

UNIVERSIDADE FEDERAL DOS VALES DO JEQUITINHONHA E MUCURI

Engenharia Civil

Hugo Henrique Silva Ferreira

**MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO DE RODOVIAS - uma comparação
entre metodologias**

**Teófilo Otoni
2018**

Hugo Henrique Silva Ferreira

**MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO DE RODOVIAS - uma comparação
entre metodologias**

Monografia apresentada ao programa de Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel.

Orientador: Profa. Msc. Gledsa Alves Vieira

**Teófilo Otoni
2018**

Hugo Henrique Silva Ferreira

**MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO DE RODOVIAS - uma comparação
entre metodologias**

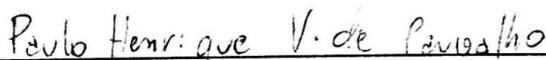
Monografia apresentada ao programa de
Graduação em Engenharia Civil da
Universidade Federal dos Vales do
Jequitinhonha e Mucuri, como requisito
parcial para obtenção do título de
Bacharel.

Orientador: Profa. Msc. Gledsa Alves
Vieira

APROVADO em: 17/08/2018


Prof. M.Sc. Flávio Alchaar Barbosa

Instituto de Ciência, Engenharia e Tecnologia - UFVJM



Paulo Henrique Vieira de Carvalho

Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte – DNIT


Profa. Msc. Gledsa Alves Vieira

Instituto de Ciência, Engenharia e Tecnologia - UFVJM

Teófilo Otoni
2018

RESUMO

Com a constante necessidade de melhoria nas condições de tráfego e na qualidade das pistas de rodagem, são desenvolvidas técnicas de dimensionamento que atendam às necessidades da região a serem empregadas. O presente trabalho concerne uma revisão bibliográfica dos conceitos gerais relacionados ao dimensionamento de pavimentos, para posteriormente apresentar as metodologias empíricas e mecánísticas desenvolvidas pelo DNER e também o método utilizado pela AASHTO. Por fim, é apresentada uma comparação entre as metodologias, além de uma breve abordagem a respeito do software Sispav.

Palavras-chave: Dimensionamento, Pavimentação, Comparação entre metodologias.

ABSTRACT

Due to the constant need to improve the traffic conditions and the quality of the roadways, sizing techniques are developed that meet the needs of the region to be used. This work concerns a bibliographic review of the general concepts related to pavement design, to later present the empirical and mechanistic methodologies developed by the DNER and also the method used by AASHTO. Finally, a comparison between the methodologies and a brief approach on the Sispav software is presented.

Keywords: Sizing, Paving, Structures catalog, comparison of methodologies.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Seção Transversal de Pavimento Flexível	21
Figura 2 - Seção Transversal de Pavimento Rígido	22
Figura 3 - Ábaco para dimensionamento da espessura de pavimentos flexíveis	41
Figura 4 - Classificação dos veículos pesados de acordo com a disposição dos eixos	45
Figura 5 - Fluxograma de dimensionamento do software MEPDG	50
Figura 6 - Fluxograma do programa SisPav.....	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Escala granulométrica dos solos.....	24
Tabela 2 - Dimensões das peneiras.....	28
Tabela 3 - Parâmetros admissíveis das camadas do pavimento	39
Tabela 4 - Coeficientes de equivalência estrutural - k.....	40

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Coeficiente de Poisson para materiais empregados em pavimentos	34
Quadro 2 - Espessura mínima de revestimento betuminoso.....	42
Quadro 3 - Comparação entre as metodologias atualmente utilizadas.	54
Quadro 4 - Comparação entre SisPav e MEPDG	58

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CAP - Cimento Asfáltico de Petróleo

CBR - California Bearing Ratio

CBUQ - Concreto Betuminoso Usinado a Quente

cm - Centímetros

Ex - Exemplo

IG - índice de grupo

ISC - Índice de Suporte Califórnia

KN - Kilo Newton

LL - Limite de Liquidez

LP - Limite de Plasticidade

MCT - Miniatura Compactado Tropical

MG - Minas Gerais

mm - Milímetros

MR - Módulo de Resiliência

nº - Número

tf - Tonelada força

ton - Tonelada

°C - Graus Celsius

LISTA DE SÍMBOLOS

+ → Mais

- → Menos

> → Maior que

< → Menor que

% → Porcentagem

= → Igual

SUMÁRIO

1. Introdução	15
1.1 Considerações iniciais	15
1.2 Objetivos.....	17
1.2.1 Objetivos Gerais.....	17
1.2.2 Objetivos específicos	17
2. Justificativa.....	19
3. Revisão Bibliográfica.....	21
3.1 Classificações dos Pavimentos.....	21
3.2 Materiais utilizados na pavimentação.....	22
3.2.1 Solo	23
3.2.2 Agregados	25
3.2.3 Betumes	28
3.2.4 Ligantes Asfálticos.....	29
3.3 Componentes Principais de Dimensionamento.....	29
3.3.1 Tráfego.....	29
3.3.2 Clima/Ambiente	30
3.3.3 Materiais	31
3.4 Parâmetros de Deformabilidade dos Materiais de Pavimentação.....	31
3.4.1 Módulo de Resiliência	31
3.4.1.1 Módulo de Resiliência das Misturas Betuminosas	32
3.4.2 Coeficiente de Poisson	33
3.4.3 Fadiga de Misturas Betuminosas.....	34
3.5 Métodos de Projeto de Pavimentos Flexíveis (empíricos e mecânicos)	
.....	35
3.5.1 Metodologia de Dimensionamento do Brasil.....	35
3.5.1.1 Dimensionamento do Tráfego	36

3.5.1.2	Fator Climático	38
3.5.1.3	Características das camadas	38
3.5.1.4	Coeficiente de equivalência estrutural.....	39
3.5.1.5	Espessura total do pavimento	40
3.6	Metodologia de Dimensionamento do EUA	43
3.6.1	Número de repetições do eixo padrão	44
3.6.2	Temperatura de Serviço.....	46
3.6.3	Fundação e Materiais de Pavimentação	47
3.6.4	Confiabilidade.....	48
3.6.5	Estrutura: Materiais e espessuras.....	48
3.6.6	O MEPDG	49
4.	Resultados e Discussão.....	53
4.1	Dimensionamento do Tráfego	55
4.2	Fator Climático	55
4.3	Características dos Materiais e espessuras.....	55
4.4	Confiabilidade	56
4.5	Situação Atual do Brasil	56
5.	Conclusão	61
6.	Propostas Futuras.....	63
	Referências	65

1. Introdução

1.1 Considerações iniciais

Desde o surgimento das primeiras civilizações o homem vem buscando meios de locomoção. À medida que a humanidade se desenvolvia, aumentava a necessidade da criação de métodos de transporte que facilitassem o deslocamento, e reduzisse cada vez mais as distâncias a serem percorridas pelas pessoas (LEAL, 2015).

Desse modo, o homem desenvolveu e aprimorou formas de construção de uma estrutura terrestre desde a preparação do solo que sustentaria os meios utilizados, buscando atingir elevadas velocidades, mas sempre pensando em eficiência, segurança e conforto (LEAL, 2015).

Um grande país desenvolvido passa por uma boa infraestrutura rodoviária que entregue eficiência em todas as suas funções, sejam elas econômicas ou sociais. A eficiência desta, tem como ponto principal a otimização da funcionalidade entre a estrutura e o veículo que por ela se desloca (LEAL, 2015).

Ainda segundo Leal (2015) todo o entendimento sobre a via é importante, considerando seu objetivo, localização, tipo e volume de tráfego que são previstos, para que essa cumpra com as funções esperadas por todo o tempo de projeto.

O objetivo de se dimensionar um pavimento baseia-se em calcular e verificar espessuras e compatibilizar os materiais, para que dessa forma a estrutura corresponda às cargas solicitadas em projeto, durante sua vida útil esperada (NETO, 2004).

Nos primórdios da construção de rodovias pavimentadas não eram empregados métodos de dimensionamento. As espessuras do pavimento eram as mesmas das utilizadas sobre qualquer outro solo. Então passaram a perceber que o pavimento se comportava de forma diferente de acordo com os trechos, onde uns apresentavam fissuras de forma precoce (NETO, 2004).

A má dosagem do asfalto e má distribuição do revestimento são algumas causas de fissurações no pavimento. Além disso, quando a estrutura

é subdimensionada ao não se considerar as mudanças climáticas, ou as características resilientes dos materiais, por exemplo, acaba por ocasionar outras patologias como trincas e afundamentos na rodovia (CNT, 2018).

Diante desse cenário, foi verificada a necessidade da criação de métodos de dimensionamento, de um modo que esse fornecesse para cada categoria de solo, o tipo e a espessura do pavimento a serem empregados (NETO, 2004).

Existem duas formas de se dimensionar um pavimento.

1. Métodos empíricos: desenvolvido a partir das observações de campo adquiridas sobre o comportamento da estrutura.
2. Métodos mecanísticos: criada com base em uma teoria elástica de multicamadas, onde suas ideias se adequavam ao comportamento da mesma.

Em 2008 o modelo mais atual seguido pelo EUA foi desenvolvido pela AASHTO (*American Association of State Highway and Transportation Officials*). Consiste em um método empírico mecanicista de dimensionamento, que agrega a experiência adquirida com passar dos anos, aos ensaios feitos em pavimentos sujeitos às diferentes situações de clima e tráfego, juntamente ao conhecimento dos materiais a serem empregados na pavimentação.

O método utilizado no Brasil tem sido o desenvolvido pelo DNER (Departamento Nacional de Estradas de Rodagem), um modelo empírico utilizado para dimensionar pavimentos flexíveis. O Engenheiro Murillo Lopes de Souza fundamentou-se no trabalho do corpo de Engenheiros do Exército dos EUA e em observações adquiridas em testes na pista da AASHO para a elaboração dessa metodologia.

Inicialmente no presente trabalho será feita uma revisão da literatura acerca dos tipos de pavimento, característica dos materiais e os métodos de dimensionamento a serem abordados. Posteriormente essas metodologias serão comparadas e discutidas, fazendo uma introdução ao software SisPav.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Comparar as metodologias empíricas e mecánísticas proposta pelo DNER, e pela AASHTO para o dimensionamento de pavimentos flexíveis através de uma revisão bibliográfica.

1.2.2 Objetivo Específico

- Destacar a obtenção de características resilientes e de fadiga dos materiais para métodos de dimensionamento.

2. Justificativa

Devido a grande ocorrência de patologias nas pistas de rodagem das estradas brasileiras, e buscando um aperfeiçoamento das metodologias de dimensionamento de pavimentos, se faz necessário o melhor entendimento das características dos materiais a serem utilizados para que essas podem ser consideradas nos métodos adotados e assim, criando uma melhor estrutura.

Visando também diminuir os problemas de sub-dimensionamento, e trazer cada vez mais confiabilidade e segurança para as rodovias, o aparecimento de softwares computacionais como o SisPav se tornam uma grande alternativa para o desenvolvimento de dimensionamento mais reais.

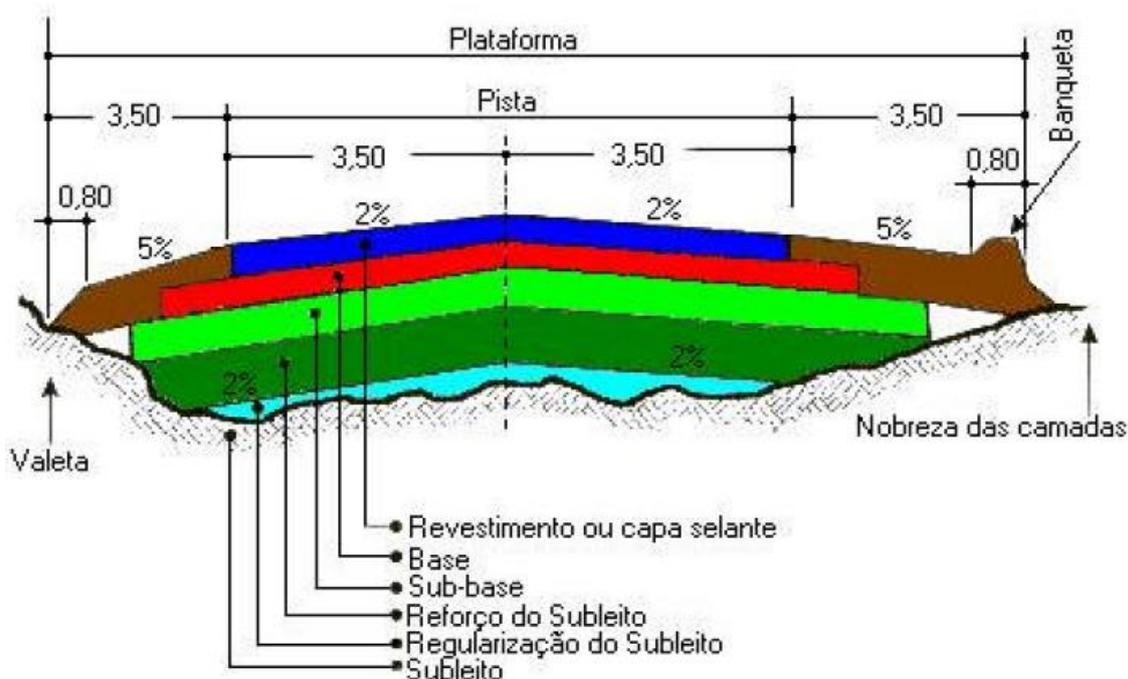
3. Revisão Bibliográfica

3.1 Classificações dos Pavimentos

Os pavimentos podem ser divididos em flexível, semi-rígido e rígido (DNIT, 2006). Quando o revestimento asfáltico é feito com uma camada de material asfáltico ou betuminoso têm-se um pavimento flexível. Leva esse nome pois a estrutura sofre flexão à medida que as cargas são aplicadas. Os materiais são aplicados na superfície do pavimento de diferentes formas de tratamentos, sendo os Tratamentos Superficiais Duplos ou Triplos (TSD ou TST) utilizados quando o volume de veículos esperado para aquela estrada é baixo. Em vias com volume elevado a aplicação de Concretos Betuminosos Usinados a Quente (CBUQ) é mais comumente empregado (MARQUES, 2006).

Para o dimensionamento desse tipo de pavimento, são importantes as características geotécnicas dos materiais constituintes, onde as espessuras das diversas camadas que compõem a rodovia dependem do valor especificado do CBR e da solicitação mínima empregada por um eixo padrão de (8,2 ton.) (MARQUES, 2006).

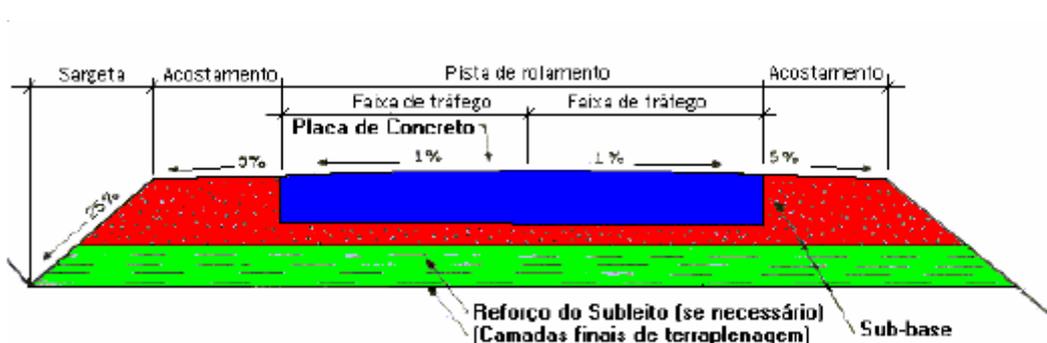
Figura 1 - Seção Transversal de Pavimento Flexível



Ainda segundo Marques (2006), quando em sua constituição o pavimento possuir camadas que trabalhem essencialmente à tração, este é considerado rígido. Para se dimensionar esse tipo de via, utiliza-se placas de concreto de cimento Portland apoiadas sobre uma camada de transição, a sub-base. Por essa constituição, são pouco deformáveis e possuem uma maior vida útil.

Para se determinar a espessura da placa de concreto é necessário verificar a resistência à tração do concreto, levando em consideração a fadiga, cargas aplicadas e o coeficiente de reação do subleito.

Figura 2 - Seção Transversal de Pavimento Rígido



Fonte: MARQUES, 2006.

Quando utilizadas misturas de solo-cimento, solo-cal e solo-betume por exemplo, consegue-se um estágio intermediário com resistência à tração regular. Nesse caso têm-se o pavimento semi-rígido. Este é caracterizado por uma base cimentada sob o revestimento betuminoso, o pavimento absorve parte dos esforços tracionados aplicados, graças ao aumento de sua rigidez (MARQUES, 2006). Vale ressaltar que para um pavimento ser considerado semi-rígido, deve possuir ao menos 3% de adição de cimento, cal ou betume como citado, em sua composição.

3.2 Materiais utilizados na pavimentação

Pavimentos são constituídos em camadas que reagem entre si para se garantir as características estruturais de projeto, assim como a disposição e espessura de cada uma das camadas. A eficiência da estrutura depende dos materiais que são utilizados em cada nível (BALBO, 2007).

Além dos materiais que irão compor o pavimento, os solos utilizados como fundação também devem ser considerados por formarem o subleito de pavimentação (BALBO, 2007).

Um material indispensável na composição é o agregado, utilizado em grande quantidade na estrutura do pavimento. Geralmente todas as camadas possuem agregados, e como os solos apresentam variadas características que irão influenciar em sua aplicação na composição do pavimento (SENÇO, 1997).

Para Balbo (2007) quando é optado por utilizar o pavimento flexível, os revestimentos são feitos preferencialmente com betumes, que podem também ser utilizados como materiais ligantes em outras camadas. Existem duas classes de misturas betuminosas, as de asfalto derivados de petróleo, e os alcatrões derivados da destilação do carvão.

Ainda segundo Balbo (2007), em pavimentos rígidos e semi-rígido também são utilizados aglomerantes ou cimentados hidráulicos como, por exemplo, cal, cimentos naturais, cimento Portland, cimentos endurecidos rapidamente onde sua aplicação varia com a disponibilidade local e com a variação do projeto.

3.2.1 Solo

Segundo Balbo (2007), a sustentação das rodovias é feita pelos solos onde estas serão empregadas, e toda a carga atuante sobre a pista de rodagem deverá ser suportada pelo terreno. Além disso, os solos podem também ser utilizados na construção da base, sub-base e do reforço do subleito. Desse modo, um estudo minucioso deve ser conduzido a fim de se escolher a melhor condição para a pavimentação.

A Embrapa (2006) definiu solo como:

Uma coleção de corpos naturais, constituídos por partes sólidas, líquidas e gasosas, formadas por materiais minerais e orgânicos que ocupam a maior parte do manto superficial das extensões continentais do nosso planeta, contém matéria viva e podem ser vegetados na natureza onde ocorrerem e, eventualmente, terem sido modificados por interferências antrópicas.

Um dos estudos realizados para obter a classificação dos solos pode ser feita através da granulometria do material, uma forma de se obter padrões entre os diferentes tipos de solo. A tabela 1 mostra os tipos de solos, suas subdivisões e as respectivas dimensões.

Tabela 1 – Escala granulométrica dos solos

FRAÇÃO	SUBDIVISÕES	DIÂMETROS (mm)	LIMITE
Pedras		>76	
Pedregulhos	Graúdo	19 a 76	
	Miúdo	4,76 a 19	
	Grossa	2 a 4,76	
Areias	Média	0,42 a 2	
	Fina	0,074 a 0,42	
Siltes		0,074 a 0,002	
Argila		<0,002	

Fonte: BALBO, 2007

Os solos são constituídos de vários vazios em sua estrutura. O preenchimento destes por água ou ar forma um sistema polifásico composto por sólidos, líquidos e gases, onde as diferentes quantidades em que essas formas se encontram definem variações nas características. O entendimento desses diferentes aspectos tornou necessária a criação e classificações de índices para a determinação dos variados comportamentos que o solo terá. As mais conhecidas classificações aplicadas em rodovias e pavimentos são da *Highway Research Board – American Association of State Highway and Transportation* (HRB-AASHTO) e o sistema classificatório de Miniatura Compactado Tropical (MCT) (SENÇO, 1997).

Balbo (2007) relata que a forma de classificação da HRB-AASHTO é o método mais conhecido no mundo e o mais utilizado no Brasil. Este estudo tem o intuito de classificar os solos de acordo com a aplicação em rodovias e

fundamenta-se no índice granulométrico e nas características físicas, que permitem o cálculo do Índice de Grupo (IG), e nos Limites de Plasticidade (LP) e de Liquidez (LL).

Já o MCT é utilizado para a caracterização de solos finos tropicais, através de observações sobre suas propriedades hidráulicas e mecânicas quando já compactados, e também da possível utilização na pavimentação, sendo mais indicado em solos finos lateríticos e não lateríticos (BALBO, 2007).

Em contrapartida ao HBR-AASHTO que não recomendam a aplicação do solo tropical em camadas com reforço superior ao do subleito, o MCT considera que o solo brasileiro quando aplicado em bases e sub-bases, possui condições satisfatórias, apesar de ainda se faz necessário um estudo para cada tipo de solo encontrado nas diferentes regiões (BALBO, 2007).

3.2.2 Agregados

Um importante componente dos revestimentos asfálticos são os agregados. Esses revestimentos são formados por associações de ligantes asfálticos, agregados e algumas vezes, de produtos complementares. Uma composição correta e bem executada desses materiais, dão origem a estruturas com um boa durabilidade e confiabilidade (BERNUCCI, 2008).

A norma ABNT NBR 9935/2005, define agregado como “Material sem forma ou volume definido, geralmente inerte, de dimensões e propriedades adequadas para produção de argamassas e de concreto”.

A escolha do agregado a se utilizar depende da sua finalidade, necessitando suportar não só as cargas atuantes sobre o pavimento, como também em seu interior, e por isso deve apresentar as propriedades adequadas para cada aplicação. A seleção desse agregado é feita através de ensaios laboratoriais que irão verificar o comportamento durante a aplicação final. Para ajudar a determinar o desempenho desse material, é importante também determinar as propriedades geológicas da rocha matriz, como o tipo de rocha, composição mineralógica, granulação e abrasão ou fratura sob tráfego (BERNUCCI, 2008).

Quando utilizados em pavimentação asfáltica, os agregados são classificados quanto a sua natureza, tamanho e distribuição dos grãos.

Segundo apresentado na obra de Bernucci (2008) quanto à natureza, esses materiais podem ser naturais, artificiais ou reciclados.

Naturais: São captados através de processos de escavação, desmonte, e dragagem de depósitos marinhos, estuários, rios e continentais. A aplicação na pavimentação asfáltica pode ser feita de forma direta, sem alteração de seu tamanho ou formato, ou então podem passar por processos como a britagem (BERNUCCI, 2008).

Artificiais: Provenientes de resíduos industriais como escória de alto forno e de aciaria. Nesta categoria, o agregado mais utilizado em pavimentos são os provenientes de escórias da indústria do aço. Apesar de apresentarem boa resistência ao atrito, podem possuir problemas de expansão e heterogeneidade, fazendo necessário um tratamento antes de ser utilizado (BERNUCCI, 2008).

Reciclados: Como o próprio nome indica, são materiais obtidos do reuso de vários outros. Com a necessidade de conscientização ambiental e devido as restrições feitas na exploração de agregados naturais, os revestimentos asfálticos reciclados vêm ganhando grande importância. Dessa forma, vários métodos de reciclagem estão sendo desenvolvidos, proporcionando materiais reciclados de qualidade para sua determinada aplicação (FERNANDES, 2004).

Segundo apresentado no manual do DNIT (2004) os agregados podem ser classificados quanto ao tamanho como graúdos, miúdos e material de enchimento.

- **Graúdos:** Agregados maiores que 2,0mm, ou seja, que não passam na peneira nº 10, como por exemplo, britas, cascalhos e seixos.
- **Miúdos:** Agregados que passam pela peneira nº 10 porém ficam retidos na peneira nº 200, com dimensões entre 0,075mm e 2,0mm, como areias e pó de pedra.

- Materiais de enchimento: Agregados que ao menos 65% passam na peneira nº 200, com partículas menores que 0,075mm, como o cimento Portland e a cal hidratada.

Em revestimentos asfálticos um fator de grande importância é a distribuição granulométrica dos agregados. Esta distribuição é obtida através de um processo de peneiramento e essa característica influi no comportamento do revestimento como, em sua rigidez, estabilidade, durabilidade, permeabilidade, resistência à fadiga e à deformação permanente, dentre outras características (FERNANDES, 2004).

As peneiras utilizadas na análise granulométrica e seus respectivos tamanhos são fornecidos pela norma DNER-ME 035/95, apesar de nem todos os tamanhos serem necessários para esta análise. É importante salientar que a peneira de abertura de 12,5mm é muito utilizada nos projetos asfálticos, apesar da norma citada não a mencionar (FERNANDES, 2004). A tabela 2 apresenta as dimensões das peneiras e suas numerações.

Tabela 2 - Dimensões das peneiras

Abertura nominal das malhas	
Principal (mm)	Peneira nº
75,0	
50,0	
37,5	
25,0	
19,0	
9,5	
4,75	4
2,36	8
2,00	10
1,18	16
0,600	30
0,425	40
0,300	50
0,150	100
0,075	200

Fonte: Norma DNER-ME 035/95

3.2.3 Betumes

Um dos mais antigos e versáteis materiais de construção utilizados pelo homem é o asfalto. Dentre suas várias aplicações, o mais importante e clássico é a utilização em pavimentos, sendo a pavimentação asfáltica o principal método de revestimento do mundo. 95% das estradas pavimentadas do Brasil recebem esse revestimento, que também é aplicado em grande parte das ruas do país (BERNUCCI, 2008).

Além de ser um produto natural encontrado em rochas e em depósitos lacustres, o asfalto também pode ser derivado do petróleo, e seu principal constituinte são os betumes. Estes são substâncias formadas por hidrocarbonetos pesados, inflamáveis com propriedades ligantes, e que ocorrem na natureza. Desta forma são utilizados como ligantes em revestimentos betuminosos. Os betumes também são obtidos através da destilação do petróleo e da fabricação da madeira, carvão e resinas (BALBO, 2007).

3.2.4 Ligantes Asfálticos

Ricos em betumes, os Cimentos Asfálticos de Petróleo (CAP), são materiais provenientes do refino do petróleo cru. São viscosos, de boa aderência aos agregados, são ligantes e podem ser utilizados ainda como impermeabilizantes.

O CAP sofre reação térmica por ser termossuscetível, reações químicas devido a radiação solar, às ações de combustíveis, graxas, e óleos deixados pelos veículos na pista de rodagem. Desta forma, o ligante asfáltico sofre oxidação denegrindo a qualidade do asfalto (BALBO, 2007).

O CAP é o principal constituinte do Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ), e de acordo com a Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfalto (ABEDA), em pesquisa realizada em 2011, no Brasil mais de 90% das estradas pavimentadas são de CBUQ.

Além do ligante, este tipo de concreto é composto de areia e brita. O traço do revestimento de CBUQ é variável e determinado através de ensaios laboratoriais, sendo os mais importantes os ensaios Marshall (DNER, 1995) e o de resistência a tração (DNER, 1994). O processo de mistura do CAP com os agregados ocorre a temperatura entre 140 e 175°C e, tanto a usina de fabricação, quanto o transporte necessitam de equipamentos especiais.

3.3 Componentes Principais de Dimensionamento

3.3.1 Tráfego

A frota de veículos e a carga transportada são muito variáveis. Estes componentes do tráfego das rodovias devem ser levados em consideração ao

se projetar o pavimento daquela via. O estudo realizado é complexo, devido a distribuição de peso sobre os eixos dos veículos, a velocidade de passagem, a quantidade de transportes que utilizarão a pista, a geometria dos eixos, e até mesmo a pressão dos pneus (LEAL, 2015).

Desta forma, o tráfego solicitante é definido através de um único eixo simples, ou eixo padrão. Então, os dados obtidos durante a análise do tráfego, são utilizados como a solicitação correspondente ao eixo padrão utilizado, representando assim o efeito do tráfego na rodovia a ser construída durante todo o tempo estabelecido em projeto (LEAL, 2015).

3.3.2 Clima/Ambiente

Além dos efeitos provocados pelas cargas aplicadas pelos veículos sobre a rodovia, outros efeitos físicos ao redor devem ser levados em consideração, por exercerem grande influência na confiabilidade do pavimento.

Segundo Franco (2007), o clima e o tráfego influenciam na variação de módulos de resiliência, da umidade, e na intemperização dos materiais do pavimento. A temperatura provoca um evidente envelhecimento do material ligante, e em pavimentos rígidos induz a dilatação térmica, empenamento e retração, devido à diferença térmica entre as placas de betão e a fundação.

Por infiltração, a precipitação no pavimento ocasiona um crescimento da taxa de umidade nas camadas inferiores. O aumento dessa umidade dos materiais pode provocar uma alteração no módulo de resiliência (FRANCO, 2007).

No caso do Brasil, onde a predominância é de pavimentos flexíveis, na camada superficial é visível a influência da água na intemperização da mistura betuminosa (LEAL, 2015).

Já para ambientes frios como nos países do hemisfério norte, as baixas temperaturas podem provocar penetração de gelo na estrutura, ocasionando uma fundação com resistência maior no inverno, porém muito mais fraca durante a primavera (LEAL, 2015).

3.3.3 Materiais

Outro importante parâmetro a ser detalhado no dimensionamento dos pavimentos, são os materiais e suas propriedades a serem utilizados em cada camada. Segundo Leal (2015), inicialmente este estudo dos materiais eram feitos em campo e depois adaptados para diversas aplicações. Porém, com o passar do tempo, muitos ensaios são realizados para quantificar e verificar as características dos materiais quanto a resistência ao carregamento aplicado. Para um fácil entendimento e padronização, estes ensaios foram normatizados e são constantemente atualizados.

Os ensaios mais aplicados podem ser agrupados em: Ensaios de Rotina (ex: CBR e triaxial), Ensaios de Parâmetros de Camadas (ex: Módulo de Resiliência e Módulo Complexo) e Ensaios de propriedades de Deformação Fundamentais (ex: Fadiga, Deformação Permanente) (YODER e WITCZAK, 1991).

3.4 Parâmetros de Deformabilidade dos Materiais de Pavimentação

3.4.1 Módulo de Resiliência

Segundo Neto (2004) deformação resiliente é quando as camadas do pavimento ao serem submetidas a carregamentos repetidos, sofrem deformação elástica ou recuperável.

Diversos estudos no campo da pavimentação, analisam as propriedades resilientes dos materiais com os mais variados modelos. O mais genérico e utilizado atualmente, trata o módulo de resiliência como uma relação entre a variação da tensão de confinamento e a tensão de desvio dos materiais, pela seguinte equação 2.4.1 (NETO, 2004).

$$M_R = K_1 \times \sigma_3^{K_2} \times \sigma_d^{K_3} \quad (2.4.1)$$

onde:

M_R = módulo de resiliência;

σ_3 = tensão de confinamento;

σ_d = tensão de desvio;

K_1, K_2, K_3 = parâmetros experimentais.

Existem vários fatores que influenciam na resiliência dos solos. Estes podem ser agrupados quanto a condição de carregamento e estado de tensão, quanto ao estado físico do solo, através do teor de umidade e massa específica seca, e quanto a natureza do solo (NETO, 2004).

3.4.1.1 Módulo de Resiliência das Misturas Betuminosas

Em misturas betuminosas, para se determinar o módulo de resiliência é aplicado o ensaio de tração indireta por compressão diametral cíclica, já que este simula o comportamento mecânico dos revestimentos asfálticos sobre deformações de tração, que ocasionam a fadiga da camada e, são responsáveis pela vida de serviço do pavimento (PINTO, 1991).

A equação 2.4.2 é utilizada para o cálculo do módulo de resiliência neste ensaio, e relaciona a tensão de tração normal ao plano vertical diametral de uma amostra, com a deformação resiliente correspondente a certa temperatura.

$$M_R = \left(\frac{\sigma_t}{\varepsilon_t} \right)_T \quad (2.4.2)$$

onde:

σ_t = tensão a tração;

ε_t = deformação resiliente.

As vantagens na aplicação deste ensaio são dadas devido a relativa simplicidade de execução, ao fornecimento de informações sobre o coeficiente de Poisson do material, a baixa variação de resultados quando comparado a outros ensaios, a ruptura inicial ocorrer em uma região de tração relativamente uniforme, e por fim, às condições superficiais não afetarem a ruptura do corpo de prova.

Pinto (1991) agrupou os principais fatores que influenciam o módulo de resiliência de misturas betuminosas, quanto aos fatores de mistura, fatores de carga e fatores ambientais.

- i. **Fatores de mistura:**
 - Penetração do asfalto;
 - Teor de asfalto;
 - Índice de vazios;
 - Relação filler-betume;
 - Tipo de agregado, forma, textura e granulometria;
- ii. **Fatores de carga:**
 - Tipo do carregamento;
 - Forma do carregamento;
 - Magnitude de carregamento;
 - Frequência, duração e intervalo de tempo entre aplicações sucessivas do carregamento;
 - História de tensões;
- iii. **Fatores ambientais:** temperatura.

3.4.2 Coeficiente de Poisson

A razão entre a deformabilidade radial relativa e a deformação axial relativa de qualquer material, é conhecido como coeficiente de Poisson (SENÇO, 2007).

Em materiais isotrópicos, ou seja, que possuem propriedades elásticas iguais em qualquer direção, sabe-se que o coeficiente de Poisson é $\mu=0,25$. Na maioria dos materiais elásticos, onde ocorre a diminuição do volume no processo de deformação e a variação da altura é pequena, após sofrer compressão, $\mu<0,50$. Já em materiais que não sofrem compressão, e não há variação do volume, $\mu=0,50$. Porém quando ocorre um acréscimo volumétrico em razão da deformação, $\mu>0,50$ (SENÇO, 2007).

Para Senço (2007), a determinação do coeficiente de Poisson de solos pode ser complicada, deste modo, mantêm a regra de que seu valor é próximo de 0,50 quando formado por materiais incompressíveis. No caso de materiais mais comumente utilizados na pavimentação flexível, o valor varia entre 0,25 e 0,50, sendo 0,50 o adotado geralmente.

Quando não houver a possibilidade de se obter valores confiáveis do coeficiente de Poisson para materiais aplicados na pavimentação, pode-se adotar os valores apresentados no quadro 1 (TRB, 1975, apud NETO, 2004).

Quadro 1 - Coeficiente de Poisson para materiais empregados em pavimentos

Materiais	Coeficiente de Poisson
CBUQ	0,25 – 0,35
Subleito, Sub-base, e Bases Granulares	0,30 – 0,40
Solo Cimento	0,10 – 0,25
Subleito Siltoso ou Argiloso	0,40 – 0,50

Fonte: TRB – Special Report 162 (1975), apud NETO, 2004

3.4.3 Fadiga de Misturas Betuminosas

O processo progressivo e localizado de degradação estrutural de um material, quando submetido a tensões ou deformações repetidas é conhecido como fadiga. Essas tensões são inferiores a resistência última do material podendo após várias repetições, ocasionar fissurações ou a completa ruptura. Dessa forma, “a resistência a fadiga de uma mistura asfáltica pode ser definida como a capacidade da mesma de suportar, sem ruptura, as solicitações repetidas do tráfego” (NETO, 2004).

Ainda segundo Neto (2004), a formação de trincas por fadiga ocorre ao longo de toda a espessura das fibras inferiores do revestimento asfáltico até o aparecimento na superfície dos materiais. Podem acontecer também a partir do topo do revestimento graças ao surgimento de tensões críticas nas fibras superiores da camada. Para Medina (1997), pavimentos asfálticos com espessura superior a 20 cm podem possuir trincamentos que se iniciam na superfície da camada do revestimento em decorrência da curvatura convexa próxima às rodas.

Em misturas asfálticas diversos fatores influenciam no aparecimento de fadiga, tais como: número de aplicações de carga, granulometria do agregado, temperatura de serviço, volume de vazios presentes na mistura,

magnitude das cargas, tipo e teor de CAP utilizado, dentre outros (NETO, 2004).

3.4.4 Deformação Permanente nos Pavimentos flexíveis

Quando o material sofre uma carga até se deformar e após a sua retirada, o material não volta para o seu estado original, diz-se que a deformação é permanente ou plástica (NETO, 2004).

A deformação permanente é a resultante da combinação da densificação que ocasiona uma variação do volume, e da deformação cisalhante repetida, ou fluxo plástico com volume constante (YODER e WITCZAK, 1975, apud NETO, 2004).

Com o tráfego de cargas pesadas sobre o pavimento, há um acúmulo em todas as camadas de deformações plásticas, o que geram em sua superfície o afundamento de trilha-de-roda, um defeito localizado por onde as rodas dos veículos passam (NETO, 2004).

Além de serem prejudiciais para a utilização das estradas, essas deformações geram insegurança, devido ao fato de proporcionar um bolsão para o acúmulo de água, dificultando a direção dos condutores (QUEIROZ, 1984).

Segundo Balbo (1997), a profundidade das trilhas-de-roda são indicadores da necessidade de recuperação dos pavimentos. Em sua metodologia de dimensionamento de pavimentos flexíveis, tratou o máximo afundamento possível para trilhas-de-roda de 16 mm, como um critério de ruptura.

3.5 Métodos de Projeto de Pavimentos Flexíveis (empíricos e mecânicos)

3.5.1 Metodologia de Dimensionamento no Brasil

Em 1961 o Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER), criou o primeiro método de dimensionamento de pavimentos flexíveis. Este modelo é baseado no criado por Porter na década de 30, através de estudos conduzidos na “*California Division of Highway*”, e no fim da década de 50, foi adaptado para as condições existentes no Brasil pelo engenheiro Murillo

Lopes de Souza, sendo apenas oficializado pelo DNER em 1961. Com o passar dos anos, esta norma foi alterada diversas vezes até chegar à versão de 1981 que é a utilizada no país (TRICHÊS, 2013).

Segundo o Manual de Pavimentação do DNIT (2006), esta metodologia tomou como referência o trabalho "*Design of flexible Pavements Considering Mixed Loads and Traffic*", de W. J. Turnbull, C. R. Foster e R. G. Ahlvin, membros do Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos da América (USACE), e com conclusões obtidas na pista experimental da AASHTO, considerando algumas adequações para melhor atender as situações brasileiras.

Quanto ao dimensionamento de estruturas de pavimentos, são utilizados dois parâmetros importantes no Brasil, o Índice de Suporte Califórnia (ISC), que é utilizado no dimensionamento convencional do DNER, e o Módulo de Resiliência (MR) usado na Mecânica dos Pavimentos (BERNUCCI, 2008).

O ensaio de ISC ou, CBR em inglês, passou a ser utilizado para avaliar as rodovias da Califórnia na década de 1920, quanto a capacidade do subleito de romper, sendo este o defeito mais comumente observado naquela época. Assim, os ensaios realizados em laboratório avaliam a resistência do material à consideráveis deslocamentos (BERNUCCI, 2008).

De acordo com o Manual de Pavimentação do DNIT (2006), com o ensaio CBR foi possível definir a capacidade resistente do subleito e também dos materiais constituintes do pavimento. A compactação das camadas do pavimento e do subleito são feitas de acordo com valores específicos, onde o grau obtido não deve ser menor que 100% do especificado.

Para o dimensionamento do pavimento flexível recomenda-se as disposições normativas do DNER/81 obtidas na obra de TRICHÊS (2013).

3.5.1.1 Dimensionamento do Tráfego

Quanto as características do tráfego, é utilizado o número (N) de repetições do eixo padrão de 8,2 tf em toda a vida útil proposta em de projeto da via. O dimensionamento desta variável se relaciona com o volume médio

diário de veículos comerciais durante a vida de projeto, a composição da frota, e um fator climático considerado igual a 1, através da seguinte equação:

$$N = V_t \times FV \times FR \quad (2.5.1)$$

onde,

V_t = volume total de tráfego durante o período de projeto

FV = fator de veículo

FR = fator climático Regional

A quantidade total de tráfego é uma relação de crescimento aritmético ou uma taxa de crescimento geométrico, e pode ser obtido pelas respectivas fórmulas:

$$V_t = 365 \times V_m \times P \quad (2.5.2)$$

$$V_t = 365 \times V_{tx} \left[\frac{\left| \left(1 + \frac{i}{100} \right)^P - 1 \right|}{\frac{i}{100}} \right] \quad (2.5.3)$$

onde,

V_m = média do tráfego no sentido mais solicitado da via, no primeiro ano de operação do pavimento com o tráfego no mesmo sentido do último ano do período analisado.

P = período de projeto.

O fator de veículo é obtido a partir da seguinte equação:

$$FV = FC \times FE \quad (2.5.4)$$

onde,

FC = fator de carga

FE = fator de eixos

3.5.1.2 Fator Climático

Este fator é utilizado quando se usa o CBR que corresponde a umidade de equilíbrio e, de acordo com resultados obtidos pelo DNER, é considerado igual a 1. O estudo deste fator considera as variações de umidade dos materiais constituintes do pavimento durante as estações do ano, e variam de acordo com o número de repetições do eixo padrão, e da espessura do pavimento. O valor final é uma média dos diferentes coeficientes sazonais visto no espaço e tempo de ocorrência.

Este fator climático regional é considerado 1 devido à falta de dados precisos referentes ao clima das diversas regiões do país, sendo assim recomendado a utilização desse valor.

3.5.1.3 Características das camadas

Segundo ensaio realizado pelo DNIT, o CBR define a capacidade de suporte da fundação e dos materiais de cada camada do pavimento.

Tabela 3 - Parâmetros admissíveis das camadas do pavimento

Camada	Condições
Fundação	Expansão $\leq 2\%$ CBR $\geq 2\%$
Reforço da fundação	CBR maior que o da fundação Expansão ≤ 1
Sub-base	CBR $\geq 20\%$ I.G. (Índice de Grupo)= 0 Expansão $\leq 1\%$
Base	CBR $\geq 80\%$ Expansão $\leq 0,5\%$ Limite de Liquidez $\leq 25\%$ Índice de Plasticidade $\leq 6\%$ Faixas de Granulometria para bases granulares: de A e F para $N \leq 5 \times 10^6$ e de A e D para $N > 5 \times 10^6$

Notas:

- se LL > 25% e/ou IP > 6, material pode ser empregue como base desde que o equivalente de areia seja superior a 30.

- para $N \leq 5 \times 10^6$ podem ser empregues materiais com CBR $\geq 60\%$ e as faixas granulométricas E e F.

Fonte: TRICHÊS (2013)

3.5.1.4 Coeficiente de equivalência estrutural

A Tabela 4 traz o coeficiente de equivalência estrutural para materiais utilizados em revestimento, base, sub-base e reforço do subleito (SENÇO, 2007).

Tabela 4 - Coeficientes de equivalência estrutural - k

Componentes dos pavimentos	Coeficiente k
Base ou revestimento do 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 por penetração	1,20
Base granular	1,00
Sub-base granular	0,77 (1,00)
Reforço do subleito	0,71 (1,00)
Solo-cimento com resistência à compressão a 7 dias, superior a 45 kg/cm ²	1,70
Idem, com resistência à compressão a 7 dias, entre 45 kg/cm ² e 35 kg/cm ²	1,40
Idem, com resistência à compressão a 7 dias, inferior a 38 kg/cm ³	1,00

Fonte: SENÇO (2007)

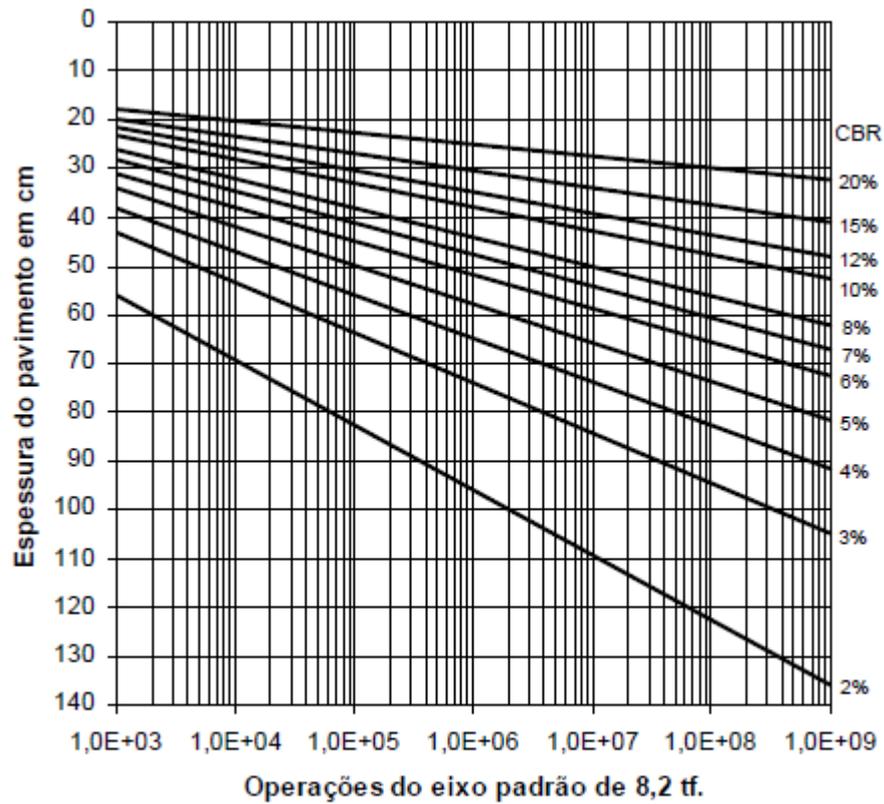
3.5.1.5 Espessura total do pavimento

É possível dimensionar a espessura total do pavimento (H_m), após a definição do índice de suporte (CBR) e do tráfego em relação ao tempo de vida útil de projeto (N), através do ábaco da figura 3.

Pode ser Determinada também pela equação 2.5.5 (DNIT, 2006).

$$H = 77,67 N^{0,0482} \times ISC^{-0,598} \quad (2.5.5)$$

Figura 3 - Ábaco para dimensionamento da espessura de pavimentos flexíveis



Fonte: SOUZA, 1981.

A espessura mínima para os revestimentos betuminosos é definida através do valor N de tráfego da via, e o quadro 2 mostra os valores especialmente para bases de comportamento puramente granular (TRICHÊS, 2013).

Quadro 2 - Espessura mínima de revestimento betuminoso

N	Espessura mínima de Revestimento Betuminoso
N inferior ou igual a 10^6	Tratamentos superficiais betuminosos
N entre 10^6 e 5×10^6	Revestimentos betuminosos com 5cm de espessura
N entre 5×10^6 e 10^7	Betão Betuminoso com 7,5cm de espessura
N entre 10^7 e 5×10^7	Betão Betuminoso com 10cm de espessura
N superior a 5×10^7	Betão Betuminoso com 12,5cm de espessura

Fonte: TRICHÈS (2013)

Com o conhecimento da espessura total do pavimento (H_m) e dos coeficientes de equivalência estrutural (K) dos materiais utilizados, pode-se determinar a espessura das camadas através das seguintes equações:

$$R \times K_R + B \times K_B \geq H_{20} \quad (2.5.6)$$

$$R \times K_R + B \times K_B + h_{20} \times K_s \geq H_n \quad (2.5.7)$$

$$R \times K_R + B \times K_B + h_{20} \times K_s + h_n \times K_{ref} \geq H_m \quad (2.5.8)$$

onde,

R = espessura do revestimento;

K_R = coeficiente de equivalência estrutural do revestimento;

B = espessura da base;

K_B = coeficiente de equivalência estrutural da base;

H_{20} = espessura de pavimento necessária para proteger a sub-base;

h_{20} = espessura da sub-base;

K_s = coeficiente de equivalência estrutural da sub-base;

H_n = espessura de pavimento necessária para proteger o reforço do subleito;

h_n = espessura do reforço do subleito;

K_{ref} = coeficiente de equivalência estrutural do reforço do subleito;

H_m = espessura total do pavimento.

Os valores das espessuras necessárias para proteger cada camada são obtidos através do ábaco da Figura 3.

3.6 Metodologia de Dimensionamento do EUA

A primeira metodologia empírica desenvolvida nos Estados Unidos que considerou a resistência dos solos foi desenvolvido por Porter, que relacionou o já estudado conceito de CBR com a espessura do asfalto empregado nas rodovias. Porém o grande crescimento no desenvolvimento da engenharia de pavimentos dos EUA foi dada pela AASHTO, órgão desenvolvedor das normas e especificações empregadas no dimensionamento das estradas no país (LEAL, 2015).

Fundada em 1914 a antiga AASHO, projetou em 1951 e construiu entre 1956 e 1958, a pista experimental para coleta de dados e desenvolvimento de várias equações empíricas, na cidade de Ottawa, Illinois. Os resultados e observações obtidos nesta pista foram utilizados como base para os primeiros manuais de dimensionamento de pavimentos norte-americanos.

Ainda segundo Leal (2015), a partir de 1986 quando a AASHTO publicou seu guia e com a monitorização das estradas e aparição do conceito de reabilitação de pavimentos, foi verificado que era preciso a formulação também de bases mecanistas, com a finalidade de se obter resultados mais precisos e coerentes com os fenômenos que eram verificados na prática, nas pistas monitoradas. Desta forma tornou-se possível o desenvolvimento de pavimentos cada vez mais eficientes.

O modelo vigente até 2002, quando foi implementada a abordagem de dimensionamento MEPDG, *Mechanistic - Empirical Guide for Design of New and Rehabilitated Pavement Structures*, fornece recomendações para o dimensionamento da estrutura do pavimento, a partir da determinação das

espessuras de cada camada e conseqüentemente a espessura total. Este guia permite a determinação de estruturas alternativas com variações de materiais e processos de construção.

A metodologia em questão considera a serventia da pista de rodagem, desempenho do pavimento, terreno de fundação, ambiente, custo de ciclo de vida, materiais utilizados, tráfego, drenagem e segurança (AASHTO, 2008).

3.6.1 Número de repetições do eixo padrão

Para pavimentos flexíveis utiliza-se a equação 2.6.1 para a determinação do número de repetições do eixo padrão de 80 KN.

$$\log W_{18} = Z_R \times S_0 + 9,36 \times \log(SN + 1) - 20 \left(\frac{\frac{\log \Delta PSI}{4,2-1,5}}{0,4 + \frac{1094}{(SN+1)^{5,19}}} \right) + 2,32 \times \log M_R - 8,07 \quad (2.6.1)$$

onde,

W_{18} = número de repetições do eixo padrão de 80 KN segundo a AASHTO;

ΔPSI = variação de serventia;

Z_R = nível de confiabilidade;

S_0 = desvio padrão;

SN = Número estrutural;

M_R = módulo de resiliência característico.

Obter esta grande quantidade de informações é uma tarefa complicada. Deste modo, existe a possibilidade de realizar aproximações, com dados das estradas pertencentes a mesma região, de modo que esta metodologia leva em consideração a cadeia hierárquica de dados qualitativos (RODRIGUES, 2013).

Segundo a AASHTO (2008), através da equação 2.6.2 é possível analisar o tráfego de veículos pesados, definindo a quantidade diária total de veículos pesados no primeiro ano da pista de rodagem.

$$TT_{i,j,l} = (AADTT_1)(MDF_j)(HDF_i)(DDF)(LDF)(n^\circ \text{ de dias}) \quad (2.6.2)$$

onde,

$AADTT_1$ = número médio anual de veículos pesados por dia no ano base;

MDF_j , HDF_i , DDF e LDF = parâmetros de distribuição mensal, horário, do design e da via;

n° de dias = número de dias correspondentes ao período em causa.

Segundo Rodrigues (2013), caso não havendo os fatores horários, diários e mensais, é possível utilizar o valor obtido pela Equação 2.6.3. Calculado o número de veículos pesados, este é dividido pela Equação 2.6.4 para as variadas classes de tráfego apresentadas pela Figura 4.

$$N_{pes} = TDMA_1 \frac{(1+t)^n - 1}{t} \times 365 \quad (2.6.3)$$

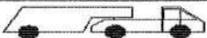
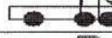
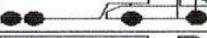
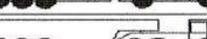
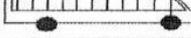
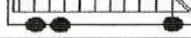
onde,

N_{pes} = número de veículos pesados;

$TDMA_1$ = tráfego médio diário anual do primeiro ano;

t = taxa de crescimento.

Figura 4 – Classificação dos veículos pesados de acordo com a disposição dos eixos

Tipo de Veículo	Classe	Subclasse	Tipo de Veículo	Classe	Subclasse
	F	F1		H	H1
		F2			H2
		F3			H3
		F4			H4
Não conformidade		F5			H5
	G	G1			H6
		G2	Não conformidade		H7
		G3		I	I1
Não conformidade		G4			I2
		Não conformidade	I3		

Fonte: Dias (2009).

$$TT_{1,j,l,k} = (TT_{1,j,l})(NTP_k) \quad (2.6.4)$$

onde,

$TT_{1,j,l,k}$ = número total de tráfego pesado para cada classe de tráfego;

$TT_{1,j,l}$ = número total de tráfego pesado no incremento de tempo i , no mês j do ano l ;

NTP_k = percentagem de tráfego pesado normalizada para determinada classe de tráfego k .

Desta forma, obtêm-se o número total de eixos por cada tipo de eixo, o que possibilita encontrar através do produto da carga normalizada por eixo para determinados grupos de carga, o número total de eixos de cada grupo de carga para cada classe de veículos pesados, utilizando a Equação 2.6.5.

$$AL_{1,j,l,k,a,w} = (NWP_{a,w})(NA_{1,j,l,k,a}) \quad (2.6.5)$$

onde,

$AL_{1,j,l,k,a,w}$ = número total de eixos de cada grupo de carga para cada classe de veículos pesados;

$NWP_{a,w}$ = percentagem normalizada de carga por eixo de um determinado grupo de carga;

$NA_{1,j,l,k,a}$ = número total de eixos de cada classe de tráfego pesado.

Ao somar para todas as classes de veículos pesados e para cada acréscimo no intervalo de tempo os resultados por eixo e para cada tipo eixo, chega-se a quantidade de eixos de cada grupo que atuam sobre a pista de rodagem (RODRIGUES, 2013).

3.6.2 Temperatura de Serviço

Para Rodrigues (2013), uma importante variável a ser entendida para se estudar o desempenho dos pavimentos é a temperatura. Esta influência na rigidez das camadas betuminosas e na deformação da mesma. É comumente considerado para o dimensionamento, a temperatura de serviço equivalente anual, que considera a variação das temperaturas durante o ciclo

de um ano. O valor adotado representa as diferentes temperaturas verificadas para as diferentes camadas aplicadas do pavimento.

Ainda segundo Rodrigues (2013), a metodologia da AASHTO utiliza a medição das temperaturas do pavimento em 3 diferentes zonas do Estados Unidos. Obtêm-se a temperatura de serviço através da espessura do pavimento e da temperatura de ar equivalente anual. Considera-se também que o pavimento é dividido em 3 subcamadas e que o ponto central de cada uma, é o ponto crítico na representação da deformação permanente. Já para o estudo de rompimento por fadiga, os pontos críticos são considerados nas extremidades das camadas.

3.6.3 Fundação e Materiais de Pavimentação

Nesta seção são avaliados e levados em consideração as propriedades elásticas dos solos granulares e coesivos e das misturas betuminosas, a partir dos dados dos carregamentos repetitivos aplicados. Então calcula-se o módulo de resiliência efetivo dos materiais a serem empregados (LEAL, 2015).

Para Leal (2015), para determinar o parâmetro, é necessário obter um valor ponderado desses módulos de resiliência de acordo com as estações do ano juntamente com a umidade do local de estudo através da Equação 2.6.6.

$$U_f = \left(\frac{3020}{Mr}\right)^{2,3} \quad (2.6.6)$$

onde,

U_f = módulo de resiliência ponderado para cada estação do ano;

Mr = módulo de resiliência efetivo.

Então assim é possível obter o módulo de resiliência característico através da média dos U_f de cada estação do ano pela Equação 2.6.7 ou pela 2.6.8.

$$\log Mr = 3,478 - 0,435 U_f \quad (2.6.7)$$

$$Mr = 1,5 \text{ CBR (solos finos com CBR} < 10) \quad (2.6.8)$$

3.6.4 Confiabilidade

Faz-se necessário verificar a eficiência e a serventia da rodovia durante seu tempo de vida útil, levando em consideração as condições ambientais e de tráfego que as quais será aplicada. Devido ao fato de que essas variáveis podem ser mais severas ou críticas com o passar do tempo, calcula-se o fator de confiabilidade (FR) (LEAL, 2015).

Ainda segundo Leal (2015), através de tabelas encontra-se o coeficiente de distribuição normal que função da classificação de funcionalidade da via e do local da mesma. Precisa-se também considerar o desvio padrão das variáveis de projeto, sendo essas particulares para cada tipo de pavimento.

O fator de confiabilidade então pode ser calculado pela Equação 2.6.9.

$$\log Mr = -50 Z_r \quad (2.6.9)$$

3.6.5 Estrutura: Materiais e espessuras

É importante a determinação da resistência estrutural mínima dos materiais a serem utilizados. Este valor abstrato permite o cálculo do número estrutural a partir da Equação 2.6.10 (LEAL, 2015).

$$SN = a_1 D_1 + a_2 D_2 m_2 + a_3 D_3 m_3 \quad (2.6.10)$$

onde,

SN = número estrutural;

a_1, a_2, a_3 = valores tabelados de coeficientes estruturais de 3 camadas de pavimento;

D_1, D_2, D_3 = espessuras em polegadas para as camadas do revestimento, base e sub-base respectivamente;

m_2, m_3 = valores tabelados de coeficientes de drenagem dos materiais, em função da permeabilidade e tempo de exposição a saturação.

Os coeficientes estruturais podem também ser obtidos por um gráfico que os relaciona ao módulo de resiliência dos materiais aplicados nas camadas (LEAL, 2015).

3.6.6 O MEPDG

Visando atualizar e corrigir as limitações dos modelos anteriormente propostos o MEPDG é um software que promove a metodologia para o dimensionamento e análise de diversos tipos de pavimentos. Uma das grandes mudanças com a implementação desse guia passa pela quantificação das características do tráfego, que deixa de ser generalizada com a carga por eixo padrão, para considerar todas as cargas por eixo separadamente (FONTENELE, 2011).

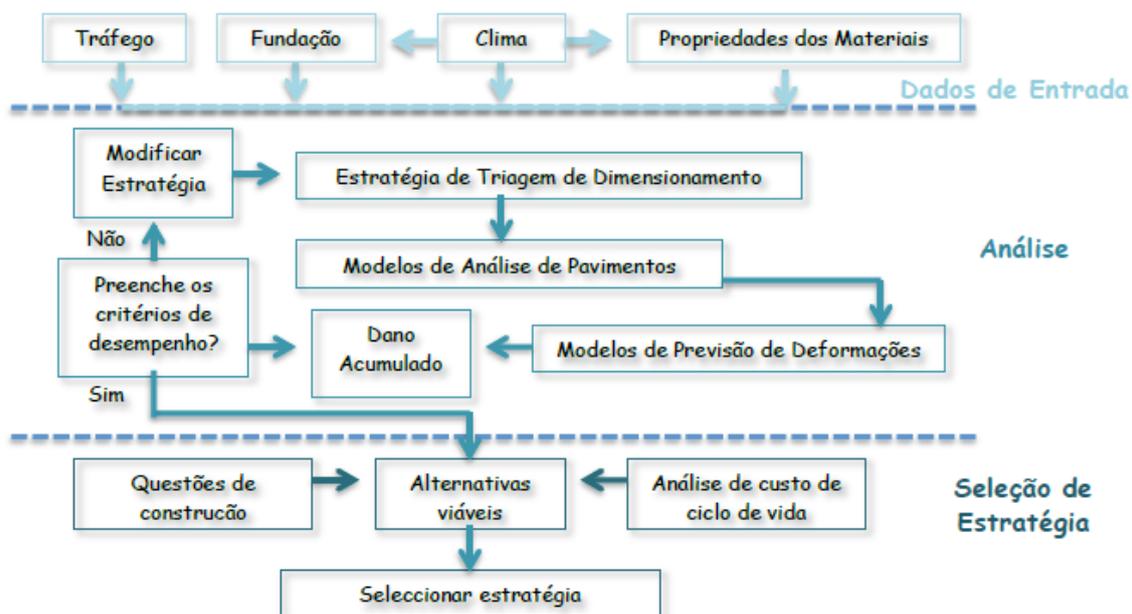
Para Fontenele (2011), essa alteração permite analisar as variações das cargas aplicadas pelo tráfego levando a um dimensionamento mais real da estrutura do pavimento.

O programa gera as respostas do pavimento para as deformações, deslocamentos e tensões com o passar da vida útil determinada, a partir dos dados de tráfego, características dos materiais e das condições ambientais do local. Os valores críticos revistos pelo software são a deformação por fadiga e as deformações permanentes (LEAL, 2015).

O Guia traz o dimensionamento como processo iterativo, analisando os resultados encontrados pelo programa para verificar as estruturas do pavimento que foram sugeridas pelo projetista. Para o caso de a análise do software não for satisfatória quanto aos critérios necessários, precisa-se adequar as inconformidades para uma nova avaliação (AASHTO, 2008 apud LEAL, 2015).

A figura 5 traz o fluxograma que detalha as operações efetuadas pelo programa para dimensionamento de pavimento flexível.

Figura 5: Fluxograma de dimensionamento do software MEPDG



Fonte: Leal (2015)

A etapa de avaliação do projeto compreende a análise dos dados obtidos em campo e em ensaios, sobre a fundação, como o módulo de resiliência, a capacidade de absorção dos solos, efeitos de drenagem e até mesmo as ações do solo devido aos efeitos de gelo e degelo. Se faz necessário também as variáveis de tráfego, condições climáticas, a estrutura do pavimento e a propriedade dos materiais (LEAL, 2015).

Segundo LEAL (2015), para a obtenção do tráfego, calcula-se o tráfego médio diário anual (TMDA) da via, o número de vias, e a quantidade de veículos pesados em cada sentido da via. De acordo com cada classe de veículos pesados é necessário encontrar a taxa de crescimento, os fatores de distribuição mensal e horária e a percentagem total destes veículos.

Para considerar as condições climáticas, as considerações são as mesmas citadas acima no texto. São analisados os dados de temperatura, precipitação e umidade, de acordo com a sazonalidade do clima, para analisar o comportamento das camadas do pavimento de acordo com a vida útil de projeto.

Então são introduzidos no software também os dados sobre a estrutura e as propriedades dos materiais aplicados, como os materiais

utilizados e a espessura de cada camada. O coeficiente de Poisson, as temperaturas de referência e a quantidade de vazios do betume aplicado, também são dados de entrada importantes para o funcionamento do programa. Quando se tratando de material granular, é solicitado o índice CBR ou o módulo de deformabilidade do material, assim como o coeficiente de Poisson e a distribuição granulométrica (LEAL, 2015).

Segundo Leal (2015), após a entrada de todos os dados solicitados, se dá início a etapa de análise feita pelo software. O processo ocorre a partir da escolha de um dimensionamento obtido em catálogos ou metodologias de dimensionamentos já existentes. Caso o dimensionamento não seja satisfatório de acordo com os critérios desejados, é necessário modificar alguns parâmetros de entrada para reiniciar a análise, até que os resultados ideais sejam encontrados. Ao final de todo o processo é retornado em formato de arquivo, todos os dados e resultados, assim como o comportamento do pavimento ao longo do tempo de projeto.

Em um último momento, são avaliadas as alternativas mais viáveis estruturalmente, quanto ao ciclo de custo de vida de cada uma das opções (LEAL, 2015).

4. Resultados e Discussão

Este estudo visa comparar a metodologia aplicada em ambos os países para o dimensionamento de pavimentos flexíveis. Não serão abordados exemplos práticos de cálculo para esta comparação, desse modo os critérios ficam restritos às generalidades e particularidades de cada modelo aplicado.

O quadro 3 traz um resumo da comparação entre as metodologias que são empregadas, de acordo com os principais pontos considerados. Após a observação dos dados será discorrido etapa por etapa os métodos abordados.

Quadro 3 - Comparação entre as metodologias atualmente utilizadas.

	DNIT	AASHTO
Tráfego	Considera o eixo padrão de 8,2 tf	Considera o eixo padrão de 8,2 tf
	Não considera o Módulo de Resiliência	Considera o Módulo de Resiliência
	Simplifica o tráfego de veículos para a quantidade de eixos padrão	Considera o tráfego anual de veículos pesados divididos por classe
Fator Climático	Valor utilizado para todo o país	Valores divididos em 3 zonas do país
	Média final dos coeficientes sazonais de um ano	Considera a temperatura equivalente anual
	Varia com a umidade dos materiais durante as estações do ano	Utiliza o ponto central de 3 subcamadas do pavimento para a determinação
Características dos Materiais e Espessuras	Considera o índice CBR	Considera o índice CBR
	Considera o Módulo de Resiliência	Considera o Módulo de Resiliência
	Considera o coeficiente de equivalência estrutural	Considera o coeficiente de equivalência estrutural
		Considera o coeficiente de Poisson
		Considera o coeficiente de drenagem dos materiais
Confiabilidade	Não se calcula o fator de confiabilidade	Calcula-se o fator de confiabilidade para as variações climáticas e de tráfego do tempo de projeto

Considerando que o MEPDG já é a metodologia aplicada nos Estados Unidos, constatou-se que o método do DNIT traz muitas generalizações que transformam em uma análise mais facilitada que foge em

alguns momentos da realidade. Considerar o fator climático igual para todas as regiões do país, ocasiona uma falta de observação que a ação da temperatura ambiente pode causar no pavimento, como deformações elásticas.

4.1 Dimensionamento do Tráfego

O modelo adotado pelo DNIT considera o eixo padrão simples de 8,2 tf para o cálculo do volume de tráfego da via. Até 2002 essa também era a forma utilizada pela AASHTO, porém com a criação do MEPDG passou-se a ser estudado todas as classes de veículos separadamente para analisar o efeito das alterações de carga sobre o pavimento, o que implica em um modelo mais real de dimensionamento do pavimento.

4.2 Fator Climático

Através dos estudos realizados, o DNIT leva em consideração para a utilização do CBR, a variação da umidade dos materiais de acordo com a sazonalidade climática do Brasil, a variação e repetição do eixo padrão simples e a espessura do pavimento, durante o tempo de projeto. Neste caso o mesmo valor é adotado para todas as regiões do país.

Nos Estados Unidos, além da consideração das variações anuais de temperatura, este efeito é analisado para todas camadas do pavimento utilizando como referência seus pontos centrais, pois é onde se encontra a maior deformação permanente. Outra particularidade desta metodologia é a utilização da medição das temperaturas do pavimento em 3 diferentes áreas do país, evitando a generalização do modelo proposto pelo DNIT.

4.3 Características dos Materiais e espessuras

Apesar de diferirem nos ensaios, ambos os modelos utilizam do índice CBR e do módulo de resiliência para caracterizar a capacidade dos materiais a serem utilizados no pavimento. Ambos ainda propõe a utilização do coeficiente de equivalência estrutural, necessário para o cálculo da espessura de cada camada. Para a utilização do software MEPDG ainda é necessário utilizar o coeficiente de Poisson dos materiais.

Para o cálculo das espessuras, o modelo brasileiro simplifica para a obtenção do valor da espessura total através de um ábaco, e a partir daí

encontrar para as subcamadas. Já o modelo norte americano depende de outras variáveis e valores tabelados como o coeficiente de drenagem dos materiais e o número estrutural.

4.4 Confiabilidade

Diferentemente do DNIT, para o dimensionamento de pavimentos a AASHTO ainda considera um fator de confiabilidade. Esta análise é relevante para se determinar a capacidade da rodovia de corresponder ao tempo de vida útil de projeto, levando em consideração ainda o acréscimo das variáveis e o comportamento da via com o passar do tempo.

4.5 Situação Atual do Brasil

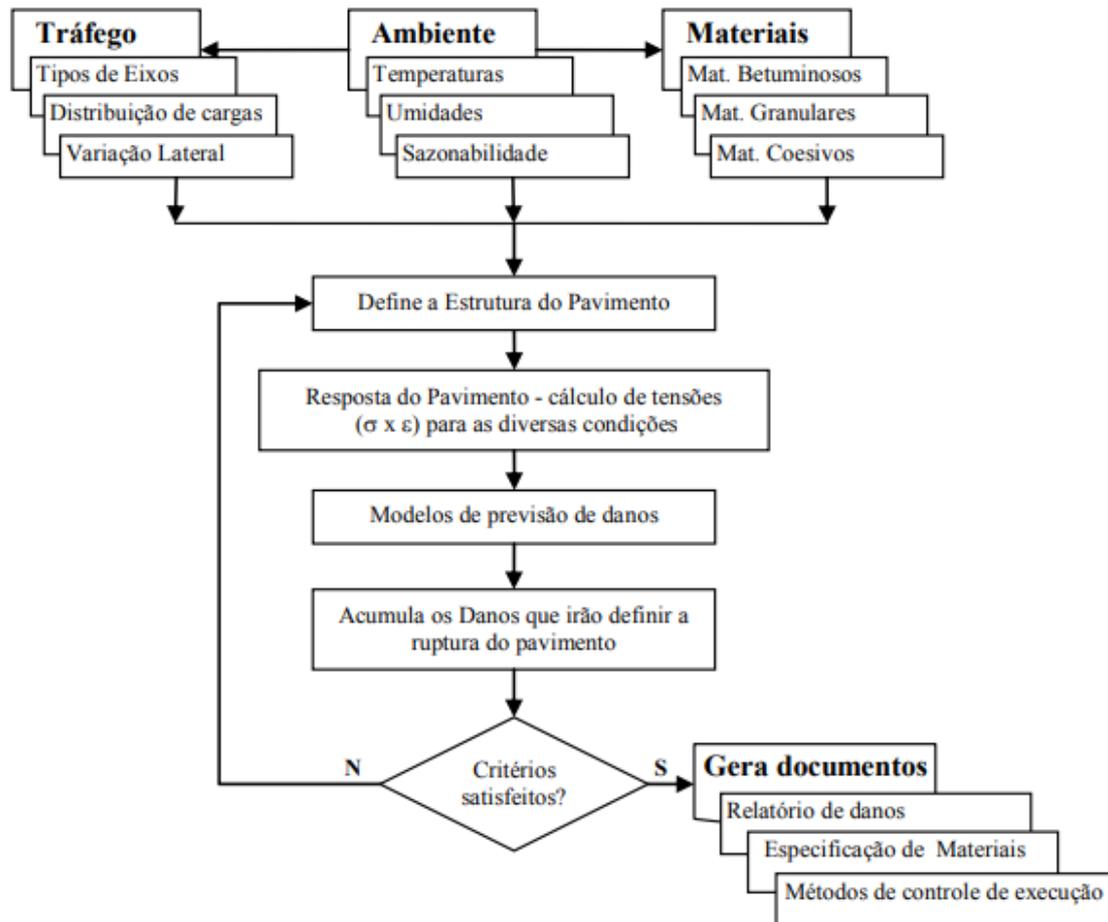
Cada modelo tem suas particularidades e atendem as demandas necessárias para suas localidades. A busca por melhorias e otimização do processo de dimensionamento, faz com que os órgãos busquem soluções constantemente. Exemplo este é o software MEPDG, que após a entrada dos dados necessários gera as análises e avalia a viabilidade dos projetos propostos.

No Brasil existem vários programas que seguem esta ideia. Muitos atendem demandas locais, porém o DNIT já trabalha para utilizar o software SisPav. Com o intuito de realizar de forma mais simplificada e prática análises a respeito do dimensionamento do pavimento, seu modelo segue os padrões de outros programas já existentes, inclusive o utilizado pela AASHTO.

Ponto importante dessa ferramenta é a possibilidade de realizar duas análises diferentes. Da mesma forma que pode dimensionar a estrutura a partir dos dados de entrada no programa, como clima e características dos materiais, e calcular as espessuras de cada camada, o programa ainda pode somente verificar os dados e requisitos propostos pelo projetista para informar a confiabilidade do projeto.

A figura 6 traz o fluxograma que detalha as operações efetuadas pelo programa SisPav para dimensionamento de pavimento.

Figura 6 - Fluxograma do programa SisPav.



Fonte: Franco (2007).

O quadro 4 compara a utilização do software MEPDG com o SisPav, diante dos mesmos aspectos comparados anteriormente.

Quadro 4- Comparação entre SisPav e MEPDG

	SisPav	MEPDG
Tráfego	Considera todos os tipos de classes e eixos	Considera todos os tipos de classes e eixos
	Considera o Módulo de Resiliência	Considera o Módulo de Resiliência
	Simplifica o tráfego de veículos para a quantidade de eixos padrão	Considera o tráfego anual de veículos pesados divididos por classe
Fator Climático	Valor utilizado para as diferentes regiões do país	Valores divididos em 3 zonas do país
	Média final dos coeficientes sazonais de um ano	Considera a temperatura equivalente anual
	Não considera a variação de umidade sobre os materiais	Utiliza o ponto central de 3 subcamadas do pavimento para a determinação
	Considera o mês em que se houve a abertura de tráfego	
Características dos Materiais e Espessuras	Considera o índice CBR	Considera o índice CBR
	Considera o Módulo de Resiliência	Considera o Módulo de Resiliência
	Considera o coeficiente de equivalência estrutural	Considera o coeficiente de equivalência estrutural
	Considera o coeficiente de Poisson	Considera o coeficiente de Poisson
		Considera o coeficiente de drenagem dos materiais
Confiabilidade	Calcula-se a confiabilidade do projeto	Calcula-se o fator de confiabilidade para as variações climáticas e de tráfego do tempo de projeto

Ao analisar este quadro é possível verificar as alterações que o programa SisPav traz para o dimensionamento de pavimentos flexíveis. Ainda

em fase final de implementação o software elimina as generalizações de classe e eixo padrão, passando a calcular o tráfego de veículos pesados separadamente, como é feito no MEPDG. Além disso, passa a utilizar valores de temperatura para cada região do país, permitindo até a entrada de novos dados no programa, caso a região não seja conhecida.

Apesar de ainda não considerar o coeficiente de drenagem dos materiais e não utilizar mais a variação de umidade destes, incorporar o coeficiente de Poisson é um avanço importante na projeção das deformações que a estrutura pode sofrer. Outro avanço relevante que o assemelha ao MEPDG é o fato de o programa conseguir verificar a confiabilidade do projeto através dos dados de entrada do projetista.

5. Conclusão

Foi possível verificar devido ao fato do método brasileiro ter sido baseado no norte americano, as semelhanças existentes entre ambas as metodologias. Cada adaptação feita para suas devidas aplicações são válidas e atendem aos objetivos necessários.

Os objetivos do trabalho foram atingidos uma vez que os softwares consideram o módulo de resiliência, e no caso do SisPav o coeficiente de Poisson passou também a ser verificado, o que já era feito no modelo do MEPDG. Entender todas as propriedades dos materiais aplicados é importante para se prever o comportamento das camadas do pavimento. Introduzir as relações do módulo de resiliência e coeficiente de Poisson nas metodologias de dimensionamento, ajuda no entendimento quanto às deformações elástica, radial e axial da estrutura.

A evolução tecnológica abre espaço para novos métodos de dimensionamento de pavimentos. O surgimento dos softwares como o MEPDG implica em um dimensionamento mais real trazendo mais confiabilidade e segurança. Já em fase final de implementação, e considerando as características dos materiais citadas acima, o SisPav vem com o mesmo objetivo, criando uma boa expectativa as situações futuras das estradas brasileiras.

6. Propostas Futuras

Em função do tempo para a conclusão deste trabalho, fica a recomendação de um estudo para o desenvolvimento de um catálogo de dimensionamento para a região de Teófilo Otoni – MG, juntamente com a comparação de estruturas de pavimentos para esta localidade. O intuito desta proposta é disponibilizar um auxílio e alternativas, aos projetistas para a escolha dos melhores materiais a serem utilizados.

Para a determinação destes materiais através do catálogo, é aconselhado seguir o roteiro que segue:

1. Obter o tráfego de projeto (N) da via através da Equação 2.5.1.
2. Determinar as características do solo para obter os parâmetros admissíveis para cada camada do pavimento através do índice CBR e do coeficiente de equivalência estrutural (K).
3. Selecionar no catálogo as estruturas que atendam às características necessárias.
4. Comparar as alternativas de acordo com as características e o custo total de execução para adotar a melhor.

Referências

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas—**NBR 9935: Agregados – Terminologia**. Rio de Janeiro, 2005.

AASHTO. **Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide - A manual of practice**. Interim Edition. Washington, 2008.

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

BALBO, J. T. **Pavimentos de Concreto**. 1ª Reimpressão. Oficina de Textos, São Paulo, 2012.

BERNUCCI, L.&MOTTA, L.&CERRATI, J.&SOARES, J. **Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros**. Rio de Janeiro, 2008.

Confederação Nacional do Transporte. **Conheça os 13 principais defeitos do pavimento das rodovias**, 2018. Disponível em: <<http://www.cnt.org.br/imprensa/noticia/conheca-principais-defeitos-pavimento>>. Acesso em: 06 ago. 2018.

DIAS, J. **Estudo de Reforço do Pavimento da EN 333-3 entre a A25 e Oliveira de Frades**. Tese de Mestrado em Engenharia Civil, F.C.T.U.C., Coimbra, 2009.

DNER-ME 138/94: **Misturas asfálticas: Determinação da resistência à tração por compressão diametral - método de ensaio**. Rio de Janeiro, 1994.

DNER-ME 035/95: **Peneiras de malhas quadradas para análise granulométrica de solos**. Rio de Janeiro, 1995.

DNIT: **Manual de pavimentação**. 3ª ed. Rio de Janeiro, 2006.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro) **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2ª ed. Rio de Janeiro, 2006.

FERNANDES, C.G. **Caracterização mecânica de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição dos municípios do Rio de Janeiro e de Belo Horizonte para uso em pavimentação.** Dissertação de Mestrado – Coordenação dos Programas de Pós-graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

FONTENELE, H.B. **Representação do Tráfego de Veículos Rodoviários de Carga através de Espetros de Carga e seu Efeito no Desempenho dos Pavimentos.** Tese de Doutorado. São Carlos, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2011.

FRANCO, F. **Método de Dimensionamento Mecânico-Empírico de Pavimentos Asfálticos – SISPAV.** Tese de Pós-Graduação, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2007.

LEAL, L.M.A.T. **Modelação Numérica e Metodologias de Dimensionamento Estrutural de Infraestruturas Rodoviárias e Ferroviárias: Estado da Arte e Estudo Comparativo.** Dissertação de Mestrado. Técnico Lisboa, Universidade de Lisboa, 2015.

MARQUES, G.L.O. **Notas de Aula da Disciplina Pavimentação – TRN 032.** Faculdade de Engenharia, Universidade Federal de Juiz de Fora, 2006.

MEDINA, J. **Mecânica dos pavimentos.** 1ª ed., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 1997.

NETO, R.S.B. **Análise Comparativa de Pavimentos Dimensionados Através dos Métodos Empíricos do DNER e Mecânico e Proposta de um Catálogo Simplificado de Pavimentos para a Região de Campo Grande (MS).** Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos da USP. São Carlos, 2004.

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

QUEIROZ, C. A. V. **Modelos de previsão de desempenho para a gerência de pavimentos no Brasil.** Tese de Doutorado. Ministério dos Transportes – GEIPOT/DNER. 1984.

RODRIGUEZ, J. P. L. **Análise e Aplicação do Método de Dimensionamento de Pavimento da AASHTO.** Coimbra, 2013.

SENÇO, W. **Manual de Técnicas de Pavimentação.** 1ªed. São Paulo, v.1. São Paulo, 1997.

SENÇO, W. **Manual de Técnicas de Pavimentação.** 1ªed. São Paulo, v.2. São Paulo, 1997.

SENÇO, W. **Manual de Técnicas de Pavimentação.** 2ªed. São Paulo, v.1. São Paulo, 2007.

SOLOS, E. **Sistema brasileiro de classificação de solos.** Centro Nacional de Pesquisa de Solos: Rio de Janeiro, 2013.

SOUZA, M. L. **Método de Projeto de Pavimentos Flexíveis.** IPR/DNER. 3ªed. Rio de Janeiro, 1981.

TRICHÊS, G. **Apostila da disciplina de Pavimentação de Estradas.** Laboratório de Mecânica dos Solos e de Pavimentação. Departamento de Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina. Santa Catarina, 2013.

YODER, E. J., Witczak, M. W. **Principles of Pavement Design.** 2ª ed. New York, 1991.

YODER, E. J., Witczak, M. W. **Principles of Pavement Design.** New York, 1975.

