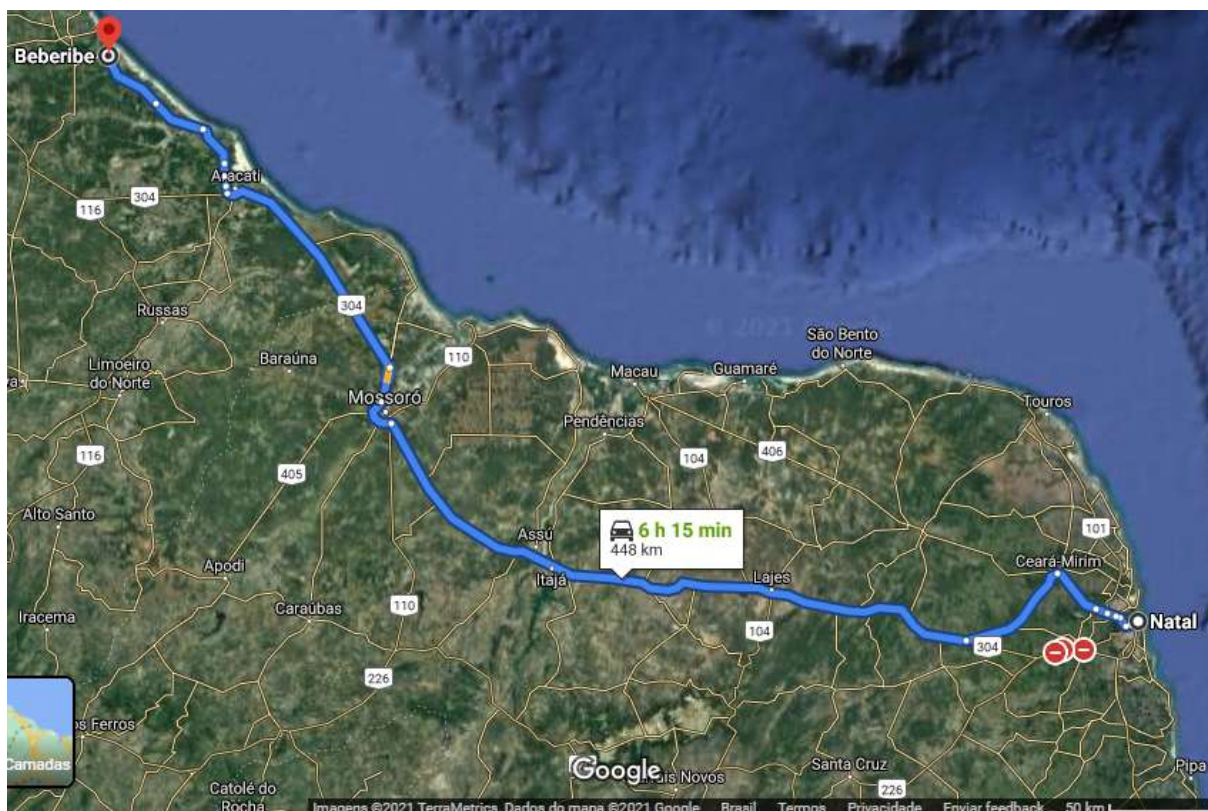
- Evolução Mensal de Danos: apresenta os resultados do comportamento da estrutura em relação à área trincada e deformação permanente total;
- Resumo de Deformação Permanente: apresenta os resultados, de forma resumida, da deformação permanente na estrutura ao fim do período de projeto;
- Bacias de Deflexão: apresenta as bacias de deflexão no topo de cada uma das camadas do pavimento e no topo do subleito;
- Relatório Completo de Análise: apresenta todas as informações utilizadas no dimensionamento ou na análise da estrutura.

3 METODOLOGIA

O presente trabalho tem o objetivo de obter, por retroanálise, o módulo de resiliência das camadas e de analisar e comparar dois métodos de dimensionamento de pavimentos flexíveis utilizados no Brasil: o método tradicional (empírico) e o Novo Método de Dimensionamento Nacional de Pavimentos Flexíveis (MeDiNa), classificando-o como uma pesquisa de teor exploratório e quantitativo, tendo em conta os dados apresentados pelos trechos estudados. Para isso, adotou-se a rodovia BR-304 para a obtenção de resultados.

A BR-304 é a estrada que liga as pontas leste e oeste do estado do Rio Grande do Norte (RN) até a fronteira com o Ceará. A estrada percorre cidades e é o caminho central para estradas secundárias. Essa rodovia é o principal caminho das cargas de frutas produzidas na região do Vale do Açu, no oeste de RN, que vão até a Europa por meio do porto de Natal. O trecho da rodovia em questão utilizado no estudo, exposto na Figura 36, dispõe de, aproximadamente, 150 quilômetros de extensão, entretanto, para a realização desse trabalho, foram utilizados apenas 5 quilômetros para a obtenção de resultados, partindo do Km 274 e indo até o Km 278. O trecho estudado tem pista simples com acostamento em ambos os sentidos da via e seu revestimento superficial é composto de Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ) como mostrado na Figura 37.

Figura 36 - Representação do trecho da BR-304 entre Beberibe/CE e Natal/RN



Fonte: Google Maps (2021).

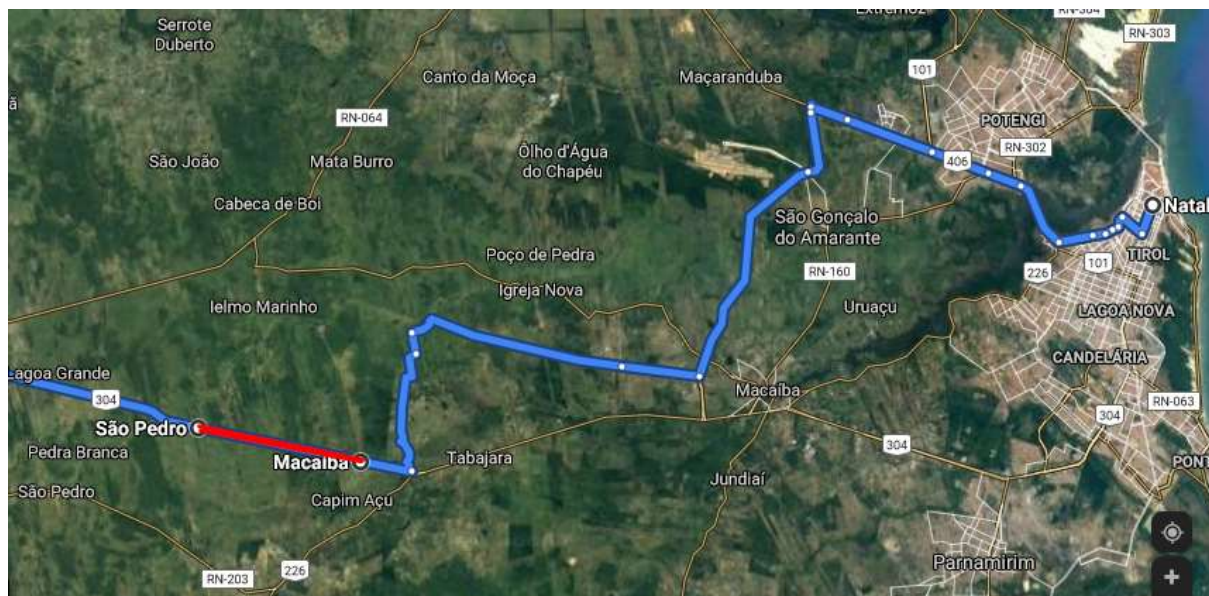
Figura 37 – Características do trecho em estudo



Fonte: Google Maps (2021).

Na Figura 38, em vermelho, está representado o trecho de cinco quilômetros que foi utilizado para a obtenção de resultados para o trabalho em questão.

Figura 38 – Representação dos cinco quilômetros da rodovia utilizados no estudo



Fonte: Google Maps (2021).

3.1 Descrição das etapas

A descrição das etapas desenvolvidas no presente trabalho encontra-se descrita nos itens a seguir:

3.1.1 Revisão bibliográfica

Inicialmente, realizou-se uma pesquisa bibliográfica a respeito de avaliação estrutural do tipo não-destrutiva, retroanálise, módulo de resiliência, método de dimensionamento e defeitos estruturais que se fazem presentes nos pavimentos flexíveis. Toda essa pesquisa foi de suma importância para proporcionar a fundamentação teórica que se faz necessária para o desenvolvimento do estudo.

3.1.2 Dados do ensaio

Para a coleta dos dados que serão utilizados nesse estudo, foi priorizada a utilização de trechos que usaram o equipamento FWD para a obtenção dos dados relativos a estrutura do pavimento da BR-304. O equipamento de FWD utilizado dispõe de sete sensores que distam, respectivamente, 0cm, 20cm, 30cm, 45cm, 60cm, 90cm e 150cm do eixo vertical de aplicação da carga para a obtenção dos valores das deflexões da bacia deflectométrica. A carga utilizada foi a correspondente a um eixo padrão tipo de 8,2tf.

3.1.3 Dados de tráfego

Para a obtenção dos dados de tráfego da rodovia utilizou-se o banco de informações do DNIT, por meio da sua plataforma online, que fornece a Pesquisa Nacional de Contagem de Tráfego (PNCT). Para a determinação do número N, foram considerados os dados da PNCT realizada no ano de 2017, entre os dias 01/07/2017 a 07/07/2017, para a BR-304, no km 191, no estado do Rio Grande do Norte (RN).

No período em questão, obteve-se o volume diário de veículos que utilizaram a rodovia, sendo apresentado na Tabela 6 a seguir.

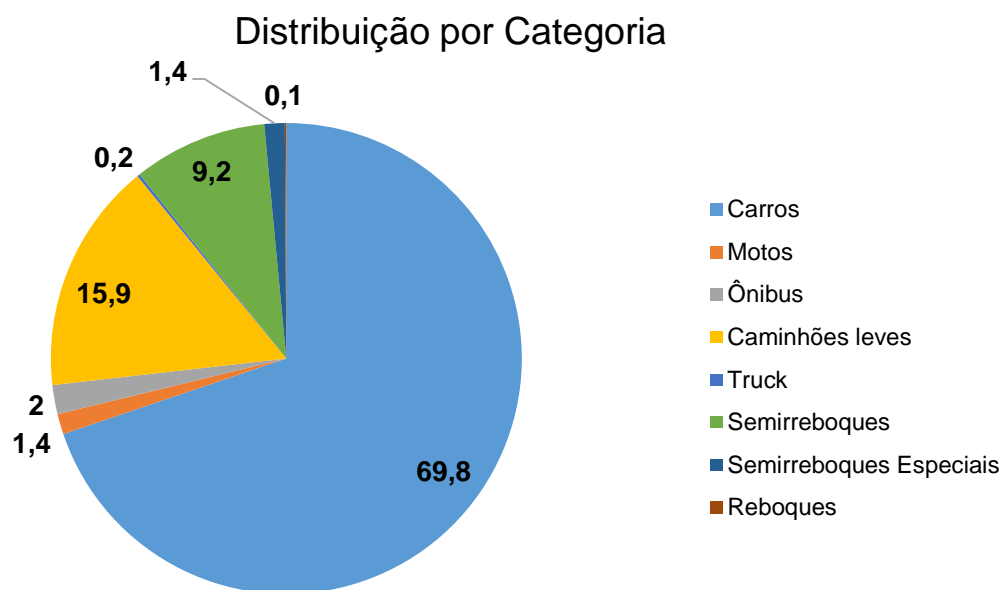
Tabela 6 – Volume diário da Br-304, no km 191

DIA	VOLUME DIÁRIO
01/07	4287
02/07	4316
03/07	5004
04/07	4548
05/07	4537
06/07	4864
07/07	5471

Fonte: Adaptado de DNIT (2017).

Esses números apresentados levam em consideração todo e qualquer tipo de veículo que transitou na rodovia durante esse período. No Gráfico 3 a seguir, estão os percentuais das classes de veículos passantes.

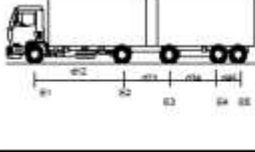

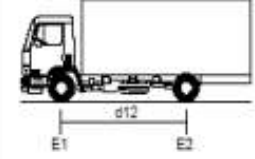
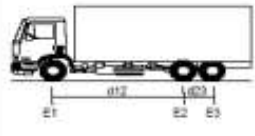
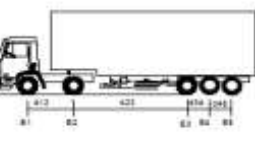
Gráfico 3 – Percentuais de veículos passantes na BR-304



Fonte: Adaptado de DNIT (2017).

Do total, tem-se que, aproximadamente, 71% do modo de transporte utilizado é correspondente a soma dos percentuais de carros e motos, não sendo contabilizados no cálculo do número N. Para o cálculo, levou-se em consideração o percentual de 29% que corresponde aos ônibus, caminhões leves, truck, semirreboques, semirreboques especiais e reboques. O DNIT classifica os tipos de veículos do estudo de acordo com a Figura 39 a seguir.

Figura 39 – Classificação e nomenclatura de acordo com o tipo do veículo

SILHUETA	Nº DE EIXOS	PBT/CMT MÁX.(t)	CARACTERIZAÇÃO	CLASSE
	5	43(45,2)	CAMINHÃO + REBOQUE E1 = ES, RS, CM 6t E2 = ED, RD, CM 10t E3 = ED, RD, CM 10t E4E5 = TD, CM 17t d12, d23, d34 > 2,40m 1,20m < d45 ≤ 2,40m	2C3
	2	16(16,8)	ÔNIBUS E1 = ES, RS, CM 6t ou a capacidade declarada pelo fabricante do pneumático E2 = ED, RD, CM 10t d12 ≤ 3,50m	2CB
	2	16(16,8)	CAMINHÃO E1 = eixo simples (ES), rodagem simples (RS), carga máxima (CM) = 6t ou capacidade declarada pelo fabricante do pneumático E2 = ES, rodagem dupla (RD), CM = 10t d12 ≤ 3,50m	2C
	3	23(24,2)	CAMINHÃO TRUCADO E1 = ES, RS, CM = 6t E2E3 = ES, conjunto de eixos em tandem duplo TD, CM = 17t d12 > 2,40m 1,20m < d23 ≤ 2,40m	3C
	5	41,5(43,6)	CAMINHÃO TRATOR + SEMI REBOQUE E1 = ES, RS, CM 6t E2 = ED, RD CM10t E3E4E5 = TT, CM 25,5t d12, d23 > 2,40m 1,20m d34, d45 ≤ 2,40m	2S3

Fonte: DNIT (2006a).

Desse modo, o volume diário foi calculado multiplicando os valores da Tabela 6 pelo percentual de 29%, retornando os valores apresentados na Tabela 7. Com a obtenção dos novos valores, foi possível calcular o volume médio diário (VMD), tendo números finais de 1368.

Tabela 7 – Volume diário adaptado (continua)

DIA	VOLUME DIÁRIO
01/07	1243
02/07	1252

Tabela 7 – Volume diário adaptado (continuação)

DIA	VOLUME DIÁRIO
03/07	1451
04/07	1319
05/07	1316
06/07	1411
07/07	1587
VMD	1368

Fonte: Elaborado pelo Autor (2021).

Para o cálculo do fator de veículo (FV), utilizou-se o *software* MeDiNa, inserindo os tipos de eixos de cada classe de veículo e o fator de eixo, em percentual, correspondente a cada tipo. Além disso, o Fator de Carga (FC) utilizado para o cálculo do número N foi o valor de carga por eixo sem excesso legal, ou seja, sem a adição de 12,5% sobre o peso do eixo. Após a inserção dos dados, o valor de FV obtido foi de 4,372. O descrito acima está exposto na Figura 40.

Com todos esses valores em mãos, foi dada entrada no software para que o número N pudesse ser calculado de forma definitiva. As informações utilizadas para o cálculo de N estão expostas a seguir:

- Tipo de via: Sistema Arterial Principal;
- VMD: 1359;
- FV: 4,372;
- Taxa de crescimento exponencial anual: 2,0%
- Período de projeto: 10 anos.

3.1.4 Parâmetros das camadas do pavimento

Para que os dados possam ser comparados de forma mais objetiva e diante da dificuldade encontrada em obter-se a classificação e a caracterização dos materiais utilizados na base, sub-base e reforço do pavimento, adotaram-se, como dados de projeto, os seguintes valores de CBR para cada camada da estrutura do pavimento de acordo com o Quadro 4 já apresentado. Os valores adotados estão explícitos no Quadro 6.

Quadro 6 – Estrutura do pavimento utilizada no estudo

Camada	CBR	Estimativa de MR
Revestimento	-	9000 MPa
Base	85%	350 Mpa
Sub-base	40%	500 Mpa
Reforço de subleito	7%	150 Mpa
Subleito	3%	-

Fonte: Elaborado pelo Autor (2021).

Além desses valores, o subleito será testado também com CBR de 6% e 10%. O material utilizado no revestimento será o Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ), a base e a sub-base serão de material granular e o reforço será de solo fino, ou seja, não-granular.

3.1.5 Parâmetros para retroanálise

Para a realização do procedimento de retroanálise do pavimento, utilizou-se o *software* BACKCAP, desenvolvido pelo Laboratório de Mecânica dos Pavimentos da Universidade Federal do Ceará (UFC), adotando uma tolerância de erro de 5% e o total de 10 interações por cada quilômetro estudado da rodovia.

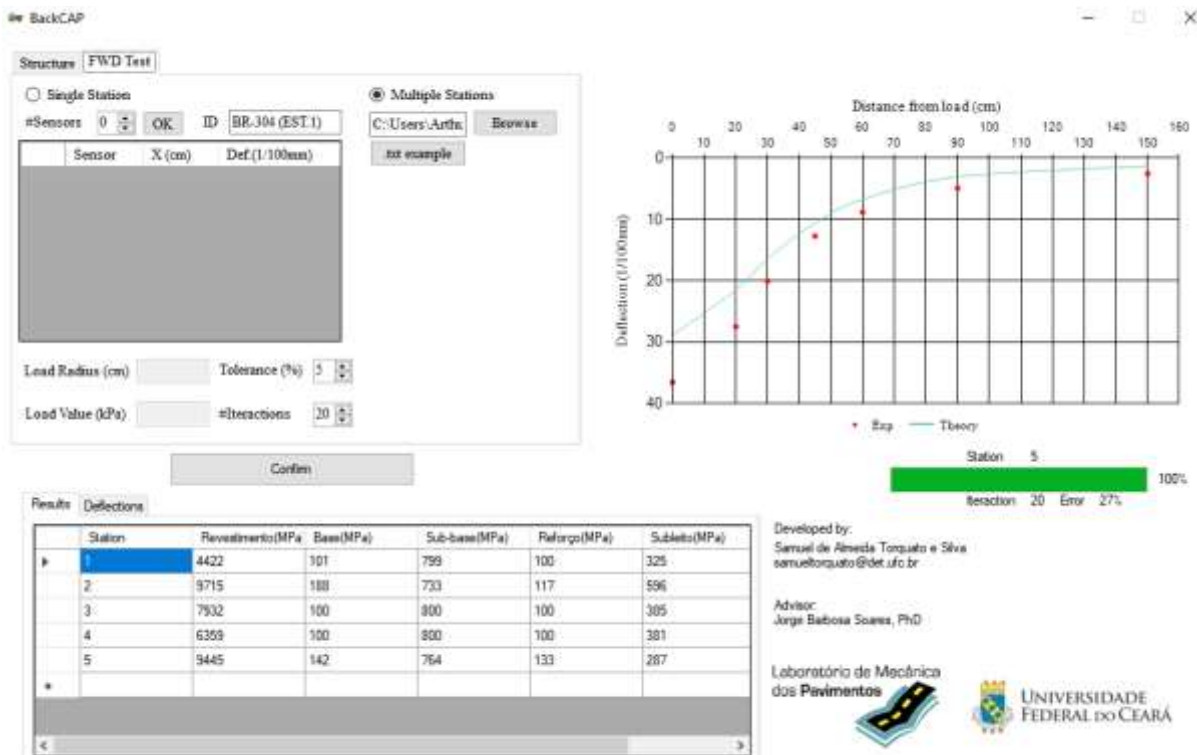
O BACKCAP tem uma interface mais limpa, compreensível, intuitiva, fácil de manusear e de inserir dados. Além de que não são precisos arquivos de grande extensão para conseguir extrair resultados do programa, sendo necessário apenas um arquivo .txt para gerar as interações, por esses motivos, optou-se pelo uso do desse *software* e não do BackMedina.

Os dados de ensaio do FWD foram obtidos por meio de uma planilha que fornecia as informações de deflexões em cada sensor do equipamento. Utilizou-se uma média aritmética do valor da deflexão, para cada um dos cinco quilômetros

estudados, para cada sensor, objetivando a obtenção do MR das camadas do pavimento.

Após fornecido o resultado do MR, utilizou-se o MeDiNa para análise do estado da estrutura. A seguir, na Figura 42, é apresentada a interface do programa.

Figura 42 – Interface do BACKCAP



Fonte: Acervo do Autor (2021).

3.1.6 Proposições para obtenção dos resultados

- Dimensionar o pavimento segundo o método empírico de dimensionamento de pavimentos flexíveis utilizado pelo DNIT;
- Dimensionar o pavimento pelo método mecanístico-empírico, por meio do *software* MeDiNa, utilizando as espessuras das camadas encontradas na aplicação do método empírico;
- Comparação dos métodos entre si;
- Realizar a retroanálise do pavimento com o BACKCAP;
- Utilizar o MR de cada camada obtido na retroanálise na análise da estrutura do pavimento utilizando o *software* MeDiNa.

4 RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados do dimensionamento do pavimento pelo CBR das camadas e as análises do dimensionamento da estrutura do pavimento realizado com o *software* MeDiNa que, posteriormente, serão comparados entre si. Além disso, será apresentado o estudo da retroanálise do pavimento.

4.1 Dimensionamento do pavimento com CBR

Como foi anteriormente apresentado, o número N utilizado para a obtenção da espessura das camadas do pavimento pelo método empírico foi de $2,39 \times 10^7$ e o CBR das camadas que serão dimensionadas foi apresentado no Quadro 6.

O primeiro passo realizado foi determinar o valor da espessura do revestimento asfáltico que está diretamente ligado com o número N. Dito isso, utilizando o Quadro 5 já exibido, obteve-se que o revestimento terá a espessura de 10 centímetros de concreto betuminoso.

O segundo passo foi determinar o valor da espessura da camada de base do pavimento. Para isso, utilizaram-se o ábaco da Figura 27 juntamente com o CBR da sub-base de 40% e a equação 9 com o valor das espessuras de R e H_{20} e com os coeficientes de equivalência estrutural das camadas. É importante salientar que o CBR utilizado no ábaco para a obtenção de H_{20} foi de 20%, pois é o valor máximo apresentado no ábaco.

$$\begin{aligned} R \times K_R + B \times K_B &\geq H_{20} && (9) \\ 10 \times 2 + B \times 1 &\geq 28 \\ 20 + B &\geq 28 \\ B &\geq 8cm \end{aligned}$$

Após a aplicação da equação, obteve-se que o valor da espessura da camada de base teria que ser maior ou igual a 8 centímetros, como a norma pede que a espessura construtiva mínima das camadas seja de 15 centímetros, adotou-se o valor da espessura da base como sendo de 15 centímetros.

O terceiro passo foi determinar o valor da espessura da camada de sub-base do pavimento. Para isso, utilizaram-se o ábaco da Figura 27 juntamente com o CBR do reforço de 7% e a equação 10 com o valor das espessuras de R, B e H_n e com os coeficientes de equivalência estrutural das camadas.

$$R \times K_R + B \times K_B + h_{20} \times K_S \geq H_n \quad (10)$$

$$10 \times 2 + 15 \times 1 + h_{20} \times 1 \geq 55$$

$$20 + 15 + h_{20} \geq 55$$

$$35 + h_{20} \geq 55$$

$$h_{20} \geq 20cm$$

Após a aplicação da equação, obteve-se que o valor da espessura da camada de sub-base teria que ser maior ou igual a 20 centímetros. Adotou-se o valor da espessura da sub-base como sendo de 20 centímetros.

O quarto passo foi determinar o valor da espessura da camada de reforço de subleito do pavimento. Para isso, utilizaram-se o ábaco da Figura 27 juntamente com o CBR do subleito de 3% e a equação 11 com o valor das espessuras de R, B, h_{20} e H_m e com os coeficientes de equivalência estrutural das camadas.

$$R \times K_R + B \times K_B + h_{20} \times K_S + h_n \times K_{Ref} \geq H_m \quad (11)$$

$$10 \times 2 + 15 \times 1 + 20 \times 1 + h_n \times 1 \geq 90$$

$$20 + 15 + 20 + h_n \geq 90$$

$$55 + h_n \geq 90$$

$$h_n \geq 35cm$$

Após a aplicação da equação, obteve-se que o valor da espessura da camada de reforço de subleito do pavimento teria que ser maior ou igual a 35 centímetros. Adotou-se o valor da espessura do reforço de subleito como sendo de 35 centímetros.

Então, pelo método de dimensionamento empírico, utilizando CBR, obteve-se as espessuras das camadas do pavimento, sendo apresentadas, em resumo, no Quadro 7.

Quadro 7 – Resumo do valor das espessuras das camadas do pavimento pelo CBR

CAMADA	ESPESSURA
Revestimento	10cm
Base	15cm
Sub-base	20cm
Reforço de Subleito	35cm

Fonte: Elaborado pelo Autor (2021).

Além do exposto, foram dimensionadas as espessuras das camadas para o subleito de CBR 6% e de CBR 10%. Como resultado, em ambos os casos, o revestimento ficou com a espessura de 10 centímetros, a base com 15 centímetros, a sub-base com 20 centímetros e o reforço de subleito ficou com 15 centímetros.

4.2 Dimensionamento do pavimento com MeDiNa

Para que seja possível uma análise entre métodos, optou-se por utilizar as espessuras das camadas obtidas pelo método anterior como parâmetro para efetuar o dimensionamento pelo *software*. A partir disso, poderemos concluir qual dos métodos é o mais confiável e que melhor se adequa às exigências do tráfego. Para isso, as seguintes considerações foram feitas para o trecho em estudo:

- Período de projeto de 10 anos;
- Taxa de crescimento do tráfego de veículos de 2,0% ao ano;
- 100% dos veículos na faixa de projeto;
- Classificação da via em sistema arterial principal com um grau de confiabilidade de 95%;
- Para o tipo de via que está sendo analisado, o MeDiNa estabelece o valor máximo de 30% para a área trincada.

O primeiro passo foi montar a estrutura do pavimento constituída pelo revestimento, base, sub-base, reforço de subleito e subleito, suas espessuras e as respectivas caracterizações dos materiais utilizados em cada camada. Para efeito de análise, optou-se por utilizar os tipos já existentes no banco de dados do programa para realizar essa caracterização dos materiais.

O Quadro 8 a seguir demonstra as camadas, a caracterização escolhida do material de cada uma, a espessura e o valor respectivo do MR em MPa e a Figura 43 apresenta a configuração das camadas no MeDiNa.

Quadro 8 – Caracterização das camadas

CAMADA	TIPO	ESPESSURA	MR (MPa)
Revestimento	RJ CAP 50/70 #19,1mm Sepetiba	10cm	9588
Base	Solo Brita – M4 (NG's:1494)	15cm	433
Sub-base	Brita Graduada – Gnaisse C5	20cm	381
Reforço de Subleito	Solo Arenoso Fino LA'	35cm	494
Subleito	Solo Siltoso NS'	0cm	189

Fonte: Elaborado pelo Autor (2021).

Figura 43 – Configuração das camadas no MeDiNa

ESTRUTURA MODELAGEM RESULTADOS

RESPONSÁVEL: EMPRESA:

PROJETO:

CAMADA	DESCRIÇÃO DO MATERIAL	TIPO	ESPESSURA (cm)
>> 1 <<	CONCRETO ASFÁLTICO	RJ CAP 50/70 #19,1mm Sepetiba	10,0
2	MATERIAL GRANULAR	Solo Brita - M4 (NG' s: 1494)	15,0
3	MATERIAL GRANULAR	Brita Graduada - Gnaisse C5	20,0
4	SOLO FINO, SILTOSO OU ARGILOSO	Solo Arenoso Fino LA'	35,0
SL	SUBLEITO	Solo Siltoso NS'	0,0

Fonte: Acervo do Autor (2021).

O segundo passo, após realizado o processo acima, foi utilizar o comando de Avaliar a estrutura, por meio do clique na tecla F3, para analisar a estrutura com os valores das espessuras das camadas descritas anteriormente. Ao concluir a verificação, o programa retornou o parecer de que a estrutura apresentou uma área trincada de 99,0%, ficando acima do limite máximo de 30% de área trincada que é permitido na camada de revestimento pelo *software*. O descrito acima está apresentado nas Figuras 44 e 45.

Figura 44 – Resultado do dimensionamento no MeDiNa (1)

MeDiNa - v.1.1.5.0 - dezembro/2020

Projeto Estrutura Análise Ajuda

ESTRUTURA MODELAGEM RESULTADOS

RESPONSÁVEL: ARTHUR PORTO EMPRESA: Nome da empresa projetista

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

Alterar Estrutura >>>

CAMADA	DESCRIÇÃO DO MATERIAL	TIPO	ESPESSURA (cm)	MÓDULO (MPa)	COEFICIENTE DE POISSON
>> 1 <<	CONCRETO ASFÁLTICO	RJ CAP 50/70 #19, 3mm Sepeliba	10,0	9588	0,30
2	MATERIAL GRANULAR	Solo Brita - M4 (NG' e 1494)	15	433	0,35
3	MATERIAL GRANULAR	Brita Graduada - Gnasse C5	20,0	381	0,35
4	SOLO FINO, SILTOSO OU ARGILOSO	Solo Arenoso Fino LA'	35,0	494	0,45
SL	SUBLEITO	Solo Siltoso NS'	0,0	389	0,45

EIXO PADRÃO RODOVIÁRIO

DADOS DO TRÁFEGO

Tipo de Via:	Sistema Arterial Principal
VMD (1º ano):	1368
FV:	4,372
N anual (1º ano):	2,18e+06
% Veículos na faixa de projeto:	100
N Anual da faixa:	2,18e+06
Taxa de crescimento (%):	2,0
Período de projeto (anos):	10
N Total:	2,39e+07

N Total:
Número Equivalente total de passagens do eixo padrão na faixa de projeto

--- ANÁLISE DO PAVIMENTO NOVO ---
Seção do pavimento analisada considerando os dados inseridos pelo Engenheiro Projetista no programa MeDiNa.
Nível de confiabilidade da análise: 95%
Área Trincada Estimada do pavimento no fim do período: 99,0%
Afundamento de Trilha de Roda: 6,2mm

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

Fonte: Acervo do Autor (2021).

Figura 45 – Resultado do dimensionamento no MeDiNa (2)

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

Nível de confiabilidade da análise: 95%
Área Trincada Estimada do pavimento no fim do período: 99,0%
Afundamento de Trilha de Roda: 6,2mm

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

Fonte: Acervo do Autor (2021).

Observando os resultados da análise da estrutura mais a fundo, por meio dos relatórios disponibilizados pelo *software*, pode-se constatar, na Figura 46, que no mês 30, o revestimento atinge o percentual de área trincada de 29,37%, ficando bem próximo dos 30% permitidos pelo MeDiNa. Já no mês 31, o percentual sobe para 30,69%, ultrapassando o valor aceitável do programa.

Figura 46 - Resultado do dimensionamento no MeDiNa (3)

MeDiNa - v.1.1.5.0 - dezembro/2020

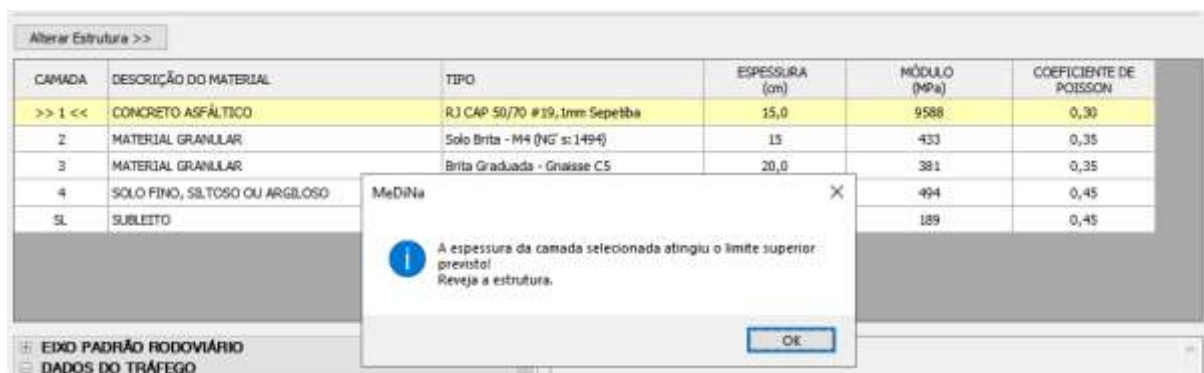
Projeto Editar Análise Ajuda

ESTRUTURA		MODELAGEM		RESULTADOS	
Danos Mensais		ATR		Bacias de campo	
Danos Mensais		ATR		Completo	
Mês	N equiv	ÁREA TRINCADA (%)	ATR (mm)		
1	1,803e+05	3,05%	4,39		
2	3,608e+05	4,02%	4,61		
3	5,417e+05	4,82%	4,74		
4	7,229e+05	5,53%	4,84		
5	9,043e+05	6,22%	4,91		
6	1,086e+06	6,89%	4,97		
7	1,268e+06	7,55%	5,03		
8	1,451e+06	8,22%	5,08		
9	1,633e+06	8,91%	5,12		
10	1,816e+06	9,60%	5,16		
11	1,999e+06	10,32%	5,19		
12	2,183e+06	11,06%	5,22		
13	2,367e+06	11,82%	5,25		
14	2,551e+06	12,60%	5,28		
15	2,736e+06	13,41%	5,31		
16	2,920e+06	14,25%	5,33		
17	3,105e+06	15,12%	5,36		
18	3,291e+06	16,02%	5,38		
19	3,477e+06	16,95%	5,40		
20	3,663e+06	17,92%	5,42		
21	3,849e+06	18,91%	5,44		
22	4,036e+06	19,94%	5,46		
23	4,222e+06	21,00%	5,47		
24	4,410e+06	22,10%	5,49		
25	4,597e+06	23,22%	5,51		
26	4,785e+06	24,39%	5,52		
27	4,973e+06	25,58%	5,54		
28	5,162e+06	26,81%	5,55		
29	5,351e+06	28,07%	5,57		
30	5,540e+06	29,37%	5,58		
31	5,729e+06	30,69%	5,59		
32	5,919e+06	32,05%	5,61		

Fonte: Acervo do Autor (2021).

O terceiro passo executado foi a tentativa de redimensionar a camada de revestimento asfáltico por meio do comando Dimensionar, clicando na tecla F2. O *software* retornou o alerta de que a espessura da camada de revestimento havia atingido o limite superior previsto de 15 centímetros. A Figura 47 demonstra o ocorrido acima.

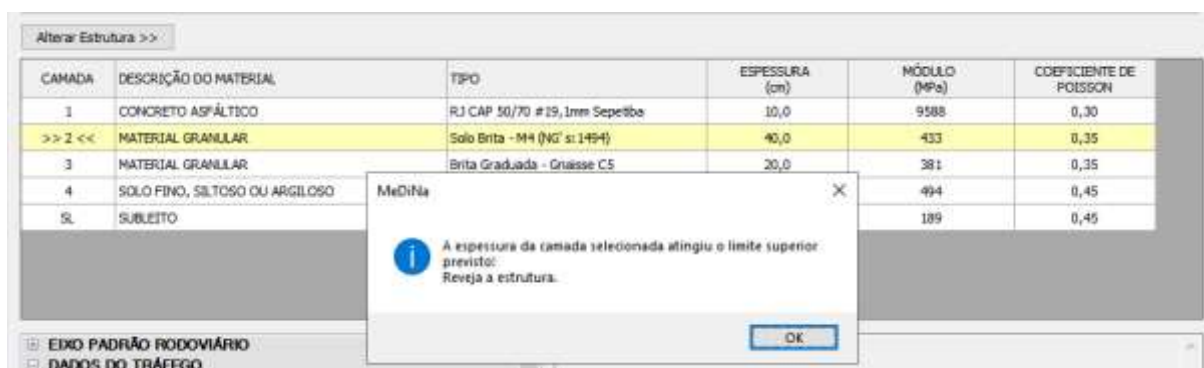
Figura 47 – Alerta relativo ao redimensionamento da camada de revestimento



Fonte: Acervo do Autor (2021).

O quarto passo executado foi a tentativa de redimensionar a camada de base por meio do comando Dimensionar, clicando na tecla F2. O *software* retornou o alerta de que a espessura da camada de base havia atingido o limite superior previsto de 40 centímetros. A Figura 48 demonstra o ocorrido acima.

Figura 48 - Alerta relativo ao redimensionamento da camada de revestimento



Fonte: Acervo do Autor (2021).

O quinto passo executado foi a tentativa de redimensionar as camadas de sub-base e reforço de subleito por meio do comando Dimensionar, clicando na tecla F2. O *software* retornou o mesmo alerta das vezes anteriores, relatando que as espessuras das camadas haviam atingido o limite superior previsto de 40 centímetros para cada uma.

Seguidamente ao exposto, foi repetido todo o processo para o teste das camadas com as espessuras obtidas no dimensionamento com o subleito de CBR 6% e 10%. Como resultado, o mesmo que ocorreu com o subleito de 3% foi observado nos novos valores de CBR para o subleito, tanto na análise da estrutura, alegando

uma área trincada de revestimento de 99,0% ao final do tempo de projeto, quanto no dimensionamento, retornando o alerta de que as espessuras das camadas granulares haviam atingido o limite superior previsto de 40 centímetros para cada uma, como mostra a Figura 49, Figura 50, Figura 51, Figura 52 e a Figura 53.

Figura 49 – Estrutura de pavimento com subleito de CBR 6% e 10%

ESTRUTURA		MODELAGEM	RESULTADOS
RESPONSÁVEL:	ARTHUR PORTO	EMPRESA:	Nome da empresa projetista
PROJETO:	Identificação da via, rodovia, trecho, km, estaca, etc		
Alterar Estrutura >>			
CAMADA	DESCRIÇÃO DO MATERIAL	TIPO	ESPESSURA (cm)
>> 1 <<	CONCRETO ASFÁLTICO	RJ CAP 50/70 #19, 1mm Sepetiba	10,0
2	MATERIAL GRANULAR	Solo Brita - M4 (NG' s: 1494)	15,0
3	MATERIAL GRANULAR	Brita Graduada - Gnaisse C5	20,0
4	SOLO FINO, SILTOSO OU ARGILOSO	Solo Arenoso Fino LA'	15,0
SL	SUBLEITO	Solo Siltoso NS'	0,0

Fonte: Acervo do autor (2021)

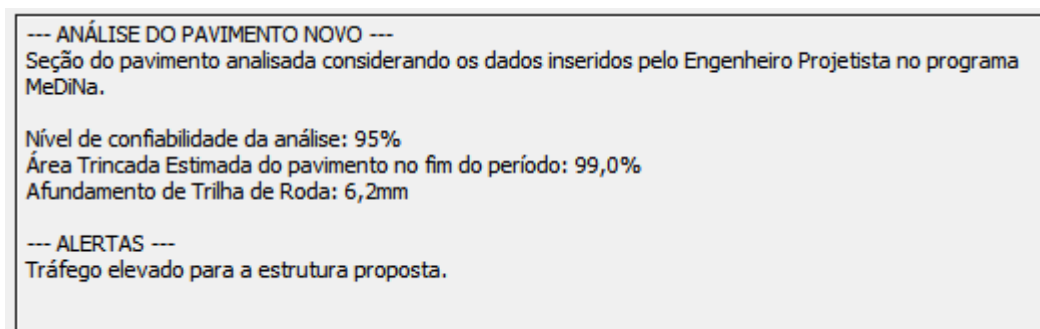
Figura 50 – Resultado da estrutura com subleito de CBR 6% e 10% (1)

CAMADA	DESCRIÇÃO DO MATERIAL	TIPO	ESPESSURA (cm)	MÓDULO (MPa)	COEFICIENTE DE POISSON
>> 1 <<	CONCRETO ASFÁLTICO	RJ CAP 50/70 #19, 1mm Sepetiba	10,0	9588	0,30
2	MATERIAL GRANULAR	Solo Brita - M4 (NG' s: 1494)	15,0	433	0,35
3	MATERIAL GRANULAR	Brita Graduada - Gnaisse C5	20,0	381	0,35
4	SOLO FINO, SILTOSO OU ARGILOSO	Solo Arenoso Fino LA'	15,0	494	0,45
SL	SUBLEITO	Solo Siltoso NS'	0,0	189	0,45

EIXO PADRÃO RODoviÁRIO		--- ANÁLISE DO PAVIMENTO NOVO ---	
DADOS DO TRÁFEGO		Seção do pavimento analisada considerando os dados inseridos pelo Engenheiro Projetista no programa MeDPA.	
Tipo de Via:	Sistema Aterial Principal	Nível de confiabilidade de análise: 95%	
VMD (1º ano):	1368	Área Trincada Estimada do pavimento no fim do período: 99,0%	
FV:	4.372	Afundamento de Trilha de Roda: 6,2mm	
N anual (1º ano):	2,18e+06	--- ALERTAS ---	
% Veículos na faixa de projeto:	100	Tráfego elevado para a estrutura proposta.	
N Anual da faixa:	2,18e+06		
Taxa de crescimento (%):	2,0		

Fonte: Acervo do autor (2021).

Figura 51 – Resultado da estrutura com subleito de CBR 6% e 10% (2)



Fonte: Acervo do autor (2021).

Figura 52 – Resultado da estrutura com subleito de CBR 6% e 10% (3)

MeDiNa

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

OK

CAMADA	DESCRIÇÃO DO MATERIAL	TIPO	ESPESSURA (cm)	MÓDULO (MPa)
1	CONCRETO ASFÁLTICO	RJ CAP 50/70 #19,1mm Sepetiba	10,0	9588
>> 2 <<	MATERIAL GRANULAR	Solo Brita - M4 (NG' s:1494)	40,0	433
3	MATERIAL GRANULAR	Brita Graduada - Gnaisse C5	20,0	381
4	SOLO FINO, SILTOSO OU ARGILOSO	Solo Arenoso Fino LA'	15,0	494
SL	SUBLEITO	Solo Siltoso NS'	0,0	189

Fonte: Acervo do autor (2021).

Figura 53 – Resultado da estrutura com subleito de CBR 6% e 10% (4)

MeDiNa

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

OK

CAMADA	DESCRIÇÃO DO MATERIAL	TIPO	ESPESSURA (cm)	MÓDULO (MPa)
1	CONCRETO ASFÁLTICO	RJ CAP 50/70 #19,1mm Sepetiba	10,0	9588
2	MATERIAL GRANULAR	Solo Brita - M4 (NG' s:1494)	15,0	433
3	MATERIAL GRANULAR	Brita Graduada - Gnaisse C5	20,0	381
>> 4 <<	SOLO FINO, SILTOSO OU ARGILOSO	Solo Arenoso Fino LA'	40,0	494
SL	SUBLEITO	Solo Siltoso NS'	0,0	189

Fonte: Acervo do autor (2021).

Então, ao final de todas as tentativas de redimensionamento do pavimento com os tipos de materiais escolhidos na base de dados do MeDiNa, não foi possível obter

novos valores para as espessuras das camadas, pois o programa alegou que o tráfego era demasiado grande para a estrutura apresentada.

4.3 Resultados da Retroanálise

Como descrito na metodologia, utilizou-se o BACKCAP para obtenção do MR das camadas do pavimento estudado.

O primeiro passo foi colocar os dados de entrada na formatação requerida pelo *software*, em arquivo .txt, apresentado na Figura 54.

Figura 54 – Formatação dos dados para entrada no BACKCAP

```
arquivo do BackCAP (RETROAN).txt - Bloco de Notas
Arquivo  E_ditar  F_ormatar  E_xibir  A_juda
%Stations
5
%Sensors
7
%Position
0      46.02  23.66  32.34  34.53  36.53
20     32.31  16.65  23.76  24.97  27.47
30     21.14  11.13  16.67  17.47  20.02
45     12.69  6.06   9.92   10.73  12.69
60     8.96   4.03   6.78   7.36   8.79
90     5.26   2.52   3.99   3.99   4.89
150    2.77   1.52   2.16   1.96   2.49
%Load
15     590    593    594    590    590
```

Fonte: Acervo do Autor (2021).

O segundo passo foi definir a estrutura do pavimento e suas espessuras. Para efeito de comparação, as espessuras utilizadas foram as mesmas adotadas no tópico 4.2 dos resultados. A disposição do pavimento ficou como está exposto na Figura 55.

Figura 55 – Estrutura do pavimento no BACKCAP

BackCAP

Structure FWD Test

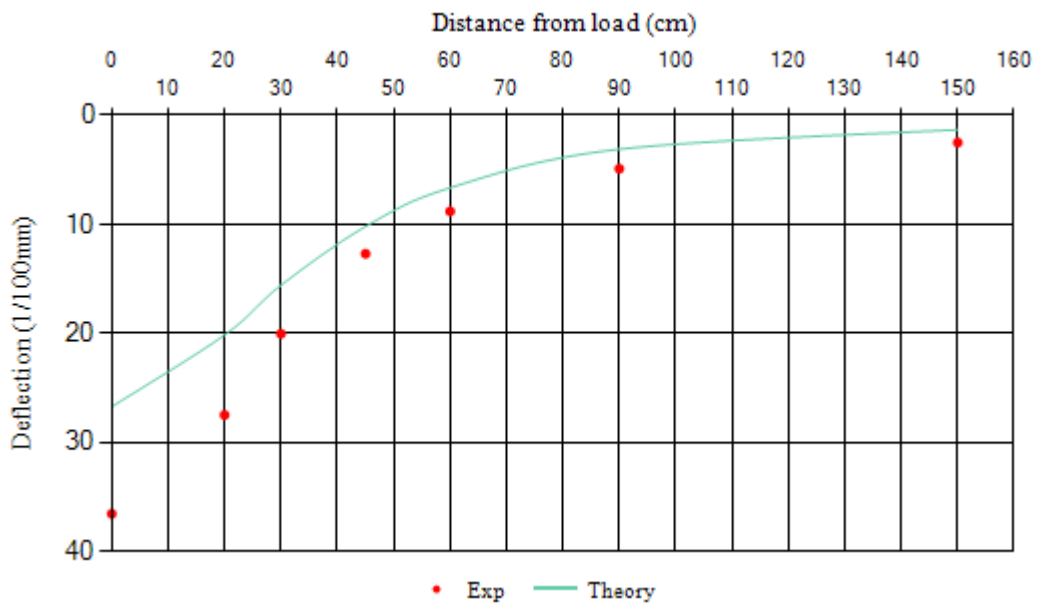
#Layers 5 OK

	Layer	h (cm)	E _{min} (MPa)	E _{max} (MPa)	Poisson
▶	Revestimento	10	4000	10000	0,30
	Base	15	100	1000	0,35
	Sub-base	20	100	800	0,35
	Reforço	35	100	600	0,45
	Subleito	0	100	600	0,45

Fonte: Acervo do Autor (2021).

O terceiro passo foi pedir para que a estrutura fosse avaliada, retornando o MR das camadas. O resultado está apresentado na Figura 56 e 57.

Figura 56 – Resultado da deflexão das camadas no BACKCAP



Fonte: Acervo do Autor (2021).

Figura 57 – Resultado do MR das camadas no BACKCAP

Results		Deflections				
	Station	Revestimento(MPa)	Base(MPa)	Sub-base(MPa)	Reforço(MPa)	Subleito(MPa)
▶	1	4422	101	799	100	325
	2	9175	212	688	174	413
	3	9625	142	743	147	337
	4	9415	188	698	184	319
	5	9010	163	669	199	276
*						

Fonte: Acervo do Autor (2021).

Em posse do resultado apresentado na Figura 57, optou-se por fazer a média do MR de cada camada para que pudesse entrar com os dados no MeDiNa e fazer a análise do pavimento. Dessa forma, o MR adotado está apresentado no Quadro 9.

Quadro 9 – MR adotado para cada camada do pavimento

CAMADA	MR (MPa)
Revestimento	8329
Base	161
Sub-base	719
Reforço de Subleito	161
Subleito	334

Fonte: Elaborado pelo Autor (2021).

Entrando no MeDiNa, viu-se que os materiais da base de dados do *software* não apresentavam MR iguais aos obtidos na retroanálise. Dessa forma, optou-se por utilizar materiais que tinham MR próximos aos que deveriam ser testados, possibilitando a análise da estrutura do pavimento. O Quadro 10 mostra a camada, o tipo de material utilizado e o seu respectivo Módulo de Resiliência.

Quadro 10 – Materiais utilizados para retroanálise no MeDiNa

CAMADA	MATERIAL	MR
Revestimento	RJ CAP 50/70 #12,5mm Sepetiba	8289
Base	Brita Graduada – Gnaisse C1	259
Sub-base	Solo Brita – M4(NG's:1494)	433
Reforço de Subleito	Solo Siltoso NS'	189
Subleito	Solo Fino NA	297

Fonte: Elaborado pelo Autor (2021).

Colocando todas as informações no software (Figura 58) e utilizando o número N dos dimensionamentos anteriores, operou-se o comando de Avaliar a estrutura, por meio do clique na tecla F3, e obteve-se o resultado de que, ao final do tempo de projeto de 10 anos, o percentual de área trincada no pavimento seria de 99,0%, estando muito acima dos 30% permitidos pelo software (Figura 59).

Figura 58 – Informações colocadas no *software* MeDiNa

CAMADA	DESCRIÇÃO DO MATERIAL	TIPO	ESPESSURA (cm)	MÓDULO (MPa)
>> 1 <<	CONCRETO ASFÁLTICO	RJ CAP 50/70 #12,5mm Sepetiba	10,0	8289
2	MATERIAL GRANULAR	Brita Graduada - Gnaisse C1	15,0	259
3	MATERIAL GRANULAR	Solo Brita - M4 (NG' s:1494)	20,0	433
4	SOLO FINO, SILTOSO OU ARGILOSO	Solo Siltoso NS'	35,0	189
SL	SUBLEITO	Solo Fino NA	0,0	297

Fonte: Acervo do Autor (2021).

Figura 59 – Resultado obtido no MeDiNa com o MR da retroanálise

<p>--- ANÁLISE DO PAVIMENTO NOVO --- Seção do pavimento analisada considerando os dados inseridos pelo Engenheiro Projetista no programa MeDiNa.</p> <p>Nível de confiabilidade da análise: 95% Área Trincada Estimada do pavimento no fim do período: 99,0% Afundamento de Trilha de Roda: 7,8mm</p> <p>--- ALERTAS --- Tráfego elevado para a estrutura proposta.</p>

Fonte: Acervo do Autor (2021).

Observando os resultados da análise da estrutura mais a fundo, por meio dos relatórios disponibilizados pelo *software*, pode-se constatar que no mês 27, o revestimento atinge o percentual de área trincada de 29,91%, ficando bem próximo dos 30% permitidos pelo MeDiNa. Já no mês 28, o percentual sobe para 31,42%, ultrapassando o valor permitido utilizado no programa. Com isso, entende-se que o pavimento se encontra com um grau de deterioração acelerado, apresentando problemas na sua estrutura.

5 CONCLUSÃO

Nesse tópico, serão expostas as conclusões que foram obtidas a partir da análise dos resultados apresentados no tópico anterior.

5.1 Comparação dos métodos

Com os resultados apresentados pode-se concluir que o método de dimensionamento empírico, com a utilização do CBR, não leva em consideração o comportamento dos materiais, logo não consegue estimar, de forma correta, a estrutura ideal para atender o tempo de projeto desejado, levando à ocorrência de pavimentos sub ou superdimensionados, não conseguindo mais atender a demanda de tráfego existente nas rodovias brasileiras. No caso do estudo em questão, o pavimento foi subdimensionado, gerando uma estrutura frágil que é incapaz de suportar o tráfego durante os 10 anos previstos em projeto. Essa conclusão foi atestada com a aplicação da estrutura no MeDiNa, retornando que, no 30º mês de vida, o revestimento asfáltico já apresentava dados próximos ao limite aceitável que é utilizado no *software*.

Além disso, conclui-se que o método empírico é ajustável, permitindo que haja uma variação da espessura das camadas de acordo com o desejo do projetista, podendo existir mais casos de pavimentos subdimensionados e até de superdimensionados, gerando problemas em ambos os casos, sejam eles financeiros, estruturais ou de segurança.

Quanto ao novo método mecanístico-empírico, por levar em conta a característica e o comportamento dos materiais utilizados nas diversas regiões do país, torna-se mais assertivo e previsível quanto ao estado da vida útil do pavimento ao decorrer dos anos e do tráfego.

5.2 Vantagens do MeDiNa

Abordando as vantagens do método mecanístico-empírico, conclui-se que o método de dimensionamento pelo MeDiNa é mais confiável frente ao método usual, pois utiliza de teorias e cálculos matemáticos que conseguem prever o comportamento do pavimento de acordo com o tráfego e com o tempo, disponibilizando relatórios completos e detalhados que permitem que um planejamento para possíveis intervenções de reforço na estrutura do pavimento seja executado.

Também, outra vantagem encontrada é a de que o *software* retorna valores das espessuras das camadas que são mais adequados para os dados inseridos, minimizando a possibilidade de execução de um pavimento subdimensionado ou superdimensionado, gerando economia ao executor e segurança ao projetista, pois leva em conta a característica e o comportamento dos tipos de materiais utilizados no dimensionamento do pavimento.

5.3 Facilidades e dificuldades do software MeDiNa

Facilidades no uso do *software* não foram difíceis de serem encontradas, cita-se, por exemplo, a simplicidade de efetuar a alteração manual da espessura das camadas, a alteração dos tipos de materiais utilizados em cada camada, a agilidade na geração de resultados de análise da estrutura e no dimensionamento de um pavimento novo, a facilidade de obter resultados detalhados sobre a estrutura analisada, dentre outras facilidades.

Ainda a respeito do MeDiNa, pode-se dizer que as dificuldades encontradas foram a respeito dos tipos de materiais disponibilizados no próprio programa para a caracterização das camadas, não apresentando valores de CBR na descrição do material escolhido. Outra dificuldade encontrada foi na baixa quantidade de tipos de materiais presentes no banco de dados do *software*, não sendo possível dimensionar a estrutura do pavimento em estudo com os materiais que foram escolhidos para a execução de tal procedimento.

Outrossim, a limitação da espessura das camadas de revestimento em 15 centímetros e das camadas de base, sub-base e reforço de subleito em 40 centímetros, torna-se uma dificuldade em casos em que o número N é elevado demais para o módulo de resistência dos tipos de materiais testados.

5.4 Retroanálise

A respeito da retroanálise, quando os resultados obtidos no dimensionamento pelo MeDiNa e no dimensionamento usando dados de retroanálise são comparados, atesta-se que a diferença entre eles foi de apenas 3 meses até atingir um percentual próximo a 30% de área trincada, mostrando que a retroanálise, por meio da sua forma de obtenção não-destrutiva, indireta e otimizada, funciona bem e que foi bem executada, apresentando, de forma rápida e satisfatória, a situação atual do pavimento.

Por fim, com as conclusões do trabalho apresentadas, espera-se que o novo Método de Dimensionamento Nacional de Pavimentos Flexíveis, o MeDiNa, seja implantado como o método de dimensionamento oficial do Brasil o quanto antes, gerando uma maior confiabilidade nas estruturas rodoviárias brasileiras, aumentando o conforto e a segurança dos usuários, garantindo o direito de ir e vir dos cidadãos e tornando prazerosa a experiência de dirigir um automóvel.

REFERÊNCIAS

AASHTO. American Association of State Highway and Transportation Officials. **AASHTO Guide for design of pavements structures**. Washington, USA, 1986.

ASTEC ENGENHARIA. **FWD – Falling Weight Deflectometer**. Disponível em: <http://astec.eng.br/fwd/>. Acesso em: 07 dez. 2020.

BALBO, José Tadeu. **Pavimentação asfáltica**: materiais, projeto e restauração. São Paulo: Oficina de Textos, 2007. 560 p.

BERNUCCI, Liedi Bariani *et al.* **Pavimentação asfáltica**: formação básica para engenheiros. 4. ed. Rio de Janeiro: Petrobras: Abeda, 2010. 504 p.

BEZERRA NETO, Rogério Silveira. **Análise comparativa de pavimentos dimensionados através dos métodos empírico do DNER e mecanístico e proposta de um catálogo simplificado de pavimentos para a região de Campo Grande (MS)**. 2004. 166 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

BRASIL. [Constituição (1988)]. **Constituição da República Federativa do Brasil** [recurso eletrônico]. Brasília: Supremo Tribunal Federal, 2019. 577 p. Disponível em: <https://www.stf.jus.br/arquivo/cms/legislacaoConstituicao/anexo/CF.pdf>. Acesso em: 28 set. 2020.

CNT. CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. **Pesquisa CNT de rodovias 2019**. Brasília: CNT: SEST SENAT, 2019.

DNER. Departamento Nacional de Estradas e Rodagem - 024/94 - ME: **Determinação das deflexões pela Viga Benkelman - Método de Ensaio**, Brasília, 1994.

DNER. Departamento Nacional de Estradas e Rodagem - 273/96 - PRO: **Determinação de deflexões utilizando deflectômetro de impacto tipo “Falling Weight Deflectometer (FWD)” - Procedimento**, Brasília, 1996.

DNIT. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – NORMA DNIT 005/2003 - TER: **Defeito nos pavimentos flexíveis e semi-rígidos - Terminologia**, Rio de Janeiro, 2003a.

DNIT. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – NORMA DNIT 009/2003 - PRO: **Avaliação subjetiva da superfície de pavimentos flexíveis e semi-rígidos - Procedimento**, Rio de Janeiro, 2003b.

DNIT. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **Manual de Pavimentação**. 3.ed. Rio de Janeiro: DNIT, 2006a. 274 p.

DNIT. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **Manual de Restauração de pavimentos asfálticos**. 2.ed. Rio de Janeiro: DNIT, 2006b. 310 p.

DNIT. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – NORMA DNIT 133/2010 - ME: **Pavimentação asfáltica – Delineamento da linha de influência longitudinal da bacia de deformação por intermédio da Viga Benkelman – Método de ensaio**, Rio de Janeiro, 2010.

DNIT. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **Manual de gerência de pavimentos**. Rio de Janeiro: DNIT, 2011. 189 p.

DNIT. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **Pesquisa Nacional de Tráfego da BR-304/RN km 191**. Rio Grande do Norte. 2017. Disponível em: <http://servicos.dnit.gov.br/dadospnct/Pnt>. Acesso em: 10 jun. 2021.

DNIT. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – NORMA DNIT 134/2018 - ME: **Pavimentação – Solos – Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio**, Rio de Janeiro, 2018.

FONSECA, L. F. S. **Análise das Soluções de Pavimentação do Programa CREMA 2ª ETAPA do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes**. 2013. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Civil, PEC/ COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2013.

FRANCO, F. A. C. P.; MOTTA, L. M. G. **Execução de estudos e pesquisas para elaboração de método mecanístico-empírico de dimensionamento de pavimentos asfálticos**. 2018.

MEDINA, Jacques de; MOTTA, Laura Maria Goretti da. **Mecânica dos pavimentos**. 3. ed. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2015. 638 p.

MORAES, Carla Gonçalves de. **Análise de bacias deflectométricas obtidas por 4 equipamentos do tipo Falling Weight Deflectometer (FWD)**. 2015. 280 p. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, UFRJ/COPPE, Rio de Janeiro, 2015.

MORAIS, Vanessa Ariadne. **Análise comparativa dos métodos de dimensionamento empírico e empírico-mecanístico de pavimentos flexíveis**. 2014. 128 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Pampa, Alegrete, 2014.

NÓBREGA, Eduardo Suassuna. **Comparação entre métodos de retroanálise em pavimentos asfálticos**. 2003. 384 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.

NORBACK, Carine. **Caracterização do módulo de resiliência e da deformação permanente de três solos e misturas solo-brita**. 2018. 180 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.

PINTO, S.; PREUSSLER, E. S. **Pavimentação rodoviária**: conceitos fundamentais sobre pavimentos flexíveis. 2. ed. Editora Copiarte, 2010.

SANT'ANNA, Giovanni Levi. **Módulo de resiliência de misturas solo-alcatrão, solo-cal-alcatrão e solo-cimento-alcatrão para pavimentação de estradas florestais**. 2002. 146 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2002.

SAYERS, Michael W.; KARAMILHAS, Steven M.. **The Little Book of Profiling**: basic information about measuring and interpreting road profiles. Michigan: University Of Michigan, 1998.

SOUZA, Murillo Lopes de. **Método de projeto de pavimentos flexíveis**. 3. ed. Rio de Janeiro: IPR, 1981.

SOUZA JÚNIOR, José Geraldo de. **Aplicação do Novo Método de Dimensionamento de Pavimentos Asfálticos a Trechos de Uma Rodovia Federal**. 2018. 218 p. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Civil, UFRJ/COPPE, Rio de Janeiro, 2018.