



**ANÁLISE COMPARATIVA DO MÉTODO DO DNER COM O MÉTODO
MECANÍSTICO-EMPÍRICO MEDINA**

LARA CORDEIRO PITANGUI

**MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL II EM ENGENHARIA CIVIL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

FACULDADE DE TECNOLOGIA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**ANÁLISE COMPARATIVA DO MÉTODO DO DNER COM O
MÉTODO MECANÍSTICO-EMPÍRICO MEDINA**

LARA CORDEIRO PITANGUI

ORIENTADOR: LUIZ GUILHERME RODRIGUES DE MELLO
MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL II EM ENGENHARIA CIVIL

BRASÍLIA / DF: DEZEMBRO - 2019

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**ANÁLISE COMPARATIVA DO MÉTODO DO DNER COM O
MÉTODO MECANÍSTICO-EMPÍRICO MEDINA**

LARA CORDEIRO PITANGUI

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL II SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL.

APROVADA POR:

Prof. Luiz Guilherme Rodrigues de Mello, *D.Sc.* (UnB)

(Orientador)

Prof. Márcio Muniz de Farias, *Ph.D.* (UnB)

(Examinador interno)

Prof.^a Letícia Nunes Lopes, *MSc.* (UnB)

(Examinadora interna)

BRASÍLIA / DF, 09 DE DEZEMBRO DE 2019

FICHA CATALOGRÁFICA

PITANGUI, LARA CORDEIRO

Análise comparativa do método do DNER com o método mecanístico-empírico MeDiNa.
[Distrito Federal] 2019.

xxi, 93p, 297 mm (ENC/FT/UnB, Bacharel, Engenharia Civil, 2019).
Monografia de Projeto Final - Universidade de Brasília. Faculdade de
Tecnologia.
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Dimensionamento de pavimentos	2. Mecanístico-empírico
3. MeDiNa	
I. ENC/FT/UnB	II. Título (Bacharel)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

PITANGUI, L.C. (2019). Análise comparativa do método do DNER com o método mecanístico-empírico MeDiNa. Monografia de Projeto Final em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 93p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTORA: Lara Cordeiro Pitangui.

TÍTULO: Análise comparativa do método do DNER com o método mecanístico-empírico MeDiNa.

GRAU: Bacharel em Engenharia Civil ANO: 2019

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta monografia de Projeto Final e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. A autora reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta monografia de Projeto Final pode ser reproduzida sem a autorização por escrito da autora.

Lara Cordeiro Pitangui
SHCES, Q 1409, Bloco B, Apartamento 102, Cruzeiro Novo
CEP: 70.658.492 Brasília/DF – Brasil
e-mail: laracordeiop@gmail.com

AGRADECIMENTOS

A conclusão da minha graduação em uma instituição tão grandiosa como a Universidade de Brasília foi, sem sombra de dúvidas, uma tarefa árdua, mas muito gratificante e realizadora. Neste momento, sou muito grata, em especial:

A Deus, aquele a quem devo tudo. Obrigada por tantas bênçãos!

À minha família, especialmente à minha mãe, que nunca mediu esforços para que eu pudesse realizar meus sonhos.

A meus irmãos, primordialmente minha irmã gêmea, Larissa, que esteve comigo lado a lado, literalmente, em todos os momentos da minha vida.

Aos amigos que fiz na faculdade, que muito me ajudaram a passar por tantos momentos difíceis, em especial à Sâmela e Flávia, amizades que levarei muito além da faculdade.

Ao Fábio, meu primeiro chefe no estágio e que sempre esteve disposto a me ajudar, todas as vezes que precisei, em especial neste trabalho de conclusão de curso.

Ao meu orientador, professor Luiz Guilherme, pelas valiosas lições e conselhos.

E a todos amigos, colegas e familiares que de alguma forma contribuíram para realização deste trabalho. Obrigada!

ANÁLISE COMPARATIVA DO MÉTODO DO DNER COM O MÉTODO MECANÍSTICO-EMPÍRICO MEDINA

RESUMO

Atualmente, no Brasil, ainda é muito significativa a realização do transporte de cargas por meio de rodovias, indicando grande solicitação do pavimento, devido ao alto volume de tráfego. Nesse cenário, torna-se cada vez mais necessário um adequado dimensionamento, capaz de atender com qualidade aos usuários de rodovias, durante toda a vida útil para o qual o pavimento foi projetado.

Durante muitos anos, foi utilizado não só no Brasil, mas no mundo inteiro, metodologias empíricas de dimensionamento, que com base em experiências acumuladas, definiram as estruturas de grande parte das rodovias federais brasileiras. No entanto, ao passar dos anos, análises mais apuradas não só dos materiais utilizados, mas também das tensões e deformações desenvolvidas no pavimento, foram sendo estudadas, dando origem a novos métodos de dimensionamento, com bases mecanicistas, como por exemplo o programa MeDiNa - Método de Dimensionamento Nacional de Pavimentos, desenvolvido pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT).

Em decorrência disto, este trabalho propõe analisar e dimensionar pavimentos por meio da ferramenta do DNIT, a fim de compreender as principais mudanças trazidas, quando comparado a projetos já dimensionados por metodologias anteriores, assim como analisar se estes estão de acordo aos critérios adotados pelo MeDiNa.

Nesse sentido, foram selecionados 16 projetos, dimensionados inicialmente por metodologias empíricas, onde buscou-se compatibilizá-los com a ferramenta do DNIT, a fim de obter dados de área trincada e deformação permanente do pavimento. Assim, foi possível avaliar se tais resultados correspondem satisfatoriamente aos critérios exigidos pelo MeDiNa, buscando entender as principais razões referentes às diferenças encontradas.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. MOTIVAÇÃO	2
1.2. OBJETIVO.....	2
1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO.....	2
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1. DEFINIÇÃO DE PAVIMENTO	4
2.2. BREVE HISTÓRICO DA PAVIMENTAÇÃO.....	5
2.2.1. Construção das primeiras estradas	5
2.2.2. Pavimentação no Brasil.....	6
2.3. METODOLOGIA CBR	7
2.3.1. Primeira equação: espessura x CBR	9
2.4. MÉTODO DO DNER	10
2.4.1. Premissas do Método DNER	10
2.4.2. Método de Cálculo.....	13
2.5. MÉTODO AASTHO 1993.....	15
2.5.1. Modificações da AASTHO.....	17
2.6. METODOLOGIA MECANÍSTICA-EMPÍRICA	18
2.6.1. Análise de tensões, deformações e deslocamentos na estrutura dos pavimentos. 19	
2.6.2. A Teoria da Elasticidade de meios semi-infinitos homogêneos, formulada por Boussinesq.	20
2.6.3. A Teoria da Elasticidade de Meios Semi-infinitos Estratificados	20
2.6.4. Programas Computacionais	23
2.7. MEPDG - MECHANISTIC-EMPIRICAL PAVEMENT DESIGN GUIDE	24
2.7.1. Indicadores de desempenho	25
2.7.2. Estrutura hierárquica MEPDG.....	25
2.8. MODELOS DE RUPTURA	25
2.8.1. Análise de Fadiga.....	25
2.8.2. Deformação limite no topo do subleito.....	28
2.9. MÉTODO DA RESILIÊNCIA - TECNAPAV.....	30
2.9.1. Procedimentos Preliminares.....	31

2.9.2.	Dimensionamento do reforço com mistura nova.....	31
3.	METODOLOGIA.....	34
3.1.	MEDINA.....	34
3.1.1.	Hipóteses.....	34
3.1.2.	Dimensionamento ou análise.....	35
3.1.3.	Calibração e validação – Função de Transferência.....	36
3.1.4.	Dano de Fadiga.....	38
3.1.5.	Deformação Permanente.....	39
3.1.6.	Condição de aderência.....	41
3.1.7.	Critérios de Parada.....	41
3.1.8.	Materiais.....	42
3.2.	PREMISSAS ADOTADAS.....	44
3.2.1.	Métodos utilizados.....	44
3.2.2.	Adequação dos materiais.....	44
3.2.3.	Limitação de espessura das camadas.....	46
3.2.4.	Tipo de Via.....	46
3.3.	SELEÇÃO DOS PROJETOS.....	46
3.4.	COMPILAÇÃO DAS INFORMAÇÕES.....	47
3.5.	ANÁLISE E DIMENSIONAMENTO.....	49
3.6.	IMPACTO FINANCEIRO.....	51
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	53
4.1.	ANÁLISE DO MEDINA.....	53
4.1.1.	Resultados da análise da BR 060 GO.....	53
4.1.2.	Resultados da análise da BR 376 PR.....	54
4.1.3.	Resultados da análise da BR 364 RO.....	54
4.1.4.	Resultados da análise da BR 470 SC.....	55
4.1.5.	Resultados da análise da BR 135 BA.....	56
4.1.6.	Resultados da análise da BR 101 SC.....	56
4.1.7.	Resultados da análise da BR 050 MG.....	57
4.1.8.	Resultados da análise da BR 104 PE.....	58
4.1.9.	Resultados da análise da BR 163/364 MT.....	58
4.1.10.	Resultados da análise da BR 222 CE.....	59
4.1.11.	Resultados da análise da BR 116 BA.....	59

4.1.12.	Resultados da análise da BR 280 SC	60
4.1.13.	Resultados da análise da BR 364 MG.....	61
4.1.14.	Resultados da análise da BR 386 RS	61
4.1.15.	Resultados da análise da BR 432 RR.....	62
4.1.16.	Resultados da análise da BR 448 RS	63
4.2.	DIMENSIONAMENTO DAS CAMADAS DE REVESTIMENTO NO MEDINA	65
4.3.	IMPACTO FICANCEIRO	67
5.	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	69
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	71
	APÊNDICE A – RESUMO DAS INFORMAÇÕES DOS PROJETOS ANALISADOS.....	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Valores da relação entre o Índice de Grupo e o Índice de Suporte	11
Tabela 2.2 – Coeficiente de equivalência estrutural	12
Tabela 2.3– Espessura Mínima de Revestimento Betuminoso.....	13
Tabela 2.4 – Classificação dos solos	31
Tabela 3.1 – Parâmetros do modelo de previsão da deformação permanente obtidos por Guimarães (2009)	40
Tabela 3.2 – Condição de aderência (Fonte: Manual do MeDiNa)	41
Tabela 3.3 – Critérios de parada (Fonte: Manual do MeDiNa)	42
Tabela 3.4 – Módulos de Resiliência teóricos (Bernucci <i>et al.</i> 2006)	45
Tabela 3.5 – Módulos de Resiliência teóricos (Nascimento <i>et al.</i> 2006)	45
Tabela 3.6 – Projetos selecionados para redimensionamento no MeDiNa	47
Tabela 3.7 – Resumo de informações da BR 104 PE	48
Tabela 3.8 – Resumo de informações da BR 448 RS	49
Tabela 4.1 – Resumo da análise dos pavimentos	64
Tabela 4.2 – Projetos utilizados para dimensionamento no Medina	67
Tabela 4.3 (a) – Cálculo do impacto financeiro	68
Tabela 4.3 (b) – Cálculo do impacto financeiro	68

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Diferença básica das estruturas de pavimentos rígidos e flexíveis.....	04
Figura 2.2 – Primeiras curvas extrapoladas para o dimensionando de pavimentos utilizando a metodologia CBR	09
Figura 2.3 – Determinação de espessuras do pavimento.....	14
Figura 2.4 - Simbologia do dimensionamento do pavimento.....	15
Figura 2.5 – Pista de teste AASHTO.....	16
Figura 2.6 – Esquema representativo das tensões, deformações e deslocamentos na estrutura do pavimento, em pontos críticos.....	19
Figura 2.7 – Carregamento circular em um sistema de duas camadas.....	21
Figura 2.8 – Ábaco para o cálculo da deflexão considerando um sistema de duas camadas.....	22
Figura 2.9 – Exemplo de ensaio de fadiga	28
Figura 2.10 – Afundamento de trilha de roda (ATR)	29
Figura 2.11 – Estrutura de referência do DNER PRO 269/94.....	32
Figura 3.1 – Tela inicial do MeDiNa	35
Figura 3.2 – Curva Sigmoide (Manual do MeDiNa)	37
Figura 3.3 – Função de transferência proposta por Fritzen (2016)	38
Figura 3.4 – Pontos de cálculo para deformação permanente	40
Figura 3.5 – Exemplo de inserção de camadas no Medina para BR 104 PE	50
Figura 3.6 – Exemplo de inserção de camadas no Medina para BR 448 RS	50
Figura 3.7 – Exemplo de inserção do Número N no Medina para BR 448 RS (a) BR 104 PE (b)	51
Figura 4.1 – Resultados da análise na BR 060 GO	53
Figura 4.2 – Resultados da análise na BR 376 PR	54
Figura 4.3 – Resultados da análise na BR 364 RO	54
Figura 4.4 – Resultados da análise na BR 470 SC	55
Figura 4.5 – Resultados da análise na BR 135 BA	56
Figura 4.6 – Resultados da análise na BR 101 SC	56
Figura 4.7 – Resultados da análise na BR 104 PE	57
Figura 4.8 – Resultados da análise na BR 104 PE	58
Figura 4.9 – Resultados da análise na BR 163/364 MT	58

Figura 4.10 – Resultados da análise na BR 222 CE	59
Figura 4.11 – Resultados da análise na BR 116 BA	59
Figura 4.12 – Resultados da análise na BR 280 SC	60
Figura 4.13 – Resultados da análise na BR 364 MG	61
Figura 4.14 – Resultados da análise na BR 386 RS	61
Figura 4.15 – Resultados da análise na BR 432 RR	62
Figura 4.16 – Resultados da análise na BR 448 RS	63
Figura 4.17 – Exemplo da impossibilidade de dimensionar a camada pelo MeDiNa	65

1. INTRODUÇÃO

Na década de 1960, foi introduzido no Brasil um método de dimensionamento de pavimentos flexíveis, popularmente conhecido como Método do DNER ou Método do engenheiro Murilo Lopes de Souza. Trata-se de uma metodologia empírica, responsável pelo dimensionamento de grande parte das rodovias pavimentadas brasileiras.

No entanto, com o passar dos anos, a malha rodoviária cresceu em grande escala, deixando evidente a necessidade de evolução das técnicas e projetos utilizados na construção de pavimentos. No mesmo sentido, a situação ruim ou regular de grande parte das rodovias existentes, como mostra o resultado do ICS (índice de condição da superfície) do DNIT de 2018, demanda a modernização dos métodos e critérios que vem sendo utilizados há mais de 50 anos.

Apesar da influência de outros fatores, como a falta de conservação, a má execução dos serviços e o aumento do tráfego ao longo dos anos, em muitos casos, essa situação pode também ser justificada pela falta de um método de dimensionamento mais rebuscado, que possa oferecer uma análise mais racional dos materiais utilizados, além de proporcionar uma metodologia onde se possam realizar análises de ruptura por fadiga, deformações permanentes do subleito, entre outros pontos.

É nesse cenário que entra em foco o método de dimensionamento desenvolvido pelo DNIT, o MeDiNa. Trata-se de um método mecanístico-empírico, que possibilita um dimensionamento a partir de modelos de previsão da vida útil dos materiais empregados, ao analisar o conjunto dos materiais constituintes e considerar um conjunto de variáveis, tais como as características elásticas de cada material (Franco, 2000).

Desse modo, tendo em vista a crescente demanda por pavimentos mais bem dimensionados, capazes de corresponder à necessidade do tráfego atual e futuro, torna-se de suma importância a aplicação de métodos com bases mais sólidas e análises reais dos materiais empregados, como se mostra o MeDiNa.

Assim, é necessário buscar entender as principais diferenças que tal método traz consigo, quando comparado ao método empírico desenvolvido na década de sessenta, visando compreender se os materiais utilizados ainda são adequados, se as espessuras das camadas dos pavimentos correspondem bem à solicitação do tráfego, entre outros fatores.

1.1. MOTIVAÇÃO

Segundo dados do relatório disponibilizado pela CNT em 2018, dos 107.161 km de rodovias avaliadas, que incluem toda a malha rodoviária federal e os principais trechos estaduais pavimentados, 57% possuem algum tipo de deficiência, encontrando-se em estado regular, ruim ou péssimo. Trata-se de um número muito expressivo, indicando a precariedade existente no âmbito rodoviário brasileiro.

A existência de trechos deficientes na maior parte das rodovias deixa evidente a necessidade de grandes volumes de investimentos, tanto no que diz respeito à recuperação adequada das rodovias existentes, quanto na aplicação de recursos em novas estradas. Segundo dados da CNT, mais de 60% do transporte de cargas e mais de 90% dos deslocamentos de passageiros do Brasil são feitos por rodovias, número muito expressivo quando comparado a outros países.

É nesse sentido que se torna necessário o estudo de métodos de dimensionamento mais eficientes, capazes de oferecer maior durabilidade aos pavimentos dimensionados.

Desse modo, este trabalho motiva-se em buscar entender quais as principais mudanças atreladas ao novo método de dimensionamento proposto pelo DNIT, de forma a viabilizar, cada vez mais, um adequado investimento no âmbito rodoviário.

1.2. OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é realizar uma análise comparativa entre projetos de pavimentos flexíveis dimensionados pelo método do DNER e/ou semelhantes, com o novo método mecanístico-empírico do DNIT, o MeDiNa.

Com isso, como objetivos secundários, pretende-se obter:

- Indicação das principais mudanças observadas, no que diz respeito à espessura das camadas, para o dimensionamento de pavimentos novos.
- Percepção do impacto financeiro da mudança do método de dimensionamento.
- Análise das principais causas da diferença de dimensionamento, se houver.

1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO

O segundo capítulo deste trabalho traz a revisão bibliográfica, dividida da seguinte forma: serão apresentados conceitos a respeito da definição do pavimento e os principais tipos existentes,

seguida pela história da pavimentação no mundo e no Brasil, no que se refere à construção das primeiras estradas.

Em seguida será apresentado o desenvolvimento da metodologia CBR, de bases empíricas, responsável pelo desenvolvimento do método de dimensionamento brasileiro – Método do DNER -, utilizado na construção de grande parte das rodovias federais. Será ainda mostrado o método da AASHTO, desenvolvido em 1993, responsável por significativas mudanças na metodologia anteriormente usada.

Nos tópicos seguintes da revisão bibliográfica serão explicitadas as bases principais da metodologia mecanística-empírica, retomando a teoria da elasticidade desenvolvida por Boussinesq e aprimorada por Burmister. Posteriormente será explicitado um breve resumo a respeito do programa *Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide* – MEPDG e em seguida, serão mostrados os principais modelos de ruptura utilizados atualmente nos programas computacionais desenvolvidos para análise de pavimentos. Ainda será explicado o método de dimensionamento para reforço de estruturas de pavimentos asfálticos, iniciado pelo Manual de Pavimentação do DNIT de 2006, mas que também é utilizado para o dimensionamento de novas estruturas.

Por fim, será mostrada a metodologia utilizada nesta pesquisa, apresentando as etapas executadas, seguida pelos resultados e respectivas análises realizadas e a conclusão deste trabalho.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. DEFINIÇÃO DE PAVIMENTO

O pavimento é uma estrutura de múltiplas camadas de espessuras finitas, construída sobre a superfície final de terraplenagem, destinada técnica e economicamente a resistir aos esforços oriundos do tráfego de veículos e do clima, e a propiciar aos usuários melhoria nas condições de rolamento, com conforto, economia e segurança (Bernucci *et al.* 2006).

Tradicionalmente, classificam-se os pavimentos em dois tipos principais: rígidos e flexíveis. Os pavimentos rígidos são associados ao concreto de cimento Portland, cujo revestimento é feito com placas de concreto que podem ser armadas ou não com barras de aço (Figura 2.1a). Tais placas apoiam-se geralmente sobre uma camada de sub-base, de material granular ou até mesmo material estabilizado com cimento. A espessura da camada é fixada em função da resistência à flexão das placas de concreto e das resistências das camadas subjacentes (Balbo, 2007).

Já os pavimentos flexíveis, mais comumente usados no Brasil, são aqueles em que o revestimento é composto por uma mistura constituída basicamente de agregados e ligantes asfálticos (Figura 2.1b). É formado, geralmente, por quatro camadas principais: revestimento asfáltico, base, sub-base e reforço do subleito. Tais camadas repousam sobre o subleito, que diz respeito ao terreno delimitado para construção da estrada, após a conclusão dos cortes e aterros (Bernucci *et al.* 2006).

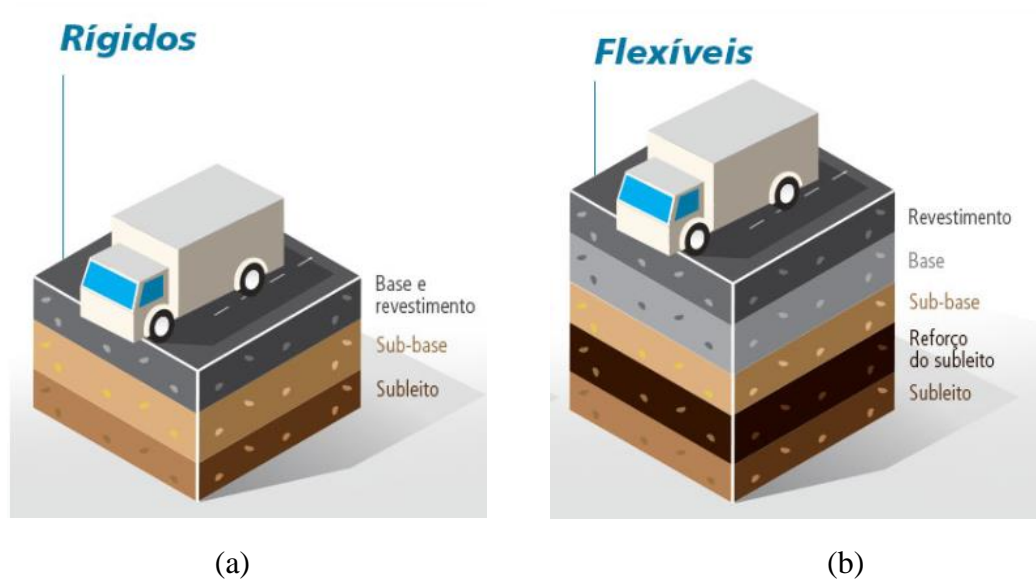


Figura 2.1 – Diferença básica das estruturas de pavimentos rígidos e flexíveis

(<http://www.mapadaobra.com.br>).

2.2. BREVE HISTÓRICO DA PAVIMENTAÇÃO

2.2.1. Construção das primeiras estradas

Os povos egípcios, gregos e romanos construíram estradas de acesso pavimentadas com o objetivo de facilitar o transporte para executar as funções que lhes eram interessantes, quais sejam: funções religiosas, militares e comerciais. Os romanos chegaram a construir, aproximadamente, 87.000,00 km de vias pavimentadas sobre todo seu império (Coutinho, 2011).

Chevallier (1976) aponta que não havia uma construção padrão para as estradas romanas, embora características comuns sejam encontradas. As informações hoje disponíveis advêm fundamentalmente das vias remanescentes. De documentos antigos do século I, sabe-se que as vias eram classificadas de acordo com a sua importância, primeiro as vias públicas do Estado, seguidas das vias construídas pelo exército, que eventualmente se tornavam públicas; das vias locais ou *actus*, e finalmente das vias privadas (Adam, 1994). Semelhantemente aos dias de hoje, as vias eram compostas por uma fundação e uma camada de superfície, que variavam de acordo com os materiais disponíveis e a qualidade do terreno natural.

Não só os romanos, mas diversas outras nações também desenvolveram técnicas para a construção de novas estradas, tanto para o transporte de cargas, como também para caminho de pedestres. Bittencourt (1958) registra inúmeras referências históricas de estradas construídas na antiguidade e que atendiam à Assíria (reino também na Mesopotâmia) e à Babilônia, assim como velhos caminhos da Índia e da China, mesmo aqueles considerados apenas itinerários, e identificados a partir de estudos arqueológicos, históricos, agrícolas e linguísticos. Entre esses caminhos, merece destaque a chamada Estrada da Seda, uma das rotas de comércio mais antigas e historicamente importantes devido sua grande influência nas culturas da China, Índia, Ásia e também do Ocidente. A Estrada da Seda não existia apenas com o propósito do comércio da seda, mas de diversas outras mercadorias como ouro, marfim, animais e plantas exóticas. Seu declínio se deu ainda no século XIII com o crescimento do transporte marítimo na região. O interesse na rota ressurgiu no final do século XIX após expedições arqueológicas europeias. (Bernucci *et al.* 2006).

Outra estrada romana da época, de extrema importância e a mais conhecida de todas, é a chamada Via Ápia, criada no século 312 a.C. Segundo Bernucci *et al.* (2006), a via tinha por objetivo principal ligar Roma a Cápua (195 km), permitindo ao exército romano chegar

rapidamente, durante o período não-invernoso, às áreas de *Campania* e *Samnium*, retornando a Roma no inverno.

A partir da queda do Império Romano em 476 d.C., e durante os séculos seguintes, as novas nações europeias fundadas perderam de vista a construção de novas estradas. Com o passar do tempo, a França foi a primeira, desde os romanos, a reconhecer o efeito do transporte no comércio, dando importância à velocidade de viagem, voltando-se novamente para a construção e conservação das estradas (Bernucci *et al.* 2006).

A partir daí outros países, como a Inglaterra, observando a forma como eram construídos os caminhos da França, conseguiram desenvolver as vias mais cômodas, duráveis e velozes da Europa, contribuindo significativamente para o progresso da indústria e comércio do país. Com isso, demais países da Europa também se voltaram para a construção de estradas, passando a se preocupar com aspectos que até os dias atuais constituem pontos importantes, como drenagem, abaulamento das estradas, sobrecargas etc.

Já na América Latina, um maior destaque pode ser dado às estradas construídas pelos incas, habitantes que nos tempos antigos ocupavam as regiões onde hoje pertencem aos países: Equador, Peru, Chile, Bolívia e Argentina. Segundo expedições científicas do alemão Alexander Von Humbolt, as estradas dos incas podem ser citadas como “os mais úteis e estupendos trabalhos realizados pelo homem” (Bernucci *et al.* 2006).

2.2.2. Pavimentação no Brasil

Quando se trata da história da pavimentação no Brasil, Bernucci *et al.* (2006) relata que uma das primeiras estradas reportadas tem início em 1560, à época do terceiro governador-geral do Brasil, Mem de Sá. Diz respeito a um caminho aberto para ligar São Vicente ao Planalto Piratininga, recuperado no ano de 1661, o que foi denominada *Estrada do Mar* (ou *Caminho do Mar*), permitindo assim o tráfego de veículos. Nos anos seguintes, a estrada ainda passou por etapas de recuperação, sendo abandonada em 1913 devido à concorrência da linha férrea. Em 1920, com a criação da *Sociedade Caminho do Mar*, a estrada foi reconstruída, havendo inclusive o estabelecimento de pedágio, mas que foi posteriormente abolido.

Ao passar dos anos, com o objetivo de melhorar o transporte de café e o ouro das minas, além de facilitar a locomoção entre os principais estados à época (São Paulo, Rio de Janeiro e Minas Gerais), foram desenvolvidas outras importantes estradas na região. Como exemplo disto, pode-se citar a *Estrada Real*, ainda utilizada hoje em dia e com forte cunho turístico; a *Estrada*

Normal da Serra da Estrela, criada para facilitar o percurso entre Rio de Janeiro (RJ) e Petrópolis (RJ); e a *Estrada de Rodagem União e Indústria*, que liga Petrópolis (RJ) a Juiz de Fora (MG), sendo a primeira a utilizar macadame como base/revestimento. (Bernucci *et al.* 2006).

Anos mais tarde, na década de 1940, haja vista o desenvolvimento tecnológico observado durante a 2ª Guerra Mundial, percebeu-se grande avanço da pavimentação em vários países, refletindo-se com o tempo também no Brasil, que passou a estudar os métodos de dimensionamentos de pavimentos desenvolvidos e as melhores técnicas construtivas para a construção de vias pavimentadas (Bernucci *et al.* 2006).

A partir daí a construção de estradas no Brasil passou a avançar. O grande impulso ocorreu nas décadas de 1940 e 1950, devido à criação do Fundo Rodoviário Nacional (FRN) em 1946, destinando recursos específicos para o desenvolvimento de estradas. Soma-se a isto também a criação, em 1953, da Petrobrás, auxiliando consideravelmente na obtenção de materiais para a execução dos pavimentos (Bernucci *et al.* 2006).

2.3. METODOLOGIA CBR

O método de dimensionamento com base no ensaio CBR foi desenvolvido pelo Corpo de Engenheiros do Exército Americano (USACE), tornando-se a base principal do método do DNER brasileiro, que será apresentado adiante.

Com a proximidade da Segunda Guerra, em 1939, e a possibilidade do uso de aviões bombardeiros mais pesados do que os pavimentos da época suportavam, surgiu a necessidade de desenvolver um método de dimensionamento de pavimentos aeroviários mais eficientes do que os utilizados comumente, vindos da área rodoviária. Além disso, deveria ser um método de fácil assimilação, rápido e eficiente, diante das condições que a ocasião impunha (Balbo, 2007).

Em 1942, com a entrada dos Estados Unidos na guerra, os engenheiros do USACE se viram obrigados a desenvolver o método da maneira mais rápida possível, momento em que passaram a considerar o aprimoramento de uma metodologia já existente, em vez de uma metodologia totalmente nova. Foi escolhido então o primeiro método do CBR, desenvolvido por O. J. Porter, da Divisão de Estradas do Estado da Califórnia (Coutinho, 2011).

Segundo Coutinho (2011), tal método, além de já ter sido correlacionado com o comportamento de rodovias construídas entre 1928 e 1942, também era vantajoso em relação à simplicidade dos ensaios, pois a resistência do subleito poderia ser avaliada com equipamentos simples e os

ensaios de resistência dos materiais poderiam ser realizados em laboratório em condições similares às existentes no campo.

Diante disso, a metodologia foi desenvolvida a partir do estudo sobre as condições das rodovias na Califórnia. Nestas rodovias, constatou-se que as principais causas de ruptura eram a má compactação, o excesso de umidade no subleito, as espessuras de base insuficientes e as bases compostas por materiais com pouca resistência à tensão cisalhante. Com isso, tornou-se evidente a necessidade de um método que levasse em conta essas causas, criando-se assim um ensaio específico, o *California Bearing Ratio* (CBR) (Coutinho, 2011).

O ensaio CBR foi concebido para avaliar a resistência do material frente a deslocamentos significativos, sendo obtida por meio de ensaio de penetração em laboratório. Foram selecionados os melhores materiais granulares de bases de pavimentos com bom desempenho à época da pesquisa de campo californiana e a média de resistência à penetração no ensaio foi estabelecida como sendo o valor de referência ou padrão, equivalente a 100%. Todos os materiais são referenciados por um valor em porcentagem, representando o quão melhor ou pior é sua resistência no ensaio por comparação com aqueles materiais granulares de referência, designados simplificada de “material padrão” (Bernucci *et al.* 2006).

Tendo em vista o mesmo princípio adotado por Porter, juntamente com o ensaio CBR, o USACE estabeleceu então curvas de dimensionamento de pavimentos para cargas de 12.000 lbs (5443,1 kg) de trens de pouso individuais de aeronaves pesadas. Segundo Balbo (2007), o critério de Porter era empírico, feito mediante observações em campo. Já a extrapolação adotada pelo USACE, para cargas superiores, implicou na associação do conhecimento das tensões de cisalhamento calculadas em função da profundidade do meio elástico. Essas tensões foram estabelecidas a partir das condições de Boussinesq, onde o meio elástico deve ser isotrópico, homogêneo e linear. Assim, foi possível se obter curvas de dimensionamento para diversos tipos de cargas, chegando até a carga de 70.000 lbs (31751,5 kg), conforme Figura 2.2.

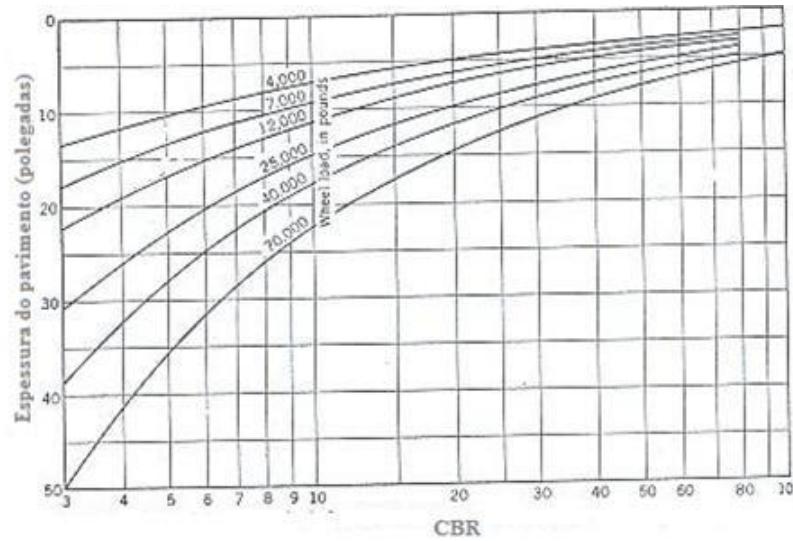


Figura 2.2 – Primeiras curvas extrapoladas para o dimensionando de pavimentos utilizando a metodologia CBR (Middlebrooks e Bertram, 1950).

2.3.1. Primeira equação: espessura x CBR

Após a extrapolação das curvas, os engenheiros do USACE: Turnbull, Ahlvin e Foster apresentaram, em 1956, a primeira equação de dimensionamento de espessuras de pavimento. Tratava-se de uma equação dada em função do valor de CBR da camada inferior, que era capaz de correlacionar a espessura necessária de material sobre o subleito com base no valor do CBR da fundação, da carga de roda e da pressão de contato (pressão da roda equivalente). No entanto, a equação só era válida para valores de CBR não superiores a 12% no subleito.

$$t = \sqrt{P \left(\frac{1}{8,1 CBR} - \frac{1}{\pi p} \right)} \quad (1)$$

Onde:

t espessura de material granular sobre o subleito (pol)

P carga total (lbs)

p pressão de contato (psi)

A partir daí outros estudos foram realizados e novas metodologias propostas, chegando a conclusões que culminaram no desenvolvimento do método de dimensionamento CBR de fato.

Conquanto, até o momento, foi explicitado apenas como a metodologia foi desenvolvida inicialmente nos Estados Unidos, assim, será mostrado daqui em diante, como o método de

dimensionamento CBR foi adotado no Brasil, passando a ser conhecido também como Método de dimensionamento do DNER.

2.4. MÉTODO DO DNER

O Método do DNER, utilizado para dimensionamento de pavimentos flexíveis e semi-rígidos (bases cimentadas), foi introduzido no Brasil pelo engenheiro Murilo Lopes de Souza, que teve como base principal o trabalho “*Design of Flexible Pavements Considering Mixed Loads and Traffic Volume*”, desenvolvido pela USACE, e por meio de resultados obtidos na Pista Experimental da *American Associations of State Highway and Transportations Official* (AASTHO), como mostra o Manual de Pavimentação de 2006, publicado pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT).

Além disso, mediante ensaio preconizado pelo DNER, o método utiliza o CBR para avaliar a capacidade de suporte relativa dos subleitos, e em relação aos materiais integrantes do pavimento, são adotados coeficientes de equivalência estrutural, baseados nos resultados da pista experimental da AASTHO, com as devidas adequações.

2.4.1. Premissas do Método DNER

A seguir, de acordo ao Manual de Pavimentação (2006) do DNIT, será detalhado o método de dimensionamento de pavimentos flexíveis do DNER.

- Capacidade de Suporte

Para a avaliação da capacidade de suporte do subleito e dos materiais que irão compor as camadas do pavimento, utiliza-se o ensaio CBR, em corpos-de-prova indeformados ou moldados em laboratório para as condições de massa específica aparente e umidade especificada para o serviço.

Para oferecer maior confiabilidade aos resultados, é utilizado para o dimensionamento o Índice de Suporte (IS), que é obtido por meio do valor médio encontrado no ensaio CBR mais o valor de suporte IS_{IG} , dado pelo índice de grupo (IG). Vale ressaltar que o IS não poderá ser maior que o valor do CBR. A Tabela 2.1 mostra os valores de IG e IS, e em seguida a formulação para o Índice de Suporte (Coutinho, 2011).

Tabela 2.1 – Valores da relação entre o Índice de Grupo e o Índice de Suporte - Tabela Original (Souza, 1991).

Índice de Grupo I.G.	Índice de Suporte I.S.
0	20
1	18
2	15
3	13
4	12
5	10
6	9
7	8
8	7
9 a 10	6
11 a 12	5
13 a 14	4
15 a 17	3
18 a 20	2

$$IS = \frac{CBR + IS_{IG}}{2} \quad (2)$$

Onde:

CBR valor do CBR do material, obtido em ensaio

IS Índice de Suporte

IS_{IG} Índice de Suporte dado pelo Índice de Grupo

- Tráfego

O pavimento é dimensionado em função do número (N) de repetições (ou operações) dos eixos dos veículos, equivalente às solicitações do eixo padrão rodoviário de 8,2 tf (80 kN) durante o período considerado de projeto, ou seja, de vida útil do pavimento.

- Fator climático regional

Devido às diversas estações do ano e a conseqüente variação de umidade dos materiais que compõem os pavimentos, o parâmetro de tráfego, representado pelo número N, deve ser corrigido por um coeficiente, denominado Fator Regional (FR).

Para os projetos brasileiros, tem-se adotado um valor de FR igual a 1.0, que tem como base os estudos desenvolvidos no IPR/DNER.

- Coeficiente de equivalência estrutural

Segundo Balbo (1997), de modo intuitivo, os coeficientes de equivalência estrutural atribuídos aos materiais constituintes das camadas do pavimento representam a capacidade relativa de um dado material em distribuir pressões sobre as camadas inferiores, levando a concluir que quanto maior o módulo de elasticidade do material, menor pressão resultaria sobre uma camada subjacente a ele, e em cascata, tal capacidade relativa de distribuição de pressões seria maior para este material.

São mostrados na Tabela 2.2 os coeficientes de equivalência estrutural para os diferentes materiais constitutivos do pavimento.

Tabela 2.2 – Coeficiente de equivalência estrutural (Manual de Pavimentação - 2006 - DNIT).

Componentes do pavimento	Coeficiente 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 45 kg/cm	1,70
Idem, com resistência à compressão a 7 dias, entre 45 kg/cm e 28 kg/cm	1,40
Idem, com resistência à compressão a 7 dias, entre 28 kg/cm e 21 kg/cm	1,20

Para designar os coeficientes estruturais, de acordo às camadas a que pertencem, tem-se:

- Revestimento: K_R
- Base: K_B
- Sub-base: K_S
- Reforço: K_{Ref}

- Espessura Mínima de Revestimento

É adotado pelo método um valor de espessura mínima necessária para proteger a camada de base dos esforços impostos pelo tráfego e para evitar a ruptura do próprio revestimento por esforços repetidos de tração na flexão. O valor é obtido em função do Número N e é utilizado principalmente para bases que possuam comportamento puramente granular, como mostra a Tabela 2.3.

Tabela 2.3 – Espessura Mínima de Revestimento Betuminoso (Manual de Pavimentação - 2006 - DNIT).

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

2.4.2. Método de Cálculo

Encontrados os dados citados no tópico anterior, o método de cálculo para o dimensionamento do pavimento torna-se muito simples.

Por meio de ábacos, em função do Número N e do IS ou CBR, encontra-se a espessura total necessária para o pavimento. A Figura 2.3 mostra o ábaco utilizado para materiais de base granular ($K = 1$), onde, a partir do valor de N nas abcissas, procede-se verticalmente até se encontrar a reta representativa da capacidade de suporte (IS ou CBR), para em seguida proceder-se horizontalmente, obtendo assim, nas ordenadas, a espessura total do pavimento.

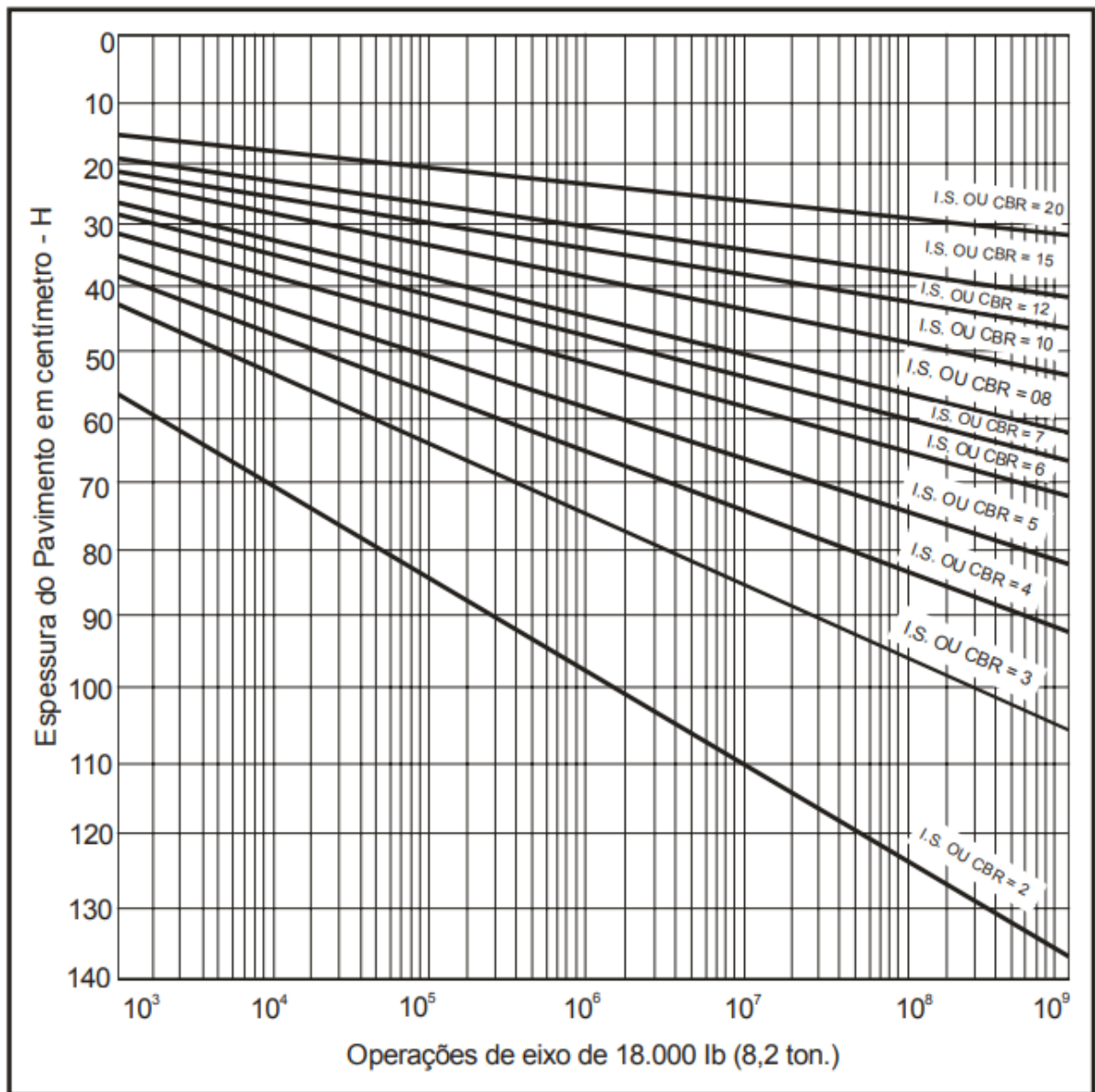


Figura 2.3 – Determinação de espessuras do pavimento (Manual de Pavimentação - 2006 – DNIT).

Uma vez estabelecida a espessura total exigida, segue-se para a determinação da espessura necessária para proteger as camadas componentes do pavimento, através de seus respectivos valores de IS ou CBR e o mesmo Número N. No entanto, no caso da camada de base, mesmo que o IS ou CBR seja superior a 20, adota-se o valor de 20 para a determinação do pavimento necessário para protegê-la. Além disso, é necessário que a espessura construtiva mínima para as camadas seja de 15 cm.

A Figura 2.4 mostra a simbologia adotada no dimensionamento do pavimento, onde H_m designa, de modo geral, a espessura de camada de pavimento com IS ou CBR igual a “m”, e assim por diante.

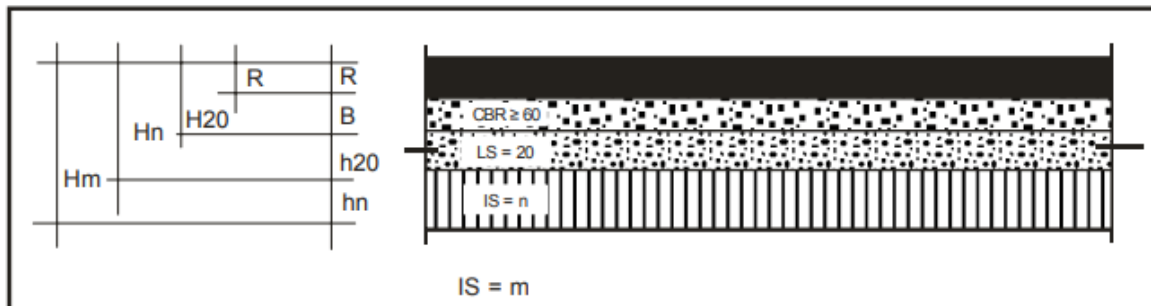


Figura 2.4 - Simbologia do dimensionamento do pavimento (Manual de Pavimentação - 2006 – DNIT).

Determinadas as espessuras mostradas na Figura 2.4, prossegue-se para a resolução das sucessivas inequações, mostradas a seguir:

$$RK_R + BK_B \geq H_{20} \quad (3)$$

$$RK_R + BK_B + h_{20}K_s \geq H_n \quad (4)$$

$$RK_R + BK_B + h_{20}K_s + h_nK_{ref} \geq H_m \quad (5)$$

Onde:

B valor necessário para espessura da base

h_{20} valor necessário para espessura da sub-base

h_n valor necessário para espessura do reforço do subleito

2.5. MÉTODO AASTHO 1993

O método de dimensionamento de pavimentos flexíveis da *American Association of State Highway Officials* (AASHO) é baseado em resultados obtidos das pistas de teste localizadas em Ottawa, Illinois, construídas entre 1956 e 1958 (Figura 2.5). Mediante a ação de tráfego acelerado sobre as pistas, buscou-se determinar a degradação do pavimento em relação à sua solicitação pelos tipos de eixos dos veículos que trafegavam sobre a via (Coutinho, 2006).



Figura 2.5 – Pista de teste AASHTO (Coutinho, 2011).

Por meio da execução de testes e com o acompanhamento contínuo de engenheiros e matemáticos da AASHTO, uma série de novos conceitos foi criada. Entre eles, o índice de serventia presente (PSI), o número estrutural (SN) e o índice de equivalência dos eixos (ESALs).

O índice de serventia presente (PSI), segundo Coutinho (2011), partiu do princípio de que a função principal de um pavimento era a de “servir” aos usuários da via. Assim, por meio de pesquisas realizadas junto aos motoristas de automóveis e caminhões, os quais deram notas a 138 regiões específicas das rodovias americanas, foram obtidas correlações entre as notas dos usuários e a condição dos pavimentos analisados.

É nesse cenário que surge uma análise não mais baseada apenas na capacidade de resistência estrutural das camadas, mas sim na capacidade de servir de forma adequada ao objetivo principal de uma rodovia, oferecendo, desta forma, uma análise da capacidade funcional do pavimento.

Com os resultados dos ensaios das pistas de teste, foi desenvolvida a primeira equação empírica, capaz de mostrar a quantidade de cargas padrões que a pista suportaria antes de atingir a serventia limite.

$$\log(W_{18}) = 9,36 \log(SN + 1) - 0,20 + \frac{\log(4,2 - p_t)/(4,2 - 1,5)}{0,4 + 1094/(SN + 1)^{5,19}} \quad (6)$$

Onde:

W_{18} número de operações do eixo padrão de 18 kips

p_r índice de serventia final no período de vida útil

SN número estrutural do pavimento

De acordo com Coutinho (2011), o número estrutural do pavimento (SN) pode ser explicado como a quantificação da capacidade de suporte do pavimento, dada pela soma ponderada da capacidade estrutural de cada uma de suas camadas constituintes. A capacidade estrutural de cada camada é o produto do coeficiente estrutural de cada material (a_1, a_2, a_3) pela sua espessura (D_1, D_2, D_3).

$$SN = a_1 \cdot D_1 + a_2 \cdot D_2 + a_3 \cdot D_3 \quad (7)$$

Onde:

SN número estrutural do pavimento

a_1, a_2, a_3 coeficientes estruturais para o revestimento, base e sub-base respectivamente

D_1, D_2, D_3 espessura da camada de revestimento, base e sub-base respectivamente

Quanto aos índices de fatores de equivalência de eixos (ESALs), segundo o mesmo autor, foram desenvolvidos por meio de uma análise comparativa entre os eixos existentes na época e o eixo padrão, este último escolhido como sendo um eixo simples de roda dupla carregado com 8,2 tf (80 kN). Nas pistas de testes foram executados ensaios de repetições de cargas, que serviram como base para a realização de uma correlação entre os tipos de eixos e o eixo padrão, levando em conta a influência dos eixos sobre a vida útil do pavimento. Com isso, obtiveram-se os fatores de equivalência de eixos.

2.5.1. Modificações da AASHTO

Com o passar dos anos, agora como *American Associations of State Highway and Transportations Official* (AASHTO), foram publicadas outras versões da metodologia, com base em novos testes realizados, novos coeficientes estruturais com a aplicação de diferentes materiais.

Desse modo, em 1986, por meio de uma nova revisão das publicações realizadas, estabeleceram-se alguns princípios a serem adotados, a citar: melhor caracterização do subleito; incorporação da drenagem no dimensionamento do pavimento; melhor consideração dos efeitos ambientais; e a incorporação do nível de confiabilidade no dimensionamento do pavimento.

Assim, os coeficientes estruturais do subleito foram correlacionados aos módulos de resiliência destes, e também a drenagem foi correlacionada ao número estrutural SN (Coutinho, 2011).

A equação principal do método passou a ser então a mostrada a seguir:

$$\log(W_{18}) = Z_R \cdot S_0 \cdot +9,36 \log(SN + 1) - 0,20 + \frac{\log(4,2 - p_t)/(4,2 - 1,5)}{0,4 + 1094/(SN + 1)^{5,19}} \quad (8)$$
$$+ 2,32 \log(M_R) - 8,07$$

Onde:

Z_R nível de confiança obtido no processo

S_0 desvio padrão

M_R módulo de resiliência efetivo do subleito (psi)

Outra versão foi publicada no ano de 1993, porém a equação permaneceu a mesma. As únicas mudanças referiram-se aos coeficientes estruturais das camadas de pavimento, que agora eram dependentes do módulo de resiliência dos materiais que foram retroanalizados.

2.6. METODOLOGIA MECANÍSTICA-EMPÍRICA

O dimensionamento de estruturas de pavimentos asfálticos trata de um processo complexo, com a necessidade de conhecimento de variáveis de difícil previsão e modelagem, tais como: carregamento da estrutura e a resposta dada por ele quando analisada as variações das condições climáticas; as características dos materiais utilizados e o comportamento dos mesmos quanto à aplicação de cargas, entre outras (Franco, 2007).

Em decorrência da dificuldade ainda presente, foi desenvolvida uma gama de estudos voltados ao desenvolvimento de métodos mais modernos e analíticos de dimensionamento de pavimentos asfálticos, que objetivam minimizar cada vez mais o alto teor de empirismo ainda existente nas metodologias utilizadas.

Tais estudos deram origem aos métodos chamados mecanístico-empíricos, que a partir de modelos matemáticos obtidos de regressões de dados de ensaios de laboratórios, procuram traduzir as tensões, deformações e deslocamentos, buscando compatibilizá-los com o estado de tensões e deformações admissíveis para uma determinada vida de projeto. Já a parcela de empirismo, se encontra no fator de calibração entre o campo e o laboratório (Franco, 2007).

Nesse sentido, para o desenvolvimento dos estudos nesse campo, buscando soluções para determinar as tensões e deformações no pavimento, dois grandes pesquisadores foram essenciais: Boussinesq e Burmister, responsáveis por usar a Teoria da Elasticidade, esta que se tornou a base principal para o desenvolvimento do método.

2.6.1. Análise de tensões, deformações e deslocamentos na estrutura dos pavimentos.

Com base em estudos realizados e na experiência da construção de pavimentos flexíveis, concluiu-se que, na composição clássica de base granular e revestimento utilizando concreto asfáltico, os pavimentos usualmente possuem dois critérios de ruptura: dano à fadiga, que ocorre devido às deformações de tração na fibra inferior do revestimento; e/ou devido à deformação permanente, que ocorre no topo da camada do subleito, ocasionada pelo acúmulo de deformações plásticas nas camadas, favorecendo significativamente o defeito de afundamento de trilha de roda (Figura 2.6) (Silva, 2014; Cabral *et al.* 2018).

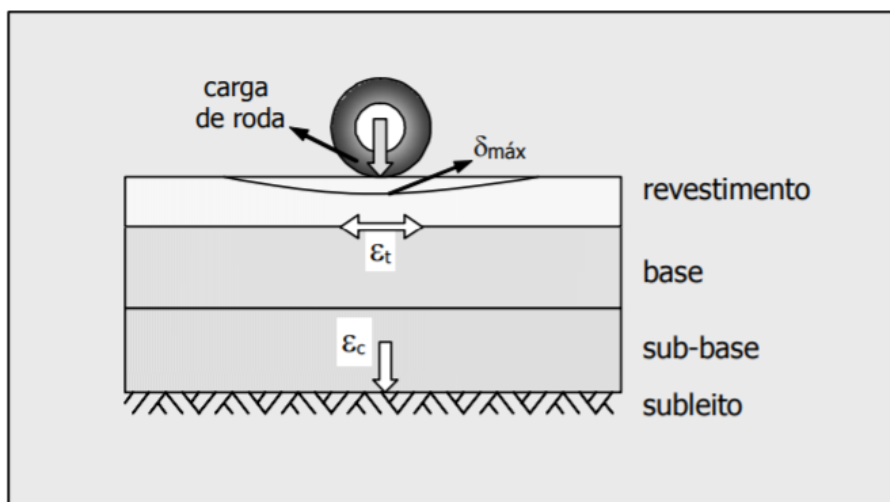


Figura 2.6 – Esquema representativo das tensões, deformações e deslocamentos na estrutura do pavimento, em pontos críticos (Franco, 2007).

Por meio da Teoria da Elasticidade, a estrutura dos pavimentos asfálticos, segundo Franco (2007) pode ser representada por um meio estratificado, submetido a um carregamento superficial distribuído em uma área circular. Desse modo, a partir da caracterização da estrutura e dos materiais componentes das camadas do pavimento; suas respectivas espessuras, módulos de resiliência e os coeficientes do Poisson dos materiais componentes; e da composição do tráfego atuante, o comportamento do pavimento pode ser estimado por meio do cálculo das tensões, deformações e deslocamentos gerados na estrutura.

2.6.2. A Teoria da Elasticidade de meios semi-infinitos homogêneos, formulada por Boussinesq.

Em 1885, Boussinesq formulou uma série de equações para o cálculo de tensões e deformações em um meio semi-infinito, linear, elástico, homogêneo e isotrópico submetido a cargas verticais concentradas ou uniformemente distribuídas na superfície (Medina, 1997).

Considerando a aplicação de uma carga de eixo simples de roda dupla de 80 kN como sendo o valor de referência usual no dimensionamento de pavimentos flexíveis, podem se destacar três grandes aplicações mais relevantes nos estudos desenvolvidos por Boussinesq, mostradas a seguir:

- Extrapolação das curvas empíricas de dimensionamento de pavimentos flexíveis do Departamento de Estradas da Califórnia, baseadas no índice de suporte CBR, para cargas de aviões;
- Cálculo da carga de roda equivalente a um conjunto de rodas, por exemplo, de um trem de pouso de rodas duplas de aviões;
- Expressão matemática das curvas de dimensionamento baseadas no índice de suporte CBR do subleito.

2.6.3. A Teoria da Elasticidade de Meios Semi-infinitos Estratificados

Segundo Medina (1997), por muitas vezes, os valores calculados de acordo às expressões de Boussinesq são muito discrepantes quando comparados às deflexões medidas no campo, principalmente quando se tem um revestimento asfáltico mais espesso ou quando há uma camada rígida na estrutura do pavimento.

Nesse sentido, surge a teoria formada pelo professor Donald M. Burmister, que em 1943 apresenta uma solução para determinar tensões e deformações em sistemas de duas camadas, como mostra a Figura 2.7. As principais hipóteses adotadas por Burmister, como retratam Medina e Motta (2005) são:

- a carga aplicada é estática, uniformemente distribuída em uma área circular, e o contato é flexível, desse modo as deflexões no centro da área carregada são maiores do que as deflexões nas bordas;

- a superfície da camada superior não está sujeita a tensões fora da área carregada e nesta área só ocorrem tensões normais, mas a grandes profundidades as tensões e deformações são nulas;
- as camadas são homogêneas, isotrópicas e constituídas por materiais linearmente elásticos, portanto é válida a lei de Hooke;
- as camadas são ilimitadas na direção transversal, com espessura finita, à exceção da camada inferior que tem espessura infinita e, portanto, é uma camada semi-infinita;
- se as camadas estão completamente aderidas umas às outras, aparecem tensões cisalhantes na interface e os deslocamentos horizontais na interface são os mesmos para as duas camadas. Se não há aderência entre as camadas, ou seja, há deslizamento, os deslocamentos horizontais são diferentes. Pelas condições de equilíbrio e continuidade a tensão vertical e os deslocamentos verticais na interface são os mesmos para as duas camadas.

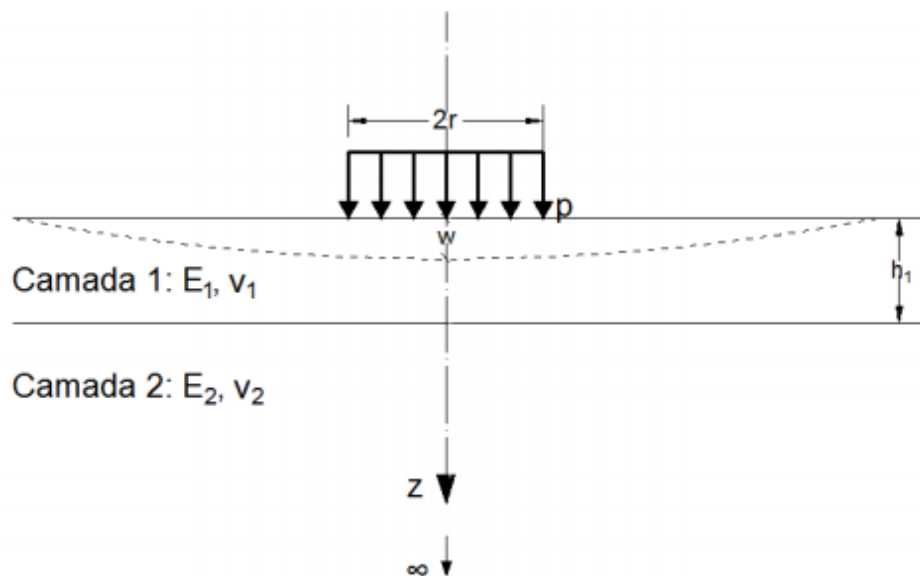


Figura 2.7 – Carregamento circular em um sistema de duas camadas (Silva, 2014).

De acordo com Silva (2014), o resultado apresentado por Burmister mostra que a razão entre os módulos das camadas é um fator de suma importância na deformabilidade da estrutura, por exemplo: tratando-se de uma estrutura de duas camadas, quanto maior for a razão entre o módulo da primeira e da segunda camada (E_1/E_2), menor é a deflexão no centro da área flexível

do carregamento, pois menor é o fator de deflexão obtido no ábaco elaborado por Burmister (Figura 2.8).

O cálculo numérico foi feito apenas para o deslocamento vertical total na superfície do terreno ou do pavimento, chegando-se a uma extensa equação que, como mostra Medina (1997), pode ser resumida na seguinte expressão:

$$w = \frac{1,5 \cdot p \cdot r}{E_2} \cdot F_w \left(\frac{r}{h_1}, \frac{E_1}{E_2} \right) \quad (9)$$

Onde:

w deflexão da superfície no centro do carregamento (metro);

p pressão de contato do carregamento circular (MPa);

r raio do carregamento (metro);

E_2 módulo de Young da camada do subleito (MPa);

E_1 módulo de Young da camada do subleito (MPa);

F_w coeficiente de deflexão

h_1 espessura da primeira camada (metro)

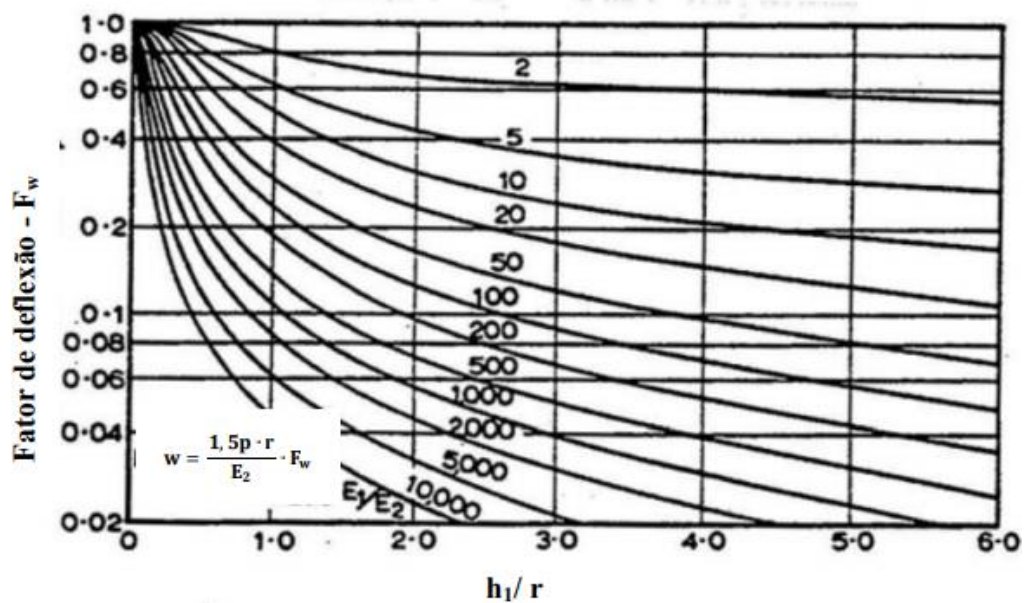


Figura 2.8 – Ábaco para o cálculo da deflexão considerando um sistema de duas camadas (Silva, 2014).

Além disso, também decrescem as tensões verticais no topo da segunda camada com o aumento da razão entre o módulo das duas camadas, pois quando a camada superior é bem menos deformável, esta se comporta com uma laje, capaz de distribuir as tensões lateralmente, efeito que acontece devido às tensões de tração na camada superior (Pinto, 2006). Vale ainda ressaltar que as equações de Burmister recaem nas de Boussinesq quando E_1 é igual a E_2 .

Burmister também desenvolveu a teoria do sistema de três camadas elásticas, numa análise aproximada de deflexões, em que estendeu a aplicabilidade da teoria de duas camadas. Mostra que a espessura combinada de revestimento asfáltico e base granular podem ser usualmente adotadas de modo a se recair no sistema de duas camadas, em sua opinião. A consideração de três camadas já se torna indispensável, no caso de pavimentos de concreto com camadas de sub-base acima do subleito ou terceira camada ou subleito (Medina, 1997).

Além de Boussinesq e Burmister, posteriormente, o pesquisador matemático L. Fox fez o cálculo das tensões na segunda camada de um sistema de duas camadas ao transformar as equações diferenciais de Burmister numa forma compatível com o cálculo numérico. Posteriormente, Acum e Fox em 1951, também aplicaram a teoria de Burmister a um sistema de três camadas, apresentando tabelas que permitiam determinar as tensões verticais e radiais ao longo do eixo de simetria do carregamento nas interfaces entre as camadas (Medina, 1997; Silva, 2014).

2.6.4. Programas Computacionais

Mesmo com as limitações existentes à época, a teoria da elasticidade atendeu de forma satisfatória aos modelos matemáticos desenvolvidos para simular os pavimentos asfálticos. No entanto, como relata Silva (2014), na década de 70, começaram a surgir os primeiros programas computacionais de cálculo, o que facilitou o dimensionamento em vários aspectos, tais como: redução de tempo gasto nos processos de cálculo; consideração de coeficientes de Poisson variáveis, aplicação de estruturas com mais do que três camadas, entre outras.

De maneira geral, em relação aos métodos computacionais, dois em especial chamam a atenção:

- a) Cálculo analítico com base na teoria de Burmister: as hipóteses são baseadas na teoria modelada por Burmister, em que se permite considerar múltiplos carregamentos, por meio do princípio da superposição. É o caso de programas como o MeDiNa e o ELSYM5, também muito utilizado para dimensionamento de pavimentos flexíveis.

- b) Cálculo utilizando o Método dos Elementos Finitos (MEF): Método ainda bastante difundido nos dias atuais, em que se considera a discretização do problema em elementos, conectado entre eles em determinados pontos. Permite análises mais complexas, aproximando mais o modelo às condições reais de campo.

A partir daí diversos programas foram e ainda vêm sendo desenvolvidos, muitos deles utilizando os métodos citados no tópico anterior, além da consideração dos conceitos advindos da teoria da elasticidade.

De toda forma, o desenvolvimento de métodos de cálculos computacionais não elimina a necessidade de modelos de análises adequados para a correta aplicação dos parâmetros obtidos em ensaios, por exemplo.

2.7. MEPDG - MECHANISTIC-EMPIRICAL PAVEMENT DESIGN GUIDE

O MEPDG, conhecido inicialmente como AASHTO 2002, foi um procedimento mecanístico-empírico desenvolvido para atualizar o método da AASTHO 1993. Tem como premissa fundamental identificar as causas das tensões e deformações nas estruturas dos pavimentos e calibrá-los a partir da observação da performance do pavimento em campo. Tais elementos definem, de maneira geral, a abordagem dessa metodologia de dimensionamento, onde a busca pelas causas físicas, procurando traduzir as tensões e deformações no pavimento, diz respeito a parte mecanicista do método, enquanto a observação em campo para determinação das correlações trata da parte empírica do processo (*Pavement Interactive*, 2019).

Um das significativas mudanças trazidas pelo método diz respeito a abordagem adotada, no qual o desenvolvimento do dimensionamento do pavimento é realizado de forma inversa, mediante critérios pré-estabelecidos (*Pavement Interactive*, 2019).

O programa utiliza para o dimensionamento os espectros de carga por eixo dos veículos comerciais de carga, assim como informações detalhadas das condições climáticas e materiais das camadas, a fim de prever o desempenho da estrutura (Pelisson *et al.* 2015).

Inicialmente, assume-se o projeto do pavimento em caráter experimental, e assim, o *software* calcula a resposta da estrutura proposta às tensões criadas. Desse modo, ao submeter a estrutura a iterações, estima-se o dano que o pavimento sofrerá ao longo do tempo (Vilhela, 2017).

2.7.1. Indicadores de desempenho

A partir dos dados e dos modelos utilizados, o processo de análise do dimensionamento do pavimento no MEPDG tem como base indicadores de desempenho, os quais refletem o impacto projetado de tensões e deformações ao longo do tempo. Tais indicadores incluem a rugosidade da via, dado pelo *International Roughness Index - IRI*, além de outros indicadores específicos de acordo ao tipo de pavimento (*Pavement Interactive*, 2019).

2.7.2. Estrutura hierárquica MEPDG

Com o intuito de fornecer resultados satisfatórios às análises realizadas, um grande nível de detalhe é cobrado para inserção dos parâmetros no *software*, principalmente no que diz respeito às características dos materiais e do tráfego, o que envolve a realização de ensaios e estudos destes (*Pavement Interactive*, 2019).

Nesse sentido, o programa permite que o projetista tenha a opção de considerar diferentes níveis de complexidade para a inserção dos dados de entrada. No primeiro nível, os dados necessários requerem maior rigor e precisão, sendo necessários completos ensaios dos materiais, detalhada pesagem e contagem dos veículos, dados confiáveis a respeito das condições climáticas, além de todas as constantes de calibração dos modelos de desempenho utilizados para previsão dos danos (*Pavement Interactive*, 2019; Vilhela, 2017).

No segundo nível, há algumas simplificações, principalmente na inserção do tráfego, mas ainda são necessários ensaios a respeito dos materiais utilizados. Já no terceiro nível, os valores são baseados em sugestões do programa, sendo o nível mais simplificado para realização de análises (Vilhela, 2017).

2.8. MODELOS DE RUPTURA

2.8.1. Análise de Fadiga

A fadiga pode ser descrita como um processo de deterioração estrutural que um determinado material sofre quando está submetido a um estado de tensões e deformações repetidas de carregamento. Assim, há uma solicitação maior na base do revestimento asfáltico, resultado de uma maior solicitação do esforço de tração, ocasionando o aparecimento de fissuras no material, que posteriormente podem evoluir para trincas, levando até mesmo à falha total do pavimento (Preussler & Pinto, 2001).

Para estabelecer a relação entre o estado de tensão-deformação e o número de ciclos de carga que ocorrem até o pavimento atingir a ruptura, são utilizados ensaios de laboratório de cargas repetidas, no qual, mediante a aplicação de diferentes níveis de tensão ou deformação, procura-se reproduzir as condições das misturas betuminosas quando o pavimento se encontra em serviço (Fontes, 2009).

Os ensaios mais comuns para expressar essa relação são: ensaios de flexão repetida, tração direta ou ensaios diametrais realizados a determinados níveis de tensão ou extensão (Fontes, 2009).

Com o objetivo de caracterizar da melhor forma a resistência à fadiga de uma mistura betuminosa, Fontes (2009) aponta que é necessário avaliar tal comportamento sob estado de tensão semelhante ao encontrado no campo. No entanto, a reprodução da ação do tráfego em laboratório é difícil, uma vez que, nos ensaios, aplicam-se ciclos de cargas que se mantêm constantes ao passar do tempo, apesar de ser praticável aplicar carregamentos com ciclos variados. No entanto, de toda forma é possível avaliar os módulos e as características de fadiga em diversas condições de carga.

Em resumo, o ensaio de fadiga consiste em submeter corpos de prova de misturas betuminosas às solicitações, repetidas vezes, registrando-se o número de ciclos ocorridos até a ruptura da estrutura de pavimento ensaiada (Fontes, 2009).

Tais ensaios podem ser realizados tanto à deformação controlada, quanto à tensão controlada. No primeiro caso, a deformação ou a amplitude de deformação se mantêm constante durante a execução do ensaio, enquanto no segundo caso, a carga aplicada no corpo de prova ensaiado permanece a mesma durante o ensaio (Arao, 2014).

Para quantificar a durabilidade da mistura betuminosa em termos de fadiga, utiliza-se o termo Vida de Fadiga, que segundo a norma do DNIT ME 183/2018, pode ser definida como: “volume de tráfego expresso por número equivalente do eixo padrão (N) que ele pode suportar antes que o dano observado, em termos de quantidade de trincas, atinja uma determinada porcentagem de área trincada admissível para cada tipo de via”.

No que diz respeito ao critério de ruptura arbitrado, Fontes (2009) aponta que, para ensaios de fadiga, no caso de deformação controlada, a vida de fadiga corresponde ao decréscimo de 50% da rigidez inicial do corpo de prova. Já no ensaio de fadiga à tensão controlada, utiliza-se como critério a ruptura completa do corpo de prova para definição do número de ciclos correspondente a cada nível de carregamento aplicado (DNIT ME 183/2018).

Desse modo, a vida de fadiga pode ser expressa em relação as tensões ou a deformação resiliente inicial (ε_i). Tal deformação pode ser calculada indiretamente por meio do módulo de resiliência (MR) da mistura asfáltica ou pode ser medida nas primeiras aplicações carga para cada nível de tensão aplicado no ensaio.

Nos ensaios de tensão e deformação controladas, os critérios de ruptura apresentados são diferentes, como apresentado anteriormente. Porém, ambas as formulações são muito semelhantes, como mostrado a seguir:

- Ensaio a tensão controlada:

$$N_f = K_1 \cdot \left(\frac{1}{\sigma_i}\right)^{n_1} \quad (10)$$

- Ensaio a deformação controlada:

$$N_f = K_2 \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon_i}\right)^{n_2} \quad (11)$$

Onde:

N_f vida de fadiga expressa em número de solicitações de carga para a redução de 50% da rigidez da mistura ou ruptura total do corpo de prova.

σ_i tensão de tração aplicada

ε_i deformação de tração inicial

K_1, K_2, n_1, n_2 parâmetros determinados experimentalmente

Vale ressaltar que, de acordo a norma DNIT ME 183/2018, no dimensionamento mecanístico-empírico, a função de transferência que ajusta o modelo de fadiga (determinação dos parâmetros experimentais) é estabelecida individualmente para as equações 10 e 11.

Na Figura 2.9 é apresentado um exemplo de resultado do ensaio de fadiga, onde é possível observar a curva de tensão x número de ciclos, para o ensaio à tensão controlada; e deformação x número de ciclos, no caso do ensaio à deformação controlada.

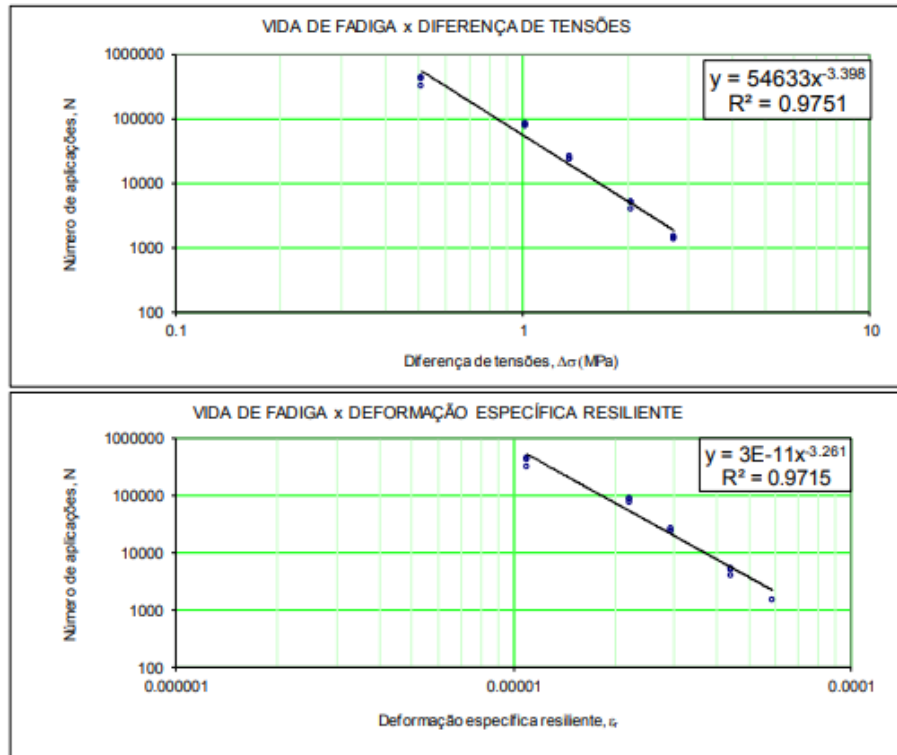


Figura 2.9 – Exemplo de ensaio de fadiga (DNIT ME 183/2018).

2.8.2. Deformação limite no topo do subleito

Um dos principais defeitos encontrados nos pavimentos asfálticos brasileiros é o de deformação permanente. É caracterizado pelo afundamento longitudinal do pavimento asfáltico, implicando em uma parcela de deformação não recuperável, ocasionando problemas em seu desempenho. Ocorre devido a passagem repetida das cargas dos veículos, o que submete o pavimento ao carregamento de tensões elevadas (Barros, 2017).

O defeito mais comum, resultado de tal deformação, é o afundamento de trilha de roda (ATR), mostrado na Figura 2.10. Caracteriza-se por sulcos criados no revestimento asfáltico ao longo da trajetória dos veículos, propiciando uma degradação acelerada da estrutura do pavimento, causando desconforto e insegurança aos usuários, e aumentando os custos operacionais da rodovia (Coutinho, 2011).



Figura 2.10 – Afundamento de trilha de roda (ATR) (BR 251/MG - Foto da autora).

No que se refere à obtenção de dados para o desenvolvimento de modelos a fim de avaliar a deformação permanente em pavimentos, tem-se um processo complexo, que demanda tempo elevado e envolve a obtenção de grande quantidade de variáveis (Franco, 2000).

Segundo o mesmo autor, atualmente, a deformação permanente ainda é avaliada indiretamente por meio das tensões verticais e deformações resilientes, obtidas mediante a aplicação de cargas que ocorrem no topo do subleito, considerando que a deformação das camadas realizadas acima do subleito é insignificante quando comparada à deformação do próprio subleito. Os ensaios mais usados para determinar esta deformação são o de compressão uniaxial, compressão triaxial e os ensaios de simuladores de tráfego (Coutinho, 2011).

Existem vários modelos de previsão de deformação permanente, tanto da tensão vertical quanto da deformação plástica admissível no topo do subleito. Um dos mais utilizados faz a consideração do limite de deformação de afundamento de trilha de roda por meio da adoção de modelos de deterioração vertical no topo do subleito ou no conjunto das camadas da estrutura do pavimento asfáltico, que segundo Franco (2007), pode ser representado pelas equações 12 e 13.

$$\varepsilon_v = A \cdot N^B \quad (12)$$

ou

$$n = k_1 \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon_v}\right)^{k_2} \quad (13)$$

Onde:

ε_v deformação vertical limite no topo do subleito;

A, B parâmetros experimentais obtidos em ensaios de laboratório, para equação 12;

k_1, k_2 parâmetros experimentais obtidos em ensaios de laboratório, para equação 13;

n número admissível de aplicações de carga no laboratório.

Outro modelo utilizado, incorporado no programa de análise de pavimentos PAVE, desenvolvido por (Franco, 2000), é apresentado a seguir, considerando uma formulação capaz de estimar a tensão vertical admissível no topo do subleito. Segundo Motta (1991), tal modelo foi originalmente desenvolvido por Heukelom e Kloump, em 1962.

$$\sigma_{adm} = \frac{0,006 \cdot M_R}{1 + 0,7 \cdot \log \cdot N} \quad (14)$$

Onde:

σ_{adm} tensão vertical admissível no topo do subleito (kgf/cm²);

M_R módulo de resiliência do subleito (kgf/cm²) e

N número de aplicações de carga.

2.9. MÉTODO DA RESILIÊNCIA - TECNAPAV

Além do dimensionamento de novos pavimentos, é possível também realizar projetos de restauração, o que também é contemplado no MeDiNa. Em suma, o procedimento de reforço consiste no confronto das deflexões medidas em campo, do pavimento construído, com os valores máximos admissíveis, obtidos a partir do tráfego previsto. Desse modo, são determinadas as espessuras do reforço a ser aplicado (caso seja necessário), a fim de reduzir as deflexões ao limite máximo admissível.

O procedimento mais utilizado, nos dias atuais, para projetos de restauração, é o DNER-PRO 269/94, também conhecido como TECNAPAV ou Método da Resiliência, que de acordo ao Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos do DNIT, publicado em 2006, trata de um procedimento fundamentado em modelos de fadiga de misturas betuminosas, no

comportamento resiliente típico de solos finos e materiais granulares, e no cálculo de tensões e deformações considerando a teoria da elasticidade não linear. Foi proposto pelos engenheiros Salomão Pinto e Ernesto Preussler, permitindo-se considerar as propriedades resilientes dos solos e dos materiais constituintes do pavimento.

No entanto, em diversos projetos de dimensionamento de estruturas de pavimentos novos, foi e ainda vem sendo utilizado o método TECNAPAV. Sendo assim, ainda que não contemplado no presente trabalho o dimensionamento de estruturas de reforço, é válida a apresentação do método, tendo em vista que parte dos projetos selecionados o utilizaram para determinação das espessuras.

2.9.1. Procedimentos Preliminares

Para a utilização do método, divide-se inicialmente a rodovia em segmentos homogêneos. Tais segmentos levam em consideração as condições do tráfego (Número N), subleito, deflexão recuperável, estrutura dos pavimentos e condições superficiais.

Após a divisão dos segmentos, devem ser realizadas sondagens, uma a cada 2 km, determinando-se as características das camadas do pavimento e do subleito. As amostras coletadas são conduzidas ao laboratório, onde devem ser realizados ensaios de caracterização, granulometria e CBR.

Pode-se então classificar o solo em três grupos quanto a sua resiliência, em função do CBR e da sua porcentagem de silte, como mostra a Tabela 2.4.

Tabela 2.4 – Classificação dos solos (Manual de Restauração – 2006 – DNIT).

CBR %	SILTE%		
	≤ 35	35 á 45	> 45
≥ 10	I	II	III
6 a 9	II	II	III
2 a 5	III	III	III

2.9.2. Dimensionamento do reforço com mistura nova

Tendo recolhido os dados referentes às características do pavimento e do subleito, a espessura necessária para reforçar o pavimento pode ser determinada da seguinte forma:

- a) Definição para cada segmento homogêneo caracterizado da espessura de mistura betuminosa existente (h_e), da deflexão característica ($D_c = \bar{x} + \sigma$) e o trincamento (TR), da espessura da camada granular (H_{cg}) e do tipo de solo da fundação.
- b) Representação para cada segmento homogêneo da chamada estrutura de referência, constituída por três camadas com as respectivas espessuras, como mostrado na Figura 2.11.



Figura 2.11 – Estrutura de referência do DNER PRO 269/94 (Manual de Restauração – 2006 – DNIT).

- c) Cálculo da espessura efetiva (h_{ef}) e do revestimento betuminoso, como mostrado na equação 15.

$$h_{ef} = -5,737 + \frac{807,961}{D_c} + 0,972 \cdot I_1 + 4,101 \cdot I_2 \quad (15)$$

Onde:

h_{ef} espessura efetiva (cm);

D_c deflexão característica (0,01 mm);

As constantes I_1 e I_2 estão relacionadas com a terceira camada da estrutura, no que diz respeito às suas características resilientes. Existem 4 casos em que se podem decidir seus respectivos valores, que está mais bem explicitado no Manual de Restauração do DNIT.

- d) Cálculo da deflexão máxima permissível:

$$\log D = 3,148 - 0,188 \log N_p \quad (16)$$

Onde:

D deflexão máxima admissível (0,01 mm)

e) Cálculo da espessura do reforço asfáltico (HR):

$$HR = -19,015 + \frac{238,14}{D^{\frac{1}{2}}} - 1,357 \cdot h_{ef} + 1,014 \cdot I_1 + 3,893 \cdot I_2 \quad (17)$$

f) Solução de recapeamento:

Com base na espessura de reforço calculada o item “e”, têm-se então as soluções propostas para o recapeamento da estrutura:

- Caso 1 – Se $3 < HR \leq 12,5$ cm, utiliza-se camada única de CBUQ ou camadas integradas de CBUQ e pré-misturado caso a superfície do pavimento estiver muito fissurada, procurando-se assim evitar a propagação de trincas.
- Caso 2 – Se $12,5 < HR \leq 25$ cm é recomendada a adoção de camadas integradas do tipo CBUQ (H_{ca}) e pré-misturado (H_{pm}) com as seguintes relações entre as espessuras:

$$H_{pm} = 0,40 \cdot HR \quad (18)$$

$$H_{ca} = HR - H_{pm} \quad (19)$$

- Caso 3 – Se $HR > 25$ cm, as camadas integradas não devem ser constituídas exclusivamente de misturas betuminosas; nesta situação deve-se verificar também a conveniência da reconstrução parcial ou total do pavimento existente.
- Caso 4 – Se $HR \geq 3$ cm, a partir da análise das condições do pavimento existente, verificar a viabilidade de intervenção com soluções do tipo tratamento superficial ou lama asfáltica.
- Caso 5 – O método contempla também a possibilidade de, em face de restrições orçamentárias, utilizar-se de uma solução de reforço por etapas. Neste caso, a norma apresenta modelos para mais duas soluções sucessivas dentro do período de análise. No entanto, não será explicitado neste presente trabalho as demais opções de dimensionamento.

3. METODOLOGIA

A partir da fundamentação teórica mostrada anteriormente, será apresentado neste capítulo como foi desenvolvida a comparação dos projetos selecionados, a partir da utilização do MeDiNa, explicitando seu funcionamento e as premissas adotadas.

3.1. MEDINA

O MeDiNa, principal meio de análise empregado no presente trabalho, trata-se de uma ferramenta utilizada para verificação de estruturas de pavimentos asfálticos, por meio da análise de um sistema de múltiplas camadas com comportamento elástico.

Foi desenvolvido a partir do Termo de Execução Descentralizada, celebrado entre o Instituto de Pesquisas Rodoviárias – IPR e o Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, da Universidade Federal do Rio de Janeiro – COPPE, bem como da colaboração do Centro de Pesquisas da Petrobrás – CENPES e de diversas Universidades do Brasil.

Em suma, o *software* é uma atualização da técnica de dimensionamento de pavimentos anteriormente utilizada no Brasil, realizado majoritariamente pelo Método do DNER, trazendo tecnologias mais avançadas, a aplicação das condições climáticas do país, mensuração do tempo de surgimento de trincas, entre outras vantagens.

3.1.1. Hipóteses

Assim como grande parte dos programas computacionais usados para a mesma análise, leva em conta uma série de hipóteses e considerações fundamentais, baseadas na solução de problemas de elasticidade linear em sistemas de multicamadas e contínuos, que de acordo ao Manual do MeDiNa, são:

- 1) Os materiais são elásticos lineares, isotrópicos e homogêneos;
- 2) A lei de Hooke é válida e o módulo de compressão é semelhante ao módulo de tração;
- 3) As camadas são ilimitadas na direção horizontal;
- 4) Todas as camadas possuem uma espessura finita, à exceção da camada inferior que é considerada semi-infinita;
- 5) A superfície da camada não está sujeita a tensões fora da área carregada.
- 6) Na área carregada ocorrem apenas tensões normais;

- 7) A carga aplicada é considerada estática, uniformemente distribuída em toda a área circular de contato;
- 8) A grandes profundidades as tensões e deformações são nulas;
- 9) As condições de aderência na interface das camadas podem variar de totalmente aderida para lisa ou sem aderência.

Além das hipóteses adotadas pelo programa, foram também estabelecidas determinadas premissas, que serão mostradas no decorrer do trabalho, para que a comparação dos projetos pudesse ser realizada.

3.1.2. Dimensionamento ou análise

No programa, é possível a realização de dois modos de dimensionamento: projeto de reforço e projeto de pavimento novo. No entanto, neste trabalho, será feita a verificação apenas de projetos de implantação de pavimentos novos. A Figura 3.1 mostra a tela inicial do *software*, já selecionada a opção de dimensionamento de um novo pavimento.

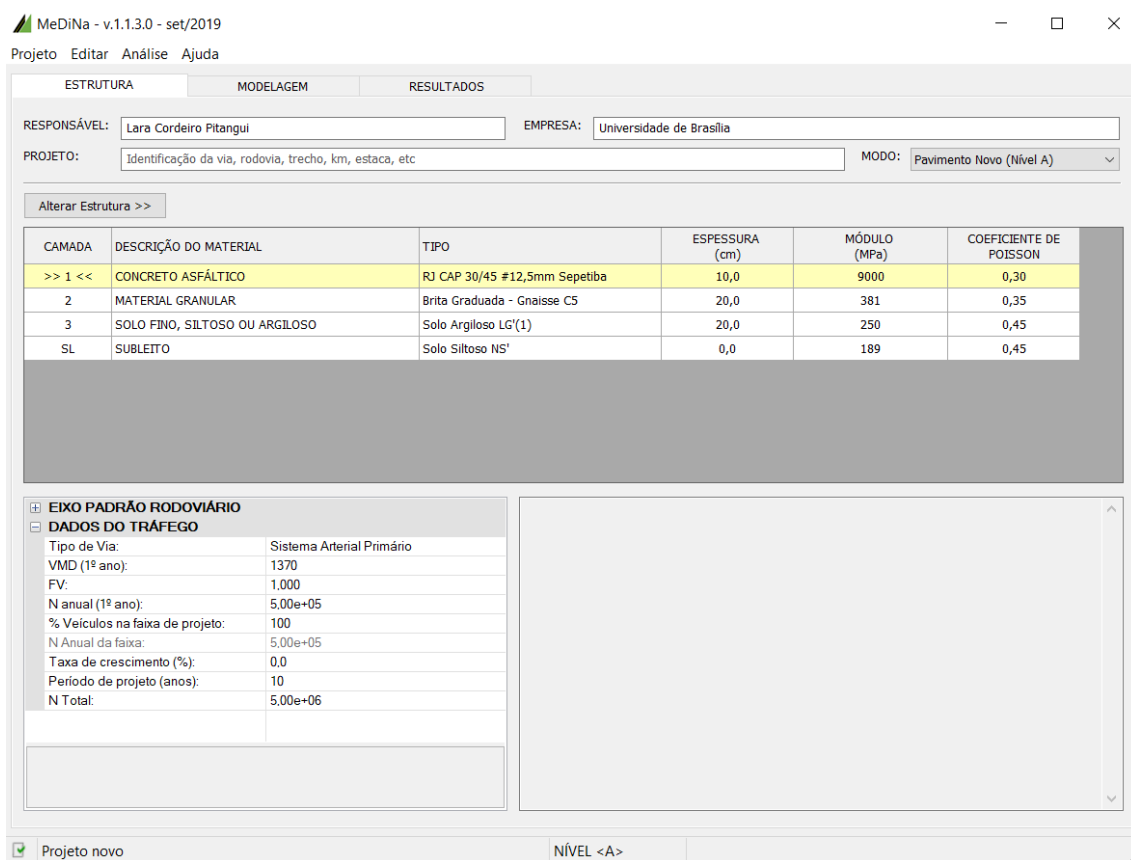


Figura 3.1 – Tela inicial do MeDiNa.

De maneira geral, o dimensionamento de um pavimento novo no MeDiNa consiste em definir a estrutura do pavimento, alimentando o programa com as características dos materiais de cada camada, com sua respectiva espessura. Além disso, é também necessário definir o tráfego, dado pelo conceito de Número Equivalente (Número N). Neste caso, é possível tanto calcular o Número N pelo *software*, quanto inserir as informações já calculadas. Tendo em vista que os projetos selecionados já estão totalmente prontos, todos contêm o Número N calculado, bastando apenas inserir as informações no programa.

Após o lançamento dos dados de estrutura e tráfego, é possível realizar dois tipos de análise: uma análise pura de como a estrutura se comporta, com base nos dados lançados, ou o dimensionamento do pavimento de fato. No primeiro caso, o programa realiza os cálculos e verifica os critérios de área trincada e/ou deformação permanente, sem alterar a espessura da camada marcada, apresentando um resumo a ser avaliado pelo projetista. Já no segundo caso, marcando a camada que se deseja dimensionar, o programa fornece qual a espessura da camada necessária para o projeto.

Neste trabalho, foi feita a alimentação do programa com os dados disponíveis no projeto e em seguida a análise da estrutura lançada, verificando se os critérios de área trincada e deformação permanente calculados pelo MeDiNa são satisfatórios para os projetos analisados.

Além disso, foi realizado o dimensionamento da camada de revestimento asfáltico, naqueles projetos em que a espessura proposta não atendeu aos critérios do MeDiNa.

3.1.3. Calibração e validação – Função de Transferência

Uma das principais dificuldades encontradas no campo da pavimentação diz respeito ao conhecimento dos materiais e a previsão do desempenho destes. Busca-se sempre caracterizá-los de forma que seu comportamento em laboratório e seu desempenho em campo sejam os mais próximos possíveis. Nesse sentido, Fritzen (2016) propôs uma metodologia de previsão do dano de fadiga em estrutura de pavimentos asfálticos, que foi atualizada posteriormente para funcionamento do MeDiNa, utilizando uma análise elástica-linear, na qual a evolução do dano é obtida por meio de ensaios laboratoriais em materiais asfálticos.

Para realização dos cálculos de danos no pavimento, o ajuste principal foi a respeito da função de transferência. No MeDiNa, o reajuste da calibração proposta do Fritzen (2016) teve como objetivo a definição da melhor curva Sigmoidal que representasse de forma satisfatória o comportamento da evolução da área trincada dos segmentos monitorados por ele em sua tese,

onde utiliza, para medição da área trincada, um gabarito desenvolvido no laboratório da COPPE. Desse modo, em todas as seções avaliadas, foram multiplicados fatores de deslocamento aos valores de Número N, nos casos em que havia leituras de área trincada, a fim de minimizar o erro entre a curva sigmoide e a evolução de área trincada, obtendo-se, dessa forma, um valor de Número N ajustado, conforme equação 20 (Manual do MeDiNa).

$$N' = (N * fS) * 10^{-10} \quad (20)$$

Onde:

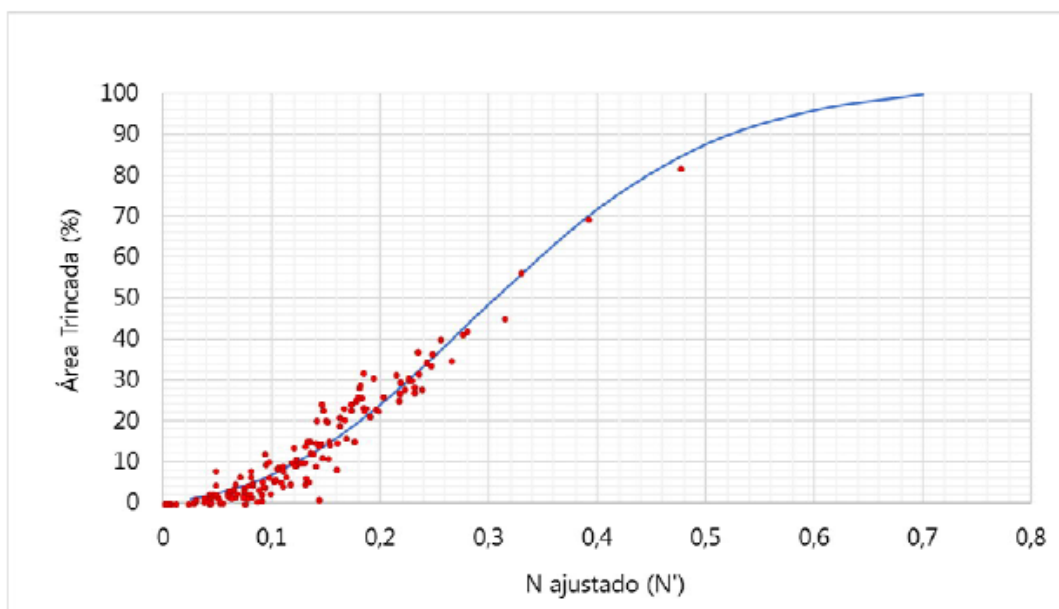
N' número N ajustado;

N número de repetições do eixo padrão quando foi realizada a medição de área trincada;

fS fator de deslocamento atribuído

Assim, uma vez aplicados estes fatores de deslocamento, as seções estudadas por Fritzen (2016) se ajustaram à curva sigmoide, cujo resultado é mostrado na Figura 3.2.

Figura 3.2 – Curva Sigmoide (Manual do MeDiNa).



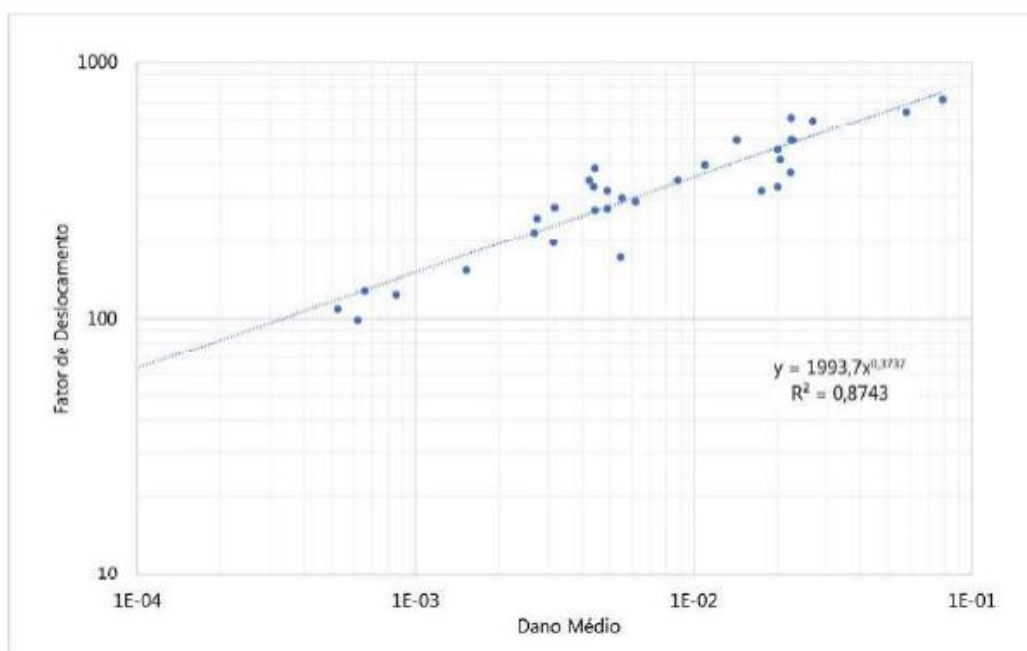
Uma vez definida a curva, foi necessário correlacionar os dados de área trincada com alguma informação estrutural do pavimento. Como aponta o Manual do MeDiNa, o dano médio foi estimado em uma malha distribuída em 20 pontos da camada de revestimento asfáltico, ou seja, para cada período, o programa calcula o dano médio distribuído nesses 20 pontos, que se dá

pela divisão de uma aplicação do eixo de carga padrão pelo número admissível de aplicações desse eixo.

Calculado o dano médio ($D_{médio}$), foi possível a obtenção de fato da Função de Transferência, capaz de transformar tal dano em uma previsão de área trincada. A função se dá como mostrada na equação 21 e visualizada na Figura 3.3, onde fS é o fator de deslocamento, enquanto C1 e C2 foram as duas constantes definidas no processo de calibração, cujo melhor ajuste encontrado foi de 1993,7 e 0,3737 respectivamente.

$$fS = C1 * (D_{médio})^{C2} \quad (21)$$

Figura 3.3 – Função de transferência proposta por Fritzen (2016) (Manual do MeDiNa).



Com isso, a partir dos coeficientes cadastrados, o programa permite calcular a área trincada para previsão de ruptura da estrutura de pavimento proposta, sendo o critério utilizado para definir a vida útil deste.

3.1.4. Dano de Fadiga

Para o cálculo de fadiga, o Manual do MeDiNa aponta que o *software* utiliza o estado de tensões calculado em dez pontos na superfície do pavimento, espaçados de 3,65 cm, e em dez pontos na fibra inferior da última camada asfáltica presente no pavimento. Assim, o dano de fadiga é

calculado em cada um desses vinte pontos, realizando a média. Desse modo, com a média, o programa calcula a área trincada tendo como referência a função de transferência, citada no tópico anterior.

A curva de fadiga adotada no MeDiNa é obtida por meio de ensaios de carregamento repetido, à tensão constante, usando o ensaio de compressão diametral de tração indireta. Como indica o Manual do MeDiNa, o programa permite apenas as relações do número de ciclos (N_{fad}) com a deformação resiliente de tração (ε_t), de acordo a expressão 20, onde k_1 e k_2 são fatores relacionados à qualidade dos materiais.

$$N_{fad} = k_1 \cdot \varepsilon_t^{k_2} \quad (20)$$

3.1.5. Deformação Permanente

No caso da deformação permanente, os materiais são avaliados de acordo ao estudo proposto por Guimarães (2009), que por meio de ensaios de materiais submetidos à ação de cargas repetidas, conseguiu definir modelos de previsão com elevados coeficientes de correlação baseados em uma equação com quatro constantes:

$$\varepsilon_p^{esp} = \psi_1 \cdot (\sigma_3)^{\psi_2} \cdot (\sigma_d)^{\psi_3} \cdot (N)^{\psi_4} \quad (21)$$

Onde

ε_p^{esp}	deformação permanente específica (%);
$\psi_1, \psi_2, \psi_3, \psi_4$	parâmetros de regressão;
σ_3	tensão confinante (kgf/cm ²);
σ_d	tensão desvio (kgf/cm ²);
N	número de ciclos de aplicação de carga.

Assim, para o cálculo de deformação permanente, o *software* utiliza o estado de tensões calculado tanto em pontos sob a roda, quanto em pontos entre as rodas, ambas no centro das camadas (Figura 3.4). Portanto, para a obtenção da deformação da camada, o ponto de deformação sob a roda é multiplicado pela espessura da respectiva camada.

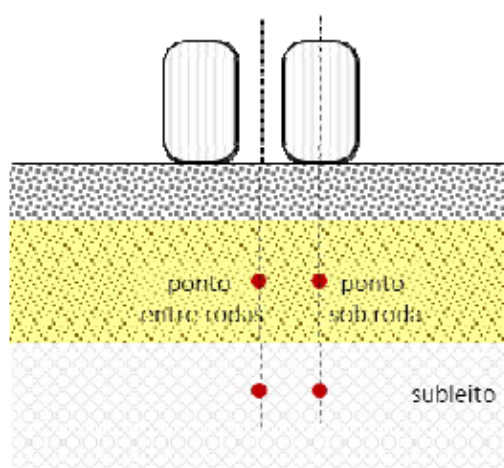


Figura 3.4 – Pontos de cálculo para deformação permanente (Manual do MeDiNa).

Desse modo, constam já cadastrados no MeDiNa os materiais estudados por Guimarães (2009), indicados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Parâmetros do modelo de previsão da deformação permanente obtidos por Guimarães (2009).

Item	Material	Classificação	$\varepsilon_p^{esp} (\%) = \psi_1(\sigma_3)^{\psi_2} \cdot (\sigma_d)^{\psi_3} \cdot (N)^{\psi_4}$				R ²
			ψ_1	ψ_2	ψ_3	ψ_4	
1	Laterita Acre	Pedregulho	0,105	0,839	-0,014	0,041	0,939
2	Brita Graduada Chapecó	Pedregulho	0,079	-0,598	1,243	0,081	0,951
3	Cascalho Corumbaíba	Pedregulho	0,180	-0,212	0,840	0,443	0,898
4	Laterita de Porto Velho	Pedregulho	0,180	0,470	0,336	0,047	0,809
5	Argila de Ribeirão Preto	LG ⁷	0,206	-0,24	1,34	0,038	0,986
6	Areia Argilosa do ES	LG ⁷	0,643	0,093	1,579	0,055	0,909
7	Solo Papucaia	NS ⁷ /NA ⁷	0,244	0,419	1,309	0,069	0,946
8	Areia Fina de Campo Azul/MG	NA	0,050	-1,579	1,875	0,064	0,868
9	Tabatinga Acre	NG ⁷	Não recomendado				

3.1.6. Condição de aderência

Um dos pontos mais importantes na utilização do MeDiNa é em relação à condição de aderência entre as camadas da estrutura do pavimento, que diz respeito ao movimento horizontal relativo na interface entre duas camadas.

No programa, não é permitido que o projetista insira valores numéricos para condição de aderência entre as camadas, deixando apenas duas condições pré-estabelecidas: “Não aderido” e “Aderido”. Tal informação é considerada no modelo de calibração do programa, para o cálculo da previsão de danos, não sendo facultado ao projetista sua seleção.

A Tabela 3.2, retirada do Manual do MeDiNa, mostra, a depender de qual camada está acima da outra, a condição de aderência especificada.

Tabela 3.2 – Condição de aderência (Manual do MeDiNa).

CAMADA	CONDIÇÃO
Camada asfáltica sobre outra camada asfáltica	ADERIDO
Camada asfáltica sobre outra camada cimentada	NÃO ADERIDO
Camada asfáltica sobre camada anti-reflexão de trincas	ADERIDO
Camada asfáltica sobre camadas de solos ou granulares	NÃO ADERIDO
Tratamento superficial sobre camadas asfálticas	ADERIDO
Tratamento superficial sobre camadas de solos ou granulares	NÃO ADERIDO
Camada estabilizada sobre outra camada estabilizada	NÃO ADERIDO
Camada estabilizada sobre camadas de solos ou granulares	NÃO ADERIDO
Camada anti-reflexão de trincas sobre camadas estabilizadas	NÃO ADERIDO
Camada de solos ou granulares sobre camadas asfálticas, cimentadas, de solos ou granulares	NÃO ADERIDO

3.1.7. Critérios de Parada

Após o cálculo do dano acumulado de fadiga no revestimento asfáltico e de deformação permanente da base, sub-base e do subleito, o programa define alguns critérios de parada, a partir do tipo de via analisada. Esses critérios são parâmetros que norteiam os projetistas, a fim de que estes possam analisar, para o período de projeto e para as características e espessuras

das camadas dimensionadas, se foi atingido ou não o limite de porcentagem de área trincada e o limite de deformação permanente.

Assim, caso um determinado projeto apresente, em algum ano do período de vida útil, porcentagem de área trincada e/ou deformação permanente superiores àquelas limitadas pelo MeDiNa, significa dizer que tal projeto não atende à análise feita pelo programa, ou seja, provavelmente seriam necessárias camadas mais espessas, diferentes materiais para a estrutura, entre outras soluções. A Tabela 3.3 resume os critérios e a confiabilidade de cada tipo de via.

Tabela 3.3 – Critérios de parada (Manual do MeDiNa).

TIPO DE VIA	CONFIABILIDADE	ÁREA TRINCADA	DEF. PERMANENTE
Sistema Arterial Principal	95%	30%	10mm
Sistema Arterial Primário	85%	30%	13mm
Sistema Arterial Secundário	75%	30%	20mm
Sistema Coletor Primário	85%	30%	13mm
Sistema Coletor Secundário	75%	30%	20mm
Sistema Local	65%	30%	20mm

3.1.8. Materiais

O programa possui, já cadastrados, diversos materiais para cada camada da estrutura do pavimento, tanto constantes em publicações técnicas, quanto ensaiados para alimentação do MeDiNa. Desse modo, a depender de qual camada está sendo analisada (revestimento, base, sub-base, camada anti-reflexão de trincas ou subleito), é permitida a escolha de materiais específicos.

a) Materiais asfálticos

No caso dos materiais asfálticos, esses são separados em três conjuntos: camadas asfálticas tradicionais, camadas asfálticas com asfalto modificado por polímero e camadas asfálticas misturadas com borracha. No banco de dados do programa existem várias misturas asfálticas já cadastradas e ensaiadas, que dizem respeito às principais misturas utilizadas no país.

A principal característica utilizada no caso das camadas asfálticas é o módulo de resiliência. Demais características da mistura como faixa granulométrica, teor de CAP, abrasão Los

Angeles, entre outras, são lançadas de forma a serem controladas durante a execução da obra. Além disso, para quantificação dos danos de área trincada, tais materiais são avaliados pelo modelo de curva de fadiga apresentado no tópico 3.1.4.

b) Camadas anti-reflexão de trincas

O *software* permite utilizar dois tipos de camadas para anti-reflexão de trincas: o tratamento superficial duplo (TSD) ou a camada de SAMI (*Stress Absorbing Membrane Interlayer*). No entanto, tais camadas somente estão disponíveis para utilização quando o projeto prevê a utilização de bases estabilizadas com cimento e, além disso, tais camadas não são avaliadas nem por critérios de fadiga, nem por critérios de deformação permanente.

c) Materiais estabilizados

No caso dos materiais estabilizados, o programa trata-os como materiais que possuem propriedades elásticas variáveis ao longo da vida de serviço. Desse modo, adota um módulo de resiliência que decai a cada mês, com comportamento do tipo sigmoidal. Tais materiais são subdivididos em três categorias principais: Brita Graduada Tratada com Cimento (BGTC), Concreto Compactado a Rolo (CCR) e o Solo Cimento.

Para as análises, o MeDiNa considera apenas os critérios de fadiga, pois entende que, quando bem executadas, estas camadas não contribuem de forma efetiva para a trilha de roda total da estrutura do pavimento. Assim, cada uma das três categorias citadas possui uma curva de fadiga associada.

d) Materiais Granulares; Solos finos, Siltosos e Argilosos.

Da mesma forma como nos materiais anteriormente citados, no caso dos materiais granulares, solos finos, siltosos ou argilosos, o principal parâmetro utilizado pelo MeDiNa para representá-los é o módulo de resiliência.

Esses materiais são utilizados basicamente em camadas granulares, os quais são avaliados apenas quanto ao dano por deformação permanente. Os modelos considerados pelo MeDiNa são aqueles indicados na Tabela 3.1.

e) Subleito

Por fim, tem-se o material do subleito. Esses são tratados de forma similar aos solos granulares, finos, siltosos e argilosos, ou seja, também são representados principalmente por seu módulo de resiliência e avaliados por meio de modelos de deformação permanente.

3.2. PREMISSAS ADOTADAS

Além das hipóteses que o próprio MeDiNa considera, também foram estabelecidas algumas premissas no momento da avaliação e dimensionamento dos projetos, de forma que a comparação destes pudesse ser realizada de forma mais realística.

3.2.1. Métodos utilizados

A ideia inicial do presente trabalho propôs a utilização de projetos dimensionados pelo Método do DNER. No entanto, tais projetos, além de considerarem uma metodologia mais simplista, em sua maioria são projetos mais antigos, cujas informações, principalmente em termos de características dos materiais, são muito limitadas.

Diante dessa situação, foi adotada a possibilidade de utilizar projetos que tivessem sido dimensionados pelo Método do DNER, mas que também fossem verificados por alguma outra metodologia mecanicista, por exemplo o *software* ELSYM5 ou similar. Além destes, alguns projetos selecionados foram dimensionados pelo Método da Resiliência, conhecido como TECNAPAV, ou até mesmo por alguma combinação entre os métodos citados. As informações referentes aos métodos utilizados em cada projeto encontram-se no Apêndice A.

3.2.2. Adequação dos materiais

Novamente, em razão da limitação de informações fornecidas dos materiais dos projetos analisados, quando comparados à necessidade do MeDiNa, alguns ajustes foram realizados para uma adequada comparação.

O primeiro ajuste diz respeito ao módulo de resiliência do material: este foi o principal parâmetro utilizado para compatibilização dos materiais selecionados nos projetos. Nos casos em que não foram dadas essas informações pelos projetistas (casos ocorridos principalmente em projetos dimensionados apenas pelo Método do DNER), optou-se pela utilização de módulos conhecidos na literatura; já nos demais casos, em que os projetos disponibilizaram esse parâmetro, este foi utilizado como referência. As Tabelas 3.4 e 3.5 indicam valores médios dos módulos utilizados como base, retirados de Bernucci *et al.* (2011) e Nascimento *et al.* (2006) respectivamente.

Tabela 3.4 – Módulos de Resiliência de referência (Bernucci *et al.* 2006).

Características	Faixa (publicação)	MR (MPa)	RT (MPa)	MR/RT
Concreto asfáltico – CAP 30/45	Faixa C (Soares <i>et al.</i> , 2000)	3.628	1,09	3.346
Concreto asfáltico – CAP 50/60		3.033	0,89	3.425
Concreto asfáltico – CAP 85/100		1.488	0,44	3.376
Concreto asfáltico – CAP 30/45	Faixa B (Soares <i>et al.</i> , 2000)	5.105	0,82	6.201
Concreto asfáltico – CAP 50/60		4.425	0,73	6.062
Concreto asfáltico – CAP 85/100		1.654	0,21	7.755
Misturas densas (moldadas em usina)	Faixa C (Rede Asfalto, 2005)			
Concreto asfáltico 1		2.651	0,85	3.119
Concreto asfáltico 2		2.297	0,67	3.428
AAUQ1		1.825	0,52	3.510
AAUQ2		1.683	0,72	2.338
Misturas densas (moldadas em laboratório)	Faixa C (Rede Asfalto, 2005)			
Concreto asfáltico 1		3.609	1,26	2.864
Concreto asfáltico 2		3.026	1,23	2.460
AAUQ1		1.786	1,02	1.751
AAUQ2		1.682	0,81	2.077
SMA – 12,5mm	(Vasconcelos, 2004)	4.747	0,98	4.844
SMA – 9,5mm		3.367	0,82	4.106
Concreto asfáltico de referência	Faixa C (Lima, 2003)			
Com 0% fresado		3.200	1,20	2.667
Com 10% fresado		4.776	1,30	3.674
Com 30% fresado		7.524	1,30	5.787
Com 50% fresado		8.901	1,60	5.663
Concreto asfáltico de referência	Faixa C (Pinheiro, 2004)	3.647	0,97	3.760
Asfalto-borracha (úmido)		2.393	0,50	4.786
Agregado-borracha (seco)		2.452	0,80	3.065

Tabela 3.5 – Módulos de Resiliência de referência (Nascimento *et al.* 2006).

ENSAIO DE MÓDULO DE RESILIÊNCIA					
Tipo de Ligante	CAP 50/70	50-65	55-75	60-85	65-90
Média (Mpa)	9015	6822	5682	4966	5152
Temp. 25°C - Aplicação da Carga: 0,1 s - Repouso: 0,9 s					
Normas: AASHTO TP-031/94 e ASTM D-4123					

O segundo ponto trata das curvas de fadiga e dos modelos de deformação permanente exigidos pelo MeDiNa para avaliação da ruptura do pavimento. Na maioria das situações, os projetos em análise não dispuseram de tais informações, situação que se justifica principalmente pelo fato de, devido às metodologias de dimensionamento adotadas, tais modelos não eram necessários.

Nesse sentido, optou-se pelo cadastro de apenas um novo material: revestimento asfáltico com módulo de 4000 MPa, utilizando uma curva de fadiga do próprio programa, referente ao concreto asfáltico de classe 2. Isso se justifica por que tal curva se aproxima satisfatoriamente das considerações usuais de danos por fadiga em dimensionamentos de pavimentos asfálticos,

e também por que em grande parte dos projetos que forneceram valores de módulo, 4000 MPa é um valor representativo.

Além disso, no caso dos subleitos cadastrados no MeDiNa, há apenas as opções de solo fino ou solo siltoso. Desse modo, de forma a ampliar o leque de opções, foram cadastrados os solos da Tabela 3.1 também na camada de subleito, pois ambos são avaliados da mesma forma, e tais materiais, em alguns casos, também são usados como subleito.

Por fim, de forma a não subestimar os projetos realizados, nos casos em que não foram disponibilizadas informações claras a respeito dos materiais das camadas, optou-se sempre por um material de módulo maior do que o teórico ou fornecido, a fim de confirmar, sem dúvidas, se algum projeto está subdimensionado de acordo com o MeDiNa.

3.2.3. Limitação de espessura das camadas

A espessura das camadas de revestimento asfáltico no MeDiNa é limitada entre 5 cm e 15 cm. Todavia, em alguns casos, os projetistas optaram por duas camadas de revestimento asfáltico, usualmente uma com CBUQ Faixa ‘C’ e outra CBUQ Faixa ‘B’ (*binder*), cujas espessuras foram inferiores a 5 cm. Nesses casos, como o programa não permite a inserção de espessuras menores, optou-se pela união das duas camadas, utilizando-se a soma da espessura de ambas, e como módulo de referência, utilizou-se o maior módulo entre as duas camadas.

Houve também situações em que a espessura da camada de revestimento asfáltico proposta foi superior à 15 cm. Nesses casos, dividiu-se a camada em duas, utilizando-se o mesmo material em ambas.

3.2.4. Tipo de Via

De acordo à Tabela 3.3, para avaliar um pavimento pelo MeDiNa, é necessário informar qual o tipo de via. Isto está diretamente relacionado à confiabilidade da análise fornecida pelo programa, que varia de 65% a 95 %, a depender a via.

Em vista disso, como foram selecionadas apenas vias de grande tráfego (vias principais) nos projetos analisados, foram considerados em todos os casos o Sistema Arterial Primário, de forma que o nível de confiabilidade fornecido pelo programa foi de 85% em todas as análises.

3.3. SELEÇÃO DOS PROJETOS

O arquivo técnico do DNIT inclui uma série de projetos realizados e implantados em várias regiões do Brasil, os quais estão catalogados e organizados por rodovia, com seu respectivo

estado. No entanto, mesmo com uma grande quantidade de projetos, somente cerca de 10% deste acervo encontra-se em meio digital.

Em vista disso, foram selecionados 16 projetos de implantação de pavimento novo, apenas dentre estes 10%. A Tabela 3.6 mostra um resumo dos projetos selecionados, indicando a rodovia principal, o respectivo estado e o segmento do projeto.

Tabela 3.6 – Projetos selecionados para redimensionamento no MeDiNa.

NÚMERO DO PROJETO	RODOVIA	ESTADO	SEGMENTO
1	BR 060	GO	km 162,9 ao km 179,9
2	BR 376	PR	km 0,00 ao km 17,3
3	BR 364	RO	km 828,6 ao km 910,6
4	BR 470	SC	km 0,0 ao km 18,61
5	BR 135	BA	km 267 ao km 344,74
6	BR 101	SC	km 245,0 ao km 271,7
7	BR 104	PE	km 19,8 ao km 71,2
8	BR 163/364	MT	Km 434,6 ao km 466,6
9	BR 222	CE	km 9 ao km 20
10	BR 050	MG	km 47 ao km 68,4
11	BR 116	BA	km 334,23 ao km 387,41
12	BR 280	SC	km 36,68 ao km 74,58
13	BR 364	MG	km 211,6 ao 287,2
14	BR 386	RS	km 351,5 ao km 385,3
15	BR 432	RR	km 119,2 ao km 169,6
16	BR 448	RS	km 0,00 ao km 22

3.4. COMPILAÇÃO DAS INFORMAÇÕES

Tendo em vista que um projeto de implantação de pavimento novo consiste em uma série de subprojetos, como de drenagem, tráfego, pavimentação, entre outros, a compilação consistiu basicamente em selecionar as informações demandadas pelo MeDiNa e organizá-las de forma a facilitar o posterior dimensionamento. Evidentemente que os projetos são diferentes entre si, o que justifica o fato de nem todas as informações terem sido encontradas em todos os projetos, em sua integralidade.

Sendo assim, as informações coletadas se resumiram nos seguintes itens:

- a) Método de dimensionamento utilizado;
- b) Número N;
- c) Período de projeto;
- d) Camadas da estrutura e respectivas espessuras;
- e) Dados principais constantes no projeto referentes aos materiais de cada camada.

Após a coleta, os dados disponíveis foram compatibilizados com aqueles presentes no MeDiNa, onde foram selecionados os que melhor caracterizavam o projeto em análise. As Tabelas 3.7 e 3.8 mostram o modelo de tabela utilizado, tendo como exemplo os projetos da BR 104 PE e BR 448 RS. As demais encontram-se no Apêndice A.

Tabela 3.7 – Resumo de informações da BR 104 PE.

Rodovia	Informações Gerais	Método(s) utilizados(s)	Número N	Período de projeto (anos)
BR 104 PE	Segmento km 19,8 ao km 71,2	Método da Resiliência e DNER	2,29E+07	15
Camada	Espessura (cm)	Material indicado no projeto	Camada selecionada no Medina	Material selecionado no Medina
Revestimento Asfáltico (1ª camada)	4,5	CBUQ Faixa "A" - Asfalto modificado com polímero SBS (Módulo fornecido de 3500 MPa)	Concreto Asfáltico Modificado	RJ CAPFLEX 65/90 SBS PG 70-22
Revestimento Asfáltico (2ª camada)	4	CBUQ Faixa "B"		
Base	17	Brita graduada tratada com 2% em peso de cimento, misturada em usina (BGTC) (Módulo fornecido de 1300 MPa)	Brita Graduada Tratada com Cimento (BGTC)	Balbo, 1993 c: 80kg/m ³
Sub-Base	20	Solo granular de jazida estabilizada granulometricamente na pista (Módulo fornecido de 130 MPa)	Solo fino, siltoso ou argiloso	Solo LG' (s:1521)
Subleito	-	Solo com CBR de 10%- Predomínio de solos siltosos (A.4 e A.2.4) (Módulo fornecido de 100 MPa)	Subleito	Solo Siltoso NS'

Tabela 3.8 – Resumo de informações da BR 448 RS.

Rodovia	Informações Gerais	Método(s) utilizados(s)	Número N	Período de projeto (anos)
BR 448 RS	Segmento km 0+000 e 9+140	DNER e EVERSTRESS 5.0	9,54E+07	10
Camada	Espessura (cm)	Material indicado no projeto	Camada selecionada no Medina	Material selecionado no Medina
Revestimento Asfáltico (1ª camada)	5	Concreto asfáltico modificado com polímeros do tipo SBS (Módulo fornecido de 5000 Mpa)	Concreto Asfáltico Modificado	Classe 2
Revestimento Asfáltico (2ª camada)	14	Concreto asfáltico convencional com CAP 50/70 - (Módulo fornecido de 6000 Mpa)	Concreto Asfáltico	RJ CAP 50/70 #12,5mm Sepetiba
Base	19	Brita graduada	Material Granular	Brita Graduada - Gnaisse C4
Sub-Base	21	Macadame Seco	Material Granular	Brita Graduada - Gnaisse C1
Subleito	-	Solo Fino - Argilas de baixa capacidade nas camadas mais superficiais, com transição para argila arenosa e areia fina a média com maiores capacidades de suporte.	Subleito	Solo Areno-argiloso LG'(2)

3.5. ANÁLISE E DIMENSIONAMENTO

Finalmente, após compiladas todas as informações, seguiu-se para a análise e dimensionamento no MeDiNa.

Em suma, esta etapa consistiu em alimentar o *software* com as informações das tabelas 3.7, 3.8 e as mostradas no Apêndice A, criando um arquivo de pavimento novo para cada. Ou seja, foram escolhidas as camadas e os materiais correspondentes, com a respectiva espessura.

As Figuras 3.5 e 3.6 mostram a tela inicial do MeDiNa com as informações já inseridas nos casos das rodovias 104 PE e 448 RS, respectivamente.

CAMADA	DESCRIÇÃO DO MATERIAL	TIPO	ESPESSURA (cm)	MÓDULO (MPa)	COEFICIENTE DE POISSON
>> 1 <<	CONCRETO ASFÁLTICO MODIFICADO	RJ CAPFLEX 65/90 SBS PG 70-22	8,5	3184	0,30
2	BRITA GRADUADA TRATADA COM CIMENTO (BGT C)	Balbo, 1993 c: 80 kg/m³	17,0	Sigmoidal	0,25
3	SOLO FINO, SILTOSO OU ARGILOSO	Solo LG' (s:1521)	20,0	Resiliente Não Linear	0,45
SL	SUBLEITO	Solo Siltoso NS'	0,0	189	0,45

Figura 3.5 – Exemplo de inserção de camadas no Medina para BR 104 PE.

CAMADA	DESCRIÇÃO DO MATERIAL	TIPO	ESPESSURA (cm)	MÓDULO (MPa)	COEFICIENTE DE POISSON
>> 1 <<	CONCRETO ASFÁLTICO MODIFICADO	Classe 2	5	6743	0,30
2	CONCRETO ASFÁLTICO	RJ CAP 50/70 #12,5mm Sepetiba	14	8289	0,30
3	MATERIAL GRANULAR	Brita Graduada - Gnaisse C4	19	311	0,35
4	MATERIAL GRANULAR	Brita Graduada - Gnaisse C1	21	259	0,35
SL	SUBLEITO	Solo Areno-Argiloso LG'(2)	0,0	248	0,45

Figura 3.6 – Exemplo de inserção de camadas no Medina para BR 448 RS.

Além disso, também foram inseridos dados referentes ao tipo de via e de Número N. Naquela, como mencionado anteriormente, foram consideradas todas pertencentes ao Sistema Arterial Primário, com nível de confiabilidade de 85%. Neste último, foram apenas inseridos os dados finais, não sendo necessário o cálculo pelo programa. As Figuras 3.7 (a) e 3.7 (b) exemplificam as informações inseridas, para o caso das rodovias 104 PE e 448 RS.

EIXO PADRÃO RODOVIÁRIO	
DADOS DO TRÁFEGO	
Tipo de Via:	Sistema Arterial Primário
VMD (1º ano):	26124
FV:	1,000
N anual (1º ano):	9,54e+06
% Veículos na faixa de projeto:	100
N Anual da faixa:	9,54e+06
Taxa de crescimento (%):	0,0
Período de projeto (anos):	10
N Total:	9,54e+07

(a)

EIXO PADRÃO RODOVIÁRIO	
DADOS DO TRÁFEGO	
Tipo de Via:	Sistema Arterial Primário
VMD (1º ano):	4174
FV:	1,000
N anual (1º ano):	1,52e+06
% Veículos na faixa de projeto:	100
N Anual da faixa:	1,52e+06
Taxa de crescimento (%):	0,0
Período de projeto (anos):	15
N Total:	2,29e+07

(b)

Figura 3.7 – Exemplo de inserção do Número N no Medina para BR 448 RS (a) BR 104 PE (b).

De posse desses dados foi então realizada a análise da estrutura do pavimento. Nesta opção, os principais resultados que o programa retorna são: a porcentagem de área trincada calculada até o final do período de projeto, e o afundamento de trilha de roda, em milímetros, correspondente a soma de deformação de cada uma das camadas, ou seja, a deformação total para o período de projeto considerado.

Naqueles projetos em que a porcentagem de área trincada e/ou o afundamento de trilha de roda foram superiores aos critérios de parada mostrados na Tabela 3.2, foi feito o dimensionamento da camada de revestimento asfáltico em busca da espessura ideal, de acordo com o MeDiNa. Todos os resultados e respectivas análises são mostrados no capítulo 4.

3.6. IMPACTO FINANCEIRO

Nesta etapa foi possível analisar o impacto financeiro percebido pelo dimensionamento dos projetos por meio do MeDiNa.

Uma vez definida a espessura de revestimento asfáltico necessária para o correto dimensionamento, de acordo com o programa, foi possível obter a diferença entre a camada de revestimento asfáltico anterior e a nova camada dimensionada. Com isso, foi possível calcular o novo valor do concreto asfáltico, assim como o impacto que isto causou no custo do item pavimentação e no custo do projeto como um todo. As informações referentes aos orçamentos dos projetos, que foram encontradas, foram utilizadas para realização do cálculo.

Ressalta-se que, para este cálculo, foi considerada apenas a análise do concreto asfáltico isoladamente, pois não foram contabilizados demais itens relacionados à pavimentação, como pintura de ligação, aplicação de emulsão asfáltica, transporte do material, entre outros, mas sim

apenas o impacto refletido no custo de pavimentação e no projeto como um todo. Isso se justifica pois, em todos os projetos analisados, o valor gasto com concreto asfáltico é significativamente maior que os demais, sendo satisfatório para interpretação do impacto financeiro.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Diante da metodologia exposta no capítulo 3 e mediante a inserção dos dados no programa, são apresentados neste capítulo os resultados obtidos a partir da análise e dimensionamento dos projetos selecionados, assim como as respectivas discussões.

4.1. ANÁLISE DO MEDINA

Nos tópicos seguintes são mostrados os resultados de cada projeto individualmente, seguida de uma sucinta análise.

4.1.1. Resultados da análise da BR 060 GO

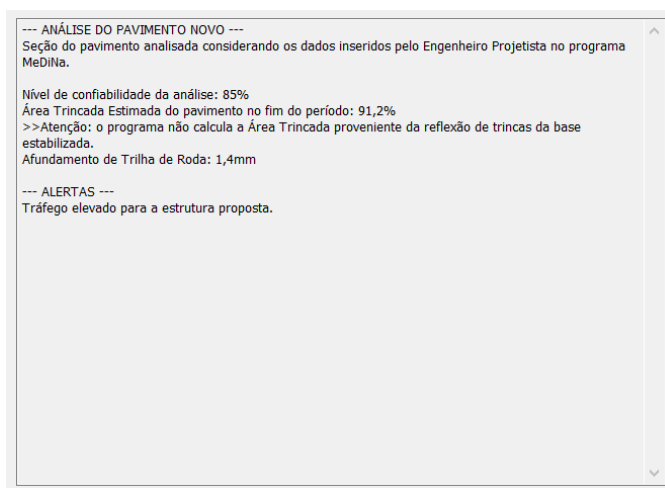


Figura 4.1 – Resultados da análise na BR 060 GO.

Perante os resultados mostrados pelo *software* (Figura 4.1), pode-se concluir que o pavimento rompeu antes do fim da vida útil de projeto de 15 anos, atingindo 91,2% de área trincada, enquanto os critérios de parada do MeDiNa (Tabela 3.3) apontam que o máximo permitido para esse tipo de via é 30%. No entanto, a ruptura se deu apenas pelo dano de fadiga, pois o afundamento de trilha de roda calculado, de 1,4 mm, foi bem menor do que o limite máximo do MeDiNa, de 13 mm.

Além disso, de acordo ao detalhamento dos resultados apresentado pelo programa, o pavimento atingiu o limite de 30% já no 78º mês.

4.1.2. Resultados da análise da BR 376 PR

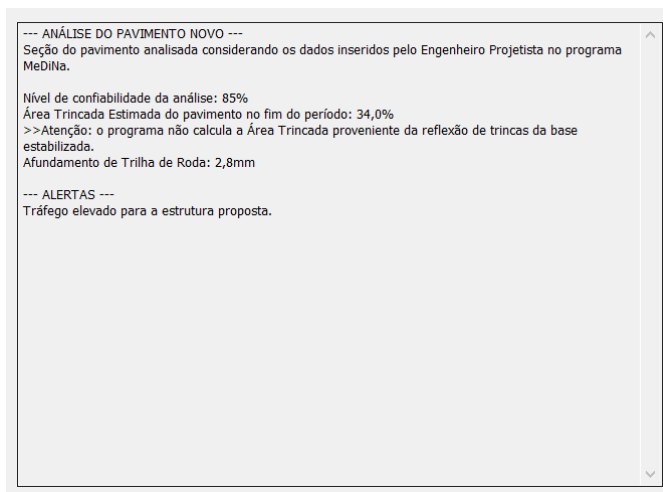


Figura 4.2 – Resultados da análise na BR 376 PR.

Com relação à BR 376 PR (Figura 4.2), a estrutura de pavimento proposta pelo projetista rompeu antes do fim do período de projeto de 10 anos, pois atingiu 34% de área trincada, enquanto o limite máximo permitido é de 30%. No entanto, a ruptura se deu apenas pelo dano de fadiga, pois o afundamento de trilha de roda calculado foi de 2,8 mm.

Além disso, de acordo ao detalhamento dos resultados apresentado pelo programa, o pavimento atingiu o limite de 30%, que é o máximo permitido para esse tipo de via, no 111º mês, ou seja, próximo ao fim do período, indicando que com poucos ajustes a estrutura já estaria de acordo aos critérios requeridos pelo MeDiNa.

4.1.3. Resultados da análise da BR 364 RO

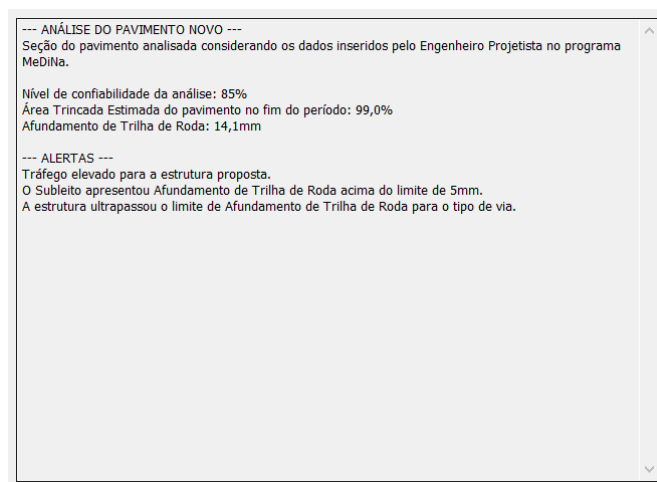


Figura 4.3 – Resultados da análise na BR 364 RO.

Para a BR 364 RO (Figura 4.3), o pavimento rompeu antes do fim do período de projeto de 10 anos, não só ultrapassando o limite de 30% permitido, como também atingindo 99% de área trincada, indicando um tráfego muito alto diante da estrutura proposta. No entanto, neste caso, o pavimento também ultrapassou o limite de afundamento de trilha de roda, apresentando um resultado de 14,1 mm, enquanto o máximo permitido é de 13 mm.

No que concerne ao dano por fadiga, o pavimento atingiu o limite máximo de 30% no 47º mês, enquanto o afundamento de trilha de roda já foi ultrapassado no 27º mês.

4.1.4. Resultados da análise da BR 470 SC

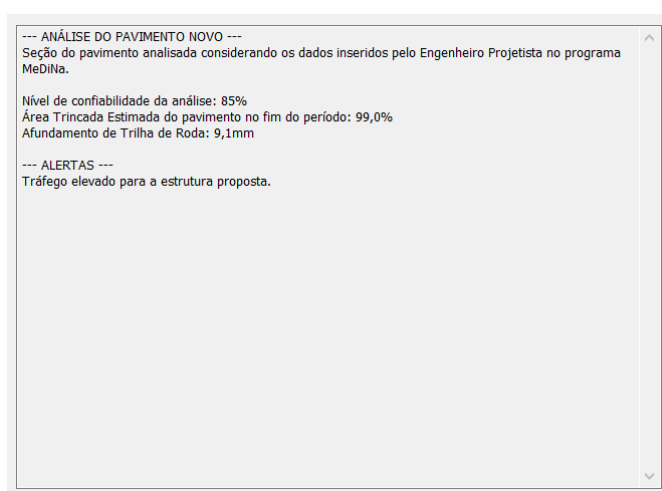


Figura 4.4 – Resultados da análise na BR 470 SC.

Para a BR 470 SC (Figura 4.4), o pavimento rompeu muito antes do esperado, atingindo 99% de área trincada antes do fim do período de projeto de 10 anos, indicando um tráfego muito elevado para a estrutura de pavimento proposta. O limite máximo de 30% foi atingido já no 13º mês.

No que diz respeito ao afundamento de trilha de roda, o programa retornou um valor elevado, de 9,1mm, porém ainda abaixo do limite máximo considerado para esse tipo de via, que é de 13 mm.

4.1.5. Resultados da análise da BR 135 BA

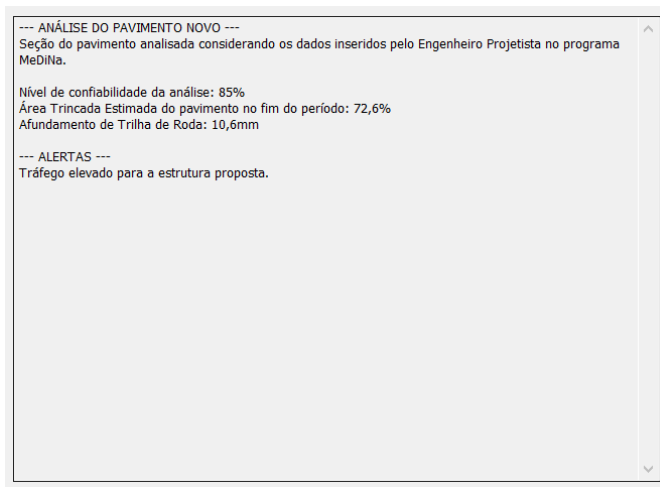


Figura 4.5 – Resultados da análise na BR 135 BA.

O resultado fornecido para a análise da BR 135 BA (Figura 4.5) não atendeu aos critérios exigidos pelo MeDiNa, porém somente no que diz respeito a fadiga. A porcentagem de área trincada calculada pelo *software* foi de 72,6%, enquanto o limite máximo é de 30%. Para afundamento de trilha de roda, o programa calculou um valor consideravelmente alto, de 10,6 mm, porém ainda abaixo do limite máximo para esse tipo de via.

De acordo aos resultados detalhados mostrados pelo programa, o pavimento ultrapassou o limite de 30% no 65º mês, indicando um tráfego elevado para a estrutura de pavimento proposta. O período de projeto considerado foi de 10 anos.

4.1.6. Resultados da análise da BR 101 SC

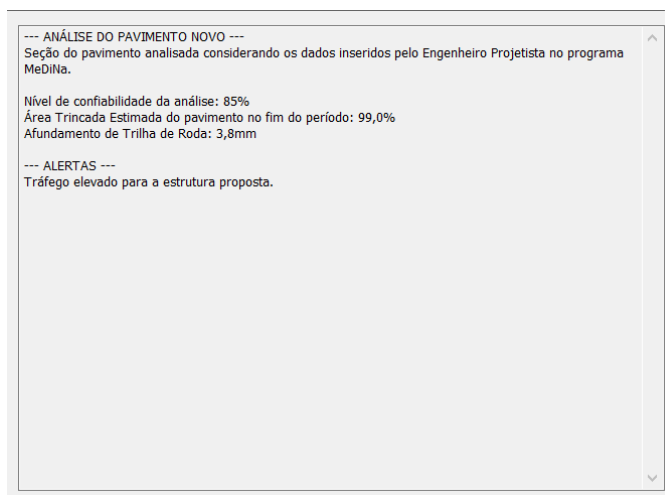


Figura 4.6 – Resultados da análise na BR 101 SC.

Para a BR 101 SC (Figura 4.6), o tráfego foi considerado muito alto para a estrutura de pavimento proposta, resultando na ruptura do pavimento antes do fim da vida útil de projeto de 10 anos. Neste caso, já no 8º mês a estrutura atingiu o limite de 30%. Além disso, também foi alcançado 99% de área trincada antes do fim do período.

Já na análise do afundamento de trilha de roda, o resultado calculado foi de apenas 3,8 mm, valor distante do critério estabelecido pelo MeDiNa.

4.1.7. Resultados da análise da BR 050 MG

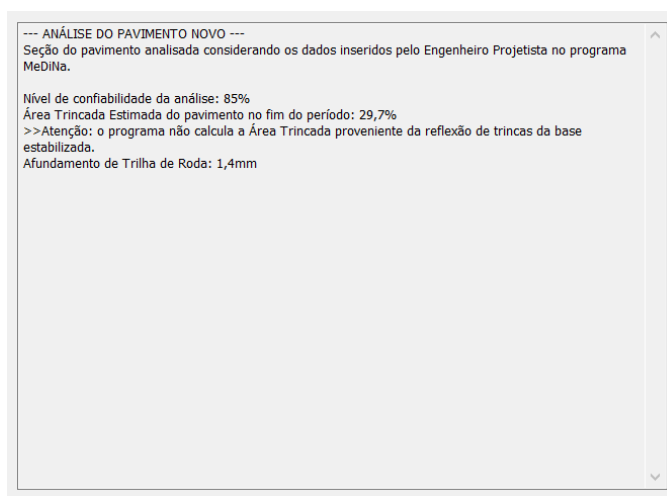


Figura 4.7 – Resultados da análise na BR 104 PE.

Para a BR 050 MG (Figura 4.7), o resultado calculado pelo *software* indicou uma porcentagem de área trincada do pavimento no fim do período de 10 anos de 29,8%, ou seja, dentro dos critérios exigidos pelo programa, pois antes do fim do período não alcançou os 30% de área trincada.

No caso do afundamento de trilha de roda, o critério também foi atendido, pois programa retornou 2,5 mm, um valor pequeno em relação ao limite máximo.

4.1.8. Resultados da análise da BR 104 PE

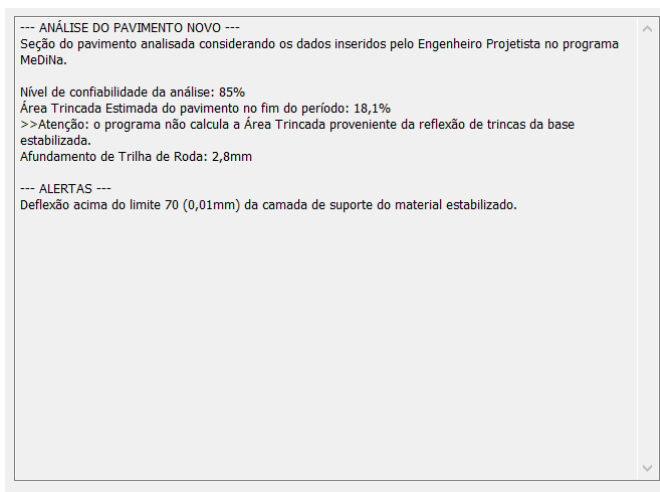


Figura 4.8 – Resultados da análise na BR 104 PE.

Os resultados fornecidos para a BR 104 PE (Figura 4.8) indicam uma estrutura adequada, que obedece aos critérios exigidos pelo programa. A porcentagem de área trincada estimada para o fim do período de 15 anos foi de 18,1%, abaixo do limite de 30%, e o afundamento de trilha de roda calculado foi de 2,8 mm, também abaixo do limite de 13 mm.

No entanto, o programa retornou um alerta indicando que na camada de suporte de material estabilizada, ou seja, na camada de base, a deflexão foi maior que o limite. Neste caso, o *software* recomenda a troca do material por um que possua uma qualidade melhor.

4.1.9. Resultados da análise da BR 163/364 MT

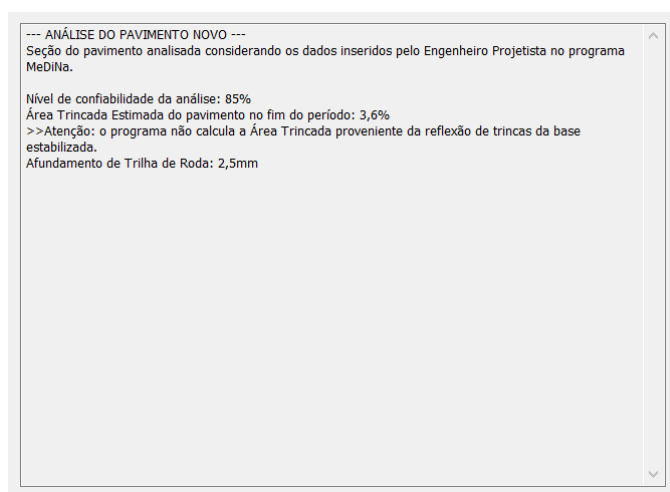


Figura 4.9 – Resultados da análise na BR 163/364 MT.

Ao analisar o resultado indicado pelo Medina para a BR 163/364 MT (Figura 4.9), percebe-se que o dimensionamento proposto está de acordo aos critérios de parada utilizados pelo *software*.

A porcentagem limite de área trincada calculada foi de apenas 3,6% no fim do período de projeto de 10 anos, enquanto o afundamento de trilha de roda foi de 2,5 mm.

Nenhum alerta foi retornado, indicando uma estrutura adequada para o tráfego proposto.

4.1.10. Resultados da análise da BR 222 CE

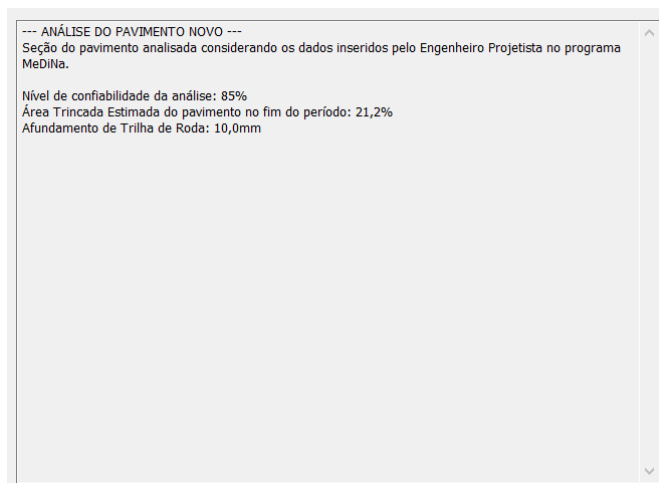


Figura 4.10 – Resultados da análise na BR 222 CE.

Para a BR 222 CE (Figura 4.10), a estrutura proposta está adequada de acordo aos critérios do programa. A porcentagem de área trincada estimada do pavimento no fim do período de 10 anos foi de 21,2% e o afundamento de trilha de roda foi de 10 mm. Neste último, o valor é consideravelmente alto, no entanto, ainda sim está abaixo do limite máximo exigido.

4.1.11. Resultados da análise da BR 116 BA

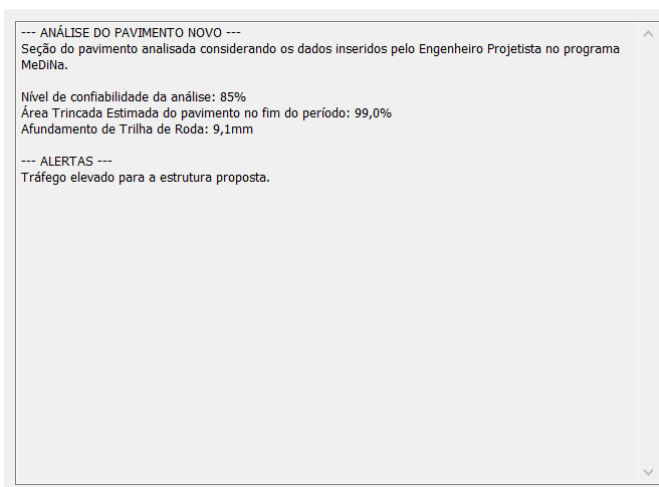


Figura 4.11 – Resultados da análise na BR 116 BA.

No caso da BR 116 BA (Figura 4.11), o pavimento atingiu o limite máximo de 30% já no 15º mês. Além disso, atingiu também 99% de área trincada, ou seja, ao final do período de projeto de 10 anos, de acordo ao MeDiNa, o pavimento estará totalmente trincado.

No entanto, a ruptura se deu apenas pelo dano de fadiga, pois o afundamento de trilha de roda calculado foi de 9,1 mm, que apesar de alto, ainda é menor que o limite máximo.

4.1.12. Resultados da análise da BR 280 SC

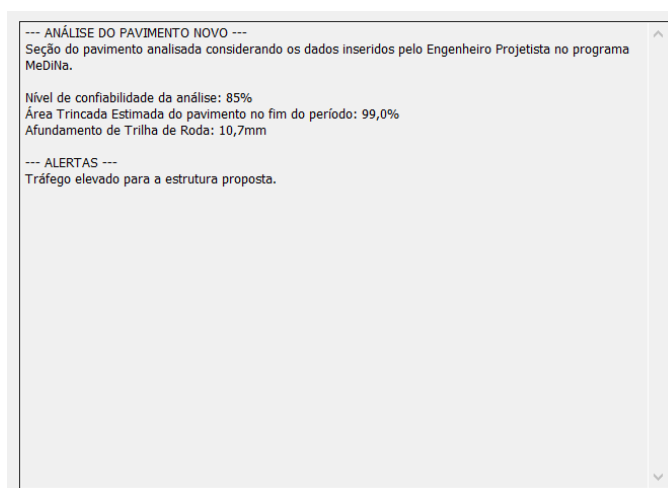


Figura 4.12 – Resultados da análise na BR 280 SC.

Com os resultados da BR 280 SC (Figura 4.12), percebe-se que a estrutura proposta para o tráfego em análise não é suficiente, dado o período de projeto de 10 anos. O pavimento atingiu 99% de área trincada, sendo que o limite de 30% já no 10º mês foi alcançado. Ou seja, seriam necessárias consideráveis alterações para que a estrutura atendesse os critérios do MeDiNa.

Já no caso do afundamento de trilha de roda, o dano calculado foi 10,7mm, o que é relativamente alto, no entanto, menor que o limite exigido pelo programa.

4.1.13. Resultados da análise da BR 364 MG

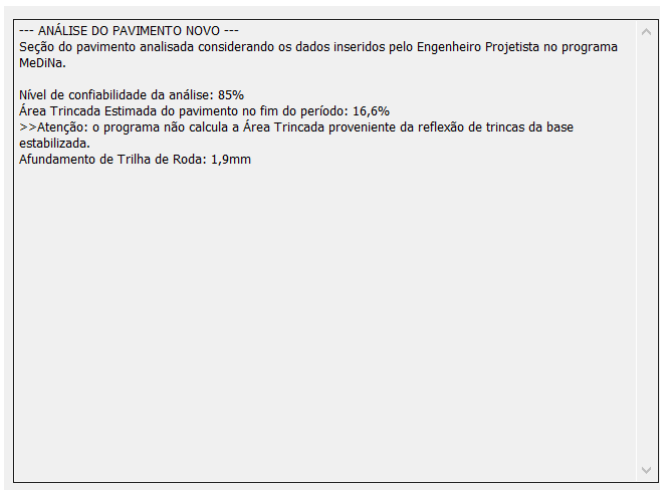


Figura 4.13 – Resultados da análise na BR 364 MG.

Para a BR 364 MG (Figura 4.13), a estrutura proposta está adequada para o tráfego em análise. Em nenhum dos critérios utilizados para avaliar a estrutura, houve valores maiores que o limite. Para o afundamento de trilha de roda, o programa calculou apenas 16,6% até o fim do período de projeto de 15 anos, enquanto o afundamento de trilha de roda foi de 1,9mm.

Além disso, não retornou nenhum alerta, indicando que para os critérios do MeDiNa, a estrutura atende perfeitamente ao tráfego proposto.

4.1.14. Resultados da análise da BR 386 RS

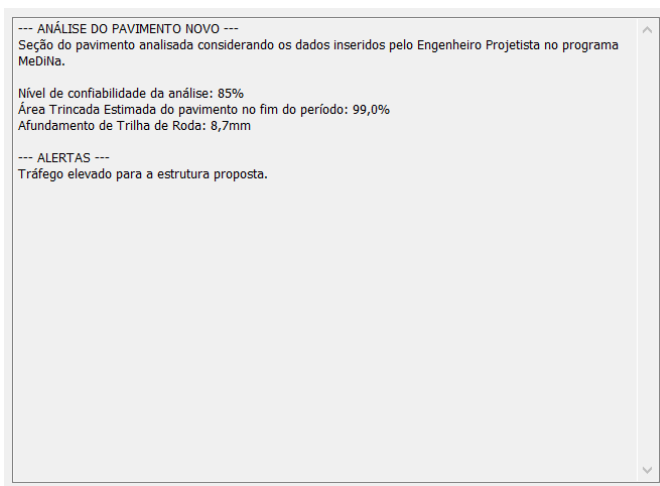


Figura 4.14 – Resultados da análise na BR 386 RS.

Com base nos resultados calculados para BR 386 RS (Figura 4.14), a estrutura do pavimento proposta não está adequada para o período de projeto considerado de 10 anos. O tráfego é muito

alto, retornando 99% de área trincada no fim do período, sendo que no 38º mês o limite de 30% do MeDiNa já é alcançado.

Porém, a ruptura se deu apenas pelo dano de fadiga, pois o afundamento de trilha de roda calculado foi de 8,7 mm, menor que o limite máximo para este critério.

4.1.15. Resultados da análise da BR 432 RR

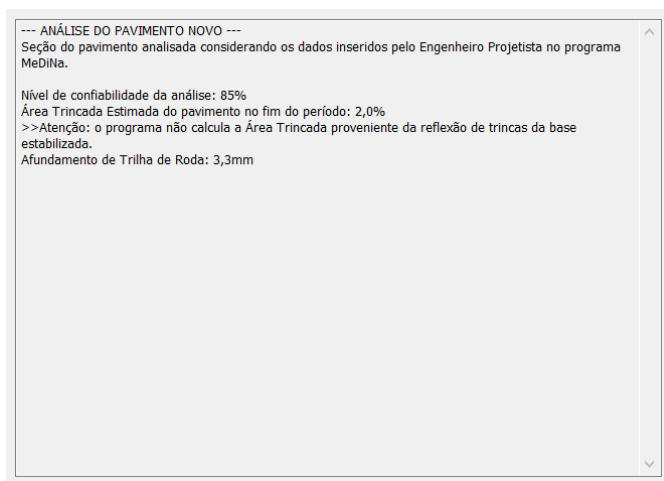


Figura 4.15 – Resultados da análise na BR 432 RR.

A estrutura proposta para a BR 432 RR atende com folga aos critérios do MeDiNa (Figura 4.15), para o período de projeto de 15 anos. A porcentagem de área trincada foi de 2,0%, enquanto o afundamento de trilha de roda foi de 3,3 mm. Em ambos os casos são valores menores que o limite.

Todavia, o programa retornou um alerta indicando que na camada de suporte de material estabilizada, ou seja, na camada de base, a deflexão foi maior que o limite. Neste caso, o *software* recomenda a troca do material por um que possua uma qualidade melhor.

4.1.16. Resultados da análise da BR 448 RS

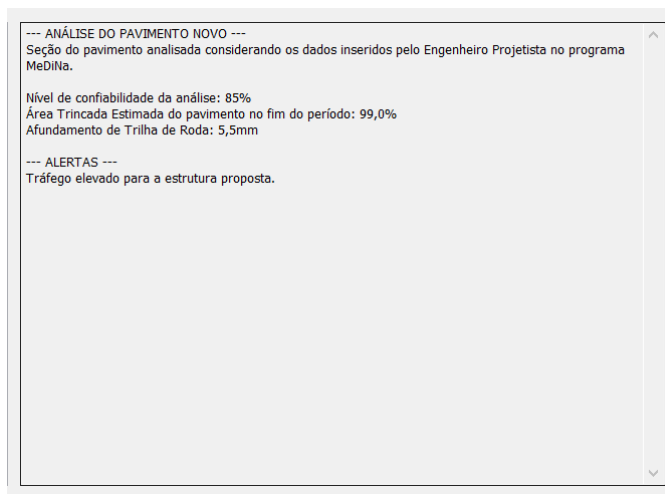


Figura 4.16 – Resultados da análise na BR 448 RS.

Por fim, para a BR 448 RS (Figura 4.16), o tráfego é considerado muito alto para a estrutura de pavimento proposta, considerando o período de projeto de 10 anos. Foi atingida 99% de área trincada antes do fim do período, sendo que a ruptura de fato, de acordo aos critérios do MeDiNa, ocorreu no 33º mês.

Para o afundamento de trilha de roda, de forma semelhante a maioria dos demais projetos, o valor calculado pelo MeDiNa, neste caso de 5,5 mm, foi menor que o limite máximo, de 13 mm.

4.1.17. Resumo dos dados da análise dos projetos selecionados

Na Tabela 4.1 é mostrado um resumo dos resultados obtidos por meio do MeDiNa, indicando as rodovias estudadas, seu respectivo Número N, a área trincada estimada do pavimento no fim do período, o afundamento de trilha de roda e o período de projeto considerado.

As células em vermelho indicam que o critério de parada do MeDiNa foi ultrapassado, enquanto as verdes indicam que foi atendido.

Tabela 4.1 – Resumo da análise dos pavimentos

Número do Projeto	Rodovia	Segmento do projeto analisado	Número N	Área Trincada Estimada do pavimento no fim do período (%)	Afundamento de Trilha de Roda (mm)	Período de Projeto	Mês que alcançou a % total de área trincada
1	BR 060 GO	km 162,9 ao km 179,9	6,60E+07	91,2%	1,4	15	78
2	BR 376 PR	km 0,00 ao km 17,3	6,30E+07	34,0%	2,8	10	111
3	BR 364 RO	km 828,6 ao km 910,6	6,85E+06	99,0%	14,1	10	47
4	BR 470 SC	km 0,0 ao km 18,61	8,57E+07	99,0%	9,1	10	13
5	BR 135 BA	km 267 ao km 344,74	3,91E+06	72,6%	10,6	10	65
6	BR 101 SC	km 245,0 ao km 271,7	1,56E+08	99,0%	3,8	10	8
7	BR 104 PE	km 19,8 ao km 71,2	2,29E+07	18,1%	2,8	15	-
8	BR 163-364 MT	Km 434,6 ao km 466,6	7,78E+06	3,6%	2,5	10	-
9	BR 222 CE	km 9 ao km 20	1,90E+06	21,2%	10,0	10	-
10	BR 050 MG	km 47 ao km 68,4	7,34E+07	29,8%	2,5	10	-
11	BR 116 BA	km 334,23 ao km 387,41	7,68E+07	99,0%	9,1	10	15
12	BR 280 SC	km 36,68 ao km 74,58	1,13E+07	99,0%	10,7	10	10
13	BR 364 MG	km 211,6 ao km 287,2	1,57E+07	16,6%	1,9	15	-
14	BR 386 RS	km 351,5 ao km 385,3	1,78E+07	99,0%	8,7	10	38
15	BR 432 RR	km 119,2 ao km 169,6	1,20E+06	2,0%	3,3	15	-
16	BR 448 RS	km 0,00 ao km 22	9,54E+07	99,0%	5,5	10	33

Diante dos resultados mostrados, é fácil perceber que grande parte dos projetos ultrapassou o critério de dano por fadiga considerado na Tabela 3.2. Já para análise de deformação permanente, relacionada ao afundamento de trilha de roda, com exceção da BR 364 RO, todos os projetos obtiveram resultados menores que o limite de 13 mm.

4.2. DIMENSIONAMENTO DAS CAMADAS DE REVESTIMENTO NO MEDINA

Para as rodovias as quais os critérios estabelecidos pelo programa não foram atendidos, foi realizado o dimensionamento da camada de revestimento asfáltico. Destaca-se que a espessura das demais camadas do pavimento não foram alteradas, permitindo, dessa forma, que o MeDiNa realizasse o dimensionamento apenas da camada de revestimento asfáltico.

Em alguns projetos, a espessura necessária para um melhor dimensionamento foi superior ao limite estabelecido pelo *software*, de 15 cm. Nesses casos, o programa retorna o resultado informando a impossibilidade de dimensionar o pavimento para os dados fornecidos (Figura 4.17).

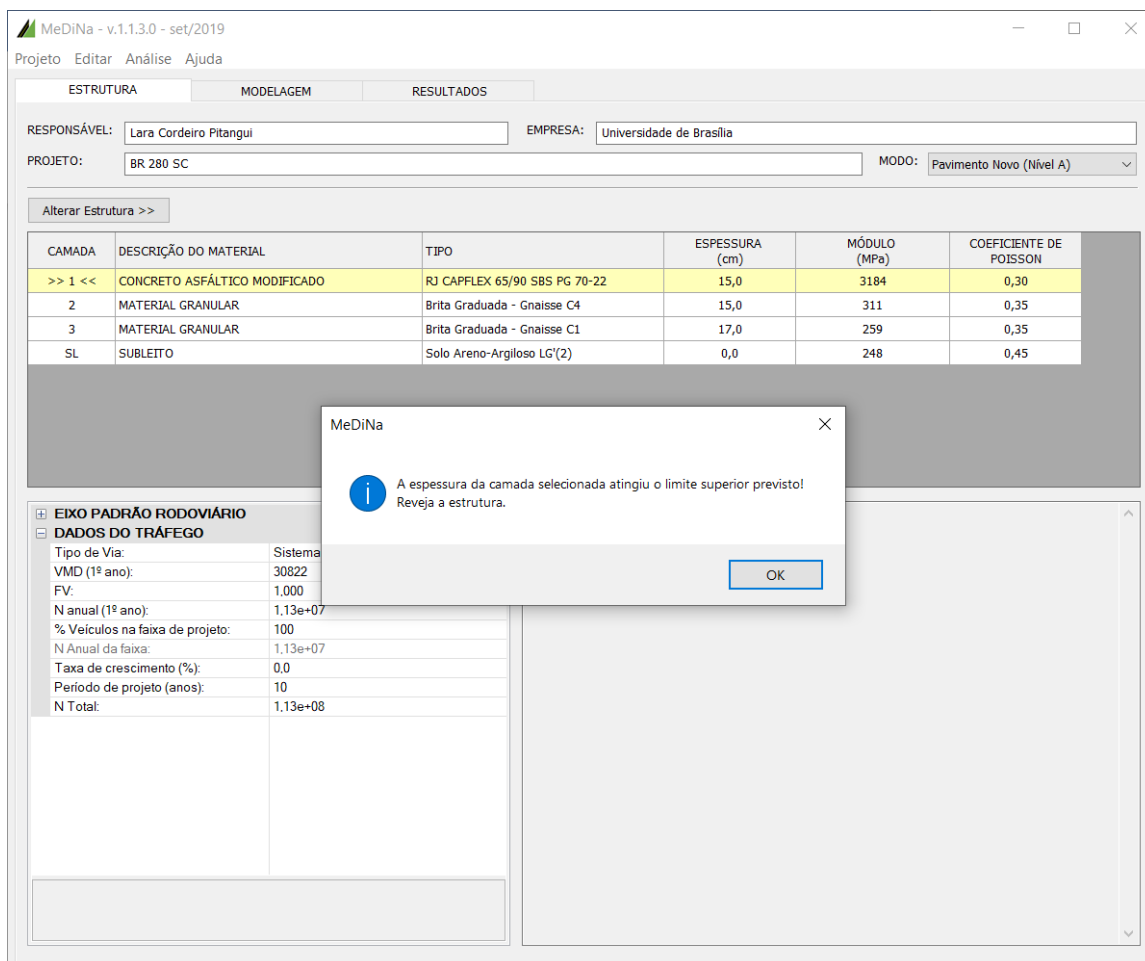


Figura 4.17 – Exemplo da impossibilidade de dimensionar a camada pelo MeDiNa.

Com o intuito de buscar o melhor resultado possível para o dimensionamento, mesmo diante da limitação de espessura imposta pelo programa, alguns ajustes foram feitos. Para aqueles projetos com apenas uma camada de revestimento asfáltico, no qual o MeDiNa não foi capaz de dimensionar, optou-se por dividi-la em duas, mantendo-se em ambas as camadas os materiais exatamente iguais, aumentando assim o campo de dimensionamento do programa. Nas situações em que mesmo dividindo a espessura em duas camadas, a espessura da camada superior permaneceu atingindo o limite superior previsto, aumentou-se gradativamente, de forma manual, a espessura da camada inferior, a fim de encontrar um dimensionamento adequado. Assim, foi somado o aumento da camada inferior com o aumento calculado para camada superior para obtenção do resultado.

Para exemplificar melhor o ajuste adotado, supõe-se um projeto com uma camada de revestimento asfáltico de 13 cm, de um determinado material, no qual o MeDiNa não foi capaz de dimensionar. Nesta situação, será dividida a camada em duas, desse mesmo material, como por exemplo, uma camada superior com 5 cm e uma inferior com 8 cm. Novamente, será solicitado o dimensionamento pelo *software*. No entanto, agora ele possui um campo de 10 cm para dimensionar o pavimento, e não mais 2 cm. Caso, mesmo assim, o programa não consiga dimensionar, será realizado o ajuste manual da camada inferior, aumentando-a para 9 cm por exemplo, e então será realizado o dimensionamento mais uma vez. Esse ajuste será feito até que o programa seja capaz de encontrar a espessura ideal para o projeto. Em último caso, continuando impossível dimensionar o pavimento, adotar-se-á o limite imposto pelo programa, em ambas as camadas, apenas para fins de cálculos financeiros.

Salienta-se que esse ajuste foi feito apenas em projetos inicialmente com uma única camada, pois ao dividi-la em duas, com o mesmo material, o programa retorna o mesmo resultado, independente se a maior espessura está na camada superior ou inferior.

A Tabela 4.2 indica os projetos cujo redimensionamento foi necessário, assim como o resultado emitido pelo MeDiNa.

Tabela 4.2 – Projetos utilizados para dimensionamento no MeDiNa.

Número do Projeto	Rodovia	Número N	Espessura antiga de Revestimento Asfáltico	Espessura nova de Revestimento Asfáltico
1	BR 060 GO	6,60E+07	10	17,5
2	BR 376 PR	6,30E+07	7,5	11,3
3	BR 364 RO	6,85E+06	7,5	14,6
4	BR 470 SC	8,57E+07	13	23,8
5	BR 135 BA	3,91E+06	5	9,7
6	BR 101 SC	1,56E+08	18	30
11	BR 116 BA	7,68E+07	12,5	21,3
12	BR 280 SC	1,13E+07	12,5	26,9
14	BR 386 RS	1,78E+07	5	14,4
16	BR 448 RS	9,54E+07	19	24,6

4.3. IMPACTO FICANCEIRO

A partir dos dados das Tabela 4.2 (a) e Tabela 4.2 (b) e dos obtidos por meio do orçamento dos projetos analisados, foi calculado o aumento no item pavimentação que essa nova espessura implicaria nos projetos, tanto no que diz respeito ao custo total do item e do projeto como um todo, quanto no aumento do custo individual do concreto asfáltico.

Para as rodovias 364 RO, 116 BA, 386 RS e 376 PR não foi possível realizar a análise do impacto financeiro, tendo em vista que as informações referentes ao custo total do revestimento asfáltico não estavam presentes nos projetos.

Salienta-se ainda que os valores listados não foram corrigidos, ou seja, correspondem ao custo do ano de realização do projeto.

Tabela 4.3 (a) – Cálculo do impacto financeiro.

Rodovia	Número N	Espessura Antiga de Revestimento Asfáltico	Espessura Nova de Revestimento Asfáltico	Custo Total do Projeto	Custo Total do Item Pavimentação
BR 135 BA	3,91E+06	5,0	9,7	R\$ 60.553.221,75	R\$9.019.115,87
BR 060 GO	6,60E+07	10,0	17,5	R\$ 98.609.154,44	R\$33.057.316,82
BR 470 SC	8,57E+07	13,0	23,8	R\$ 203.498.649,42	R\$26.812.745,84
BR 101 SC	1,56E+08	18,0	30,0	R\$ 111.029.413,65	R\$23.956.433,85
BR 280 SC	1,13E+07	12,5	26,9	R\$ 133.902.870,57	R\$21.395.305,42
BR 448 RS	9,54E+07	19,0	24,6	R\$ 206.751.065,96	R\$34.078.998,70

Tabela 4.3 (b) – Cálculo do impacto financeiro.

Rodovia	Custo Original do Concreto Asfáltico	Custo Novo do Concreto Asfáltico	Aumento Percentual do Concreto Asfáltico	Aumento Percentual do Item Pavimentação	Aumento Percentual no Custo Total do Projeto	Ano do Orçamento (Database)
BR 135 BA	R\$ 4.420.473,51	R\$ 8.575.718,61	94%	46%	7%	mai/02
BR 060 GO	R\$ 7.825.258,75	R\$ 13.694.202,81	75%	18%	6%	nov/07
BR 470 SC	R\$ 9.918.803,70	R\$ 18.159.040,62	83%	31%	4%	nov/12
BR 101 SC	R\$ 15.154.491,91	R\$ 25.257.486,52	67%	42%	9%	dez/99
BR 280 SC	R\$ 5.611.275,00	R\$ 12.075.463,80	115%	30%	5%	mar/10
BR 448 RS	R\$ 7.310.933,70	R\$ 9.465.735,21	29%	6%	1%	set/08

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Nas metodologias de dimensionamento de pavimento tradicionais, com destaque ao Método do DNER, as considerações utilizadas para o desempenho do pavimento em relação a fadiga eram bastante simplificadas, não sendo utilizados modelos de previsão de danos durante a vida útil do projeto. Assim, as previsões de desempenho estimadas para o pavimento, em muitas vezes, retornavam resultados equivocados.

Já o MeDiNa, ao apresentar modelos de curva de fadiga e de deformação permanente para materiais efetivamente utilizados no país, consegue evoluir na avaliação de desempenho das estruturas de pavimentos asfálticos, apresentando resultados menos empíricos.

É nessa perspectiva que se observa a diferença dos resultados obtidos com a comparação dos projetos. É fato que, em grande parte das análises, os materiais utilizados no programa não correspondem exatamente ao efetivamente utilizado no dimensionamento da estrutura. No entanto, ainda sim, configura uma boa aproximação, que fornece resultados passíveis de análise. Tais resultados indicam um dano de fadiga, dado pela porcentagem de área trincada estimada para o fim do período de projeto considerado, muito alto, indicando em muitos casos a ruptura total do pavimento antes do fim do período. Já quanto à deformação permanente, dado pelo cálculo do afundamento de trilha de roda, os valores são consideravelmente pequenos.

Esses dados condizem com a falta de previsão de danos por fadiga nas metodologias antigas, que agora são apontadas no MeDiNa. Entretanto, em alguns dos projetos analisados, o dano calculado foi muito grande, como nos casos em que o pavimento atingiu 99% de área trincada antes mesmo do fim do período de projeto.

Tal resultado demonstra-se exagerado, mesmo para Números N muito altos, pois não corresponde ao observado em campo atualmente. Uma das razões capaz de explicar este resultado é a condição de aderência entre as camadas da estrutura do pavimento, que já são pré-definidas no programa. Com exceção das camadas de revestimento asfáltico aderidas entre si e das camadas anti-reflexão de trincas com revestimento asfáltico, também aderidas entre si, todas as demais são dadas como não aderidas, ou seja, presume-se que a interação entre elas em nada contribui para o desempenho do pavimento, o que nem sempre é verdade. Seriam necessários ensaios para entender, de fato, a interferência da interface entre as camadas e sua contribuição para o desempenho do pavimento, podendo, inclusive, haver a consideração do modelo de calibração levando a hipótese de aderência entre as camadas, uma vez que no campo, quando executadas, as camadas possuem aderência entre si, o que implica em contribuição

significativa para o comportamento da estrutura. Além disso, grande parte dos projetos considera a execução de imprimação entre as camadas de base e revestimento asfáltico, o que pode implicar diretamente na condição de aderência entre elas, conquanto, no MeDiNa, esta condição não pode ser considerada.

Outro ponto capaz de explicar grandes valores de área trincada são os próprios dados utilizados. Mesmo utilizando valores de módulo iguais ou maiores aos utilizados em campo, a falta de informações dos projetos, quando comparados à necessidade do MeDiNa, não permitiu a perfeita comparação. Seria necessário o ensaio de todos os materiais, para obtenção de suas características, assim como da curva de fadiga e do modelo de deformação permanente exigidos pelo programa.

Contudo, conclui-se que, mesmo diante da incompatibilidade de certas informações, o MeDiNa, principalmente para tráfegos muito elevados, pode vir a apresentar resultados superdimensionados, ao exigir espessuras maiores do que àquelas realmente necessárias. Como consequência direta disso, o custo se eleva, pois, com base nos resultados mostrados na Tabela 4.3, os custos de pavimentação são altos, o que indica que qualquer centímetro de espessura adicional implica em um aumento financeiro considerável, na casa de milhões de reais.

Além disso, a implantação do MeDiNa exige de certa forma uma mudança de comportamento significativa no dimensionamento de pavimentos, pois são necessárias informações completas a respeito dos materiais utilizados na estrutura, com destaque às curvas de fadiga e aos modelos de deformação permanente, ou seja, ensaios e estudos a respeito de muito mais materiais do que àqueles constantes atualmente.

Em relação às demais características referentes aos projetos, como espessura, tipo de material, módulo das camadas, etc., não foi possível estabelecer nenhum padrão de comportamento do MeDiNa. Isso porque nenhuma delas desassociadas consegue descrever de forma satisfatória um determinado projeto. Mesmo com espessuras iguais, em projetos diferentes, os materiais referentes a cada camada são capazes de fornecer resultados completamente distintos. Análise análoga pode ser feita em referência a todos os demais parâmetros.

Por fim, para posteriores pesquisas envolvendo a comparação de projetos já existentes, recomenda-se o ensaio de cada material proposto, buscando-se obter, de fato, as características destes materiais e os fatores dos modelos requeridos pelo MeDiNa para a cálculo de área trincada e afundamento de trilha de roda.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADAM, J.P. *Roman Building: Materials and Techniques*, London, UK. 1994.
- AASHTO, 1993. American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) Guide for Design of Pavement Structures: Appendix J – Analysis Unit Delineation by Cumulative Differences. AASHTO, Washington, D.C., USA.
- ARAO, M. Análise da Vida de Fadiga de Pavimentos Flexíveis em Diferentes Misturas/ Mieka Arao – Rio de Janeiro: UFRJ/Escola Politécnica, 2014.
- BALBO, 1997. *High Quality Cement Treated Crushed Stones for Concrete Pavement Bases*. In: 6th Purdue Conference on Concrete Pavement, Indianapolis, U.S.A., 1997.
- BALBO, J. T. Pavimentação Asfáltica: materiais, projeto e restauração, São Paulo: Oficina de Textos, 2007.
- BARROS, L. M., Deformação Permanente de Misturas Asfálticas: Avaliação do desempenho pelo critério de Flow Number de misturas quentes e mornas. 2017, 179p. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil.
- BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L.M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES; J. B. Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros. Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA, 2008.
- BITTENCOURT, E.R. Caminhos e estradas na geografia dos transportes. Rio de Janeiro. 1958.
- CABRAL, W. S.; BARROSO, S. H. A. Avaliação da deformação permanente do subleito de vias não pavimentadas da microrregião de Mossoró/RN. 32º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte da ANPET. Fortaleza, Ceará. 2018.
- CHEVALLIER, R. *Roman Roads*, Berkeley, Califórnia. 1976.
- CNT. Pesquisa de rodovias 2018: Relatório Gerencial – Brasília.
- DI BENEDETTO, H. & DE LA ROCHE, C. *State of the Art on Stiffness Modulus and Fatigue of Bituminous Mixtures*. RILEM Report 17. Bituminous Binders and Mixes. Brussels, Belgium, 1998.

- DNER. *Método de projeto de pavimentos flexíveis*. Ministério dos Transportes. Dep. Nacional de Estradas de Rodagem. 1981.
- DNIT. *Manual de pavimentação*. Publicação IPR-697. Ministério dos Transportes. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. 2006.
- DNIT. *Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos*. Publicação IPR-720. Ministério dos Transportes. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. 2006.
- DNIT. RELATÓRIO PARCIAL IV (A) – *Execução de estudos e pesquisa para elaboração de método mecânico – empírico de dimensionamento de pavimentos asfálticos*. Convênio UFRJ/DNIT. Ministério dos Transportes. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. 2008.
- DNIT. ME 183/2018. Pavimentação asfáltica – Ensaio de fadiga por compressão diametral à tensão controlada – Método de ensaio. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT). Rio de Janeiro, Brasil. Disponível em: ipr.dnit.dov.br/normas-e-manuais.
- DNIT. ME 184/2018. Pavimentação asfáltica – Ensaio uniaxial de carga repetida para determinação da resistência à deformação permanente – Método de ensaio. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT). Rio de Janeiro, Brasil. Disponível em: ipr.dnit.dov.br/normas-e-manuais.
- FONTES, L. P. T. L. *Otimização do desempenho de misturas betuminosas com betume modificado com borracha para reabilitação de pavimentos*. Tese (Doutorado) - Universidade do Minho, Escola de Engenharia, Minho, 2009.
- FRANCO, F.A.C.P., 2000, *Um Sistema para Análise Mecânica de Pavimentos Asfálticos*. Dissertação de M.Sc., COPPE/ UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- FRANCO, F.A.C.P., *Método de Dimensionamento Mecânico-Empírico de Pavimentos Asfálticos - SISPAV*, 2007, 294p. Tese (Doutorado em ciências em engenharia civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.

- FRITZEN, M. A., Desenvolvimento e Validação de Função de Transferência para Previsão do Dano por Fadiga em Pavimentos Asfálticos, 2016, 262p. Tese (Doutorado em ciências em engenharia civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.
- GUIMARÃES, A. C. R., Um Método Mecânico Empírico para a Previsão da Deformação Permanente em Solos Tropicais Constituintes de Pavimentos, 2009, 352 p. Tese (Doutorado em ciências em engenharia civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.
- HUANG, Y. H., 2003, *Pavements Analysis and Design*. 2nd Ed., Prentice Hall Inc. New Jersey, E.U.A.
- KAKUDA, F. M., 2010 *Desenvolvimento e a utilização de um equipamento de grandes dimensões na análise do comportamento mecânico de uma seção de pavimento sob carregamento cíclico*. Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos/USP, São Carlos, SP, Brasil.
- MEDINA, J.; MOTTA, L.M.G. *Mecânica dos pavimentos*. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 2005.
- MEDINA, J. *Mecânica dos pavimentos*. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 1997.
- MIDDLEBROOKS, T.A; BERTRAM, G.E. *Adaptation to the Design of Airfield Pavements*. 1950.
- MONISMITH, C. L. *Evolution of long-lasting Asphalt Pavement Design methodology: A perspective*. Alabama: Auburn University. 2004.
- MOTTA, L. M. G. *Método de dimensionamento de pavimentos flexíveis; critério de confiabilidade e ensaios de cargas repetidas*. 1991. 366p. Tese (Doutorado em ciências em engenharia civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- MOTTA, L. M. G.; SOARES, J.B. *Considerações sobre a determinação do fator de veículo no cálculo do número N*. 2001. 13p. - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- PELISSON, N. D., et al. 2015. *Avaliação de desempenho pelo MEPDG: o efeito da variação de espessuras de pavimentos flexíveis*, 2015.

- PINTO, C. S.; *Curso Básico de Mecânica dos Solos*. 3ª Edição, Oficina de textos. 2006. São Paulo – SP, Brasil.
- PREUSSLER, E.S. & PINTO, S. *Pavimentação Rodoviária: Conceitos Fundamentais sobre Pavimentos Flexíveis*. Editora Copiarte. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1991.
- SILVA, C. F. S. C. *Análise de Tensões em Pavimentos a Partir de Modelo Físico Instrumentado* – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2014.
- TURNBULL, W. J.; FOSTER, C. R.; AHLVIN, R. G. *Design of flexible pavements considering mixed loads and traffic volume*. 1962.
- VILLELA, R. *Comparação entre métodos de dimensionamento de reforço de pavimentos flexíveis*, 2017 – Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, SC, Brasil.
- PAVEMENT INTERACTIVE. *What Is Mechanistic-Empirical Design?*, 2019. Disponível em: <https://www.pavementinteractive.org/what-is-mechanistic-empirical-design-the-mepdg-and-you/>. Acesso em: 10 dez. 2019.

**APÊNDICE A – RESUMO DAS INFORMAÇÕES DOS PROJETOS
ANALISADOS**

Resumo de informações da BR 432 RR

BR	Informações Gerais	Métodos utilizados	Número N	Período de projeto (anos)
BR432RR	Segmento km 119,2 ao km 169,6	DNER	1,20E+06	15
Camada	Espessura (cm)	Material	Camada	Medina
Revestimento Asfáltico	5	CBUQ Faixa "C" - CAP 50/70	Concreto Asfáltico	RJ CAP 50/70 #12,5mm Sepetiba
Base	15	Estabilizada granulometricamente com mistura de solo, cimento e areia.	Solo Cimento	Ceratti, 1992 (mistura 5)
Sub-Base	15	Estabilizada granulometricamente sem mistura - Solo do tipo A.2.7 - Pedregulho arenoso com argila siltosa	Solo fino, siltoso ou argiloso	Solo Areno-argiloso LG' (2)
Subleito	-	CBR de 11% - Argila silto arenosa	Subleito	Solo Argiloso LG'(1)

Resumo de informações da BR 386 RS

BR	Informações Gerais	Métodos utilizados	Número N	Período de projeto (anos)
BR386RS	Segmento km 351,5 ao km 385,3 - Pista Dupla	Método Híbrido Elástico Linear - CBR e Resiliência	1,78E+07	10
Camada	Espessura (cm)	Material	Camada	Medina
Revestimento Asfáltico (1ª Camada)	5	CBUQ com CAP MP RET 55/75 modificado por polímero - Faixa "C" (Módulo fornecido de 4000 MPa)	Concreto Asfáltico Modificado	Material Padrão
Revestimento Asfáltico (2ª Camada)	8	CBUQ Faixa "A" ou "B" com CAP convencional 50/70 (Módulo fornecido de 3000 MPa)	Concreto Asfáltico	Material Padrão
Base	16	Brita Graduada	Material Granular	Brita Graduada - Gnaisse C4
Sub-Base	19	Macadame Seco	Material Granular	Brita Graduada - Gnaisse C1
Subleito	-	CBR de 9% - Argila arenosa	Subleito	Solo Areno-argiloso LG'(2)

Resumo de informações da BR 280 SC

BR	Informações Gerais	Métodos utilizados	Número N	Período de projeto (anos)
BR280SC	Lote 21 - Segmento km 36,68 ao km 74,58	DNER e TECNAPAV	1,13E+08	10
Camada	Espessura (cm)	Material	Camada	Medina
Revestimento Asfáltico	12,5	CBUQ Faixa "B" com polímero tipo SBS 60/85	Concreto Asfáltico Modificado	RJ CAPFLEX 65/90 SBS PG 70/22
Base	15	Brita graduada	Material Granular	Brita Graduada - Gnaisse C4
Sub-Base	17	Macadame Seco	Material Granular	Brita Graduada - Gnaisse C1
Subleito	-	CBR 6% - Solo tipo A.1.b - Saibro rosado com pedregulhos	Subleito	Solo Areno-argiloso LG'(2)

Resumo de informações da BR 116 BA

Rodovia	Informações Gerais	Método(s) utilizados(s)	Número N	Período de projeto (anos)
BR116BA	Seg. I: Entr. BR-349/BA - Início do Contor. de Serrinha. km 334,23 ao km 387,41	DNER, TECNAPAV e ELSYM5	7,68E+07	10
Camada	Espessura (cm)	Material indicado no projeto	Camada selecionada no Medina	Material selecionado no Medina
Revestimento Asfáltico (1ª camada)	3,5	CBUQ Faixa "C" - Concreto asfáltico com Asfalto Polímero (Módulo fornecido de 4098 MPa)	Concreto Asfáltico Modificado	Classe 2
Revestimento Asfáltico (2ª camada)	9	CBUQ Faixa "B" - Concreto asfáltico com Asfalto Polímero (binder) (Módulo fornecido de 4261 MPa)		
Base	15	Solo tipo estabilizada granulometricamente com mistura solo-brita (Módulo fornecido de 290 MPa)	Material Granular	Solo Brita - M5 (LG' s:1521)
Sub-Base	15	Estabilizada granulometricamente utilizando cascalho sem mistura (Módulo fornecido de 180 MPa)	Solo fino, siltoso ou argiloso	Solo LG' (s:1521)
Subleito	-	CBR 12% - Predominância de solo do tipo arenoso tipo saibro, de cor variegada (Também tem presença de material fino, silte argiloso e/ou argila-siltosa) (Módulo fornecido de 180 MPa)	Subleito	Solo Areno-argiloso LG'(2)

Resumo de informações da BR 050 MG

Rodovia	Informações Gerais	Método(s) utilizados(s)	Número N	Período de projeto (anos)
BR050MG	Segmento km 47 ao 68,4 - Estacas 1011 + 10,00 a 1067 + 11.389	DNER e TECNAPAV	7,34E+07	10
Camada	Espessura (cm)	Material indicado no projeto	Camada selecionada no Medina	Material selecionado no Medina
Revestimento Asfáltico (1ª camada)	5	CBUQ Faixa "C" com asfalto modificado por polímero - CAP 50/70	Concreto Asfáltico Modificado	Material Padrão
Revestimento Asfáltico (2ª camada)	5	CBUQ Faixa "B" com asfalto modificado por polímero - CAP 50/70	Concreto Asfáltico Modificado	RJ CAPFLEX 65/90 SBS PG 70/22
Reflexão de Trincas	2,5	Tratamento Superficial Duplo	Anti-Reflexão de Trincas	Tratamento Superficial Duplo
Base	15	Cascalho com solo melhorado com cimento com 3% em peso	Solo Cimento	Ceratti, 1992 (mistura 5)
Sub-Base	15	Sub-base estabilizada granulometricamente com utilização de solos lateríticos	Solo fino, siltoso ou argiloso	Solo LG' (s:1521)
Subleito	-	CBR 10% - Constituído predominantemente por solos argilosos e em menor escala por solos siltosos.	Subleito	Solo Argiloso LG' (5)

Resumo de informações da BR 222 CE

Rodovia	Informações Gerais	Método(s) utilizados(s)	Número N	Período de projeto (anos)
BR222CE	Trecho Fortaleza - Sobral - km 9 ao km 20	DNER	1,90E+06	10
Camada	Espessura (cm)	Material indicado no projeto	Camada selecionada no Medina	Material selecionado no Medina
Revestimento Asfáltico	5	CBUQ com CAP 50/60	Concreto Asfáltico	Material Padrão
Base	20	Solo brita (60/40) - 60% de solo areia média siltosa e 40% de brita colorida (gnaiss).	Material Granular	Solo Brita - M5 (LG' s:1521)
Sub-Base	30	Mistura de solos (30/70) - 30% de areia grossa de rio e 70% de areia média siltosa.	Solo fino, siltoso ou argiloso	Solo NA' (s: 1492)
Subleito	-	CBR de 6% - Solos do tipo A-2-4/A-2-6. Ora areno-predregulhosos, ora argilo-micáceos	Subleito	Solo Areno-argiloso LG'(2)

Resumo de informações da BR 163/364 MT

Rodovia	Informações Gerais	Método(s) utilizados(s)	Número N	Período de projeto (anos)
BR163-364MT	Lado direito: Trevo do Lagarto - Jangada - km 434,6 ao km 466,6	DNER	7,78E+06	10
Camada	Espessura (cm)	Material indicado no projeto	Camada selecionada no Medina	Material selecionado no Medina
Revestimento Asfáltico (1ª camada)	5	CBUQ com CAP 20	Concreto Asfáltico	Classe 1
Revestimento Asfáltico (2ª camada)	6	Pré-misturado usiano a quente, com utilização de CAP modificado com polímero.	Concreto Asfáltico Modificado	RJ CAPFLEX 65/90 SBS PG 70-22
Base	15	Cascalho laterítico estabilizado com a adição de 3% de cimento.	Solo Cimento	Ceratti, 1992 (mistura 5)
Sub-Base	20	Cascalho laterítico estabilizado granulometricamente.	Solo fino, siltoso ou argiloso	Solo LG' (s:1521)
Subleito	-	CBR médios entre 8 a 10% - Pertencentes a dois grupos: os granulares constituídos por cascalhos lateríticos ou de quartzo laterizados, e os solos argilosos.	Subleito	Solo Argiloso LG'(1)

Resumo de informações da BR 101 SC

Rodovia	Informações Gerais	Método(s) utilizados(s)	Número N	Período de projeto (anos)
BR101SC	Lote 23 - Segmento km 245,0 a km 217,7 (Pista de duplicação)	DNER, TECNAPAV e Análise Mecanicista com ELSYM5	1,56E+08	10
Camada	Espessura (cm)	Material indicado no projeto	Camada selecionada no Medina	Material selecionado no Medina
Revestimento Asfáltico	18	CBUQ Faixa "B" - CAP 20 (Módulo fornecido de 4000 MPa)	Concreto Asfáltico	Material Padrão
Base	15	Brita Graduada (Módulo fornecido de 300 MPa)	Material Granular	Brita Graduada - Gnaisse C4
Sub-Base	20	Macadame Seco (Módulo fornecido de 220 MPa)	Material Granular	Brita Graduada - Gnaisse C1
Subleito	-	CBR de 6% - Solo em grande parte A-4 (Solos siltosos)	Subleito	Solo Siltoso NS'

Resumo de informações da BR 135 BA

Rodovia	Informações Gerais	Método(s) utilizados(s)	Número N	Período de projeto (anos)
BR135BA	Segmento km 267 - km 344,74	DNER	3,91E+06	10
Camada	Espessura (cm)	Material indicado no projeto	Camada selecionada no Medina	Material selecionado no Medina
Revestimento Asfáltico	5	CBUQ Faixa "C" com CAP 50/60	Concreto Asfáltico	Material Padrão
Base	15	Solo estabilizado granulometricamente com solo tipo A.1.b - Fragmentos de pedra, pedregulhos e areia.	Solo fino, siltoso ou argiloso	Solo LG' (s:1521)
Sub-Base	17	Solo estabilizado granulometricamente com solo tipo A.2.4 - Pedregulhos e areia siltosa ou argilosa	Solo fino, siltoso ou argiloso	Solo Areno-argiloso LG'(2)
Subleito	-	CBR de 9% - Solo na região predominantemente argiloso	Subleito	Solo Arenoso Fino NA'

Resumo de informações da BR 470 SC

Rodovia	Informações Gerais	Método(s) utilizados(s)	Número N	Período de projeto (anos)
BR470SC	Segmento 7+700 - 18+605,74	Método DNER e Método da Resiliência	8,57E+07	10
Camada	Espessura (cm)	Material indicado no projeto	Camada selecionada no Medina	Material selecionado no Medina
Revestimento Asfáltico	13	CBUQ com Asfalto Borracha	Concreto Asfáltico Borracha	CAPFLEX B PG 64-22
Base	15	Brita Graduada	Material Granular	Brita Graduada - Gnaisse C4
Sub-Base	17	Macadame Seco	Material Granular	Brita Graduada - Gnaisse C1
Subleito	-	CBR 11% - Silte argiloso arenoso	Subleito	Solo Areno-argiloso LG'(2)

Resumo de informações da BR 364 RO

Rodovia	Informações Gerais	Método(s) utilizados(s)	Número N	Período de projeto (anos)
BR364RO	Segmento 828,6 ao km 910,6	DNER	6,85E+06	10
Camada	Espessura (cm)	Material indicado no projeto	Camada selecionada no Medina	Material selecionado no Medina
Revestimento Asfáltico (1ª camada)	3,5	CBUQ - Faixa "C" - CAP 50/70	Concreto Asfáltico	Material Padrão
Revestimento Asfáltico (2ª camada)	4	CBUQ - Faixa "B" - CAP 50/70	Concreto Asfáltico	
Base	15	Base de cascalho	Solo fino, siltoso ou argiloso	Solo LG' (s:1521)
Sub-Base	15	Sub-base de cascalho laterítico	Solo fino, siltoso ou argiloso	Solo LG' (s:1521)
Subleito	-	CBR de 9% - Areia silto argilosa	Subleito	Solo Areno-argiloso LG'(2)

Resumo de informações da BR 060 GO

Rodovia	Informações Gerais	Método(s) utilizados(s)	Número N	Período de projeto (anos)
BR060GO	Segmento km 162,9 ao km 179,9	DNER, TECNAPAV e ELSYM5	6,60E+07	15
Camada	Espessura (cm)	Material indicado no projeto	Camada selecionada no Medina	Material selecionado no Medina
Revestimento Asfáltico (1ª camada)	6	CBUQ com polímero - Faixa "C" - CAP 50/70	Concreto Asfáltico Modificado	Material Padrão
Revestimento Asfáltico (2ª camada)	4	CBUQ com polímero - Faixa "B" - CAP 50/70		
Reflexão de Trincas	2,5	Tratamento superficial duplo	Anti-Reflexão de Trincas	Tratamento Superficial Duplo
Base	17	Solo de jazida estabilizado com 3% de cimento	Solo Cimento	Ceratti, 1992 (mistura 5)
Sub-Base	18	Material granular de jazida - Cascalho laterita com quartzo	Solo fino, siltoso ou argiloso	Solo LG' (s:1521)
Subleito	-	CBR médio 10% - Solo argiloso - Predominantemente do tipo A-6	Subleito	Solo Argiloso LG' (5)

Resumo de informações da BR 376 PR

Rodovia	Informações Gerais	Método(s) utilizados(s)	Número N	Período de projeto (anos)
BR376PR	Contorno Norte de Maringá - km 0,00 - km 17,3	DNER	6,30E+07	10
Camada	Espessura (cm)	Material indicado no projeto	Camada selecionada no Medina	Material selecionado no Medina
Revestimento Asfáltico (1ª camada)	3,5	CBUQ Faixa "C" com polímero - CAP 50/70	Concreto Asfáltico Modificado	Material Padrão
Revestimento Asfáltico (2ª camada)	4	CBUQ Faixa "B" com polímero - CAP 50/70		
Reflexão de Trincas	2,5	Tratamento Superficial Simples	Anti-Reflexão de Trincas	SAMI
Base	15	Base de solo cimento - Teor de 6% em peso.	Solo Cimento	Ceratti, 1992 (mistura 5)
Sub-Base	16	Sub-base de solo melhorado com cimento - Teor de 3% em peso.	Solo Cimento	Ceratti, 1992 (mistura 3)
Subleito	-	CBR entre 8% e 10% - Solos argilosos laterizados - Solo tipo A-7-5.	Subleito	Solo LG' (s:1521)