



Universidade Federal  
de Campina Grande

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA CIVIL  
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

**MARRONNEY MARCOS RIBEIRO FIGUEIREDO**

**ANÁLISE DE DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTO FLEXÍVEL  
ESTUDO COMPARATIVO DE MÉTODOS**

**CAMPINA GRANDE**

**2018**

**MARRONNEY MARCOS RIBEIRO FIGUEIREDO**

**ANÁLISE DE DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTO FLEXÍVEL  
ESTUDO COMPARATIVO DE MÉTODOS**

Monografia apresentada como trabalho de conclusão de curso à Unidade Acadêmica de Engenharia Civil da Universidade Federal de Campina Grande como exigência para obtenção do título de Engenheiro Civil.

Orientado por Dr. John Kennedy Guedes Rodrigues  
Co-orientado por Ms. Maciel Wallace Queiroz Fernandes.

**CAMPINA GRANDE - PB**

**2018**

**ANÁLISE DE DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTO FLEXÍVEL  
ESTUDO COMPARATIVO DE MÉTODOS**

Monografia apresentada como trabalho de conclusão de curso à Unidade Acadêmica de Engenharia Civil da Universidade Federal de Campina Grande como exigência para obtenção do título de Engenheiro Civil.

Orientado por Dr. John Kennedy Guedes Rodrigues  
Co-orientado por Ms. Macel Wallace Queiroz Fernandes.

Aprovada em: \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_.

**BANCA EXAMINADORA**

\_\_\_\_\_  
**Nota**

**Prof. Dr. John Kennedy Guedes Rodrigues – UFCG  
(Presidente - Orientador)**

\_\_\_\_\_  
**Nota**

**Prof. Me. Macel Wallace Queiroz Fernandes – UNINASSAU  
(1º Examinador)**

\_\_\_\_\_  
**Nota**

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente a Deus criador dos céus e da Terra que me concedeu saúde e forças para que chegasse até aqui.

A minha mãe Claudiana Ribeiro Figueiredo e ao meu pai Marcos Antonio Figueiredo que sem eles não seria possível a realização deste e de outros projetos em minha vida.

A esta universidade, seu corpo docente, direção e administração que contribuíram para o meu aprimoramento técnico e científico.

Aos amigos que contribuíram direta ou indiretamente nos anos que estudei nesta instituição.

*“A experiência é um troféu composto  
por todas as armas que nos feriram.”*

*(Marco Aurélio)*

# ANÁLISE DE DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTO FLEXÍVEL ESTUDO COMPARATIVO DE MÉTODOS

Autor: Marronney Marcos Ribeiro Figueiredo – Graduando do Curso de Engenharia Civil – Departamento de Engenharia Civil – Centro de Tecnologia e Recursos Naturais - UFCG

Orientador: Prof. Dr. John Kennedy Guedes Rodrigues - Departamento de Engenharia Civil – Centro de Tecnologia e Recursos Naturais - UFCG

1º Examinador: Prof. Me. Macel Wallace Queiroz Fernandes – UNINASSAU – Campina Grande – Paraíba.

2º Examinador:

## RESUMO

A pavimentação de vias e rodovias é essencial para uma melhor qualidade no transporte rodoviário de pessoas e mercadorias em todo mundo. O desenvolvimento de tecnologias para um melhor conforto e durabilidade remonta os tempos da Antiga Roma. No Brasil aproximadamente 60% do transporte de cargas e passageiros é feito em rodovias, sendo um país de extensões territoriais continentais, com diversidades climáticas, pedológicas e geológicas é de grande importância o estudo e comparação entre o novo método de dimensionamento DNIT mecanístico-empírico, cujo dimensionamento de pavimentos é baseado em dois principais critérios de ruptura (fadiga e o afundamento de trilha), método este em fase de atualização no Brasil, e o método de dimensionamento empírico adotado pelo DNER, proposto nos anos 60 pelo Engenheiro Murillo Lopes de Souza, baseado na capacidade de suporte do subleito, medida pelo CBR. O presente trabalho teve como objetivo analisar, dimensionar e comparar os métodos de dimensionamento de pavimento flexível citados, com auxílio dos dados coletados pelo Laboratório de Engenharia de Pavimentos-LEP/UFCG, Campina Grande-PB, na PB-138 que liga Campina Grande/Catolé de Boa Vista-PB a Boa Vista-PB. Com os dados foi possível dimensionar o pavimento com auxílio do programa MeDiNa e realizar a comparação entre os dois métodos de dimensionamento.

**Palavras-chave:** DNIT; DNER; Pavimentação.

FLEXIBLE PAVEMENT SIZE ANALYSIS  
COMPARATIVE STUDY OF METHODS

Author: Marronney Marcos Ribeiro Figueiredo - Graduate of Civil Engineering - Department of Civil Engineering - Center for Technology and Natural Resources - UFCG

Privacy Policy | Dr. John Kennedy Guedes Rodrigues - Department of Civil Engineering - Center for Technology and Natural Resources - UFCG

1st Examiner: Prof. Macel Wallace Queiroz Fernandes - UNINASSAU - Campina Grande - Paraíba.

2nd Examiner:

**ABSTRACT**

The paving of roads and highways is essential for better quality road transport of people and goods around the world. The development of technologies for better comfort and durability goes back to the times of Ancient Rome. In Brazil, 60% of freight and passengers are carried on highways, being a country of continent territories, with a diversity of species, pedological and geological, it is of great relevance for the study and separation between the new methods of mechanistic DNIT design which is based on two main criteria of rupture, the method being updated in Brazil, and the method of empirical design adopted by the DNER, applied in the 1960s by the engineer Murillo Lopes de Souza, in which the capacity of support of subbed, as measured by the CBR. The present work has owned the objective of analyzing, dimensioning and comparing the methods of sizing exchange rate indicators, with the help of data from the Pavement Engineering Laboratory-LEP / UFCG, Campina Grande-PB, on the PB-138 linking Campina Grande / Catolé de Boa Vista-PB to Boa Vista-PB. With the help of the data, it was possible to size the pavement with the aid of the MeDiNa program and to carry out a comparison between the two sizing methods

**Keywords:** DNIT; DNER; Paving.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Camadas pavimento rígido .....	6
Figura 2-Camadas pavimento semirrígido .....	6
Figura 3- Pavimento Flexível .....	6
Figura 4- Pavimentos e seus materiais .....	7
Figura 5- Camadas do pavimento flexível.....	7
Figura 6- Camadas estruturais do pavimento flexível .....	8
Figura 7 - Tensões, deformações e deslocamentos em pavimento flexível.....	11
Figura 8 -Esforços de carga externa superficial um ponto do semi-espaço elástico .....	11
Figura 9 - Fatores de equivalência de operação .....	16
Figura 10 -Eixo Padrão Rodoviário.....	17
Figura 11 - Dimensionamento do pavimento .....	20
Figura 12 - Determinação de espessuras do pavimento .....	21
Figura 13- Deformação permanente em trilha de roda (ATR) .....	23
Figura 14 - Trincas isoladas.....	24
Figura 15 -Trincas Interligadas .....	25
Figura 16- Fluxograma de dimensionamento mecânico.....	25
Figura 17- Tela do Programa MeDiNa corresponde aos dados de entrada de um pavimento, tráfego e análise (versão de 19/02/2018).....	26
Figura 18-Tela do Programa MeDiNa correspondente aos dados de um material argiloso de sub-base .....	27
Figura 19-Tensões aplicadas e deslocamentos no ensaio de carga repetida.....	28
Figura 20-Eschema do equipamento triaxial dinâmico de compressão axial .....	28
Figura 21 -Comportamento dos materiais de pavimentação sujeitos a um ciclo de carregamento .....	29
Figura 22-Exemplo de deformação permanente em pavimento asfáltico .....	30
Figura 23-Classificação resiliente de solos granulares.....	32
Figura 24- Alerta de Erro MeDiNa.....	36
Figura 25:PB-138 antes de ser pavimentada .....	37
Figura 26: PB-138 pavimentada.....	37
Figura 27- Relação entre o valor de CBR e o Coeficiente de Recalque.....	40
Figura 28Simbologia das camadas .....	42
Figura 29 Modelo de planilha para entrada dos dados no software BackMeDiNa, .....	45
Figura 30- Interface BackMeDiNa .....	45
Figura 31: MeDiNa com dados de entrada (Trecho 3).....	46
Figura 32: Dados de saída MeDiNa (trecho3).....	48
Figura 33: Análise da estrutura MeDiNa.....	49



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Histórico de pavimentos .....	4
Tabela 2: Extensão de rodovias pavimentadas .....	5
Tabela 3 - CBR através do Índice de Grupo.....	14
Tabela 4 - Especificações de materiais empregados em camadas exceto subleito.....	15
Tabela 5- Granulometria para base granular .....	15
Tabela 6- Fator de equivalência para eixo "tandem" triplo .....	17
Tabela 7- Coeficiente de equivalência estrutural .....	19
Tabela 8 - Espessura Mínima de revestimento betuminoso .....	20
Tabela 9- Granulometria encontrada no solo .....	38
Tabela 10 - Relações dos ensaios realizados para o solo .....	39
Tabela 11-CLASSIFICAÇÃO DE SOLOS: Sugestão do Highway Research Board-HRB adotada pela AASHTO .....	39
Tabela 12- Coeficientes de recalque.....	40
Tabela 13-Fluxos futuros do Tráfego .....	41
Tabela 14 - Coeficiente de Poisson usuais para materiais de pavimentação (DER-SP, 2006)	44
Tabela 15- Módulos de resiliência ou elasticidade usuais para materiais de pavimentação (DER-SP, 2006).....	44
Tabela 16- Espessuras pavimento flexível (método empírico) .....	47
Tabela 17-Espessuras pavimento flexível (Trecho 3) .....	47
Tabela 18- Espessuras pavimento flexível (MeDiNa).....	48
Tabela 19-Quantitativo de Materiais (método empírico) .....	49
Tabela 20-Quantitativo de Materiais (Trecho 3) .....	49
Tabela 21-Quantitativo de Materiais (MeDiNa) .....	49

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

AASHTO – American Association of State Highway and Transportation Officials

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas.

CNT – Confederação Nacional do Transporte

DNER– Departamento Nacional de Estradas de Rodagem

DNER/PR– Departamento de Estradas de Rodagem do Estado do Paraná

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

Gn. – Gênese

LEP – Laboratório de Engenharia de Pavimentos

MeDiNa - Método de Dimensionamento Nacional

NBR – Norma Brasileira

USACE – U. S. Army Corps of Engineers, conhecido como CE – Corpo de Engenheiros

## LISTA DE SÍMBOLOS

A – área de contato entre o pneu-pavimento.

P– Carga por roda.

p – Pressão de enchimento do pneu.

E – Módulo de elasticidade do meio.

V – Coeficiente de Poisson.

$\sigma_x$  – tensão normal na direção X.

$\sigma_z$  – tensão normal na direção Z.

$\tau_{xz}$  – a tensão de cisalhamento na direção xz.

W – deslocamento do ponto em estudo.

r – distância horizontal e entre o ponto de aplicação de carga e o ponto em estudo.

z– distância vertical entre o ponto de aplicação de carga e o ponto em estudo.

IG – Índice de Grupo.

ISC– Índice de Suporte Califórnia.

IP– Índice de Plasticidade.

LL– Limite de Liquidez.

LP– Limite de Plasticidade.

a= % de material que passa na peneira n° 200, menos 35.

b= % de material que passa na peneira n° 200, menos 15.

c= Valor do Limite de Liquidez (LL) menos 40.

d= Valor de Índice de Plasticidade (IP)menos 10.

N – Número de ciclos de carregamento.

$V_m$ – Volume médio de tráfego.

$V_1$ -Volume médio de tráfego no ano da abertura, em um sentido e admitindo-se a taxa t% de crescimento anual.

t- Taxa de crescimento anual (%) em progressão aritmética.

P- Período de anos.

$V_t$ – Volume total de tráfego.

F.E–fator de eixos, número que multiplicado pelo número de veículos dá o número de eixos correspondentes.

F.C– fator de carga, número que multiplicado pelo número de eixos que operam dá o número de eixos equivalentes ao eixo padrão.

F.V – fator de veículo, número que multiplicado pelo número de veículos que operam, dá diretamente o número de eixos equivalentes ao eixo padrão página.

n– número total de eixos.

$P_i$ – percentagem com que cada categoria de veículos ocorre na estrada.

FVi- fator de veículos individual para cada categoria de veículo.

$H_m$  – Espessura total do pavimento.

$H_n$ – Espessura do topo do revestimento até o início da camada de reforço do subleito.

$h_n$ –espessura da camada do pavimento com C.B.R ou I. S=N.

$H_{20}$ – Espessura do revestimento + base sobre a sub-base.

$h_{20}$ –Espessura de sub-base.

B–Espessura da base.

R–Espessura de revestimento.

$H_t$  –altura total do pavimento flexível.

ATR- Afundamento de Trilha de Rodas.

FR – Fator Climático Regional.

MR – Módulo de Resiliência.

$\sigma_d$  - ( $\sigma_1 - \sigma_3$ ): tensão desvio aplicada repetidamente (MPa).

$\epsilon_r$  – deformação específica axial resiliente (mm/mm).

$\sigma_1$ – Tensão principal maior (Mpa).

$\sigma_3$  – Tensão principal menor ou tensão de confinamento (Mpa).

$\epsilon_r$ – Deformação específica axial resiliente (mm/mm).

$\delta_h$  – Deslocamento resiliente registrado (mm).

$H_0$  – Altura de referência do medidor de deslocamentos - LVDT (mm).

$\delta_{total}^p$  – Deformação permanente total.

$\epsilon_p^i$  – Espessura específica de cada camada do pavimento.

$h_i$  – Espessura da camada do pavimento.

n – Número total de camadas.

$\delta_p(\%)$  – Deformação permanente específica.

$\Psi_1, \Psi_2$  e  $\Psi_3$  – Parâmetros de regressão (parâmetros de deformabilidade permanente).

$\sigma_3$  – Tensão confinante.

$\sigma_d$  – Tensão desvio.

$\rho_0$  – Tensão de referência (tensão atmosférica).

N: número de ciclos de aplicação de carga.

MR - Módulo de Resiliência.

$\sigma_3$  - tensão de confinamento.

k1, k2, k3- constantes ou parâmetros de resiliência.

# SUMÁRIO

## Sumário

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1. Objetivos.....</b>	<b>2</b>
1.1.1. Objetivo Geral.....	2
1.1.2. Objetivos Específicos .....	2
<b>1.2. Justificativa .....</b>	<b>2</b>
<b>2. REFERÊNCIAL BIBLIOGRÁFICO .....</b>	<b>2</b>
<b>2.1. Breve histórico da pavimentação asfáltica no mundo.....</b>	<b>2</b>
<b>2.2. Tipos de pavimentos .....</b>	<b>5</b>
<b>2.3. Pavimento flexível.....</b>	<b>7</b>
<b>2.4. Constituição das camadas de pavimento flexível.....</b>	<b>8</b>
<b>2.5. Estrutura de um pavimento.....</b>	<b>8</b>
2.5.1. Subleito.....	8
2.5.2. Regularização do subleito .....	9
2.5.3. Reforço do Subleito .....	9
2.4.4. Sub-base.....	9
2.4.5. Base.....	9
2.4.6. Revestimento asfáltico .....	9
<b>2.6. Distribuição de carga em pavimentos flexíveis.....</b>	<b>10</b>
<b>2.7. Estudos preliminares de pavimentação .....</b>	<b>12</b>
<b>2.8. Método empírico.....</b>	<b>13</b>
2.8.1. Classificação dos materiais granulares no pavimento.....	14
2.8.2. Tráfego .....	16
<b>2.9. Método mecanístico-empírico .....</b>	<b>22</b>
2.9.1. Módulo resiliente.....	27
2.9.2. Deformação permanente.....	29
2.9.3. Materiais granulares .....	31
2.9.4. Solos finos, siltosos ou argilosos.....	32
2.9.5. Solos lateríticos .....	33
2.9.6. Materiais estabilizados com cimento .....	33
2.9.7. Misturas asfálticas .....	33

2.10. mediNa- Método de Dimensionamento Nacional .....	34
<b>3. METODOLOGIA.....</b>	<b>36</b>
3.1. Área de estudo .....	36
3.2. Modelo de dimensionamento .....	37
3.3. Dimensionamento pelo Método Empírico .....	38
3.3.1. Determinação do Índice de Suporte .....	38
3.3.2. Índice de Grupo (IG) .....	38
3.3.3. Capacidade de suporte do subleito .....	40
3.3.4. Estudo do Tráfego .....	41
3.3.5. Determinação do Coeficiente de Equivalência Estrutural.....	42
3.3.6. Dimensionamento das camadas do pavimento.....	42
3.4. Dimensionamento Mecânico-Empírico com MeDiNa.....	43
3.4.1. Retroanálise .....	43
3.4.2. Verificação da vida útil e dimensionamento .....	46
<b>4. RESULTADOS .....</b>	<b>47</b>
4.1. Método empírico .....	47
4.2. Relatório Técnico Final, Termo de Cooperação 0050.0081624.13.9 PETROBRAS/ANP e a (UFCG).....	47
4.3. Método mecânico-empírico utilizando MeDiNa .....	48
4.4. Quantitativo dos materiais .....	49
<b>5. CONCLUSÃO E SUGESTÕES .....</b>	<b>50</b>
5.1. Conclusão .....	50
5.2. Sugestões para trabalhos futuros.....	50
<b>6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>51</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos a indústria da Construção no Brasil vem sofrendo diversas adequações e modernização, a exemplo da NBR 15.575:2013- Edificações Habitacionais-Desempenho na construção civil e também do método de dimensionamento de pavimentos flexíveis mecanístico-empírico em fase de implantação nas rodovias brasileiras pelo DNIT.

Mattos (2010), diz que “o processo de planejamento e controle passa a cumprir papel fundamental nas empresas, na medida em que tem forte impacto no desempenho da produção”. Sendo, portanto, indispensável no atual cenário competitivo do mercado da engenharia brasileira, os profissionais de engenharia manterem-se atualizados.

A partir de 2018, segundo a CNT (2018) rodovias administradas pelo DNIT serão dimensionadas de acordo com um novo método. A metodologia foi criada por meio de uma parceria entre DNIT, a Rede Temática de asfaltos e o Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, da UFRJ. Sendo, portanto, uma atualização da técnica utilizada no Brasil desde 1960 incluindo tecnologias já adotadas em rodovias brasileiras.

Ainda segundo a CNT (2018), o método de dimensionamento de pavimentos flexíveis, do Eng. Murillo Lopes de Souza de da década de 1960, método empírico, é baseado na experiência do Corpo do Engenheiros do Exército dos Estados Unidos da América do Norte e em conclusões obtidas na pista Experimental da AASHTO. Este método previa apenas o uso do asfalto puro na pavimentação das rodovias nacionais. Tecnologias mais avançadas, como asfaltos de borracha e modificados por polímeros, não eram consideradas.

O dimensionamento pelo método empírico, conforme (DNIT 2006) tem por base a capacidade de suporte do subleito, onde a Capacidade de Suporte do subleito e dos materiais constituintes dos pavimentos é através do CBR, adotando-se o método de ensaio preconizado pela Norma DNER-ME 049/94.

No dimensionamento do método mecanístico-empírico, que está sendo atualizado no Brasil, Motta (2003) descreve dois principais critérios de ruptura que comandam o dimensionamento de pavimentos de qualquer tipo, no clima tropical: a fadiga e o afundamento de trilha de roda, que resultam das deformações elásticas e plásticas que acontecem em cada ponto do pavimento a cada passagem de um veículo.

No presente trabalho será realizado o dimensionamento de pavimento flexível, empírico e mecanístico-empírico, com auxílio de dados de um trecho de rodovia já monitorado pelo Laboratório de Engenharia de Pavimentos-LEP/UFCG, Campina Grande-PB, na PB-138 que



liga Campina Grande/Catolé de Boa Vista-PB a Boa Vista-PB. Com a finalidade de compararmos os resultados encontrados entre os dois métodos de dimensionamento

## **1.1. Objetivos**

### **1.1.1. Objetivo Geral**

Este trabalho tem como objetivo geral o estudo dos modelos de dimensionamento de pavimento flexível, empírico e mecanístico-empírico utilizados no Brasil pelo DNIT e adequação do modelo mais representativo para a região analisada.

### **1.1.2. Objetivos Específicos**

- Analisar os modelos de dimensionamento de pavimento flexível;
- Dimensionamento de pavimento flexível, pelos dois métodos citados, de acordo os com dados coletados pelo LEP/UFCG (Laboratório de Engenharia de Pavimentos da Universidade Federal de Campina Grande) na PB-138 que liga Campina Grande/Catolé de Boa Vista-PB a Boa Vista-PB.
- Comparar os resultados obtidos pelos métodos de dimensionamento empírico e mecanístico-empírico.

## **1.2. Justificativa**

Tendo em vista a atualização do método de dimensionamento mecanístico- empírico de pavimentos flexíveis, que está sendo realizada no Brasil, a justificativa deste trabalho baseia-se na necessidade de realizar um estudo comparativo entre esse método e o método empírico utilizado pelo DNIT no Brasil. Dentro da Rede Temática de Asfáltico, onde são monitorados trechos experimentais de rodovias, tendo como finalidade a criação de um banco de dado e a criação de um novo método de dimensionamento brasileiro mecanístico empírico.

## **2. REFERÊNCIAL BIBLIOGRÁFICO**

### **2.1. Breve histórico da pavimentação asfáltica no mundo**

Historicamente as estradas foram construídas principalmente por motivos econômicos e militares, no entanto a primeira citação de um caminho remonta a Bíblia sagrada no livro de Gn.3: 24 “E, havendo lançado fora o homem, pôs querubins ao oriente do jardim do Éden e uma espada inflamada que andava ao redor, para guardar o caminho da árvore da vida.

Conforme Bernucci (2006), percorrer a história da pavimentação nos remete à própria história da humanidade, passando pelo povoamento dos continentes, conquistas territoriais, intercâmbio comercial, cultural e religioso, urbanização e desenvolvimento. Podemos encontrar no antigo Egito (2600-2400 a.C.) uma das estradas mais antigas pavimentadas no mundo, sendo construída com lajões justapostos e utilizada para o transporte de cargas durante a construção das Pirâmides. Uma das estradas mais antigas no mundo usadas inicialmente para fins comerciais, foram as estradas que faziam parte das Rotas da seda que ligavam a China à Europa.

Com é dito em Bernucci (2006), já à época havia uma grande preocupação com diversos aspectos hoje sabidamente importantes de se considerar para uma boa pavimentação (trechos extraídos de Mascarenhas Neto, 1790):

- Drenagem e abaulamento: o convexo da superfície da estrada é necessário para que as águas, que chovem sobre ela, escorram mais facilmente para os fossos, por ser esta expedição mais conveniente à solidez da estrada”;
- Erosão: “quando o sítio não contém pedra, ou que ela não se consegue sem longo carreto, pode suprir-se formando os lados da estrada com um marachão de terra de grossura de quatro pés, na superfície do lado externo, formando uma escarpa; se devem semear as gramas ou outras quaisquer ervas, das que enlaçam as raízes”;
- Distância de transporte: “o carreto de terras, que faz a sua maior mão-de-obra”;
- Compactação: “é preciso calcar artificialmente as matérias da composição da estrada, por meio de rolos de ferro”;
- Sobrecarga: “devia ser proibido, que em nenhuma carroça de duas rodas se pudessem empregar mais de dois bois, ou de duas bestas, e desta forma se taxava a excessiva carga; liberdade para o número de forças vivas, empregadas nos carros de quatro rodas, ... peso então se reparte, e causa menos ruína”;
- Marcação: “todas as léguas devem estar assinaladas por meio de marcos de pedra.

Afim de simplificar o entendimento histórico das estradas, este trabalho à apresenta uma linha do realizada com o apoio da ferramenta computacional.

São destacado na Quadro 1, alguns fatos históricos relevantes que influenciaram o desenvolvimento da pavimentação no Brasil e mundo.

Tabela 1 Histórico de pavimentos

Ano	Fato	Descrição
*	Primeira citação de uma estrada	“E, havendo lançado fora o homem, pôs querubins ao oriente do jardim do Éden e uma espada inflamada que andava ao redor, para guardar o caminho da árvore da vida.” (Livro de Gn.3: 24)
27 a.C.	Otaviano-Roma Antiga	Uso de estradas para "deslocando tropas de centros estratégicos para as localidades mais longínquas, os romanos foram capazes de implantar um sistema robusto construído com elevado nível de critério técnico". (BERNUCCI ET.AL. 2006, p.11)
476 d.C.	Queda do Império Romano	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 e a conservação das estradas. (BERNUCCI ET.AL., 2006, p.14)
1650 d.C.	Veículo de três rodas	"Hans Hautch, Alemanha. Projetou um veículo de três rodas, provavelmente acionado por um dispositivo de relojoaria"(SENÇO, 2008, p.16).
1885 d.C.	Patente de veículo com motor movido a gasolina	"Gottlieb Daimler, Alemanha. No mês de agosto, consegue a patente de um veículo acionado por motor, que usava a gasolina como combustível. Essa patente pode ser considerada como a certidão de nascimento do automóvel " (SENÇO, 2008, p.16).
1904 d.C.	Transferência da Ford	"Henry Ford, Estados Unidos, Ford, nesse ano, transferiu sua fábrica para Detroit, local anteriormente escolhido por Ramsay Qfds para produzir veículos, tornando-se a cidade, em pouco tempo, a capital mundial do automóvel" (SENÇO, 2008, p.17).
1929 d.C.	Quebra da Bolsa de Valores de New York	A quebra da bolsa de valores, levou o governo Americano, a uma política rígida de investimento público e privado, assim visando combater principalmente o desemprego, desta forma teve-se um vasto investimento em "obras de saneamento, produção de energia, irrigação, estradas e outros, no vale do Tennessee" (SENÇO, 2008, p.21).
1940 d.C. - 1950 d.C	Avanço tecnológico na área de Pavimentação	Ocorreu um grande avanço na Tecnologia empregada nas estradas pavimentadas, tendo como principal precursor as necessidades logísticas durante a Segunda Guerra Mundial
1972 d.C	Inauguração da Transamazônica	Inauguração da Transamazônica pelo presidente Emílio Garrastazu Médici (1969 a 1974).

Fonte: Autoria própria.

Em Bernucci (2006), o grande impulso na construção rodoviária brasileira ocorreu nas décadas de 1940 e 1950, graças à criação do Fundo Rodoviário Nacional (FRN) em 1946. No Brasil, durante o período de Regime Militar, vivenciou-se um grande avanço econômico impactando diretamente o desenvolvimento das rodovias. A rodovia Transamazônica que liga o Nordeste ao Norte do País possui 4 223 km e foi inaugurada em 27 de Agosto de 1972.

A Tabela 2, apresenta dados em quilômetros (Km) a porcentagem das rodovias pavimentadas no Brasil.

Tabela 2: Extensão de rodovias pavimentadas

Região	Área Km <sup>2</sup>	Extensão das rodovias - km	
		Total*	Pavimentadas
<b>Brasil</b>	<b>8.515.759,1</b>	<b>1.720.700</b>	<b>213.453</b>
Norte	3.853.840,9	148.028	22.389
Nordeste	1.554.291,1	445.404	59.961
Sudeste	924.608,9	533.795	62.520
Sul	576.783,8	388.078	38.322
Centro-Oeste	1.606.234,5	205.395	30.260

Fonte: CNT. 2018, p.140

## 2.2. Tipos de pavimentos

Dentre as várias definições de Pavimento podemos citar a de Bernucci (2006) onde “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.”

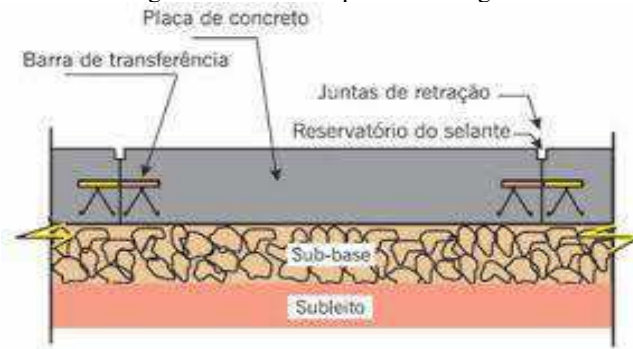
Segundo a NBR 7207/1982 o pavimento é uma estrutura que deve:

- resistir e distribuir ao subleito os esforços verticais produzidos pelo tráfego;
- melhorar as condições de rolamento quanto à comodidade e segurança;
- resistir aos esforços horizontais que nele atuam tornando mais durável a superfície de rolamento.

O Dnit (2006) classifica os pavimentos em três tipos: os pavimentos flexíveis, semi-rígido e os pavimentos rígidos.

Para o DER/PR (2005) o pavimento rígido ou pavimento de concreto simples, apresentada na Figura 1, é o pavimento cuja camada é constituída por placas de concreto de cimento Portland, não armadas ou eventualmente com armaduras sem função estrutural, que desempenham simultaneamente as funções de base e de revestimento.

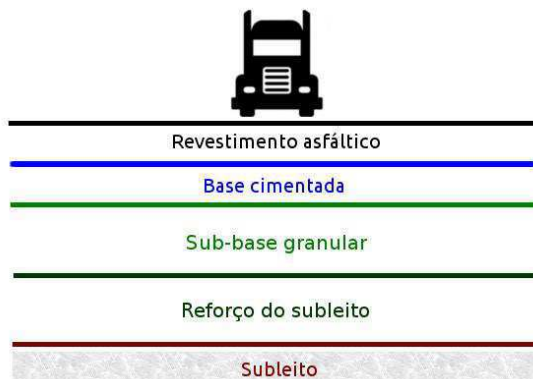
Figura 1 - Camadas pavimento rígido



Fonte: [http://www.ibracon.org.br/eventos/50cbc/pav\\_apresentacoes/isis\\_raquel.pdf](http://www.ibracon.org.br/eventos/50cbc/pav_apresentacoes/isis_raquel.pdf)

Para o pavimento semirrígido, exemplificado na Figura 2, é o que “caracteriza-se por uma base cimentada por algum aglutinante com propriedades cimentícias como por exemplo, por uma camada de solo cimento revestida por uma camada asfáltica.”

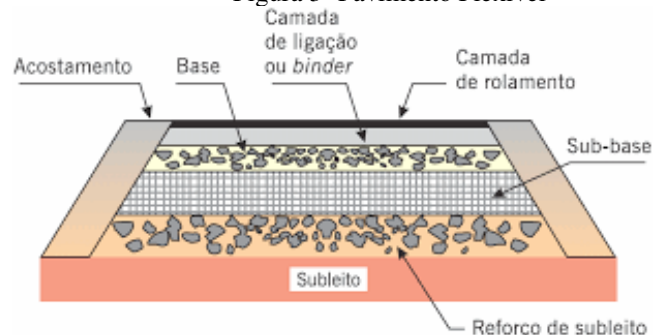
Figura 2-Camadas pavimento semirrígido



Fonte: <https://www.ecivilnet.com/dicionario/o-que-e-pavimento-semi-rigido.html>

“Pavimento flexível, ilustrado na Figura 03, é aquele em que todas as camadas sofrem deformação elástica significativa sob o carregamento aplicado e, portanto, a carga se distribui em parcelas aproximadamente equivalentes entre as camadas” (DNIT,2006, p.95).

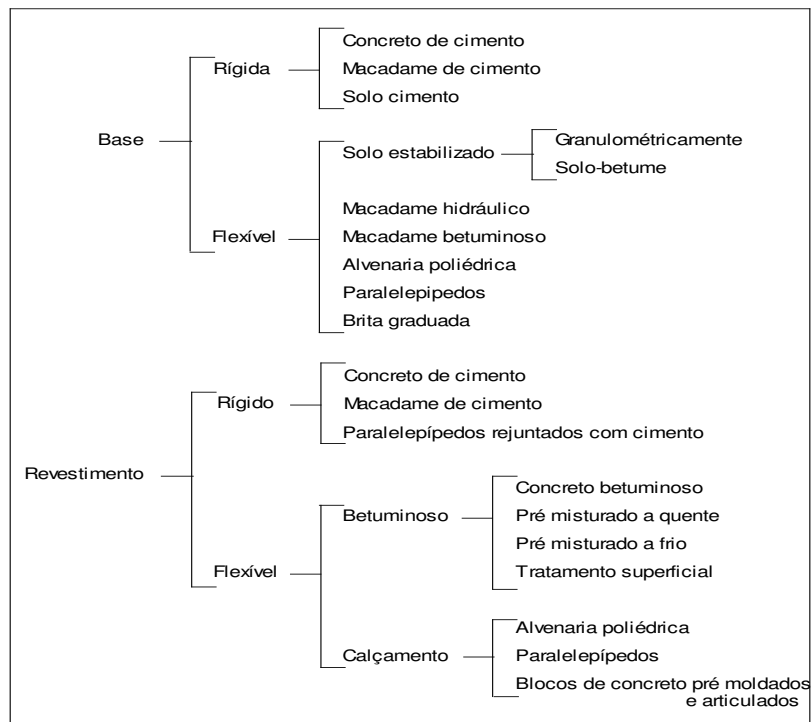
Figura 3- Pavimento Flexível



Fonte: [http://www.ibracon.org.br/eventos/50cbc/pav\\_apresentacoes/isis\\_raquel.pdf](http://www.ibracon.org.br/eventos/50cbc/pav_apresentacoes/isis_raquel.pdf)

Os pavimentos são compostos por diversos materiais, na figura 4 podemos verificar os materiais utilizados para cada tipo de pavimento.

Figura 4- Pavimentos e seus materiais

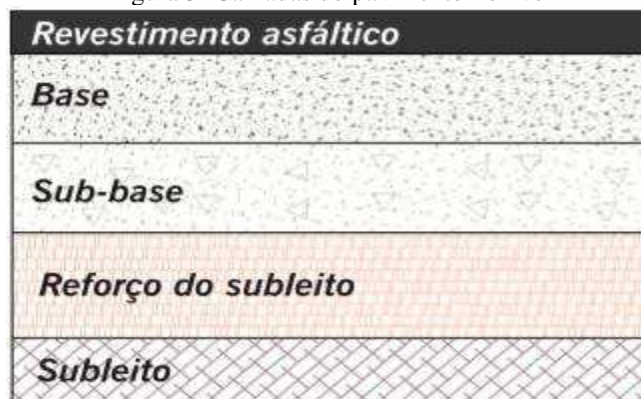


Fonte: NOTAS DE AULA, PROF. LUÍS MÁRCIO FRANCA, (2008)

### 2.3. Pavimento flexível

No presente trabalho iremos centrar o estudo no dimensionamento de pavimento flexível. Segundo Bernucci (2006) as estruturas de pavimentos são sistemas de camadas assentes sobre uma fundação chamada subleito”. Nos pavimentos flexíveis essas estruturas são flexíveis, compostas por uma superfície asfáltica(revestimento), base, sub-base e reforço do subleito, conforme Figura 5 e Figura 6.

Figura 5- Camadas do pavimento flexível



Fonte: BERNUCCI ET. AL. (2006).

Figura 6- Camadas estruturais do pavimento flexível



Fonte: <http://www.ufjf.br/pavimentacao/files/2009/03/Aulas-1%C2%BA-TVC.pdf>

## 2.4. Constituição das camadas de pavimento flexível

De acordo com Rodrigues (2013), a constituição de um pavimento flexível pode variar em função da localização, do tipo de tráfego previsto, do solo de fundação, do tipo de material utilizado na sua construção (normalmente função dos materiais disponíveis) e das condições climáticas a que esteja sujeito, variáveis que de uma forma geral influenciam o seu comportamento.

Bernucci (2006) destaca que, os materiais de pavimentação compactados devem apresentar-se resistentes, pouco deformáveis e com permeabilidade compatível com sua função na estrutura. Onde os principais materiais utilizados são:

- Agregados
- Solos
- Cimento
- Cal
- Emulsão asfáltica

## 2.5. Estrutura de um pavimento

### 2.5.1. Subleito

É a fundação do pavimento, formado basicamente por um material natural devidamente compactado ou por material compactado mecanicamente. Em Bernucci (2006) temos que dependendo do tipo de subleito, deve-se utilizar uma camada de bloqueio de modo a evitar cravamento do agregado graúdo no solo. Em subleitos de baixa capacidade de suporte,

emprega-se largamente o “rachão”, material granular de grandes dimensões, denominado “pedras-de-mão”, que, por cravamento e posterior intertravamento, reduz significativamente as deformações permanentes e auxilia na construção das demais camadas subseqüentes por oferecer um aumento substancial de suporte.

#### 2.5.2. Regularização do subleito

Segundo o DER/PR ES-P01/05(2005) regularização do subleito dever ser empregada como a camada final de terraplenagem, mediante cortes e/ou aterros de 0,20m, conferindo-lhe condições adequadas em termos geométricos e de compactação.

#### 2.5.3. Reforço do Subleito

Conforme Balbo (2007) e Branco (2006), o reforço do subleito é uma camada construída, se necessário, acima da regularização do subleito, com características técnicas inferiores ao material usado na camada que lhe for superior, porém superiores às do material do sub-jeito. e tem por finalidade evitar custos mais elevados com camadas muito espessas de base e sub-bases, se faz uso de camada de reforço do subleito, nos casos em que o solo de subleito é de baixa capacidade de carga.

#### 2.4.4. Sub-base

Sub-base, segundo Balbo (2007) e Branco (2006) é uma camada complementar à base, que tem por finalidade diminuir a espessura da base, diminuindo assim os custos da pavimentação asfáltica, Os materiais utilizados podem ser os mesmos utilizados nas bases, quanto há utilização de aglomerantes o consumo de material é menor.

#### 2.4.5. Base

De acordo com Balbo (2007) e Branco (2006), base é a camada que tem por finalidade receber e distribuir os esforços do tráfego, sobre esta camada é construída o revestimento asfáltico. Podendo ser composta de solo estabilizado naturalmente e quimicamente, misturas de solos agregados, brita graduada e brita graduada tratada com cimento.

#### 2.4.6. Revestimento asfáltico

De acordo com Balbo (2007) e Branco (2006), é a camada que recebe diretamente os esforços do tráfego, cargas estáticas e dinâmicas, garantindo condições de conforto e segurança. O revestimento deve possuir propriedades físicas e químicas que evitem:

- Elevadas deformações elásticas ou plásticas;



- Perda de compactação;
- Desagregação dos componentes;
- Movimentação horizontal.

Para os revestimentos asfálticos novos existe uma subdivisão em duas camadas, a camada de rolamento que consiste na camada superficial que receberá o contato direto das cargas e ações do ambiente, e a camada de ligação(binder) que também é construída de mistura asfáltica e está entre a camada de rolamento e a base, agindo como camada impermeável.

## **2.6. Distribuição de carga em pavimentos flexíveis**

Para Bauer (2008) é essencial que os pavimentos tenham espessura adequada. Os pavimentos rodoviários devem ser encarados como placas destinadas a distribuir o peso dos veículos sobre o terreno natural, e que descansam sobre o solo.

Em Bernucci (2006) os revestimentos das estruturas de pavimento em geral são submetidos a esforços de compressão e de tração devidos à flexão, ficando as demais camadas submetidas principalmente à compressão. Em certos casos, uma camada subjacente ao revestimento pode ser composta por materiais estabilizados quimicamente de modo a proporcionar coesão e aumentar sua rigidez, podendo resistir a esforços de tração

Franco (2007) define que a estrutura de um pavimento asfáltico é representada por um meio estratificado, submetido a um carregamento superficial distribuído em uma área circular podendo ser modelada por meio da Teoria da Elasticidade. A Figura 7 apresenta um esquema representativo das tensões, deformações e deslocamentos em pontos críticos de um pavimento asfáltico.

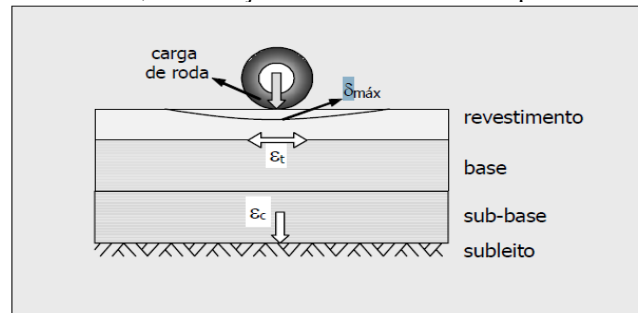
Segundo Fernandes (2016) no dimensionamento de pavimentos a aproximação da área ao círculo traz a equação para área de contato entre o pneu -pavimento, conforme equação (1).

$$A=P/p \quad (1)$$

Onde:

- A– Área de contato entre o pneu-pavimento
- P– Carga por roda
- p– Pressão de enchimento do pneu.

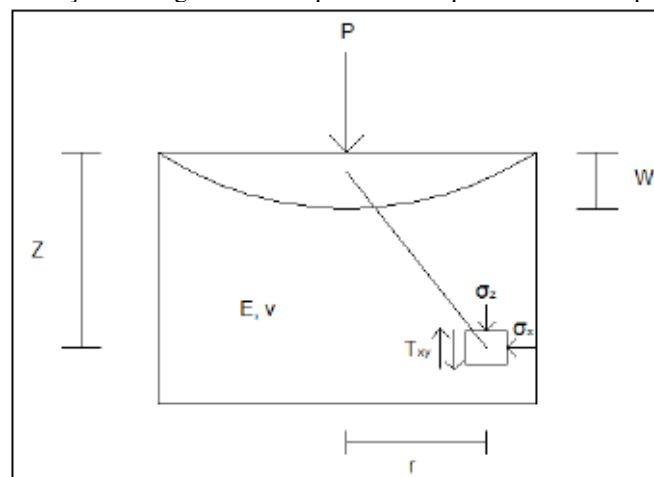
Figura 7 - Tensões, deformações e deslocamentos em pavimento flexível



Fonte: FRANCO 2007, p. 23.

Conforme Franco (2007), a partir da caracterização da estrutura e dos materiais, aí incluídas as espessuras das camadas, os módulos de resiliência e os coeficientes de Poisson dos diversos materiais; e da composição do tráfego atuante, a resposta do pavimento pode ser estimada via cálculo das tensões, deformações e deslocamentos gerados na estrutura. A Figura 8 demonstra o esquema de esforços atuantes em um semi-espaço elástico e as equações de 2 a 5 representam o cálculo destes esforços.

Figura 8 - Esforços de carga externa superficial um ponto do semi-espaço elástico



Fonte: BALBO,2007 APUD FERNANDES 2016.

$$\sigma_x = \frac{P}{2\pi} \left\{ (1 - 2\nu) \left[ \frac{1}{r^2} - \frac{z}{r^2} (r^2 + z^2)^{-\frac{1}{2}} \right] - 3r^2 z (r^2 + z^2)^{-5/2} \right\} \quad (2)$$

$$\sigma_z = -\frac{3P}{2\pi} z^3 (r^2 + z^2)^{-\frac{5}{2}} \quad (3)$$

$$\tau_{xz} = -\frac{3P}{2\pi} r z^2 (r^2 + z^2)^{-\frac{5}{2}} \quad (4)$$

$$w = \frac{P}{2\pi E} \left[ z^2 (1 + \nu) (r^2 + z^2)^{-\frac{3}{2}} + 2(1 - \nu^2) (r^2 + z^2)^{-1/2} \right] \quad (5)$$

Onde:

- P é a carga aplicada
- E é o módulo de elasticidade do meio;
- V é o coeficiente de Poisson;

- $\sigma_x$  – Tensão normal na direção X;
- $\sigma_z$  – Tensão normal na direção Z;
- $\tau_{xz}$  – a tensão de cisalhamento na direção xz;
- W é o deslocamento do ponto em estudo;
- r e z são as distâncias horizontal e vertical entre o ponto de aplicação de carga e o ponto em estudo.

Para Yoder & Witczak,1975;Huang,2004;Branco,2006,apud Fernandes 2016: .

Esses cálculos consideram as tensões e deformações para um determinado local e espaço de tempo infinitesimal, ou seja, ao se deslocar a roda do ponto inicial de aplicação da carga, as tensões e as deformações relativas diminuem e anulam-se. O pavimento recupera praticamente sua condição inicial. No entanto, uma pequena parcela da deformação não é recuperada devido aos materiais que constituem a estrutura do pavimento não serem perfeitamente elásticos.

## 2.7. Estudos preliminares de pavimentação

Conforme Dnit (2006) os estudos geotécnicos para o Projeto de pavimentação compreendem, estudos do Subleito e estudos de ocorrência de Materiais para pavimentação, onde:

- Estudo do Subleito de estradas de rodagem com terraplenagem concluída tem como objetivo o reconhecimento dos solos visando a caracterização das diversas camadas e o posterior traçado por perfil dos solos para efeito do projeto de pavimento.
- O estudo de ocorrências de materiais para Pavimentação tem como objetivo o reconhecimento e a caracterização dos materiais de jazidas como fonte de matéria-prima para a utilização na construção das diversas camadas de Reforço do Subleito, Sub-base, Base e Revestimento, de acordo com o projeto de pavimento.

Para efeito dos estudos geotécnicos são adotadas as seguintes definições Dnit (2006):

- a) Prospecção e classificação expedida no campo: é a que resulta das sondagens e observação dos materiais quanto a cor, textura e consistência;
- b) Camadas de solos: são massas de solos contínuas e consideradas homogêneas sob o ponto de vista da classificação;
- c) Perfil de solos: é o desenho em escala conveniente, de um corte de subleito ou de uma seção de uma jazida até a profundidade sondada e que deverá ser feito de acordo com a classificação de laboratório.

Na execução dos estudos geotécnicos para o projeto de Pavimentação são realizados os seguintes ensaios DNIT (2006):

- a) Granulometria por peneiramento com lavagem do material na peneira de 2,0 mm (n°10) e de 0,075 mm (n° 200);
- b) Limite de Liquidez;
- c) Limite de plasticidade;
- d) Limite de Construção em casos especiais do subleito;
- e) Compactação;
- f) Massa específica aparente "in situ";
- g) Índice de Suporte Califórnia (ISC);
- h) Expansibilidade no caso de solos lateríticos.

## 2.8. Método empírico

O método que era adotado pelo DNER, foi proposto nos anos 60 pelo Engenheiro Murillo Lopes de Souza. Este método tem como base a capacidade de suporte do subleito e dos materiais granulares, que é feita pelo ensaio CBR, Eixo padrão de 80 KN e o coeficiente de equivalência estrutural obtido nas pistas da AASHTO.

“A Capacidade de Suporte do subleito e dos materiais constituintes dos pavimentos é feita pelo C.B.R, adotando-se o método de ensaio preconizado pela Norma DNER-ME 049/94” (DNIT 2006, apud FERREIRA 2013, p.6).

Conforme DNER 1981, quando se deseja e for justificável uma segurança maior, em vez do C.B.R pode-se usar um C.B.R corrigido em função do Índice de Grupo (IG), que é denominado Índice de Suporte (I.S).

Obtemos o IS através da equação (6)

$$IIS = \frac{C.B.R + C.B.R_{IG}}{2} \quad (6)$$

Com as seguintes condições:

- $IS \leq CBR$ ;
- CBR – Valor C.B.R determinado no ensaio respectivo e nas condições descritas anteriormente;
- $CBR_{IG}$  – Valor obtido através da Tabela 3.

Tabela 3 - CBR através do Índice de Grupo

Índice de Grupo (I.G)	C.B.R I.G
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

Fonte: DNER (1981)

Conforme DNIT (2006), o Índice de Grupo (IG) é um número empírico obtido pela expressão seguinte, equação (7):

$$IG=0,2 a +0,005ac+0,01bd \quad (7)$$

Onde,

- a – % de material que passa na peneira n° 200, menos 35. Se a % obtida nesta diferença for maior que 75, adota-se 75; se for menor que 35, adota-se 35. (a varia de 0 a 40);
- b – % de material que passa na peneira n° 200, menos 15. Se b% obtida nesta diferença for maior que 55, adota-se 55; se for menor que 15, adota-se 15. (b varia de 0 a 40)
- c – Valor do Limite de Liquidez (LL) menos 40. Se o Limite de Liquidez for maior que 60, adota-se 60, se for menor que 40, adota-se 40 (c varia de 0 a 20)
- d – Valor de Índice de Plasticidade (IP) menos 10. Se o Índice de Plasticidade for maior que 30, adota-se 30; se for menor que 10 adota-se 10(d varia de 0 a 20).

### 2.8.1. Classificação dos materiais granulares no pavimento

Os materiais do subleito devem apresentar uma expansão, medida no ensaio C.B.R , menor ou igual a 2% e um C.B.R  $\geq 2\%$  ( DNER 1981).

Segundo o DNIT (2006), as exigências para os materiais de reforço do subleito e base estabilizada, são as seguintes:

- Reforço do subleito: características superiores à do subleito, demonstrados pelos ensaios de ISC. e de caracterização (Granulometria, LL, LP).

- Para a sub-base granulometricamente estabilizada:  $ISC \geq 20$  e índice de Grupo =0 para qualquer tipo de tráfego.

- Para a base estabilizada granulometricamente:

- Limite de Liquidez máximo 25%
- Índice de plasticidade máximo: 6%
- Equivalente Areia mínimo:30%

Na Tabela 4, temos algumas especificações de materiais empregados nas camadas de pavimentos flexíveis com exceção do subleito.

Tabela 4 - Especificações de materiais empregados em camadas exceto subleito

Camada	CBR ou I. S	Expansão	I.G.	LL	IP
Reforço do SUBLEITO	>subleito	$\leq 1\%$	-	-	-
Sub-Base	$\geq 20\%$	$\leq 1\%$	0	-	-
Camada	CBR ou I. S	Expansão	I.G.	LL	IP
Base	$\geq 80\%$	$\leq 0,5\%$	-	$\leq 25\%$	$\leq 6\%^{**}$

Fonte Adaptada, "20 de outubro de 2018", DNIT (2006), p. 142.

\*medida com sobrecarga de 10lb (aprox. 4,53592kg)

\*\*Se o ensaio equivalente areia for superior a 30, o LL e o IP não precisam satisfazer as condições. Os materiais para a base granular devem se enquadrar numa das seguintes faixas granulométricas conforme Tabela 5.

Tabela 5- Granulometria para base granular

Tipos	Para $N > 5 \times 10^6$			Para $N < 5 \times 10^6$			Tolerâncias da Faixa de projeto
	A	B	C	D	E	F	
	% em peso passando						
2"	100	100	-	-	-	-	$\pm 7$
1"	-	75-90	100	100	100	100	$\pm 7$
3/8"	30-65	40-75	50-85	60-100	-	-	$\pm 7$
N° 4	25-55	30-60	35-65	50-85	55-100	10-100	$\pm 5$
N° 10	15-40	20-45	25-50	40-70	40-100	55-100	$\pm 5$
N° 40	.8-20.	15-30	15-30	25-45	20-50	30-70	$\pm 2$
N° 200	30-65	.5-15.	.5-15.	.10-25	.6-20.	.8-25.	$\pm 2$

Fonte: DNIT 2006, p.143.

O DNIT (2006), faz as seguintes observações a respeito da Tabela 6:

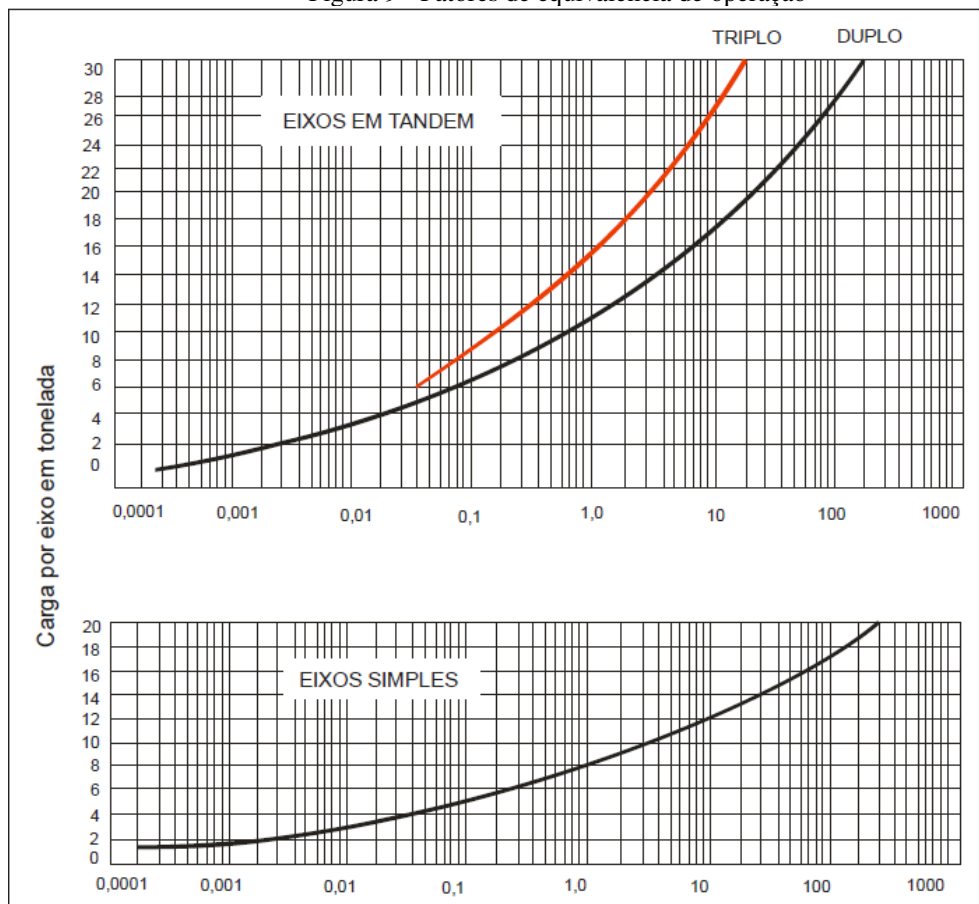
- A fração que passa na peneira n° 200 deve ser inferior a 2/3 da fração que passa na peneira n° 40. A fração graúda deve apresentar um desgaste Los Angeles igual ou inferior a 50. Pode ser aceito um desgaste maior, desde que haja experiência no uso do material.

- Em casos especiais podem ser especificados outros ensaios representativos da durabilidade de fração graúda.
- Para o caso de materiais lateríticos, as "especificações Gerais" fixarão valores para expansão, índices de consistência, granulometria e durabilidade de fração graúda.

### 2.8.2. Tráfego

Em DNIT (2006), o pavimento é dimensionado em função do número equivalente (N) de operações de um eixo tomado como padrão, durante o período de projeto escolhido. A Figura 9, apresenta os fatores de equivalência de operação entre eixos simples e em "tandem" com diferentes cargas e o eixo simples padrão com a carga de 8,2 t (18.000 lb).

Figura 9 - Fatores de equivalência de operação



Fonte: DNIT 2006, p. 144.

Segundo Ferreira (2013) à época que os fatores de equivalência mostrados na Figura 9 em preto foram estabelecidos no trabalho do Corpo de Engenheiros citado (1962) não existiam eixos triplos. Assim em 1981 o Eng<sup>o</sup> Murillo propôs a Tabela 6 para o eixo triplo, inserida em vermelho na Figura 9.

Tabela 6- Fator de equivalência para eixo "tandem" triplo

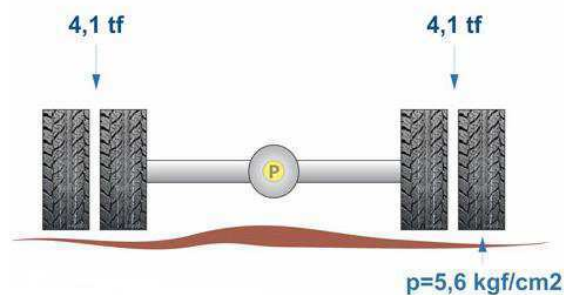
CARGA/EIXO (t)	FATOR DE EQUIVALÊNCIA
6	0,04
8	0,08
10	0,15
12	0,29
14	0,58
16	0,92
18	1,5
20	2,47
22	4,00
24	6,11
26	9,88
28	14,82
30	20,80
32	33,00
34	46,80
36	70,00
38	80,00
40	130,00

Fonte: SOUZA 1981, Apud FERREIRA 2013, p.11.

Um Eixo Padrão Rodoviário, Figura 10, é um eixo simples de duas rodas de cada lado e com as seguintes características:

- Carga por eixo: 8,2tf = 80kN
- Carga por roda: 2,04tf = 20kN
- Pressão de enchimento dos pneus: 5,6 kgf/cm<sup>2</sup>
- Pressão de contato pneu/pavimento: 5,6 kgf/cm<sup>2</sup>
- Afastamento entre pneus, por roda: 32,4cm
- Raio da área de contato pneu/pavimento: 10,8cm

Figura 10 -Eixo Padrão Rodoviário  
Eixo Padrão Rodoviário - 8,2 tf  
eixo simples de rodas duplas



Fonte: (<<https://pedreiro.com.br/o-que-e-um-eixo-padrao-rodoviario-passo-a-passo/>>, 20 de out. 2018



“Para o cálculo de N, deve-se antes calcular o volume médio e o volume total de tráfego na via de projeto”. (FERREIRA 2013, p.8)

O volume médio de tráfego pode ser obtido, conforme Equação (8):

$$V_m = \frac{V_1[2 + \frac{(p-1)t}{100}]}{2} \quad (8)$$

Onde,

- $V_1$ – Volume médio de tráfego no ano da abertura, em um sentido e admitindo-se a taxa  $t\%$  de crescimento anual

- $t$ – Taxa de crescimento anual (%) em progressão aritmética;

- $P$ – Período de anos

- Conforme DNIT (2006), o volume total de tráfego, (num sentido) conforme Equação (9) durante o período,  $V_t$ , será:

$$V_t = 365 \times P \times V_m \quad (9)$$

Admitindo-se uma taxa  $t\%$  de crescimento anual em progressão, o volume total de tráfego,  $V_t$ , durante o período é dado através da Equação (10):

$$V_t = \frac{365V_1[(1 + \frac{t}{100})^p - 1]}{\frac{t}{100}} \quad (10)$$

Conhecido  $V_t$ , Calcula-se N, Equação (11) que é o número equivalente de operações do eixo simples padrão durante o período de projeto e o parâmetro de tráfego usado no dimensionamento:

$$N = V_t * F.E * F.C = V_t * F.V \quad (11)$$

onde:

- F.E– Fator de eixos, número que multiplicado pelo número de veículos dá o número de eixos correspondentes;

- F.C– Fator de carga, número que multiplicado pelo número de eixos que operam dá o número de eixos equivalentes ao eixo padrão;

- F.V– Fator de veículo, número que multiplicado pelo número de veículos que operam, dá diretamente o número de eixos equivalentes ao eixo padrão pagina

Para o cálculo de F.E, F.C e F.V é necessário conhecer a composição de tráfego. Para isto, é necessário fazer uma contagem do tráfego na estrada que se está considerando, estudando-se um certo volume total de tráfego,  $V_t$  (para o período de amostragem). Faz se contagem do número total de eixos  $n$ , e pesam-se todos esses eixos conforme Figura 9.

Obtemos assim as seguintes relações, Equações (12), (13) e (14):

$$n = V_t \times (F.E) \quad (12)$$

$$F. E = \frac{n}{vt} \quad (13)$$

$$F. V = (F.E) \times (FC) \quad (14)$$

Normalmente calcula-se o F.V da seguinte forma, Equação (15):

$$F.V = \frac{\sum(Pi) \times (F \times Vi)}{100} \quad (15)$$

onde:

Pi– Percentagem com que cada categoria de veículos ocorre na estrada;

FVi– Fator de veículos individual para cada categoria de veículo.

O DNIT (2006), classifica os veículos nas seguintes categorias:

- a) automóveis;
- b) ônibus;
- c) caminhões leves, com dois eixos simples, de rodas simples;
- d) caminhões médios, com dois eixos, sendo o traseiro de rodas duplas;
- e) caminhões pesados, com dois eixos, sendo o traseiro "tandem"
- f) reboques e semi-reboques: as diferentes condições de veículos, em unidades múltiplas.

múltiplas.

“Os FVi para automóveis e caminhões leves (embora calculáveis) são desprezíveis, interessando especialmente, os FVi para caminhões médios, pesados e reboques e semirreboques”. (DNIT2006, apud Ferreira2013, p11.)

Segundo o (DNIT 2006), o coeficiente final do fator climático regional (FR) a adotar é uma média ponderada dos diferentes coeficientes sazonais, levando-se em conta o espaço de tempo em que ocorrem. Tem se adotado um FR=1,0 face aos resultados de pesquisas desenvolvidas no IPR/DNER.

O Coeficiente de Equivalência Estrutural, Tabela 7, “São os seguintes os coeficientes de equivalência estrutural para os diferentes materiais constitutivos do pavimento, conforme a tabela” (DNIT,2006 p. 146).

Tabela 7- Coeficiente de equivalência estrutural

<b>Componentes do Pavimento</b>	<b>Coeficiente K</b>
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
<b>Camadas granulares</b>	<b>1,00</b>
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 21kg/cm

1,20

Fonte: DNIT 2006, p.146.

Os coeficientes estruturais são designados, genericamente por:

- Revestimento: KR;
- Base: KB;
- Sub-base: KS;
- Reforço: KRef.

Conforme DNIT (2006), as espessuras a seguir recomendadas, Tabela 8, visam especialmente as bases de comportamento granular e são definidas pelas observações efetuadas.

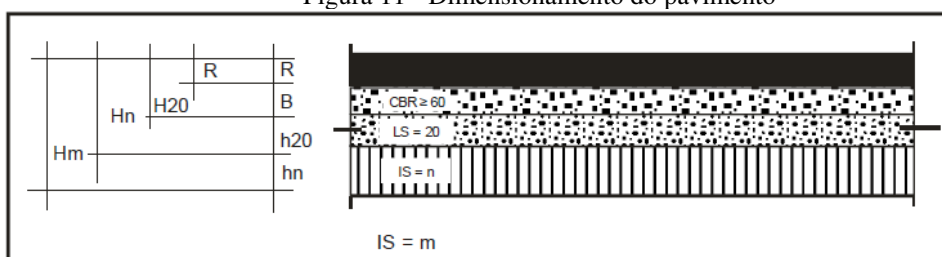
Tabela 8 - Espessura Mínima de revestimento betuminoso

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

Fonte: DNIT 2006, p. 147

Os respectivos símbolos do dimensionamento de pavimento podem ser observados na Figura 11.

Figura 11 - Dimensionamento do pavimento



Fonte: DNIT 2006, p. 149.

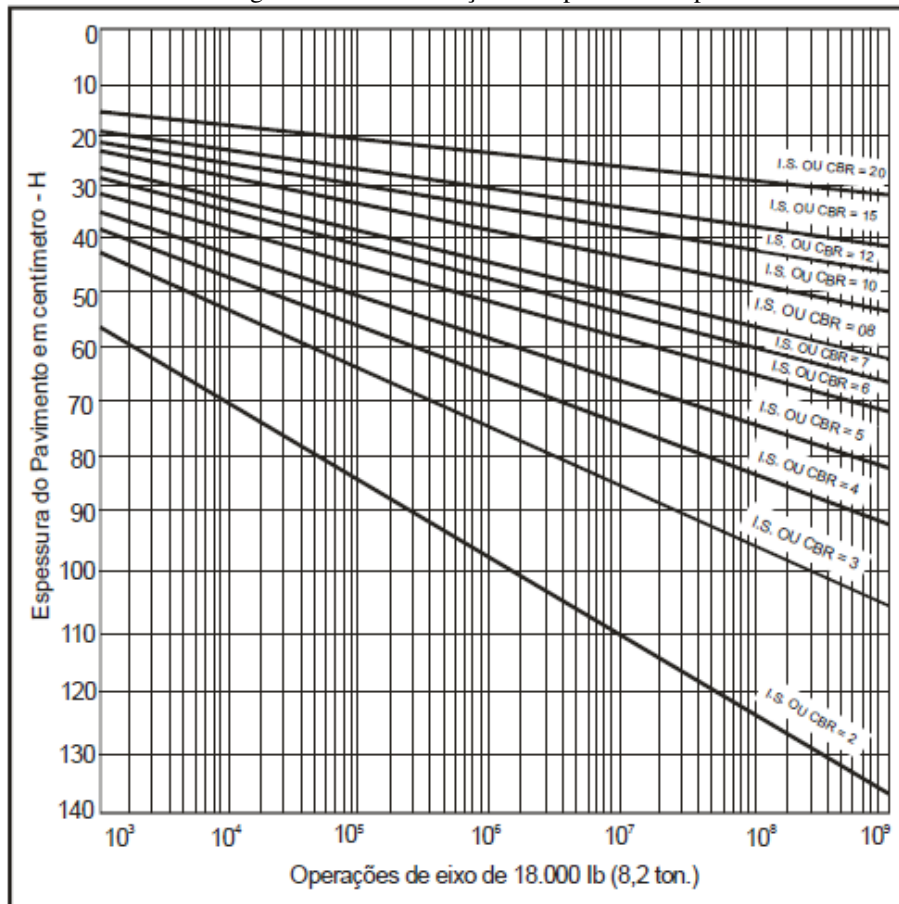
Onde,

- Hm – Espessura total do pavimento;
- Hn– Espessura do topo do revestimento até o início da camada de reforço do subleito;
- hn– Espessura da camada do pavimento com C.B.R ou I.S=N, representando geralmente o reforço do subleito;
- $H_{20}$ – Espessura do revestimento + base sobre a sub-base

- $h_{20}$ – Espessura de sub-base;
- B– Espessura da base
- R– Espessura de revestimento.

Para o dimensionamento do Pavimento, conforme DNIT (2006), o gráfico da Figura 12, dá a espessura total do pavimento em função de N e de I.S ou CBR; a espessura fornecida por este gráfico é em termos de material com  $K=1,00$  ou seja em termos de base granular

Figura 12 - Determinação de espessuras do pavimento



Fonte: DNIT 2006, p. 149.

Onde, a Equação (16) representa altura total do pavimento flexível,

$$H_t = 77,67 \times N^{0,0482} \times CBR^{-0,598} \quad (16)$$

“Uma vez determinadas as espessuras  $H_m$ ,  $H_n$ ,  $H_{20}$ , pelo gráfico da Figura 11, e do revestimento R, através da Tabela 9, as espessuras de Base B, sub-base  $h_{20}$  e reforço do subleito  $h_n$ , são obtidas pela resolução sucessiva das seguintes inequações” (DNIT 20016, apud FERREIRA 2013, p.13)

- $R * KR + B * KB \geq H_{20} \quad (17)$

- $R*KR + B*KB + h_{20} *KS \geq Hn$  (18)
- $R*KR+B*KB+h_{20}*KS+h_n*KRef \geq Hm$  (19)

Segundo SOUZA (1981) apud FERREIRA 2013, a espessura mínima de camadas granulares é de 10cm para compactação; 15 cm a espessura total mínima; e 20 cm é a espessura máxima de compactação.

Ainda em Ferreira (2013), também é possível adotar um coeficiente que leva em consideração a variação de umidade dos materiais do pavimento durante as diversas estações do ano. O Fator Climático Regional, representado pelo coeficiente FR, deve multiplicar o número N, o que altera a espessura do pavimento. No Brasil, usualmente adota-se Fr=1 porque o CBR é realizado com saturação (embebido 4 dias).

## 2.9. Método mecanístico-empírico

Conforme DNIT (2006), o método de dimensionamento do DNER, baseado no método original USACE, e o da AASHTO visam a proteção do subleito contra a geração de deformações plásticas excessivas. No Brasil pode-se até mesmo falar em um superdimensionamento de pavimentos flexíveis, que seria explicado pela ausência, da condição crítica correspondente ao degelo da primavera.

Esses métodos devem ser complementados, DNIT (2006), contudo, por análises que permitam considerar, no dimensionamento, o problema do trincamento por fadiga das camadas asfálticas, nos pavimentos flexíveis, e das camadas cimentadas, nos pavimentos semirrígidos. Para esse objetivo o procedimento mais eficaz é a aplicação de modelos de previsão de desempenho do tipo mecanístico-empírico.

Um modelo de previsão e desempenho, segundo DNIT (2006) é uma função que permite quantificar a redução do nível de serventia ou a geração de defeitos ao longo da vida de serviço do pavimento. Tal modelo é denominado " mecanístico-empírico" quando é constituído por três partes:

- Um Modelo Estrutural para cálculo das respostas induzidas pelas cargas de roda em movimento nas camadas do pavimento, na forma de tensões, deformações ou deflexões elásticas que estejam relacionadas ao surgimento ou à propagação de defeitos na estrutura;
- Funções de Transferência, capazes de relacionar as respostas estruturais da estrutura às cargas de tráfego, à geração e propagação de defeitos. Além de atenderem a determinadas condições de contorno, exigidas pelo problema, essas funções deverão basear-se em teorias empiricamente validadas, que descrevam o mecanismo com que a deterioração se processa.

- Fatores ou Funções de Calibração, que ajustam as previsões das Funções de Transferência de modo a se reproduzir dados de uma determinada base empírica. São responsáveis, portanto, pela consideração de parâmetros que não puderam ser explicitados, seja no modelo estrutural ou nas Funções de Transferências, tais como: clima, características específicas do tráfego atuante, particularidades dos materiais e de sua variabilidade

Segundo Motta (2003), apud Ferreira (2013), os dois principais critérios de ruptura que comandam o dimensionamento de pavimentos de qualquer tipo, no clima tropical, são a fadiga e o afundamento de trilha de roda, que resultam das deformações elásticas e plásticas que acontecem em cada ponto do pavimento a cada passagem de um veículo.

Ferreira (2008), apud Norback (2018), diz que os procedimentos de dimensionamento mecanístico-empírico permitem uma utilização muito mais racional dos materiais que irão compor o pavimento em relação aos métodos que se baseiam unicamente em parâmetros empíricos. Além disso, ao contrário do que aqueles que se baseiam e que levam em conta exclusivamente os parâmetros de resistência relacionados ao cisalhamento, os métodos mecanístico-empíricos consideram a deformabilidade elástica do pavimento, permitindo a análise da vida de fadiga do revestimento e a consideração do ATR( Afundamento de Trilha de Rodas), fatores determinantes do bom desempenho das estruturas, especialmente em países de clima tropical, com suas particularidades em relação aos países de clima frio e temperado.

Figura 13- Deformação permanente em trilha de roda (ATR)



Fonte: Moura 2010 p. 24.

Ainda segundo Moura (2010), em dias chuvosos, há formação de uma lâmina d'água ao longo de todo o trecho nos afundamentos das trilhas de roda, ocasionando uma dificuldade de escoamento da água, e propiciando um menor contato entre o pneu e as acículas dos agregados, podendo ocorrer a hidroplanagem.

O problema de deformação em trilha de roda, segundo Joliet & Mallot (2000), apud Moura 2010, é um processo que ocorre de forma simultânea, envolvendo a deformação viscosa do ligante asfáltico e deformação plástica da estrutura mineral da mistura asfáltica. Estes autores comentam que tanto o ligante como o agregado exercem papel fundamental no desempenho da mistura asfáltica. O ligante com o resultado de sua consistência e reologia, e o agregado com as forças de fricção interna entre suas partículas (ângulos de atrito interno advindo do entrosamento).

Conforme Fontes (2009), apud Arao (2014), as trincas no revestimento asfáltico são os defeitos mais comuns nos pavimentos flexíveis. A maior parte das trincas é causada pelo fenômeno de fadiga, ou seja, devido às ações repetidas de esforços de tração por flexão dessa camada. Elas são o primeiro sinal da redução da qualidade estrutural do pavimento.

Em Arao (2014) as trincas por fadiga iniciam-se na parte inferior da camada asfáltica e propagam-se até a superfície do pavimento. Normalmente, elas surgem nas trilhas de roda de veículos pesados na direção longitudinal da via (Figura 14). Seu estágio final caracteriza-se por trincas do tipo pele de crocodilo (Figura 15), já que as trincas longitudinais isoladas evoluem para trincas ramificadas”.

Figura 14 - Trincas isoladas



Fonte: Fontes,2009, apud Arao 2014 p.7.

O DNIT (2003),define trincas interligadas, como trincas sem direções preferenciais, assemelhando-se ao aspecto de couro de jacaré. Essas trincas podem apresentar, ou não, erosão acentuada nas bordas.

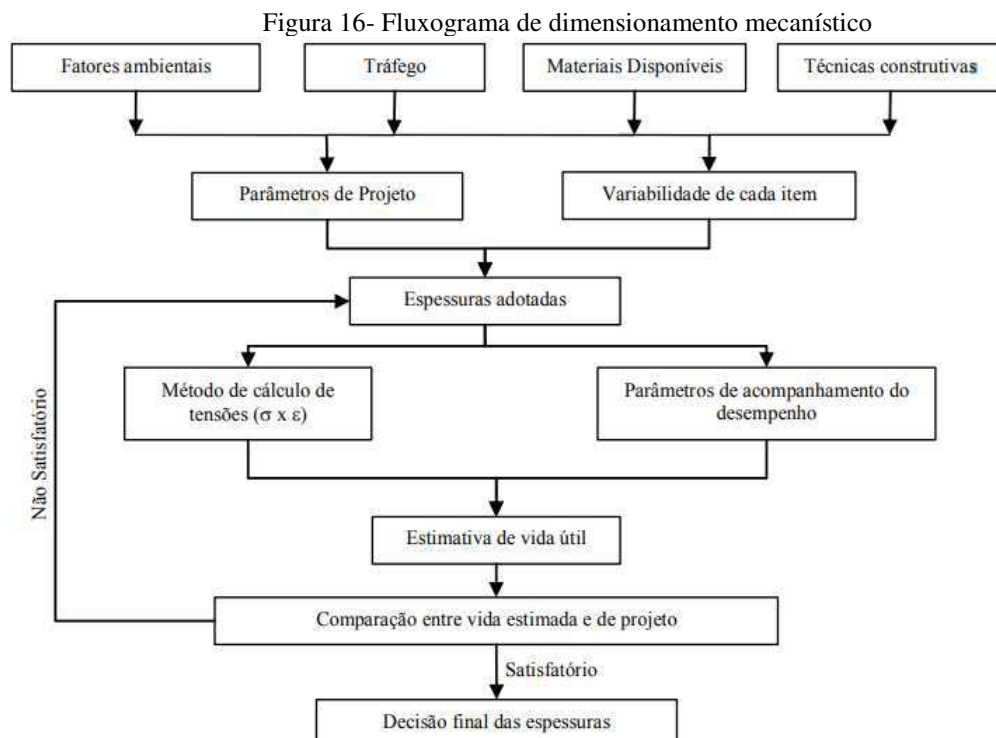
Figura 15 -Trincas Interligadas



Fonte: Fontes,2009, apud Arao 2014 p.8.

“Pode-se dizer que o dimensionamento objetiva determinar as espessuras das camadas para obter um desempenho adequado para que o conjunto seja solicitado de forma equilibrada, sem que a solicitação leve precocemente à ruptura de uma de suas camadas” (NORBACK,2018 pg.8).

MOTTA (1991), Apud Ferreira (2013), apresentou o diagrama da Figura 16, no qual pode-se perceber que os dados de entrada necessários para o dimensionamento são o clima local, os dados dos materiais disponíveis para cada camada e o tipo de material do subleito, os dados do tráfego e dados dos métodos construtivos.



Fonte: FERREIRA,2013, pg. 17.



Fritzen (2005), comenta que o dimensionamento mecânico-empírico também tem por finalidade determinar a espessura de reforço estrutural em pavimentos degradados, para que este atenda de forma econômica, aos critérios limites de fadiga e de deformação permanente de todas as camadas do pavimento e do subleito, assim, aumentando a confiabilidade da vida útil prevista para o pavimento restaurado.

Segundo Norback (2018), o método M-E em desenvolvimento para o DNIT, numa parceria com a COPPE, denominado Método de Dimensionamento Nacional – MeDiNa - tem esta estrutura e vai considerar como dados de entrada obrigatórios os módulos de resiliência e a equação de previsão da deformação permanente dos materiais de base, sub-base e subleito. Nas Figura 17 e Figura 18, a seguir, são mostradas duas das telas de entrada de dados dos materiais do MeDiNa (versão de 19/02/2018) para ilustrar este aspecto.

Figura 17- Tela do Programa MeDiNa corresponde aos dados de entrada de um pavimento, tráfego e análise (versão de 19/02/2018).

The screenshot shows the MeDiNa software interface. At the top, there is a menu bar with 'Projeto', 'Editar', 'Análise', and 'Ajuda'. Below the menu bar, there are tabs for 'ESTRUTURA', 'MODELAGEM', and 'RESULTADOS'. The main workspace is divided into several sections:

- Header:** 'MeDiNa - v.1.00 -- VERSÃO DISPONÍVEL PARA TESTES --' and 'VERSÃO PARA TESTES'.
- Form Fields:** 'AUTOR:' and 'EMPRESA:' text boxes, and 'PROJETO:' text box.
- Table:** A table with columns: CAMADA, MATERIAL, TIPO, ESPESSURA (cm), MÓDULO (MPa), and COEFICIENTE DE POISSON.
- Traffic Data Section:** 'EIXO PADRÃO RODoviÁRIO' and 'DADOS DO TRÁFEGO' with various input fields.

CAMADA	MATERIAL	TIPO	ESPESSURA (cm)	MÓDULO (MPa)	COEFICIENTE DE POISSON
1	CONCRETO ASFÁLTICO	Nível 3	10,0	6500	0,30
>> 2 <<	SOLO FINO, SILTOSO OU ARGILOSO	Solo Argiloso LG'(5)	20,0	393	0,35
3	SOLO FINO, SILTOSO OU ARGILOSO	Solo Argiloso LG'(1)	20,0	250	0,35
SL	SUBLEITO	Solo Fino NA	0,0	297	0,35

**DADOS DO TRÁFEGO**

Tipo de Via: VIA PRINCIPAL  
 N anual total: 1.00e+06  
 % Veículos na faixa de projeto: 100  
 N Anual da faixa: 1.00e+06  
 Taxa de crescimento (%): 0,0  
 Período de projeto (anos): 10  
 N Total: 1.00e+07

Fonte: NORBACK, 2018, p. 11.

Figura 18-Tela do Programa MeDiNa correspondente aos dados de um material argiloso de sub-base

CAMADA	MATERIAL	TIPO	ESPESSURA (cm)	MÓDULO (MPa)	COEFICIENTE DE POISSON
1	CONCRETO ASFÁLTICO	Nível 3	10,0	6500	0,30
>> 2 <<	SOLO FINO, SILTOSO OU ARGILOSO	Solo Argiloso LG (5)	20,0	173	0,35
3	SOLO FINO, SILTOSO OU ARGILOSO	Solo Argiloso LG (1)	20,0	123	0,35
SL	SUBLEITO	Solo Fino NA	0,0	297	0,35

Fonte: NORBACK, 2018, p. 12.

### 2.9.1. Módulo resiliente

Conforme Norback (2018), o Módulo de Resiliência (MR) é definido como a relação entre a carga cíclica aplicada e a deformação elástica ou recuperável do material. É um parâmetro que caracteriza o comportamento elástico dos materiais, como solos e britas, sob carregamento repetido, em laboratório, ou pelas ações das cargas dos veículos, repetidas sobre o pavimento. É uma propriedade importante utilizada nos métodos de dimensionamento mecânico-empíricos de pavimentos asfálticos. O reflexo de tais deformações repetidas pode ser observado nos revestimentos asfálticos que apresentam trincamento, muitas vezes prematuramente.

Segundo MOTTA (2003) “o Módulo Resiliente ou de resiliência do solo é definido como a relação entre a diferença de tensões aplicada axial e ciclicamente em um corpo de prova e a correspondente deformação específica vertical recuperável”, podendo ser obtido a partir da seguinte equação:

$$M_R = \frac{\sigma_d}{\epsilon_r} \quad (20)$$

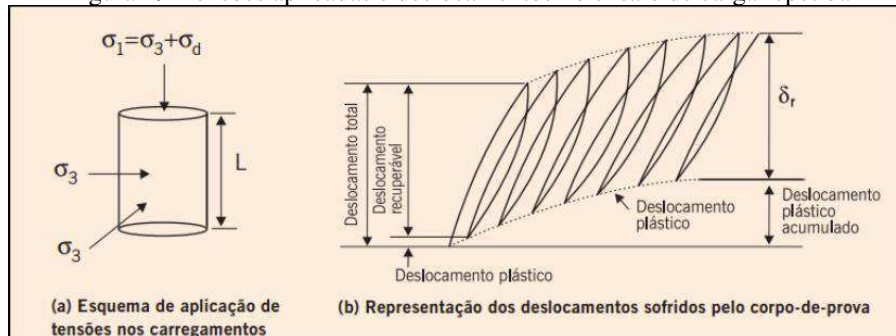
- $M_R$  – Módulo Resiliente;
- $\sigma_d - (\sigma_1 - \sigma_3)$  – diferença de tensões aplicada repetidamente (MPa);
- $\epsilon_r$  – Deformação específica axial resiliente (mm/mm).

Conforme Norback (2018), a obtenção deste parâmetro é realizada a partir de ensaios triaxiais de carga repetida, que tem por finalidade reproduzir em laboratório as condições de

carregamento das cargas de tráfego na estrutura do pavimento no campo. Tal relação para a maioria dos materiais de pavimentação é do tipo não linear, diferente de outros sólidos elásticos, havendo grande dependência das tensões aplicadas.

Na Figura 19 (a) é indicada a direção das tensões durante o carregamento, e na Figura 19 (b) os deslocamentos sofridos pelo corpo de prova (MEDINA, 1997, apud NORBACK, 2018). Na figura 20, podemos verificar o esquema do ensaio triaxial de carga repetida.

Figura 19-Tensões aplicadas e deslocamentos no ensaio de carga repetida

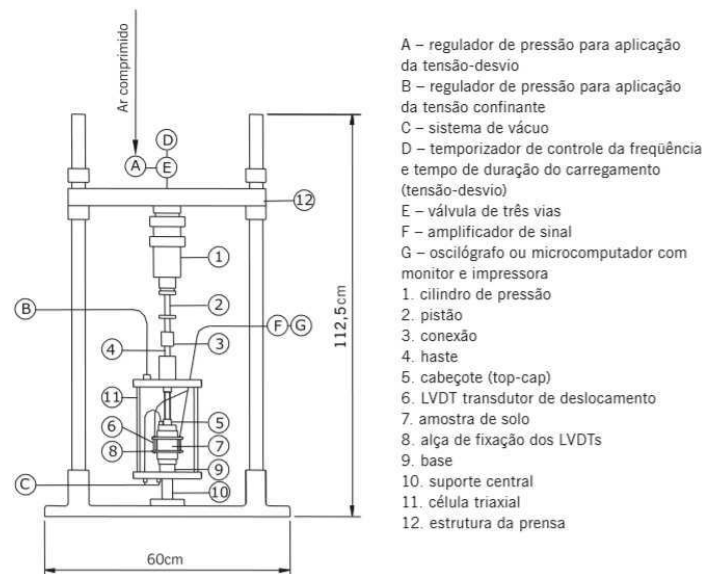


Fonte: BERNUCCI 2006, p.348.

Onde,

- $\sigma_1$  – Tensão principal maior (Mpa);
- $\sigma_3$  – Tensão principal menor ou tensão de confinamento (Mpa);
- $\epsilon_r = \frac{\delta h}{H_0}$  – Deformação específica axial resiliente (mm/mm);
- $\delta_h$ : Deslocamento resiliente registrado (mm);
- $H_0$ : Altura de referência do medidor de deslocamentos - LVDT (mm).

Figura 20-Esquema do equipamento triaxial dinâmico de compressão axial

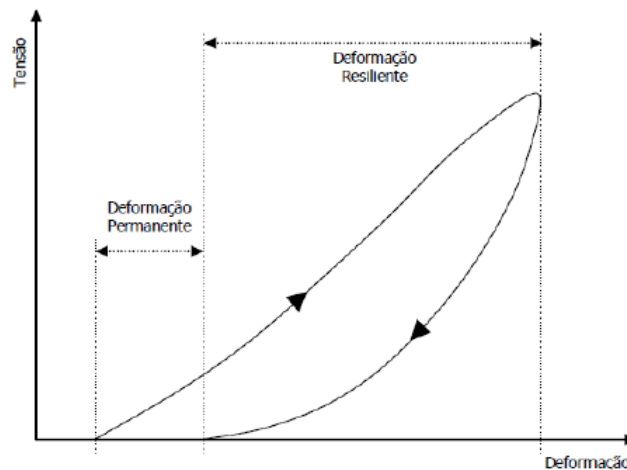


Fonte: BERNUCCI, 2006, p.347.

“A partir das características do comportamento tensão-deformação dos materiais que compõem as camadas, bem como da frequência, intensidade de tráfego e condições ambientais regionais é que se pode prever o desempenho de pavimentos”. (NORBACK 2018, p. 28)

Conforme Medina (1997), apud Motta (2003), a deformação total do corpo de prova ensaiado tem duas componentes, uma resiliente (recuperável) ou elástica e outra permanente (irrecuperável) ou plástica, como mostra a Figura 21. É a deformabilidade resiliente que condiciona a vida de fadiga das camadas superficiais ou as mais rijas dos pavimentos, sujeitas a flexões sucessivas. Como os solos e britas não são materiais elásticos lineares, o que se procura determinar é a relação experimental que descreve o comportamento dos módulos de resiliência em função da tensão de confinamento e da tensão desvio.

Figura 21 -Comportamento dos materiais de pavimentação sujeitos a um ciclo de carregamento



Fonte: LEKARP et al., 2000a apud FRANCO, 2007, p.75.

Como é citado em Norback (2018), o módulo de resiliência depende da constituição mineralógica, textura, plasticidade da fração fina, e de fatores como umidade, peso específico e estado de tensões, além das características do próprio ensaio (frequência e tempo de carregamento, forma de onda, etc.)

### 2.9.2. Deformação permanente

Segundo Moura (2010), dentre os diversos tipos de defeitos a que um pavimento está sujeito, sem dúvida, a deformação permanente em trilha de roda da camada de rolamento é um dos mais importantes, pois esse tipo de defeito além de propiciar uma degradação acelerada da estrutura do pavimento, reduz consideravelmente o conforto ao rolamento, a segurança do usuário, e aumenta os custos operacionais.

Para Fontes (2009), apud Arao (2014), o fenômeno da deformação permanente, Figura 22, é um processo complexo, pois ele é influenciado pelas propriedades e proporções de cada um dos componentes de uma mistura asfáltica (agregados, ligante e volume de vazios). A

resistência à deformação permanente é considerada como uma combinação de resistência do ligante e do agregado mineral.

Figura 22-Exemplo de deformação permanente em pavimento asfáltico



Fonte :FRANCO, 2007 Apud FERREIRA 2013, p.28.

Para Guimarães (2009), apud Norback (2018), os principais fatores que afetam a deformação permanente em solos são:

- Tensão: Estado de tensões, rotação das tensões principais com o deslocamento da carga de roda e história de tensões;
- Carregamento: Magnitude, número de aplicações, duração, frequência e sequência de carga;
- Umidade: percentual de umidade, permeabilidade do material, grau de saturação e poro-pressão;
- Tipo de Agregado: origem, forma das partículas, granulometria, porcentagem de finos, tamanho nominal máximo dos grãos e massa específica real dos grãos.

No dimensionamento M-E, o cálculo do defeito do ATR é feito considerando o somatório da contribuição de cada camada, de acordo com a expressão seguinte:

$$\delta_{total}^p = \sum_{i=1}^n \varepsilon_p^i h_i \quad (21)$$

Onde,

- $\delta_{total}^p$  – Deformação permanente total;
- $\varepsilon_p^i$  – Espessura específica de cada camada do pavimento;
- $h_i$  – Espessura da camada do pavimento
- n – Número total de camadas

Guimarães (2009), apud Norback (2018), propôs o modelo de previsão da deformação permanente, apresentado na equação (22) que foi desenvolvido visando incluir as tensões atuantes para contribuir com o aperfeiçoamento do método de dimensionamento mecanístico-empírico. A equação (22) foi obtida por análise dos resultados de ensaios de deformação

permanente feitas em equipamentos triaxiais de carga repetidas, com vários níveis de tensão para vários materiais, entre britas, lateritas e solos.

$$\delta_p(\%) = \Psi_1 \left( \frac{\sigma_3}{\rho_0} \right)^{\Psi_2} \left( \frac{\sigma_d}{\rho_0} \right)^{\Psi_3} N^{\Psi_4} \quad (22)$$

Onde,

- $\delta_p(\%)$ – Deformação permanente específica;
- $\Psi_1, \Psi_2$  e  $\Psi_3$ – Parâmetros de regressão (parâmetros de deformabilidade permanente);

- $\sigma_3$  – Tensão confinante;
- $\sigma_d$  –Tensão desvio;
- $\rho_0$ – Tensão de referência (tensão atmosférica);
- N– número de ciclos de aplicação de carga.

### 2.9.3. Materiais granulares

“Os materiais granulares apresentam um comportamento não-linear e têm suas respostas às cargas aplicadas pelo tráfego caracterizadas pelas deformações resilientes e pelas deformações residuais “(FRANCO, 2007, APUD FERREIRA 2013, p.20).

Segundo MOTTA (2003), apud Ferreira 2013, o modelo que tem sido normalmente utilizado para retratar o comportamento do solo granular é o seguinte

$$M_R = k_1 \sigma_3^{-k_2} \quad (23)$$

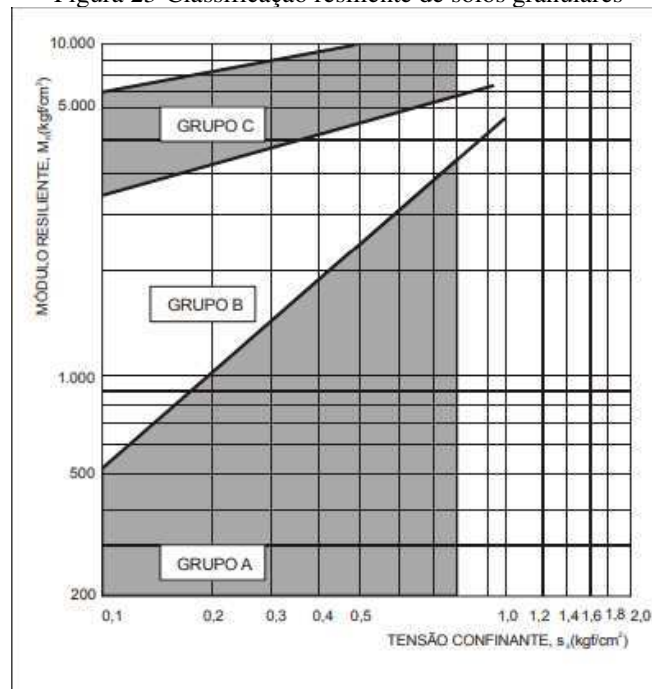
Onde,

- $M_R$  – Módulo de Resiliência;
- $\sigma_3$  – Tensão de confinamento; e
- $k_1$  e  $k_2$  - constantes ou parâmetros de resiliência determinados em ensaio triaxial de carga repetida.

Os solos granulares, Figura 23, conforme Motta (2003), podem ser classificados em três grupos: Grupo A, Grupo B e Grupo C, conforme podemos observar na Figura 22:

- Grupo A: módulo de resiliência mais baixo;
- Grupo B: módulo de resiliência moderado, podendo ser empregado em qualquer camada do pavimento, dependendo do valor de  $k_2$  (bom comportamento se  $k_2 \leq 0,50$ );
- Grupo C: elevado módulo de resiliência, que também podem ser utilizados em qualquer camada do pavimento, resultando em estruturas com baixas deflexões.

Figura 23-Classificação resiliente de solos granulares



Fonte: Manual de pavimentação DNIT (2006) p.70.

#### 2.9.4. Solos finos, siltosos ou argilosos

Preussler e Pinto, em 1982, apud Ferreira 2013, estabeleceram valores típicos para os módulos de resiliência de solos finos, a partir de ensaios com solos de estradas federais brasileiras estudados até aquela data. Esses valores podem ser obtidos através das seguintes equações:

$$\text{Tipo I: } M_R = 4874 \sigma_d^{-1,129} \quad (24)$$

$$\text{Tipo II: } M_R = 1286 \sigma_d^{-0,5478} \quad (25)$$

$$\text{Tipo III: } M_R = 530 \text{ kgf/cm}^2 \quad (26)$$

Onde,

- $M_R$  – Módulo de resiliência;
- $\sigma_d$  – Tensão desvio.

Conforme temos em Ferreira (2013), os solos do Tipo I possuem bom comportamento quanto à resiliência, podendo ser utilizados como subleito e reforço do subleito, e em alguns casos como sub-base. Os solos do Tipo II possuem comportamento regular quanto à resiliência, podendo ser utilizados como subleito e reforço de subleito. E os solos do Tipo III têm seu emprego vedado em camadas de pavimento, por possuírem comportamento ruim quanto à resiliência.

### 2.9.5. Solos lateríticos

Em 1996, MACÊDO, Apud Franco 2007, propôs o modelo composto, equação 27, que leva em consideração a influência ao mesmo tempo das tensões confinantes e desvio para todos os tipos de material.

$$M_R = k_1 \sigma_3^{k_2} \sigma_d^{k_3} \quad (27)$$

- $M_R$  – Módulo Resiliente;
- $\sigma_3$  – Tensão confinante
- $\sigma_d$  – Tensão-desvio, aplicada repetidamente
- $k_1, k_2$  e  $k_3$  – constantes ou parâmetros de resiliência determinados

experimentalmente, em ensaios triaxiais de carregamento repetidos.

### 2.9.6. Materiais estabilizados com cimento

Conforme Franco (2007), os materiais estabilizados com cimento podem ser caracterizados pelo módulo elástico de Young e coeficiente de Poisson. O módulo de resiliência de compressão pode ser representado por um valor constante, elástico linear ( $M_R = E$ ), que geralmente é elevado quando comparado com os módulos de resiliência de britas e outros materiais granulares normalmente utilizados em bases de pavimentos asfálticos.

### 2.9.7. Misturas asfálticas

Segundo Ferreira (2013), pg. 24 para dimensionar um pavimento segundo métodos mecanístico-empíricos é preciso conhecer o módulo de resiliência e o coeficiente de Poisson da mistura asfáltica (MOTTA *et al.*, 2002 *apud* FRANCO, 2007). Para isso, o mais comum é a realização de ensaio de compressão diametral dinâmico, ou de cargas repetidas.

Conforme Motta (2003), após a realização do ensaio de compressão diametral é possível determinar  $M_R$  com a seguinte equação:

$$M_R = \frac{\sigma_t}{\epsilon_a} \quad (28)$$

Onde,

- $M_R$  – Módulo de Resiliência, constante para uma mesma mistura em uma dada temperatura;
- $\sigma_t$  – Tensão de tração;
- $\epsilon_a$  – Deformação específica.



Os valores de módulo de resiliência podem variar, dependendo do tipo de ligante e da granulometria da mistura, de 2.000 a mais de 10.000 MPa, para uma temperatura de 25°C (FERREIRA, 2013, p.25).

## **2.10. MeDiNa- Método de Dimensionamento Nacional**

Em Franco (2018) temos que o MeDiNa é um software que realiza a verificação e o dimensionamento mecânico-empírico de estruturas de pavimentos, por meio da rotina AEMC “Análise Elástica de Múltiplas Camadas”. Esta rotina calcula tensões e deformações em estruturas de pavimentos sob carregamento de rodas do tipo eixo padrão rodoviário e aplica modelos de fadiga e deformação permanente para ajustar as espessuras das camadas.

A análise de uma estrutura de pavimento ou mesmo o seu dimensionamento, conforme Franco (2018) , o programa requer um conjunto amplo de informações para que os resultados obtidos sejam confiáveis. As informações passam pelo conhecimento do subleito, como seu módulo e curva de deformação permanente. Outra informação que é importante para o correto funcionamento do software MeDiNa é a definição do Número Equivalente de Eixos, o número N. Os modelos utilizados no programa MeDiNa mostram-se sensíveis a pequenas variações do Número N, e, portanto, uma estimativa apurada é de grande importância para o sucesso do projeto.

O software MeDiNa, conforme Junior (2018), tem sua interface dividida em abas, sendo denominadas: estrutura; modelagem e resultados. Ao iniciar o software, o mesmo sempre se apresenta na aba estrutura, onde são inseridas as informações de identificação do projeto; estrutura do pavimento; tráfego e painel onde o software registra o resumo dos resultados das análises ou dos dimensionamentos. Antes de preencher os dados do projeto, define-se em qual modo o programa irá tratar os dados. Na versão utilizada apenas dois modos estão disponíveis:

- Pavimento Novo (Nível 1): Modo para elaboração de projetos de pavimentos novos no nível de projeto 1, onde as propriedades das camadas são obtidas por ensaios de laboratório.
- Projeto de Reforço: Modo para elaboração de projeto de reforço, onde as propriedades das camadas existentes são obtidas por meio de retroanálise de bacias deflectométricas.

Na tabela, conforme Figura 18 ilustrada anteriormente, que exibe a estrutura do pavimento são apresentadas informações resumidas das propriedades de cada uma das camadas da estrutura do pavimento, como: material constituinte e o tipo selecionado, espessura, módulo de resiliência (se linear ou sigmoidal), e coeficiente de Poisson.

Conforme Junior (2018), a análise ou dimensionamento dos pavimentos pode ser realizada após inserido todos os dados da estrutura e do tráfego. Para se realizar uma análise do comportamento da estrutura com o tráfego, basta clicar a tecla de atalho F3, ou ir no menu Análise e clicar na função Analisar Estrutura. A análise realiza os cálculos e verifica os critérios de área trincada e/ou deformação permanente, sem alterar a espessura da camada selecionada. No final, apresenta um resumo que pode ser avaliado pelo projetista. Para realizar o dimensionamento da estrutura, basta clicar a tecla de atalho F2, ou ir no menu Análise e clicar na função dimensionar, após selecionar a camada que se deseja dimensionar.

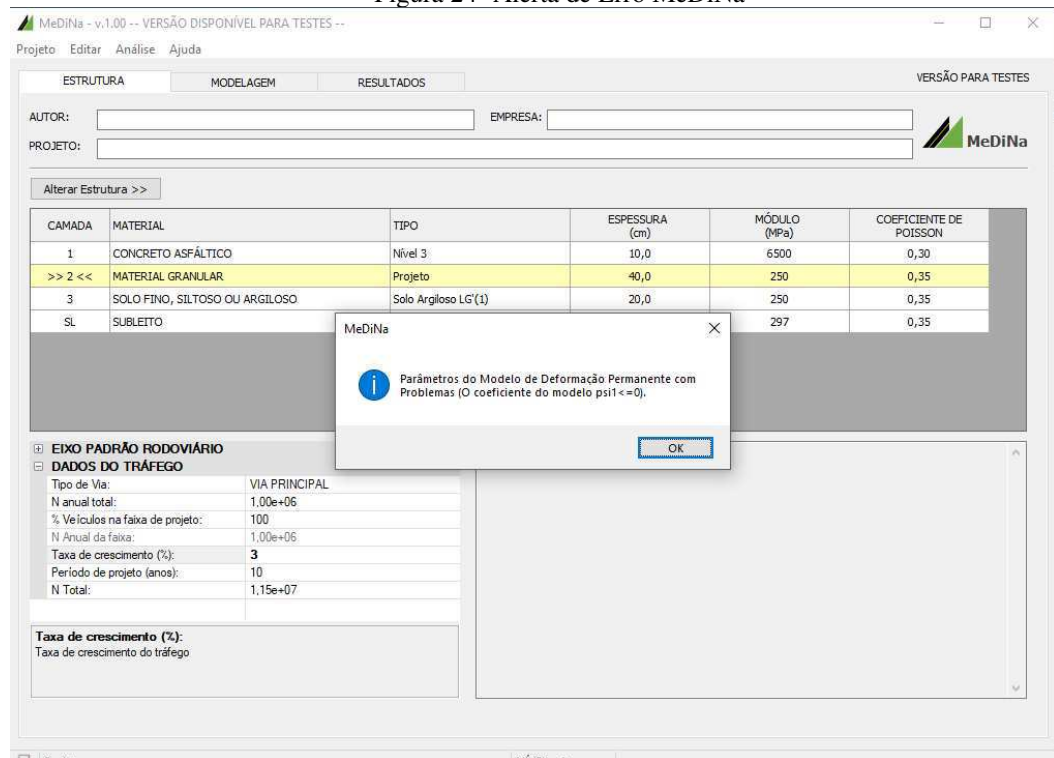
Conforme temos em Junior (2018), após a análise da estrutura ou dimensionamento da mesma é possível ter acesso á três relatórios:

- Evolução Mensal de Danos: apresenta os resultados do comportamento da área trincada, da deformação permanente total e do Módulo Sigmoidal quando houver camadas cimentadas na estrutura;
- Resumo da Deformação Permanente e Bacias de Deflexão: apresenta um resumo da deformação permanente na estrutura ao fim do período de análise, com a contribuição de cada camada na deformação permanente total;
- Relatório Completo de Análise: apresenta todas as informações utilizadas no dimensionamento ou na análise da estrutura.

Algumas observações com relação ao modo Projeto Novo são descritas por Junior (2018), no qual existem casos em que o programa MeDiNa não consegue dimensionar a estrutura e emite alguns alertas conforme Figura 24:

- a espessura atingiu o máximo permitido para a análise (15cm para as camadas asfálticas e 40cm para as demais);
- a camada apresentou deformação permanente acima do limite de 5% da sua espessura;
- o Subleito apresentou deformação permanente acima do limite de 5mm;
- a camada abaixo da camada estabilizada possui uma deflexão superior a 70 (0,01mm).

Figura 24- Alerta de Erro MeDiNa



Fonte: Própria autoria.

### 3. METODOLOGIA

#### 3.1. Área de estudo

O objeto de estudo deste trabalho é o trecho da PB-138 localizada no Agreste Paraibano com 18 km de extensão, trecho localizado entre os municípios de Campina Grande-PB, no bairro jardim Verdejante (coordenadas: UTM 25M: 0175939 – 9197330) com elevação de 512 metros e Catolé de Boa Vista-PB (coordenadas: UTM 24M: 0820826 – 9195174) com elevação 488 metros.

Este trecho foi monitorado pelo Laboratório de Engenharia de Pavimentos (LEP) da Universidade Federal de Campina Grande, sob a coordenação do Prof. Dr. John Kennedy Guedes Rodrigues. O Monitoramento compreende parte do trabalho de construção de pistas experimentais da rede Temática de asfaltos, em diferentes regiões, clima e temperatura. Tem por finalidade a geração de dados de campo e laboratório na elaboração do novo método de dimensionamento mecânico empírico a ser implantado no Brasil.

Para este trabalho utilizaremos os dados coletados pelo LEP, afim de realizarmos um estudo comparativo da espessura do dimensionamento entre o método empírico e o método mecânico-empírico. As Figuras 25 e 26 mostram atual estado da PB-138 e como a rodovia era antes de ser pavimentada.

Figura 25:PB-138 antes de ser pavimentada



Fonte: Google Maps

Figura 26: PB-138 pavimentada



Fonte: <https://www2.pbagora.com.br>.

### 3.2. Modelo de dimensionamento

Os dados que serão utilizados neste trabalho para o dimensionamento de pavimento flexível pelo método empírico e mecanístico- empírico, foram obtidos do Relatório Técnico Final , Termo de Cooperação 0050.0081624.13.9 “Construção e monitoramento de trechos experimentais em um pavimento flexível de baixo e alto volume de tráfego pela UFCG” dados referente ao Trecho 3.

Este trecho foi construído em local de uma via preexistente, sendo que esta era do tipo vicinal e apresentava inúmeros defeitos. A nova via é composta pela camada de sub-base de 20 cm de solo, base de 20 cm (mistura de solo e areia) e revestimento em C.B.U.Q. faixa “C” do DNIT com 5,0 cm de espessura.

### 3.3. Dimensionamento pelo Método Empírico

Nesta seção serão definidos todos os parâmetros necessários para o cálculo dos diversos coeficientes e o resultado do dimensionamento pelo método empírico DNIT 2006.

#### 3.3.1. Determinação do Índice de Suporte

O Índice de Suporte (IS) é um valor corrigido do CBR em função do Índice de Grupo (IG). O método do DNER impões que o índice de suporte máximo seja igual ao valor do CBR. O índice de suporte é calculado através da Equação 6:

#### 3.3.2. Índice de Grupo (IG)

O índice de grupo (IG) é um número inteiro que estabelece a posição de um solo dentro de um subgrupo. O IG é função da percentagem de solo passando na peneira N° 200, dados encontrados na Tabela 9 e 10 que são dados referente a camada de subleito e sub-Base, e dos limites de Atterberg, sendo calculado por meio da Equação 7.

Tabela 9- Granulometria encontrada no solo	
Amostra total e Parcial	
Peneira(mm)	% Amostra total
9,5	97,09
4,75	93,98
2	90,56
0,42 (#40)	76,53
0,18	49,57
0,075(#200)	19,9
Sedimentação	
0,067	10,71
0,047	10,71
0,034	9,52
0,023	7,14
0,017	5,95
0,012	5,95
0,009	4,76
0,006	4,7
0,004	3,57
0,003	4,7
0,002	4,7
0,001	1,19

Fonte: Termo de Cooperação 0050.0081624.13.9 PETROBRAS/ANP e a (UFCG), p.155, modificada.

Tabela 10 - Relações dos ensaios realizados para o solo

Ensaio	Norma	Resultado
Limite de Liquidez (%)	DNIT- ME 122-94	NL
Limite de Plasticidade (%)	DNIT- ME 82-94	NP
Massa específica aparente máxima (g/cm <sup>3</sup> )	DNIT- ME 129-94	1,979
Umidade ótima (%)		7,6
CBR (%)	DNIT- ME 049-94	58,5
Expansão (%)		0,12

Fonte: Termo de Cooperação 0050.0081624.13.9 PETROBRAS/ANP e a (UFCEG), p.156.

Com os dados da Tabela 9 e 10, temos que a % de material passante na peneira #200 é de 19,9%, desta forma temos os seguintes coeficientes.

$$a=0 \quad b=4,9 \cong 5,0 \quad c=0 \quad d=0$$

Assim:

$$IG = 0,2 \times 0 + 0,005 \times 0 \times 0 + 0,01 \times 5 \times 0 = 0$$

$$IG = 0, \text{ logo através da Tabela 3 temos que o C.B.R. } I_G = 20$$

A qualidade do desempenho de um solo como subleito é inversamente proporcional ao IG:

- IG=0 solo ótimo quanto a capacidade de suporte;
- IG=20 solos péssimo quanto à capacidade de suporte.

O solo em questão é classificado pelo Sistema Rodoviário de Classificação, neste caso a AASHTO conforme a Tabela 11, baseado na granulometria do solo e nos limites de Atterberg, como A-3, ou seja, uma Areia fina possuindo uma ótima capacidade de suporte, os coeficientes de recalque encontram-se Tabela 12.

Tabela 11-CLASSIFICAÇÃO DE SOLOS: Sugestão do Highway Research Board-HRB adotada pela AASHTO

Classificação Geral	Materiais granulares (35% ou menos passando na peneira nº 200)							Materiais siltosos e argilosos (mais de 35% passando na peneira nº 200)			
	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7
	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				
Peneiração: % que passa:											
Nº 10	50 máx.										
Nº 40	30 máx.	50 máx.	51 mín.								
Nº 200 (p)	15 máx.	25 máx.	10 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	36 mín.	36 mín.	36 mín.	36 mín.
Características da fração que passa nº 40											
Limite de Liquidez - LL (%)				40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.
Índice de Plasticidade IP (%)			NP	10 máx.	10 máx.	11 mín.	11 mín.	10 máx.	10 máx.	11 mín.	11 mín.
Índice de Grupo	0		0	0		4 máx.		8 máx.	12 máx.	16 máx.	20 máx.
Materiais que predominam	Pedra Britada pedregulho e areia		Areia fina	Areia e areia silosa ou argilosa				Solos Siltosos		Solos argilosos	
Comportamento geral como subleito	Excelente a bom							Fraco a pobre			

Fonte: [http://www.cct.udesc.br/arquivos/id\\_submenu/1470/classificacao\\_\\_rodoviaria\\_\\_hrb.pdf](http://www.cct.udesc.br/arquivos/id_submenu/1470/classificacao__rodoviaria__hrb.pdf)

**Tabela 12- Coeficientes de recalque**

Valores de kv(kgf/cm <sup>3</sup> )	
Turfa leve- solo pantanoso	0,5 a 1,0
Turfa pesada-solo pantanoso	1,0 a 1,5
Areia fina de praia	1,0 a 1,5
Aterro de silte, areia e cascalho	1,0 a 2,0
Argila molhada	2,0 a 3,0
Argila úmida	4,0 a 5,0
Argila seca	6,0 a 8,0
Arila secaendurecida	10
Silte compacto com areia e pedra	8,0 a 10,0
Silte compacto com areia e muita pedra	10,0 a 12,0
Cascalho miúdo com areia fina	8,0 a 12,0
Cascalho médio com areia fina	10,0 a 12,0
Cascalho grosso com areia grossa	12,0 a 15,0
Cascalho grosso com pouca areia	15,0 a 20,0
Cascalho grosso com pouca areia compactada	20,0 a 25,0

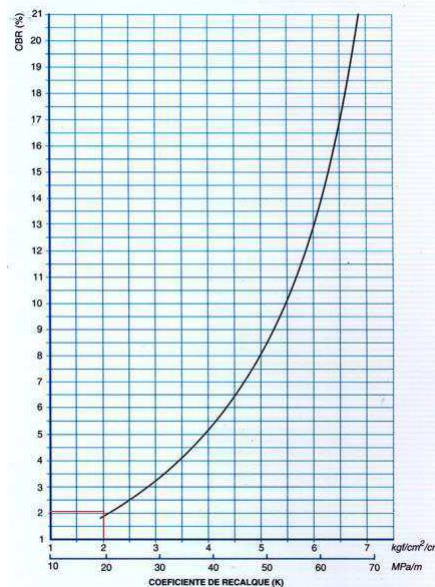
Fonte: <https://upcarreira.zendesk.com/hc/pt-br/articles/205271463>

### 3.3.3. Capacidade de suporte do subleito

A Tabela 3, p. 13, apresenta os valores do índice de suporte derivado do índice de grupo. Para o valor de IG = 0 obtido anteriormente, o valor de IS<sub>IG</sub> correspondente é igual a 20.

A Figura 27, apresenta uma relação entre o valor do CBR e o coeficiente de recalque.

Figura 27- Relação entre o valor de CBR e o Coeficiente de Recalque



Fonte: DNIT – Manual de pavimentação (2006).

Adotando o coeficiente de recalque 2,0 kgf/cm<sup>3</sup>, o ábaco fornece CBR = 2,0% para o subleito. Substituindo na Equação 29:

$$IS = \frac{2,0 + 20,0}{2} = 11\% \quad (29)$$

Portando, o índice de suporte é igual a 11%.

#### 3.3.4. Estudo do Tráfego

Não existia um estudo consolidado na rodovia a respeito do tráfego, a taxa de crescimento anual adotada foi de 3% ao ano para todas as categorias e no relatório citado constam os Fatores de Ajustamento Sazonal de 0,953 , logo o Fator de ajustamento Total do mês de fevereiro é de 0,869.

Para determinação do tráfego atual na própria rodovia em estudo, foram realizadas pesquisas fluxométricas/classificadoras durante três dias, hora-a-hora às 24horas/dia , no entanto estes valores representam o fluxo do mês de janeiro (mês da pesquisa), sendo estes ajustados para representarem as médias diárias anuais do ano de 2010.

Posteriormente aplicada a taxa de crescimento indicada acima, foram elaboradas projeções que apontam os fluxos futuros conforme Tabela 13.

Tabela 13-Fluxos futuros do Tráfego

ANO	AUTOS	ÔNIBUS	CAMINHÕES			TOTAL
		2CB	2C	3C	2S2	
2011	231	39	41	13	1	325
2020	301	51	54	17	1	424

Fonte: Termo de Cooperação 0050.0081624.13.9 PETROBRAS/ANP e a (UFCG), p.151.

O número equivalente de operações do eixo simples padrão (N) durante o período de projeto é o parâmetro de tráfego usado no dimensionamento, calculado através das Equações 10 e 11. O número N foi obtido considerando os dados de fluxo projetados para os 10 anos seguintes e o planejamento foi que a via comporte um Volume diário Médio de 364 veículos. resultando em um N usando a metodologia AASHTO de  $6,9 \times 10^5$  e pela metodologia USACE resultou em  $1,2 \times 10^6$ .

$$N = 1,2 \times 10^6.$$

De posse do valor de N, neste utilizaremos o método USACE, valor para a espessura mínima do revestimento betuminoso é dado pela Tabela 8. As espessuras recomendadas visam especialmente as bases do comportamento puramente granular e são definidas pelas observações efetuadas. Portanto, a espessura mínima para o revestimento deve ser de 5,0 cm de CBUQ.

$$(R) = 5 \text{ cm}$$



### 3.3.5. Determinação do Coeficiente de Equivalência Estrutural

A Tabela 7 apresenta os coeficientes de equivalência estrutural, que são valores empíricos definidos como a relação entre a espessura de uma base granular e de uma camada de material considerado, que apresente desempenho semelhante. Para o revestimento, utilizar  $k_R = 2,0$ , para base, sub-base e reforço do subleito  $k_B = k_S = k_{Ref} = 1,0$  (Camadas granulares)

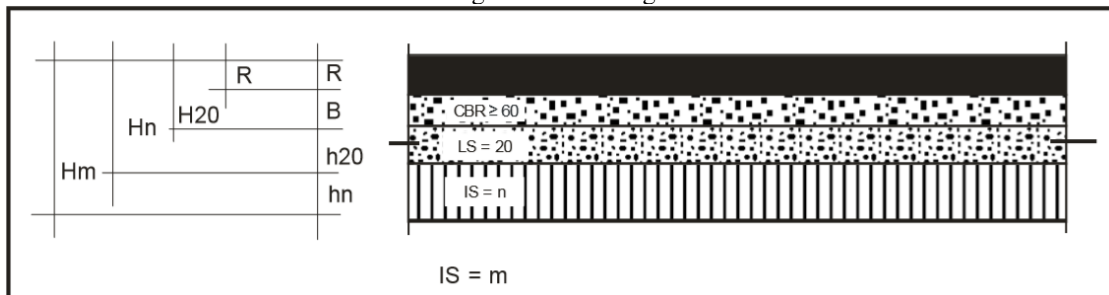
### 3.3.6. Dimensionamento das camadas do pavimento

O gráfico da Figura 12 apresenta a espessura total do pavimento, em função de  $N$  e de  $IS$  ou  $CBR$ . Entrando-se em abcissas com o valor de  $N$ , procede-se verticalmente até encontrar a reta representativa da capacidade de suporte em causa e, procedendo-se horizontalmente, encontra-se nas ordenadas a espessura do pavimento.

Uma vez determinadas as espessuras  $H_m$ ,  $H_n$  e, as espessuras da base ( $B$ ), sub-base ( $h_{20}$ ) e reforço do subleito ( $h_m$ ) são obtidas pela resolução sucessiva das seguintes equações:

- $R * K_R + B * K_B \geq H_{20}$  (17)
- $R * K_R + B * K_B + h_{20} * K_S \geq H_n$  (18)
- $R * K_R + B * K_B + h_{20} * K_S + h_n * K_{Ref} \geq H_m$  (19)

Figura 28 Simbologia das camadas



Fonte: DNIT 2006, modificada, p. 149.

Onde:

$H_{20}$  = espessura do pavimento necessário para proteger a sub-base;

$H_n$  = espessura do pavimento necessário para proteger o reforço do subleito;

$H_m$  = espessura total de pavimento necessária.

Alem da Figura 12 podemos utilizar a Equação (16) para o dimensionamento das camadas do pavimento flexível como é demonstrado a seguir.

$$H_t = 77,67 \times N^{0,0482} \times CBR^{-0,598}$$

Desta forma temos:

- $H_{20} = 13,38 \text{ cm}$  ( $N = 1,2 \times 10^6$  e  $CBR = 58,5\%$ )

$R = 5 \text{ cm}$ .

$$R K_R + B K_B \geq H_{20}$$

$$5x_2 + 1xB \geq 13,38 \text{ cm}$$

$$B \geq 3,38 \text{ cm}$$

A espessura mínima para base é definida pelo DNIT (2006) como 15 cm, portanto esse valor foi adotado. Assim:  $B = 15 \text{ cm}$ .

- $H_n = 36,35 \text{ cm}$  ( $N = 1,2 \times 10^6$  e  $\text{CBR}=11\%$ )

$$RK_R + BK_B + h_{20}K_s \geq H_n$$

$$5,00x_2 + 15x_1 + 1xh_{20} \geq 36,35 \text{ cm}$$

$$h_{20} \geq 11,35 \text{ cm}$$

A espessura mínima para a sub-base nas especificações do projeto é de 25 cm, portanto esse valor foi adotado. Assim:  $h_{20} = 25 \text{ cm}$ .

- $H_m = 58,24 \text{ cm}$  ( $N = 1,2 \times 10^6$  e  $\text{CBR}_{\text{estimado}}=2\%$ )

$$RK_R + BK_B + h_{20}K_s + h_n K_{\text{Ref}} \geq H_m$$

$$5,00x_2 + 15x_1 + 25x_1 + h_n \cdot 1 \geq 100,00 \text{ cm}$$

$$h_n \geq 50 \text{ cm}$$

A espessura mínima para o reforço do subleito nas especificações do projeto é de 15cm, portanto esse valor foi adotado 50 cm está de acordo com a norma. Assim:  $h_n = 50 \text{ cm}$ .

### 3.4. Dimensionamento Mecanístico-Empírico com MeDiNa

#### 3.4.1. Retroanálise

Segundo, Junior (2018), uma questão de grande relevância a ser considerada na metodologia de projeto de reforço com uso de retroanálise é a escolha da bacia de deflexão para a determinação dos módulos das camadas no segmento homogêneo que se analisa

É fato que existe certa variabilidade das deflexões medidas, mesmo em bacias do mesmo segmento homogêneo, os fatores que proporcionam essa variabilidade são:

- a heterogeneidade do material da camada e de sua espessura;
- os decorrentes do procedimento de ensaio;
- acurácia decorrente do equipamento.

Conforme Junior (2018), os dados de entrada do processo de retroanálise são: a carga aplicada no pavimento, a bacia deflectométrica medida em campo, as temperaturas do ar e pavimento durante o ensaio, seção-tipo do pavimento, coeficientes de Poisson e valores modulares iniciais para cada camada da estrutura.

Os coeficientes de Poisson, conforme Tabela 14, e os valores iniciais de módulos de elasticidade (Tabela 15) adotados para os materiais utilizados nas camadas dos pavimentos seguiram as recomendações da instrução de projeto de pavimentação do DER-SP (2006).

Tabela 14 - Coeficiente de Poisson usuais para materiais de pavimentação (DER-SP, 2006)

Material	Intervalo de Valores de Coeficiente de Poisson	Valor recomendado de coeficiente de Poisson
Concreto de cimento Portland	0,10 - 0,20	0,15
Materiais estabilizados com cimento	0,15 - 0,30	0,2
Misturas asfálticas	0,15 - 0,45	0,3
Materiais granulares	0,30 - 0,40	0,35
Solos do subleito	0,30 - 0,50	0,4

Fonte: JUNIOR 2018, p. 84.

Tabela 15- Módulos de resiliência ou elasticidade usuais para materiais de pavimentação (DER-SP, 2006)

Material	Intervalo de valores de Módulo de Resiliência (Mpa)
Concretos Asfálticos:	
Revestimento (CAP 50-70)	2000-5000
Revestimento (CAP 30-45)	2500-4500
Binder (CAP 50-70)	2000-3000
Binder (CAP 30-45)	2500-4000
Materiais granulares	
brita graduada	150-300
macadame hidráulico	250-450
Materiais estabilizados quimicamente	
solo-cimento	5000-10000
brita graduada tratada com cimento	7000-18000
concreto compactado com rolo	7000-22000
Concreto de cimento Portland	30000-35000
Solos finos em base e sub-base	150-300
Solos finos em subleito e reforço do subleito	
solos de comportamento laterítico LA, LA', LG'	100-200
Solos de comportamento não laterítico	25-75
Solos finos melhorados com cimento para reforço de subleito	200-400
Concreto de cimento Portland	28000-45000

Fonte: JUNIOR 2018, p. 85.

A Retroanálise é realizada através do programa BackMeDiNa, cujos dados de entrada , conforme Junior(2018) são inseridos em uma planilha do Excel, Figura 29, e posteriormente estes dados são importados para o BackMeDiNa, Figura 30. Informa-se a estrutura do pavimento, o módulo de elasticidade inicial para cada camada, o coeficiente de Poisson e escolhe-se a aderência das camadas da estrutura (aderido e não aderido). A seguir, de forma

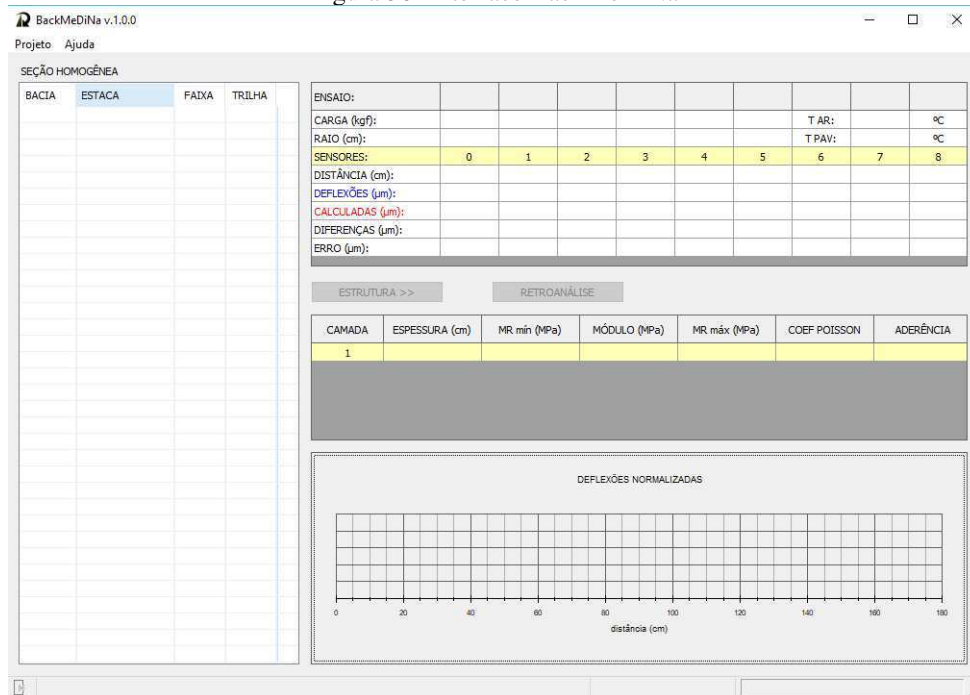
iterativa, a partir de análise elástica linear, o programa varia os valores dos módulos em torno do valor central informado, até a obtenção do melhor ajuste da bacia teórica em relação à bacia de campo.

Figura 29 Modelo de planilha para entrada dos dados no software BackMeDiNa,

Data de Execução	Temp. Do	Temp. Do	Carga	Estaca – N	Estaca – D	Estaca – F	Estaca – Tr	d0	d20	d30	d45	d60	d90	d120
01/06/2017	26	20	4099	106	800	1	Externa	507	420	325	238	149	92	60
01/06/2017	26	20	4099	106	900	1	Externa	524	441	348	261	162	102	65
01/06/2017	26	20	4070	107	0	1	Externa	545	438	352	259	168	103	62
01/06/2017	26	20	4150	107	100	1	Externa	472	389	315	242	159	97	59
01/06/2017	26	20	4150	107	200	1	Externa	492	415	312	228	136	77	51

Fonte: JUNIOR (2018), P.86.

Figura 30- Interface BackMeDiNa



Fonte: BackMeDiNa ,Própria Autoria.

Após a realização da retroanálise podemos enfim importar estes dados para o MeDiNa, preencher os campos de: camadas, Material, espessura de camada (cm), MR (Mpa), Coeficiente de Poisson e (através do comando F2) dimensionar e analisar a estrutura escolhida

Após a entrada dos dados é possível salvar o projeto, ação que preserva todos os dados informados, podendo ser aberto a qualquer momento pelo projetista para que sejam efetuadas alterações, novas análises e dimensionamento de camadas.

No caso específico deste trabalho utilizaremos a retroanálise já contida na base do MeDiNa, pois no trecho selecionado não foi realizado o levantamento deflectométrico

### 3.4.2. Verificação da vida útil e dimensionamento

As primeiras informações que devem ser preenchidas são de identificação do projeto, nos campos: Responsável, Projeto e Empresa. A determinação da estrutura a ser analisada é realizada adicionando ou excluindo camadas, definindo o material que as compõem, espessura, módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson de cada camada, conforme Figura 31.

Dados de entrada para o dimensionamento conforme relatório da UFCG Trecho 3 e Tabelas 18 e 19:

- $N = 1,2 \times 10^6$
- Período de projeto = 10 anos
- Coeficiente de Poisson da camada de Revestimento (C.B.U.Q Classe C) = 0,30
- Coeficiente de Poisson da camada de Base = 0,35
- Coeficiente de Poisson da camada de Sub- Base = 0,35
- Coeficiente de Poisson da camada de Sub-leito = 0,35
- Módulo de resiliência da camada de revestimento (C.B.U.Q Classe C)= 8833 Mpa (conforme relatório)
- Módulo de resiliência da camada de Base=285 Mpa (conforme Tabela 19)
- Módulo de resiliência camada de Sub-Base= 300 Mpa (conforme Tabela 19)
- Módulo de resiliência camada de Sub-Leito= 300 Mpa( conforme Tabela 19)

Figura 31: MeDiNa com dados de entrada (Trecho 3)

The screenshot shows the MeDiNa software interface with the following data:

CAMADA	MATERIAL	TIPO	ESPESSURA (cm)	MÓDULO (MPa)	COEFICIENTE DE POISSON
>> 1 <<	CONCRETO ASFÁLTICO	RJ CAP 50/70 #12,5mm Sepetba	5,0	8833	0,30
2	SOLO FINO, SILTOSO OU ARGILOSO	Solo Fino NA	20,0	285	0,35
3	SOLO FINO, SILTOSO OU ARGILOSO	Solo Fino NA	20,0	300	0,35
SL	SUBLEITO	Solo Fino NA	0,0	297	0,35

Below the table, the 'EIXO PADRÃO RODOVIÁRIO' section is expanded to show 'DADOS DO TRÁFEGO' (Traffic Data):

- Tipo de Via: VIA PRINCIPAL
- N. Anual total: 1,00E+06
- % Veículos na faixa de projeto: 100
- N. Anual da faixa: 1,00E+06
- Taxa de crescimento (%): 0,0
- Período de projeto (anos): 10
- N. Total: 1,00E+07

Fonte: MeDiNa Própria Autoria

## 4. RESULTADOS

### 4.1. Método empírico

A Tabela 16 apresenta um resumo das espessuras encontradas para as camadas dimensionadas pelo método empírico.

Fonte:

Camada	Espessura(cm)
Revestimento C.B.U. Q	5
Base	15
Sub-Base (Solo Local)	25
Reforço do Subleito (Solo Local)	50

Fonte: Própria Autoria

Tendo em vista que o material de composição da sub-base é o solo local, areia fina do Tipo A-3, para o levantamento do quantitativo de materiais será levado em consideração apenas as camadas de Base e Revestimento. O revestimento dos acostamentos pode ser, sempre, de categoria inferior ao da pista de rolamento.

### 4.2. Relatório Técnico Final, Termo de Cooperação 0050.0081624.13.9 PETROBRAS/ANP e a (UFCG)

No relatório apresentado os valores respectivos de Base e Sub-base são respectivamente de 20cm conforme Tabela 17.

Camada	Espessura(cm)
Revestimento C.B.U.Q	5
Base	20
Sub-Base (Solo Local)	20
Reforço do Subleito (Solo Local)	Solo local

Fonte: Própria Autoria

No relatório da UFCG no Trecho 3, é ressaltado que as curvas de fadiga indicam que a mistura asfáltica é muito rígida (fato comprovado pelo elevado  $MR > 8000$  MPa) e que provavelmente o pavimento irá fadigar prematuramente. Sendo, portanto, observado que este módulo de resiliência MR, não obedece aos critérios do DNER- SP, 2006 que indica o MR usual máximo de 5000 Mpa.

### 4.3. Método mecânico-empírico utilizando MeDiNa

Após o dimensionamento no programa MeDiNa, foram obtidos os seguintes valores das camadas de pavimento flexível, Tabela 18

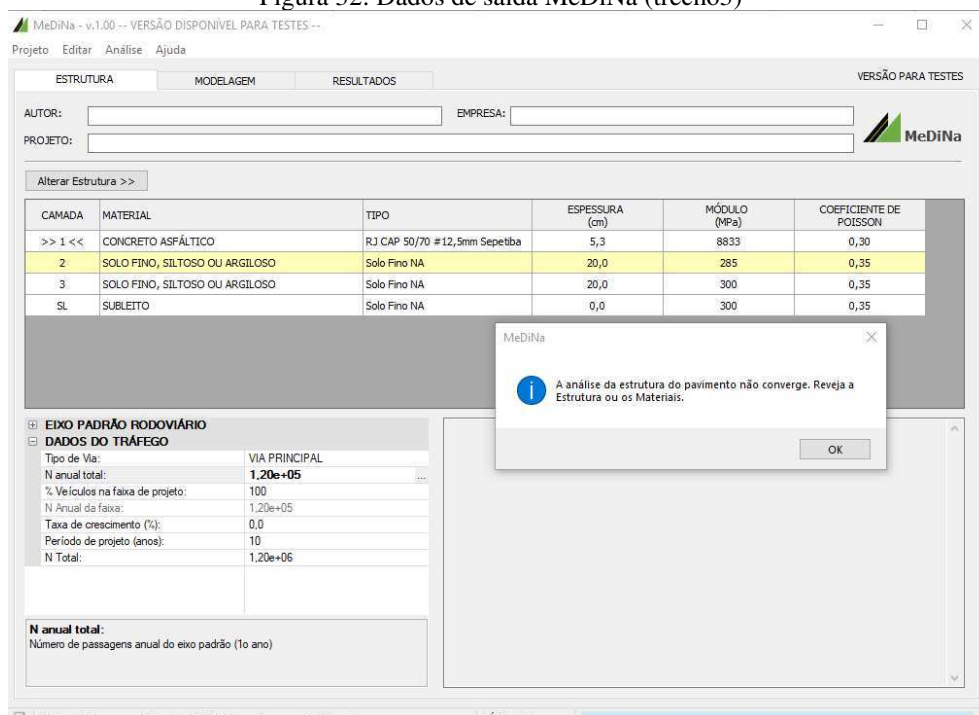
Tabela 18- Espessuras pavimento flexível (MeDiNa)

Camada	Espessura(cm)
Revestimento C.B.U.Q	5,3
Base	20
Sub-Base (Solo Local)	20
Reforço do Subleito (Solo Local)	Solo local

Fonte: Própria Autoria

Entretanto o programa apresentou a seguinte mensagem, conforme Figura 32 “A análise de estruturas dos materiais não converge. Reveja a Estrutura ou os materiais”. Ou seja, demonstrando uma incompatibilidade de rigidez entre as camadas.

Figura 32: Dados de saída MeDiNa (trecho3)

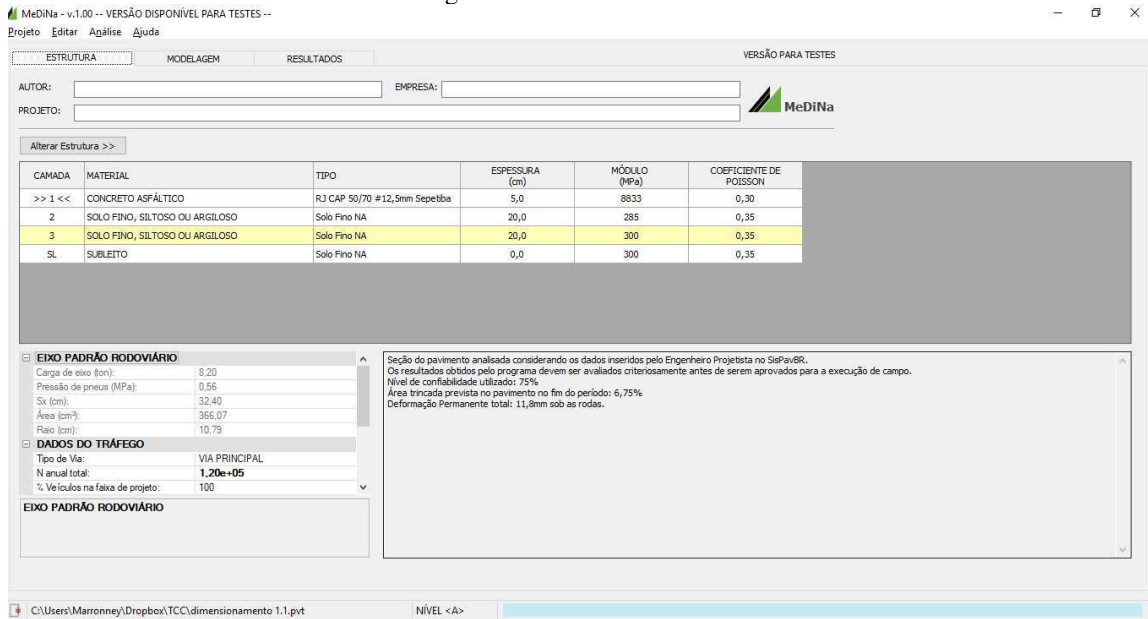


Fonte:MeDiNa Própria Autoria

Co estrutura o MeDiNa apresentou os seguintes resultados, referentes a análise da estrutura inseridas no programa conforme Figura 33:

- Nível de confiabilidade utilizado: 75%
- Área trincada prevista no pavimento no fim do período: 6,75%
- Deformação Permanente total: 11,8mm sob as rodas.

Figura 33: Análise da estrutura MeDiNa



Fonte: MeDiNa Própria Autoria

#### 4.4. Quantitativo dos materiais

As Tabelas 19, 20 e 21 apresentam os quantitativos dos materiais necessários para execução das camadas do pavimento projetado pelo método empírico, o dimensionamento do Trecho 3 realizado pelo relatório da UFCG e do dimensionamento pelo MeDiNa.

Tabela 19-Quantitativo de Materiais (método empírico)

Camadas	Espessura (m)	Comprimento (m)	Largura (m)	Volume (m <sup>3</sup> )
Revestimento	0,05	400	13,2	264
Base	0,15	400	13,2	792
Sub-Base	0,25	400	13,2	Solo local

Fonte: Própria Autoria

Tabela 20-Quantitativo de Materiais (Trecho 3)

Camadas	Espessura (m)	Comprimento (m)	Largura (m)	Volume (m <sup>3</sup> )
Revestimento	0,05	400	13,2	264
Base	0,20	400	13,2	1056
Sub-Base	0,20	400	13,2	Solo local

Fonte: Própria Autoria

Tabela 21-Quantitativo de Materiais (MeDiNa)

Camadas	Espessura (m)	Comprimento (m)	Largura (m)	Volume (m <sup>3</sup> )
Revestimento	0,053	400	13,2	279,84
Base	0,20	400	13,2	1056
Sub-Base	0,20	400	13,2	Solo local

Fonte: Própria Autoria



## **5. CONCLUSÃO E SUGESTÕES**

### **5.1. Conclusão**

Este trabalho teve como objetivo a comparação entre os modelos de dimensionamento empírico e mecanístico-empírico, tomando como base o Trecho 3 do Termo de Cooperação 0050.0081624.13.9 PETROBRAS/ANP e a (UFCG), rodovia que liga Campina Grande a Catolé de Boa Vista.

No âmbito geral os modelos de dimensionamento realizados pelo método empírico utilizado neste trabalho, converge nas espessuras das camadas, com o dimensionamento realizado no Trecho 3 (do Termo de Cooperação). Havendo uma pequena diferença nos valores encontrados.

Com relação ao modelo computacional usado no dimensionamento mecanístico-empírico utilizando o MeDiNa, o resultado do dimensionamento gerou incompatibilidade de rigidez entre as camadas, sendo uma das possíveis causas o MR elevado, acima de 8000Mpa, e provavelmente o pavimento irá fadigar prematuramente.

O MeDiNa realiza o dimensionamento analisando a estrutura como um todo, focado na curva de fadiga, na área trincada futura e MR, informando ao projetista muitos mais detalhes para a interpretação final do projeto. Desta forma é um software de ótimo desempenho e segurança para a realização de dimensionamento de pavimentos flexível pelo método mecanístico-empírico.

### **5.2. Sugestões para trabalhos futuros**

Considerando a importância do tema, destaca-se que toda a pesquisa envolvendo o dimensionamento do método empírico, mecanístico-empírico e utilização do programa MeDiNa, visando sempre os aspectos de segurança e economia de materiais. Recomenda-se que trabalhos futuros realizem as seguintes pesquisas:

- Realização de Retroanálise utilizando o BackMeDiNa;
- Variar as dimensões das camadas e/ou adicionar camadas de reforço;
- Realizar um levantamento de custos dos ensaios realizados no método mecanístico-empírico.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAO, Mieka. Análise da Vida de Fadiga de Pavimentos Flexíveis em Diferentes Misturas. 2014. Projeto de Graduação da Escola Politécnica- Universidade Federal do Rio de Janeiro. Disponível em < <http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10009440.pdf> >. Acesso em: 24 nov. 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6023**: Informação e documentação – Referências – Elaboração. Rio de Janeiro,2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15.575-1**: Edificações habitacionais – Desempenho Parte 1: Requisitos Gerais. Rio de Janeiro. 2013a.

BALBO, José Tadeu. **Pavimentação Asfáltica: materiais, projeto e restauração**. Oficina de Textos. São Paulo: SP, 2007. Disponível em <[www.ebooks.groohood.stream](http://www.ebooks.groohood.stream)>. Acesso em 15 out. 2018

BAUER, Luiz Alfredo Falcão. **Materiais de Construção** ,5ªed, Rio de Janeiro LTC,2008.

BERNUCCI, L.B., MOTTA LMG, CERATTI JAP, SOARES JB. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**. Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA, 2006.

COMPANHIA ESTADUAL DE HABITAÇÃO E OBRAS PÚBLICAS. **CEHOP**. Disponível em < <http://www.cehop.se.gov.br/>>. Acesso em 20 de jun. 2018.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTE. **CNT**. Disponível em < <http://www.cnt.org.br/>>. Acesso em 20 de jul. 2018.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DO PARANÁ. **DER/PR ES-P 01/05: Pavimentação Regularização do Subleito**. Curitiba, Paraná, Brasil,2005. Disponível em< [www.der.pr.gov.br](http://www.der.pr.gov.br)>. Acesso em 20 Jul. 2018.

\_\_\_\_. **DER/PR ES-P 35/05: Pavimento Rígido**. Curitiba, Paraná, Brasil,2005. Disponível em< [www.der.pr.gov.br](http://www.der.pr.gov.br)>. Acesso em 20 Jul. 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT - **Pavimentação -Regularização do subleito-Especificação de serviço**, Rio de Janeiro,2017.

\_\_\_\_. **IPR-719- Manual de Pavimentação, 3ª ed.**, Rio de Janeiro, 2006.

\_\_\_\_-005/2003-**Defeitos nos pavimentos flexíveis e semi- rígidos Terminologia**, Rio de Janeiro 2003.

FERNANDES, Wagner Dambros. **Análise comparativa entre os métodos de dimensionamento de pavimentos flexíveis do Brasil e método AASHTO**. 2016. Dissertação – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brasil. Disponível em < <https://repositorio.ufsm.br/handle/1/7929> >. Acesso em: 15 out. 2018.

FERREIRA, Felipe de Almeida. **Análise do Dimensionamento de Pavimentos Asfálticos Utilizando o Programa SISPAVBR**. 2013, Projeto de Graduação da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil. Disponível em < <http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10009006.pdf> >. Acesso em: 24 out. 2018

FRANCO, Filipe Augusto Cinque de Proença. **Método de dimensionamento mecânico-empírico de pavimentos asfálticos – SISPAV**. 2007. Tese de Doutorado- Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil. Disponível em < <http://www.coc.ufrj.br/es/documents2/doutorado/2007-2/887-filipe-augusto-cinque-de-proenca-franco-doutorado/file> >. Acesso em: 14 ago. 2018.

FRITZEN, Marcos Antonio, **Avaliação de soluções de reforço de pavimentos asfálticos com simulador de tráfego da rodovia Rio Teresópolis**. 2005. Dissertação de Mestrado, Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, RJ. Disponível em < <http://www.coc.ufrj.br/pt/documents2/mestrado/2005-1/1701-marcos-antonio-fritzen-mestrado/file> >. Acesso em: 24 nov. 2018.

JUNIOR, Geraldo de Souza, **Aplicação do novo método de dimensionamento de pavimentos asfálticos a trechos de uma rodovia federal**. 2018. Dissertação de Mestrado, Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, RJ. Disponível em < <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwiu9saG56ngAhXQILkGHUtWCOYQFjAAegQICRAC&url=http%3A%2F%2Fwww.coc.ufrj.br%2Fpt%2Fdocuments2%2Fmestrado%2F2018%2F3240-junior-jgs-tm-18-1&usg=AOvVaw2thH-rzIVNncxWMd8DVDUq> >. Acesso em: 25 nov. 2018.

MATTOS, Aldo Dórea. **Planejamento e Controle de Obras, 1ª edição**, São Paulo: Pini, 2010. Disponível em < [www.ebah.com.br](http://www.ebah.com.br) >. Acesso em : 15 out. 2018.

MOTTA, L.M.G. **Noções de Mecânica dos Pavimentos. Laboratório de Geotecnia.2003** - Programa de Engenharia Civil, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 2003.

MOURA, Edson de. **Estudo de Deformação Permanente em Trilha de Roda de Misturas Asfálticas em Pista e em Laboratório**. 2010. Tese de Doutorado- Universidade de São Paulo. Disponível em <[http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3138/tde-17082010-094223/publico/Tese\\_Edson\\_de\\_Moura.pdf](http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3138/tde-17082010-094223/publico/Tese_Edson_de_Moura.pdf)>. Acesso em: 14 nov. 2018.

NORBACK, Carina. **Caracterização do Módulo de Resiliência e da Deformação Permanente de três solos e misturas Solo-Brita**. 2018. Dissertação de Mestrado, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil. Disponível em <<http://www.coc.ufrj.br/pt/dissertacoes-de-mestrado/602-msc-pt-2018/8905-carine-norback>>. Acesso em: 30 nov. 2018.

RODRIGUES, João Pedro Lemos. **Análise e Aplicação do Método de Dimensionamento de Pavimentos da AASHTO**. 2013. Dissertação– Universidade de Coimbra, Coimbra, Portugal. Disponível em < [www.eg.uc.pt](http://www.eg.uc.pt) >. Acesso em: 15 de out. 2018.

ROSSI, Anna Carolina. **Etapas de uma obra de pavimentação e dimensionamento de pavimento para uma via na ilha do fundão**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil. Disponível em < [monografias.poli.ufrj.br](http://monografias.poli.ufrj.br) >. Acesso em 16 de out. 2018.

SENÇO, Wlastermiller de. **Manual de Técnicas de Projetos Rodoviários, 1ª edição**, São Paulo: Pini, 2008. Disponível em <https://www.ebah.com.br/content/ABAAAgRdIAD/manual-tecnicas-projetos-rodoviaros-wlastermiller-senco> Acesso 20 de out. 2018.