



**ANÁLISE COMPARATIVA NA APLICAÇÃO DE
MÉTODOS EXPEDITOS PARA DIMENSIONAMENTO
DE PAVIMENTOS**

Rita de Cássia Rodrigues

Relatório Final de Dissertação Apresentado à:
Escola Superior de Tecnologia e Gestão Instituto Politécnico

Para a Obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia da Construção

Novembro, 2020



**ANÁLISE COMPARATIVA NA APLICAÇÃO DE
MÉTODOS EXPEDITOS PARA DIMENSIONAMENTO
DE PAVIMENTOS**

Rita de Cássia Rodrigues

Relatório Final de Dissertação Apresentado à:
**Escola Superior de Tecnologia e Gestão Instituto Politécnico de
Bragança**

Para a Obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia da Construção
No âmbito da Dupla Diplomação com a UniEvangélica

Orientador:
Professor Doutor Manuel Joaquim da Costa Minhoto

Novembro, 2020

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, aos meus pais, Jaqueline e Adilson, pelo apoio durante toda minha vida e pelo incentivo recebido por eles em minha jornada acadêmica, além da oportunidade única oferecida de realizar um sonho, o intercâmbio.

Aos meus padrinhos, Zilma e Divino, ao meu irmão Kayque, e ao meu namorado Bruno Felipe, por sempre se fazerem presentes nos momentos difíceis e por também serem merecedores de todas as minhas conquistas.

Aos amigos que fiz durante esses cinco anos de faculdade, em especial, Maria Cristina, Janaína, Issan, responsáveis por fazerem o dia-a-dia mais leve e por promoverem momentos inesquecíveis e histórias memoráveis tornando o intercâmbio uma experiência única fazendo nos sentir em casa, repletos de alegria, atenção e carinho.

Ao Professor Doutor Manuel Joaquim da Costa Minhoto por toda orientação, dedicação, paciência e por estar sempre disposto a ajudar e a encontrar as melhores soluções possíveis para o desenvolvimento da tese. Bem como pela avaliação criteriosa e críticas relativas ao texto original.

RESUMO

Este trabalho detalha um estudo acadêmico sobre a análise e aplicação dos métodos de dimensionamento de pavimentos pelo manual brasileiro e manual português. Os pavimentos flexíveis são os mais representativos na rede de estradas tanto nacional quanto internacionalmente. O que faz com que, a cada dia as exigências de desempenho e qualidade dos pavimentos rodoviários cresçam, levando a repensar nas metodologias de dimensionamento utilizadas atualmente.

Neste trabalho aborda-se a análise comparativa entre duas metodologias de dimensionamento. Os métodos a serem estudados são o Método empírico brasileiro DNER proposto pelo Departamento Nacional de Estradas e Rodagem atualmente chamado de Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte (DNIT) e o método expedito português MACOPAV (Manual de Concepção de Pavimentos para a Rede Rodoviária Nacional) proposto pela Junta Autónoma de Estradas (JAE) que atualmente se designa por Infraestruturas de Portugal (IP). Com base nos manuais referidos foram obtidas soluções de pavimento resultante de diversas situações de carregamento e de fundação, em termo de espessuras finais das camadas do pavimento, e após esta análise, realizaram-se comparações entre os métodos, abordando os tipos de estruturas, espessuras, materiais e vida útil do pavimento. Conclui-se que das variadas estruturas tipo resultantes, não se encontram diferenças significativas em termos de espessura e materiais utilizados, observa-se que o pavimento português é dimensionado para um tempo de vida útil de 20 anos onde este se torna um pavimento de custo elevado em sua fase de construção. Para o pavimento brasileiro este dimensionamento é feito para um período de 10 anos, visando um menor custo por tempo de vida útil de construção. Porém, este requer mais intervenções de conservação e reabilitação para uma vida útil correspondente do método português, gerando um custo mais alto que este.

PALAVRAS-CHAVE: Métodos de dimensionamento, MACOPAV, DNER, Pavimentos flexíveis.

ABSTRACT

This work details an academic study on the analysis and application of pavement sizing methods by the manual standards and Brazilian manual and Portuguese manual. Flexible pavements are the most representative in the road network both nationally and internationally. Which makes the performance and quality requirements of road pavements grow every day, leading to rethinking the sizing methodologies currently used. This paper addresses the comparative analysis between two sizing methodologies. The methods to be studied are the Brazilian empirical method DNER proposed by the National Department of Roads and Routing, currently called the National Department of Infrastructure and Transport (DNIT); and the expeditious Portuguese method MACOPAV (Floor Design Manual for the National Road Network) proposed by the Autonomous Board of Roads (ex JAE), currently known as Infraestruturas de Portugal (IP). Based on the aforementioned manuals, pavement solutions resulting from various loading and foundation situations were obtained, in terms of the final thicknesses of the pavement floor layers, and after this analysis, comparisons were made between the methods, addressing the types of structures, thicknesses, materials and useful floor life of the pavement. It is concluded that of the various resulting type structures, there are no significant differences in terms of thickness and materials used, it is observed that the Portuguese pavement is designed for a service life of 20 years where it becomes a high-cost floor in its construction phase. For the Brazilian pavement, this design is done for 10 years, aiming at a lower cost per service life, but this requires constant maintenance, which ends up generating a higher cost compared to the other method.

KEY-WORDS: Methods of dimensioning; MACOPAV; DNER; flexible pavement.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	15
1.1.	CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	15
1.2.	ENQUADRAMENTO DO TEMA	16
1.3.	ÂMBITOS E OBJETIVOS.....	18
1.4.	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	18
2.	MÉTODOS EXPEDITOS DE DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS.....	20
2.1.	MÉTODO EXPEDITO DE DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS MACOPAV	22
2.1.1.	Objetivo do Manual	22
2.1.2.	Tráfego	23
2.1.2.1.	Fator de Agressividade.....	25
2.1.3.	Condições Climáticas.....	27
2.1.4.	Fundação do Pavimento	29
2.1.5.	Materiais de Pavimentação.....	31
2.1.5.1.	Materiais Granulares	31
2.1.5.2.	Materiais Betuminosos	33
2.1.5.3.	Critérios de Ruína	33
2.1.6.	Estrutura do Pavimento	35
2.1.7.	Perfis Transversais	37
2.2.	MÉTODO EMPIRICO DE DIMENSIONAMENTO DO DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM (DNER)	38
2.2.1.	Considerações Iniciais.....	38
2.2.2.	Objetivo do Manual	38
2.2.3.	Áreas de Atuação e Competências do DNIT.....	38
2.2.4.	Etapas de Dimensionamento do Método DNER	39

2.2.4.1.	Determinação dos Materiais	39
2.2.4.2.	Determinação do Tráfego	41
2.2.4.3.	Fator Regional Climático	43
2.2.4.4.	Estrutura do Pavimento	44
2.2.4.5.	Dimensionamento de Pavimentos.....	45
2.2.5.	Tipo e Espessura Mínima da Camada de Revestimento	46
2.2.6.	Espessura das demais Camadas	47
2.2.7.	Bermas.....	49
3.	APLICAÇÃO DOS MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO	50
3.1.	CONCEPÇÃO DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS SEGUNDO O MÉTODO EXPEDITO MACOPAV	50
3.1.1.	Parâmetros de Projeto.....	50
3.1.2.	Tráfego	50
3.1.3.	Zona Climática.....	51
3.1.4.	Classe de Fundação	51
3.1.5.	Classe de Betume	51
3.1.6.	Materiais	51
3.1.7.	Dimensionamento	53
3.2.	CONCEPÇÃO DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS SEGUNDO O MÉTODO EMPIRICO DNER.....	54
3.2.1.	Definição do Tráfego	54
3.2.2.	Espessura de Revestimento	55
3.2.3.	Determinação do Índice de Suporte Califórnia (CBR)	55
3.2.4.	Coeficiente de Equivalência Estrutural.....	56
3.2.5.	Dimensionamento	57
4.	RESULTADOS E ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE OS MÉTODOS DE ESTUDO	58
4.1.	RESULTADOS OBTIDOS NO DIMENISONAMENTO.....	58

4.1.1. Fundação.....	63
4.1.2. Tráfego	64
4.1.3. Estruturas Resultantes	65
5. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	70
5.1. CONCLUSÕES.....	70
5.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	71
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Ranking do Relatório de Competitividade Global 2016-2017. (CNT, 2017)	15
Tabela 2: Ranking de Qualidade de Rodovias. (CNT - World Economic Forum, 2016-2017)	16
Tabela 3: Classificação de veículos segundo JAE (Adaptado de JAE,1995)	24
Tabela 4: Classificação de Tráfego (Adaptado de JAE, 1995)	25
Tabela 5: Fatores de agressividade do tráfego (Adaptado de JAE, 1995)	26
Tabela 6: Elementos do tráfego para o dimensionamento de pavimentos flexível e solicitação do eixo padrão (Adaptado de JAE, 1995)	27
Tabela 7: Classe de betume por zona térmica (adaptado de JAE, 1995)	29
Tabela 8: Classes de fundação (Adaptado de JAE, 1995)	30
Tabela 9: Definição das camadas de leito de pavimento em materiais não ligados (Adaptado de JAE, 1995)	30
Tabela 10: Classe de terrenos de fundação (Adaptado de JAE,1995)	31
Tabela 11: Características de deformabilidade dos materiais granulares (Adaptado de JAE,1995)	32
Tabela 12: Materiais granulares constituintes das estruturas dos pavimentos flexíveis	32
Tabela 13: Materiais betuminosos aplicados nas camadas das estruturas do pavimento flexível	33
Tabela 14: Classificação dos materiais granulares empregados nos pavimentos (Adaptado de Souza, 1981)	40
Tabela 15: Percentagem passada nos peneiros	40
Tabela 16: Espessura mínima do revestimento. (Adaptado de Souza, 1981)	47
Tabela 17: Coeficientes de equivalência estrutural. (Adaptado de DNIT, 2006)	48
Tabela 18: Características das misturas betuminosas (Adaptado de JAE, 1995)	52
Tabela 19: Coeficiente de Poisson para materiais de pavimentação. (Adaptado de JAE, 1995)	52
Tabela 20: Composição volumétrica para materiais de pavimentação. (Adaptado de JAE, 1995)	53
Tabela 21: Equivalência entre o tráfego nos dois dimensionamentos	54

Tabela 22: Valores de CBR usados no dimensionamento DNER	56
Tabela 23: Cálculo do Ndim (10 anos).....	59
Tabela 24: Resultados obtidos dos dimensionamentos	61
Tabela 25: Resultados obtidos dos dimensionamentos	62

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Distribuição das zonas climáticas em Portugal Continental (CEPSA, 2014)	28
Figura 2: Representação gráfica de um pavimento flexível	35
Figura 3: Estrutura-tipo de pavimento flexível (Adaptada de JAE, 1995).....	36
Figura 4: Estrutura de pavimento para as classes T1 e F3 (CEPSA, 2014; Adaptado de JAE, 1995).....	37
Figura 5: Resposta mecânica do pavimento flexível. (Balbo, 2007)	39
Figura 6: Fatores de equivalência de operação. (DNIT, 2006).....	43
Figura 7: Estrutura do pavimento flexível. (Bernucci, 2010).....	45
Figura 8: Estrutura do pavimento rígido.(Bernucci, 2010)	45
Figura 9: Ábaco de dimensionamento de pavimentos flexíveis utilizado	46
Figura 10: Dimensionamento dos pavimentos. (Souza, 1981).	46
Figura 11: Resultantes das camadas betuminosas para estrutura-tipo 1; tráfego T1; 65	
Figura 12: Resultantes das camadas granulares para estrutura-tipo 1; tráfego T1; ...	65
Figura 13: Resultantes das camadas betuminosas para estrutura-tipo 1; tráfego T5; 66	
Figura 14: Resultantes das camadas granulares para estrutura-tipo 1; tráfego T5; ...	66
Figura 15: Resultantes das camadas betuminosas para a estrutura-tipo 2; tráfego T1;	67
Figura 16: Resultantes das camadas betuminosas para a estrutura-tipo 2; tráfego T5;	67
Figura 17: Resultantes das camadas granulares para estrutura-tipo 2; tráfego T1;	67
Figura 18: Resultantes das camadas granulares para estrutura-tipo 2; tráfego T5; ...	68
Figura 19: Resultantes das camadas betuminosas para estrutura-tipo 3; tráfego T1; 68	
Figura 20: Resultantes das camadas granulares para estrutura-tipo 3; tráfego T1; ...	69
Figura 21: Resultantes das camadas betuminosas para estrutura-tipo 3; tráfego T5; 69	
Figura 22: Resultantes das camadas granulares para estrutura-tipo 3; tráfego T5; ...	69

ÍNDICE DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

AASHO – American Association of State Highway Officials;
AASHTO – American Association of State Highway and Transportation Officials;
ASTM – American Society for Testing and Materials;
B – Espessura da base;
BD – Betão betuminoso;
BG – Material britado sem recomposição aplicado à camada de base;
BGr – Material britado recomposto em central;
BGTC – Brita graduada tratada com cimento;
C – Fator camiãõ;
CEPSA – Compañia Española de Petróleos, S.A.U.;
CBR – California Bearing Ratio;
CNT – Confederação Nacional de Transportes;
CBUQ – Concreto Betuminoso Usinado a Quente;
DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem;
DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes;
 E = Módulo de deformabilidade;
 E_f – Módulo de deformação do leito do pavimento;
FV – Fator de veículo da frota;
FR – Fator climático regional;
FE – Fator de eixos;
FC – Fator de carga;
GN – Material não britado;
 H_{20} – Espessura do pavimento necessária para proteger a sub-base;
 h_{20} – Espessura da sub-base;
 H_n – Espessura do pavimento necessária para proteger o reforço do subleito;
 h_n – Espessura do reforço do subleito;
 H_m – Espessura total do pavimento necessária para proteger o material com CBR igual a m%;
 $IPen$ – Índice de penetração;
IP- Infraestrutura de Portugal;
JAE – Junta Autónoma de Estradas;

K – Coeficiente estrutural;
 K_B – Coeficiente de equivalência estrutural de base;
 K_R – Coeficiente de equivalência estrutural do revestimento;
 K_S – Coeficiente de equivalência estrutural da sub-base;
 K_{REF} – Coeficiente de equivalência estrutural do reforço do subleito;
 MACOPAV – Manual de Concepção de Pavimentos para a Rede Rodoviária Nacional;
 MB – Macadame betuminoso;
 MBD – Macadame betuminoso denso;
 MMAT – Temperatura ambiente média mensal;
 N – Número de operações do eixo padrão de 8,2 t;
 NEP – Número de passagens de um eixo-padrão;
 $N_{80\ dim}$ – Número de dimensionamento de eixos-padrão;
 N_i – Número de passagens de um eixo de peso i ;
 P – Período de projeto em anos;
 P_i – Peso bruto de intensidade i ;
 PEP – Peso bruto de um eixo-padrão;
 Pen_{25r} – Penetração do betume a 25 °C;
 PMQ – Pré misturado a quente;
 R – Espessura do revestimento;
 SbG – Material britado sem recomposição aplicado á camada de sub-base;
 SUCS – Sistema Unificado de Classificação de Solo;
 SS – Solo selecionado;
 t_c = Tempo de carregamento;
 TMDAp – Tráfego médio diário anual de veículos pesados;
 T_{abr} – Temperatura de amolecimento anel-bola;
 USACE – The U.S. Army Corp Engineerings;
 V_m – Volume médio diário de tráfego em um sentido;
 va – Quociente entre volume de agregado e o volume total da mistura;
 vb – Quociente entre volume de betume e o volume total da mistura.
 w -MAAT – Temperatura média anual ponderada.
 α – Parâmetro que reflete o tipo de ruína de base;
 γ – Fator de conversão dos eixos;

αI – Fator de agressividade do tráfego;

1. INTRODUÇÃO

1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Segundos dados divulgados pela Comissão Europeia destinados a avaliar a qualidade das estradas nos Estados-Membros, Portugal é o segundo país da União Europeia com as melhores estradas com uma avaliação de 6,05 pontos em uma escala de 1 a 7. À frente do país surge a Holanda com uma pontuação de 6,18 pontos, enquanto a França apresenta-se em terceiro lugar com 5,95 pontos.

Esta classificação, baseia-se em uma pesquisa do Fórum Econômico Mundial, onde coloca Portugal a frente de países como a Alemanha (5,46 pontos), Espanha (5,63 pontos) ou a Suécia (5,57 pontos). Em nível de sinistralidade rodoviária, o relatório aponta que em Portugal regista uma diminuição no número de mortes nas estradas por milhão de habitante desde 2010 e encontra-se agora perto da média da União Europeia com um registo de 58 mortes por milhão de habitante, enquanto a média no conjunto da união é de 49 mortes. (CE, 2017)

Em Portugal os pavimentos flexíveis são projetados para uma vida útil de 20 anos, enquanto no Brasil os pavimentos possuem uma duração média de 8 a 12 anos. Segundo relatórios do TCU (Tribunal de Contas da União) de 2013, o pavimento das rodovias sob gestão pública apresenta problemas estruturais precocemente, cerca de sete meses depois da entrega da obra. O Brasil ocupa a 111ª posição (entre 138 países) no ranking do Relatório de Competitividade Global 2016-2017. Cerca de 99% da malha rodoviária pavimentada é de pavimento flexível, e apenas 12,3% das rodovias brasileiras são pavimentadas (211.46 km de 1.720.756 km) possuindo assim uma densidade muito baixa em relação a outros países, ver Tabela 1. (CNT, 2017)

Tabela 1: Ranking do Relatório de Competitividade Global 2016-2017. (CNT, 2017)

País	Posição no ranking (de 138 países)	Pontuação (1 a 7)
Japão	5	6,1
Portugal	9	5,9
Estados Unidos	13	5,6
Brasil	111	3,0

Os países com as melhores colocações no ranking de qualidade de rodovias segundo o relatório de Competitividade Global, conforme a Tabela 2 são:

Tabela 2: Ranking de Qualidade de Rodovias. (CNT - World Economic Forum, 2016-2017)

Ranking de Qualidade de Rodovias	
1º	Emirados Árabes Unidos
2º	Singapura
3º	Hong Kong
4º	Holanda
5º	Japão
6º	França
7º	Suíça
8º	Áustria
9º	Portugal
10º	Dinamarca
11º	Taiwan
12º	Finlândia
13º	Estados Unidos

1.2. ENQUADRAMENTO DO TEMA

A qualidade de um pavimento é um indicativo do seu desempenho que, para tanto, passou por diversas etapas consideradas bem sucedidas.

As etapas que precedem à execução de um pavimento começam com o planejamento, que fica sob a responsabilidade dos órgãos rodoviários. Nesta etapa, são definidas as metas em termos de padrões mínimos de qualidade e previsão da vida útil de uma rodovia.

O projeto determina os requisitos de qualidade, a oportunidade de influenciar a qualidade e o custo do pavimento, selecionando a combinação de materiais e espessura do pavimento, necessários para satisfazer as metas definidas pelo planejamento.

Os pavimentos rodoviários têm como a principal função garantir uma superfície de rolamento que permita a circulação dos veículos em boas condições de segurança, economia e comodidade. Um pavimento que seja bem projetado e

executado deverá possuir uma série de características funcionais e estruturais que lhe permita desempenhar as funções para as quais foi concebido.

Para satisfazer estas exigências, devem ser adotadas características estruturais e funcionais que lhe permita suportar, ao longo de sua vida útil, as ações do tráfego e dos agentes climáticos. Estas características devem garantir a integridade da estrutura do pavimento, minimizando também a necessidade de intervenções de conservação e manutenção.

A resposta funcional e estrutural de um pavimento depende de sua estrutura geométrica e mecânica, isto é, depende do número, da espessura e das características mecânicas das camadas constituintes, bem como da fundação que o suporta.

Na maioria dos países Europeus assim como no Brasil, os pavimentos flexíveis são os predominantes na rede rodoviária. Estes pavimentos flexíveis distinguem-se pela sua elevada deformabilidade e pela sua constituição baseada em materiais betuminosos, como:

- Misturas betuminosas nas camadas superiores;
- Materiais granulares em uma ou duas camadas.

As camadas betuminosas são compreendidas por:

- Camadas de desgaste: camada directamente em contacto com os rodados dos veículos, recebe as cargas por eles induzidas, distribuindo-as pelas camadas subjacentes;
- Camada de regularização: camada responsável pelo nivelamento da espessura do pavimento, recebe e degrada as cargas provenientes da camada de desgaste;
- Camada de base betuminosa: camada responsável, essencialmente, por degradar os esforços induzidos pelo tráfego para as camadas inferiores (sub-base e fundação). (Brás, 2012).

O Manual de Concepção de Pavimentos para a Rede Rodoviária Nacional JAE (1995) utilizado em Portugal, posteriormente mencionado como MACOPAV no

presente documento, trata-se de um manual que consiste em um método expedito e é considerado apenas para pré-dimensionamento de estruturas.

O método de dimensionamento de pavimentos flexíveis de 1966 é, até hoje, o mais utilizado no Brasil: é a metodologia do extinto Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER). Este método apresenta caráter generalista, isto é, várias situações específicas são tratadas de forma média e muitas vezes simplificada. A utilização de modelos generalistas leva a uma análise superficial sobre a situação e especificidades das diversas variáveis que influenciam no desempenho funcional e estrutural de um pavimento.

Por este fato, neste trabalho visa-se a obtenção de resultados a partir da comparação entre os métodos baseados em fundamentos expeditos e empírico.

1.3. ÂMBITOS E OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho consiste na análise dos métodos de dimensionamento usados no Brasil e em Portugal, assim descobrindo suas diferenças e semelhanças ao dimensionar um pavimento, através do dimensionamento para diversos os tipos de tráfegos e de fundação de forma a se poder referir sobre os seus resultados. Observando, analisando as estruturas através das espessuras resultantes dos dimensionamentos.

1.4. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O trabalho que se apresenta está organizado em cinco capítulos, incluindo o presente capítulo de “Introdução”, onde se enquadra o tema em estudo e explicita os objetivos que se pretende atingir e a organização do trabalho.

No capítulo 2 “Métodos expeditos de dimensionamento de pavimentos” introduz-se a utilização dos métodos expeditos e empíricos de dimensionamento, assim como sua evolução e aprimoramento ao longo dos anos. Expõe-se também uma revisão bibliográfica sobre os manuais de pavimentação, sendo o manual Concepção de Pavimentos para a Rede Rodoviária Nacional (Ex JAE, 1995), e o manual de pavimentação (DNIT, 2006) abordando tópicos como: Tráfego, Condições

Climáticas, Fundação do pavimento, Materiais de Pavimentação, Estrutura do Pavimento.

No capítulo 3 “Aplicação dos métodos de dimensionamento” foram realizadas abordagens e situações, combinando fundação (Fi) e tráfego (Ti) para o método MACOPAV. Para o método do DNER as situações de estudo foram feitas a partir de combinações com o número N referente ao tráfego, o CBR referente a fundação e o coeficiente de equivalência estrutural referente ao tipo de material.

No Capítulo 4 “Resultados e análise comparativa entre os métodos de estudo”, apresenta-se os resultados obtidos dos dimensionamentos feitos através do método empírico DNER e o método expedito MACOPAV. Além disso, apresenta-se uma análise comparativa entre os métodos apresentados, a fim de analisar as estruturas e espessuras do pavimento.

Por fim no Capítulo 5 “Conclusões e trabalhos futuros” são apresentadas as conclusões do estudo, com base na análise dos resultados obtidos durante os dimensionamentos. Também faz-se a apresentação de sugestões para trabalhos futuros na área de dimensionamento de pavimentos asfálticos.

2. MÉTODOS EXPEDITOS DE DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS

Entre os mais variados métodos de dimensionamento, o objetivo comum entre eles é a obtenção de um pavimento adequado para cada situação específica. No dimensionamento de pavimentos rodoviários pode ser realizado de uma forma racional, seguindo o modelo empírico-mecanicista como a Shell (1978), AASHTO (2008), Claessen et al. (1977), ou de uma forma empírica AASHTO (1993), através dos catálogos JAE (1995), TRH4 (1996).

O dimensionamento de pavimentos teve uma evolução nas últimas décadas, uma abordagem empírica para uma empírica-mecanicista. Os métodos empíricos consideram a entrada de tráfego representada por uma única carga de roda, bem como as propriedades do solo, com suporte a partir da observação do desempenho do pavimento em campo, em instalações de teste de pista acelerada com pavimento real. (Pereira & Pais; 2007).

A partir da realização do experimento denominado AASHTO (*American Association of State Highway Officials*) Road Test, que tornou-se exemplo para diversos estudos na área de dimensionamento de pavimentos, sendo o responsável por fornecer uma elevada quantidade de informações relacionadas ao comportamento de estruturas rígidas e flexíveis. Os resultados obtidos a partir deste experimento podem ser observados em vários manuais de dimensionamento no mundo, levando-se em consideração suas respectivas particularidades de acordo com o local de aplicação (Ferreira, 2019). O método brasileiro de dimensionamento do DNER tem como base este experimento da AASHO o qual baseia-se fundamentalmente nas características de suporte do solo de fundação e dos materiais que constituem a estrutura do pavimento, bem como parâmetros de tráfego (Neto, 2004). Semelhante ao método DNER, o método *Asphalt Institute* é baseado nos ensaios AASHO, o qual recorre a aplicação de um ábaco para a determinação da espessura total do pavimento, em betão betuminoso em função do CBR do solo de fundação e do índice DNT (*Design traffic number*) representativo do tráfego.

O dimensionamento de pavimentos teve uma evolução nas últimas décadas, de uma abordagem empírica para uma empírica-mecanicista. Os métodos empíricos consideram a entrada de tráfego representada por uma única carga de roda, bem como as propriedades do solo, com suporte a partir da observação do desempenho do

pavimento em campo, em instalações de teste de pista acelerada com pavimento real. (Pereira & Pais; 2007).

Os métodos empíricos são aqueles baseados na experiência acumulada e correlacionam o desempenho do pavimento com algumas propriedades dos materiais utilizados na construção. Possuem a vantagem de serem facilmente empregados, pois os ensaios de caracterização exigidos são simples e não requerem aparelhagem sofisticada. Entretanto, são bastante limitados pelas condições de contorno (materiais de construção, clima de região, condições de tráfego dentre outros) não permitindo uma generalização adequada para outras regiões, novos materiais e diferentes cargas de tráfego (Neto, 2004). O principal objetivo desses métodos é a determinação da espessura das camadas a serem construídas sobre o subleito, a fim de permitir uma circulação de tráfego antes que o pavimento atinja uma condição de rotura predefinida ao final da vida projetada.

Os métodos expeditos são baseados em condições empíricas e, por isso, se tornam frequentemente alvo de dúvidas e discussões sobre sua autenticidade. “A abordagem empírica teve início durante a Segunda Guerra Mundial e representou o principal método de dimensionamento durante quase três décadas.” (Pereira & Pais; 2007).

De uma forma geral, os métodos expeditos apresentam limitações ao uso e à aplicabilidade, se não forem aplicadas à aquelas condições originais que lhe deram origem. Esta falta de flexibilidade dos métodos expeditos é a principal causa de incertezas de resultados. Para isto, os estudos e desenvolvimento de novos métodos vem gradualmente se aprimorando ao longo dos anos, seja por estímulo da investigação científica, seja por iniciativas de instituições rodoviárias de carácter técnico, como por exemplo as Infraestruturas de Portugal (IP) ou do Instituto da Mobilidade e dos Transportes (IMT). (Ferreira, 2019)

2.1. MÉTODO EXPEDITO DE DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS MACOPAV

O Manual de Concepção de Pavimento para a Rede Rodoviária Nacional (MACOPAV), publicado em 1995 é o resultado de um estudo que foi realizado pela Junta Autónoma de Estradas (JAE), atualmente designada por Infraestrutura de Portugal (IP).

O Manual apresentado é dividido em sete fases sequenciais para o dimensionamento de forma a efetuar uma adequadas situações de concepção. Os capítulos em geral se dividem em duas partes, onde na primeira parte apresenta a recolha de dados, na qual se engloba a definição do tráfego, das condições climáticas, da fundação, das condições dos materiais e camadas integrantes da estrutura de pavimentação. Na segunda parte objetiva a obtenção de soluções estruturais que se adequam as diferentes condições de tráfego e fundação a que o pavimento deverá resistir.

2.1.1. Objetivo do Manual

Este manual tem como principal objetivo orientar a concepção de estruturas de pavimento e suas respectivas fundações, que serão adotadas na construção de novas infraestruturas rodoviárias. Além disto o MACOPAV (1995) busca o cumprimento de alguns requisitos como:

- Oferecer ao utente um nível de serviço adequado, permitindo que a circulação se faça em condições de segurança, conforto e economia;
- Corresponder as exigências das diferentes classes de tráfego e taxas de crescimento expectáveis;
- Garantir condições adequadas de fundação para o pavimento, permitindo, simultaneamente, que a sua construção se faça nas melhores condições, e que, após entrada em serviço, se reduza a ocorrência de deficiências e a necessidade de efetuar trabalho de conservação oneroso;

- Melhorar a qualidade dos pavimentos a construir, atuando, designadamente, nas condições de execução das obras, e na especificação de matérias e processos construtivos que tenham em conta os equipamentos atualmente disponíveis;
- Sistematizar, tanto quanto possível, as estruturas de pavimentos rígidos, semi-rígidos e flexíveis que tem vindo a ser adaptados na rede rodoviária nacional;
- Permitir que a junta autónoma de Estradas atual Infraestrutura de Portugal disponha de elementos que facilitem o planeamento, a construção, a avaliação do comportamento, a conservação e a beneficiação dessas infra-estruturas.

2.1.2. Tráfego

Na aplicação do método do MACOPAV considera-se apenas o efeito do tráfego de veículos pesados. São considerados veículos pesados cujo peso seja igual ou superior a 30 kN, incluindo uma larga gama de veículos como os autocarros e os caminhões com ou sem reboque ou semi-reboque. Segundo a metodologia das contagens de tráfego feita pela antiga JAE (atual infraestrutura de Portugal) os veículos pesados são pertencentes as classes F, G, H, I, J e K, ver Tabela 3:

Tabela 3: Classificação de veículos segundo JAE (Adaptado de JAE,1995)

Velocipedes (a+b)	
Categoria	Descrição
a	Velocipede sem motor auxiliar
b	velocipede com motor auxiliar
Ligeiros (c+d+e)	
Categoria	Descrição
c	Motociclos com ou sem "side car"
d	Automoveis com ou sem reboque , incluindo os veiculos comportando o maximo de 9 lugares
e	Caminhonetas até 3000 kg de carga com ou sem reboque
Pesados (f+g+h+i+j+k)	
Categoria	Descrição
f	Caminhões de mais de 3000 kg sem reboque
g	Caminhões com um ou mais reboques
h	Tratores com semireboque
	Tratores com semireboque e um ou mais reboques
	Tratores com um ou mais reboques
i	Autocarros e trolleybus
j	Tratores agricolas
k	Tratores sem reboque ou semirreboque e veiculos especiais (cilindros, bulldozers, etc.)

Através das análises de dados obtidos nos recenseamentos quinzenais feitos pela IP, em postos de contagem distribuídos ao longo da rede, foram definidas classes de tráfego TMDAp (tráfego médio diário anual de veículos que circulam apenas em uma via e um sentido). Em função do TMDAp, o manual considera oito classes de tráfego (T0 ao T7) sendo T7 a classe de tráfego de menor intensidade.

A cada classe de tráfego é associada uma taxa média de crescimento anual geométrica de pesados, sendo dados fundamentais para a previsão do tráfego pesado que solicitará o pavimento durante o seu período de dimensionamento (vida de projeto). O pavimento deve assegurar a circulação do tráfego em dadas condições durante um número de anos, chamado período de dimensionamento. Para os pavimentos flexíveis este período é de 20 anos e para os pavimentos rígidos é de 30 anos.

Para realizar a classificação do tráfego e necessário obter os seguintes dados relativos para a qual se quer projetar o pavimento:

- O tráfego médio diário anual de veículos pesados no ano de abertura nos dois sentidos (TMDA);

- O período de dimensionamento;
- A taxa média de crescimento anual de veículos pesados no período de dimensionamento;
- A distribuição do tráfego pelas vias existentes num dado sentido;

A tabela abaixo indica a classificação das rodovias propostas pelo MACOPAV, em função do TMDAp, bem como suas respectivas taxas média de evolução anual de veículos pesados prevista, como na Tabela 4:

Tabela 4: Classificação de Tráfego (Adaptado de JAE, 1995)

Classes de Tráfego		
Classe	TMDA	Taxa Média de Crescimento anual (%)
T7	<50	Estudo Específico
T6	50 - 150	3
T5	150 - 300	
T4	300 - 500	4
T3	500 - 800	
T2	800 - 1200	5
T1	1200 - 2000	
T0	>2000	Estudo Específico

2.1.2.1. Fator de Agressividade

No sentido de exprimir o efeito de um dado número acumulado de passagens de veículos pesados com geometria e configuração de carga por eixo variado, recorre-se ao conceito de “eixo padrão”, o qual permite quantificar as ações devidas ao tráfego durante o período de vida útil do pavimento. (Brás, 2012). O eixo padrão pode ser adaptado, para tal, fatores de agressividade, cujos valores são definidos no manual em função do tráfego médio diário anual de veículos pesados no ano de abertura, por sentido e na via mais solicitada (TMDAp).

Os fatores de agressividade médios considerados resultam da análise de valores obtidos em estações de pesagem e tiveram em atenção a ocorrência de eixos sobrecarregados, sobretudo nos itinerários de maior volume de tráfego pesado, ver Tabela 5. (ex JAE, 1995)

Tabela 5: Fatores de agressividade do tráfego (Adaptado de JAE, 1995)

Fatores de Agressividade do Tráfego			
Classe de Tráfego	(TMDA)	Fator de agressividade	
		Eixo padrão de 80 kN	Eixo padrão de 130 kN
T ₆	50 - 150	2	0,5
T ₅	150 - 300	3	0,6
T ₄	300 - 500	4	0,7
T ₃	500 - 800	4,5	0,8
T ₂	800 - 1200	5	0,9
T ₁	1200 - 2000	5,5	1,0

Devido a vasta gama de veículos pesados, o manual cria uma forma para efetuar uma homogeneização do tráfego onde os converte em eixo padrão de 80 kN. Para a realização da conversão entre os mais variados tipos de veículos faz-se o uso da expressão (01) a baixo:

$$\frac{N_{EP}}{N_i} = \left(\frac{P_i}{P_{EP}} \right)^\alpha = \gamma \quad (01)$$

Onde:

N_{EP} → Número de passagens de um eixo simples de carga PEP;

N_i → Número de passagens de um eixo simples de carga P_i

γ → Fator de equivalência entre os eixos P_i e PEP;

α → Parâmetro que reflete o tipo de ruína de base da conversão.

O coeficiente de equivalência, γ , exprime o número de passagens do eixo PEP que provoca o mesmo dano que uma passagem de P_i , em termos de um determinado tipo de ruína. O parâmetro α normalmente é igual a 4 (Fadiga), ($\alpha = 11$ para pavimentos semi-rígidos e $\alpha = 33$ para pavimentos rígidos). Esta relação é capaz de traduzir a quantidade de vezes em que o eixo não-padrão deve passar para provocar um dano semelhante a uma passagem do eixo padrão.

Calcula-se então o valor acumulado de eixos padrão de 80 kN para o dimensionamento das estruturas de pavimento propostas (N_{80}^{dim}), representado pela seguinte expressão (02):

$$N_{80}^{dim} = 365 * (TMDA)_p * C * \alpha * p \quad (02)$$

N_{80}^{dim} → Número acumulado de passagens de eixo padrão;
 $(TMDA)_p$ → Tráfego médio diário anual de veículos pesados
 C → Fator caminhão
 α → Fator de agressividade do tráfego
 p → Período de dimensionamento (dado em anos)

O Fator caminhão é o fator de crescimento de tráfego, o qual tem em conta a taxa média de crescimento anual do tráfego pesado t o período de dimensionamento p , dado pela equação (03):

$$C = \frac{(1+t)^p - 1}{p * t} \quad (03)$$

Na Tabela 6 abaixo obtém-se o numero acumulado de eixos padrão para qualquer classe de tráfego.

Tabela 6: Elementos do tráfego para o dimensionamento de pavimentos flexível e solicitação do eixo padrão (Adaptado de JAE, 1995)

Elementos Relativos ao Tráfego						
Classe	(TMDA)	Taxa de Crescimento	Pavimento Flexível		Pavimento Semi-Rígido	
			Fator agressividade (α)	N dim (20 anos)	Fator agressividade (α)	N dim (20 anos)
T7	<50		Estudo Específico			
T6	50 - 150	3	2	$2 * 10^6$	0,5	$5 * 10^5$
T5	150 - 300		3	$8 * 10^6$	0,6	$2 * 10^6$
T4	300 - 500	4	4	$2 * 10^7$	0,7	$4 * 10^6$
T3	500 - 800		4,5	$4 * 10^7$	0,8	$7 * 10^6$
T2	800 - 1200	5	5	$7 * 10^7$	0,9	10^7
T1	1200 - 2000		5,5	10^8	1	$2 * 10^7$
T0	>2000		Estudo Específico			

2.1.3. Condições Climáticas

Os fatores climáticos no dimensionamento de um pavimento, principalmente a temperatura dos pavimentos, dependem da localização geográfica de cada região onde se insere o pavimento a dimensionar. Fenômenos como estes comprometem a

resistência das estruturas e por esse motivo devem ser devidamente considerada na metodologia de dimensionamento. Assim, como em vários países da Europa, em Portugal os métodos de dimensionamento de pavimentos, MACOPAV, deve considerar os efeitos da variação sazonal da temperatura e da variação hídrica.

Fatores como temperatura e umidade dos materiais do pavimento, podem alterar suas propriedades físicas, e a capacidade de suporte das camadas.

O manual também trata de fatores hídricos partindo de sistemas de drenagem e os fatores térmicos por uma distribuição de zonas climáticas em Portugal Continental. A Figura 1 representa a distribuição de três zonas climáticas em todo país.

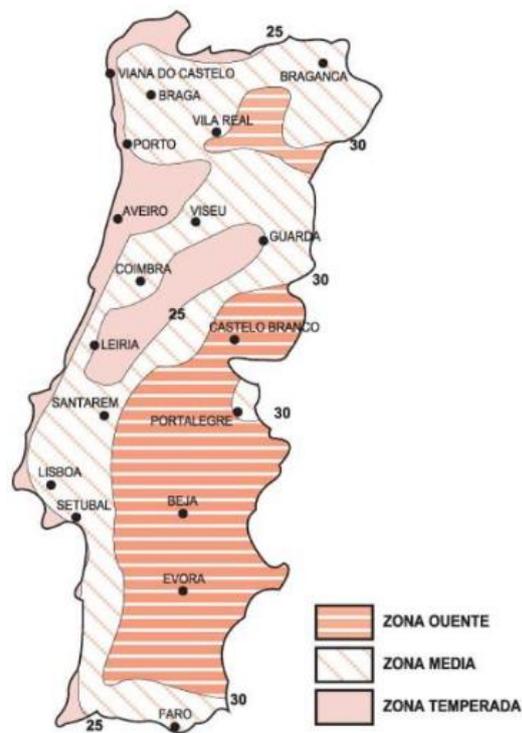


Figura 1: Distribuição das zonas climáticas em Portugal Continental (CEPSA, 2014)

Esta classificação da zona climática tem por objetivo escolher a classe de betume que deve ser utilizado para garantir as propriedades necessárias.

A Tabela 7 abaixo indica as classes do betume de acordo com a zona térmica e a classe de tráfego.

Tabela 7: Classe de betume por zona térmica (adaptado de JAE, 1995).

		Zona Térmica		
		Temperada	Média	Quente
Tráfego	T ₁	50/70	35/50	35/50
	T ₂	50/70	50/70	35/50
	T ₃	50/70	50/70	50/70
	T ₄	50/70	50/70	50/70
	T ₅	50/70	50/70	50/70
	T ₆	50/70	50/70	50/70

2.1.4. Fundação do Pavimento

A fundação de um pavimento pode ser definida como o conjunto das camadas de solos onde está apoiado o pavimento, incluindo, para além da camada de leito do pavimento, os terrenos subjacentes (CEPSA, 2014).

É necessário a realização do estudo e a caracterização da fundação, principalmente, do comportamento mecânico dos solos que constituem o leito de um pavimento, tornando-o um aspecto indispensável quer a nível de projeto, quer a nível de construção. (Morais, 2011)

Existem ensaios para avaliar a capacidade de suporte de uma fundação, dos quais o mais utilizado, é o (CBR) índice californiano de capacidade de suporte, por ser um método mais simples, com o qual se analisa uma amostra de solo do leito de pavimento para a caracterização do comportamento mecânico da fundação. (Morais, 2011)

A classificação dos solos no MACOPAV é realizada tendo em consideração características como granulometria, limite de liquidez, limite de plasticidade, índice de plasticidade e o valor de CBR, e tem como base a Classificação Unificada dos Solos proposto pela especificação ASTM D 2487.

A Tabela 8 abaixo mostra as classes de fundação e os seus valores do módulo de fundação proposta pelo MACOPAV.

Tabela 8: Classes de fundação (Adaptado de JAE, 1995)

Classes de Fundação			
Classe de fundação	Módulo de fundação (Mpa)		Classe de tráfego
	Gama	Valor de cálculo	
F1	> 30 a ≤ 50	30	T ₅ , T ₆
F2	> 50 a ≤ 80	60	T ₃ , T ₄ , T ₅ , T ₆
F3	> 80 a ≤ 150	100	T ₁ , T ₂ , T ₃ , T ₄ , T ₅ , T ₆
F4	> 150	150	T ₁ , T ₂ , T ₃ , T ₄ , T ₅ , T ₆

Na definição da capacidade de suporte da plataforma é de extrema importância a estrutura de leito de pavimento no que se refere ao tipo de solo constituinte, a sua resistência e, conseqüentemente, espessura definida. (Brás, 2012). As tabelas 9 e 10 propostas pelo MACOPAV, representam a espessura das camadas do leito e as classes do terreno de fundação.

Tabela 9: Definição das camadas de leito de pavimento em materiais não ligados (Adaptado de JAE, 1995)

		F1	F2	F3	F4
	Ef (Mpa) CBR (%)	> 30 a ≤ 50	> 50 a ≤ 80	> 80 a ≤ 150	> 150
S ₀	< 3	Estudo especial			
S ₁	≥ 3 a < 5	30 S ₂ ou 20 S ₃	60 S ₃ ou 40 S ₄		2*
S ₂	≥ 5 a < 10	1*	30 S ₃ ou 15 S ₄	60 S ₃ ou 30 S ₄	
S ₃	≥ 10 a < 20	-	1*	20 S ₄	
S ₄ , S ₅	≥ 20	-	-	1*	

As espessuras são definidas em cm.

CBR- Índice CBR do terreno situado sob o pavimento, até a profundidade de 1 metro.

Ef- Módulo de deformabilidade de fundação do pavimento (incluindo a camada de leito na espessura indicada no quadro)

1*- Em escavação deve ser escarificado e recompactado na profundidade necessária à garantia de uma espessura final de 30 cm bem compactada; em aterro as condições de fundação estão garantidas.

2*- Em pedraplenos ou em aterros com materiais do tipo solo-enrocamento, com uma camada de leito de pavimento em material pétreo de espessura mínima de 15 cm.

Tabela 10: Classe de terrenos de fundação (Adaptado de JAE,1995).

Classe	CBR(%)	Tipo de Solo	Descrição	Reutilização		
				Aterro	Leito	Sub-base
S0	<3	OL	Siltes orgânicos e siltes argilosos orgânicos de baixa plasticidade (1)	N	N	N
		OH	Argilas orgânicas de plasticidade média a elevada; siltes orgânicos (2)	P	N	N
		CH	Argilas inorgânicas de plasticidade elevada; argilas gordas (3)	P	N	N
		MH	Siltes inorgânicos; areias finas micáceas; siltes micáceos. (4)	P	N	N
S1	≥ 3 a < 5	OL	Idem (1)	S	N	N
		OH	Idem (2)	S	N	N
		CH	Idem (3)	S	N	N
		MH	Idem (4)	S	N	N
S2	≥ 5 a < 10	CH	Idem (3)	S	N	N
		MH	Idem (4)	S	N	N
		CL	Argilas inorgânicas de plasticidade baixa a média; argilas com seixo, argilas arenosas, argilas siltosas e argilas magras.	S	N	N
		ML	Siltes orgânicos e areias muito finas; areias finas, siltosas ou argilosas; siltes argilosos de baixa plasticidade	S	N	N
S3	≥ 10 a < 20	SC	Areia argilosa. Areia argilosa com cascalho (5)	S	P	N
		SC	Idem (5)	S	S	N
		SM	Areia siltosa; areia siltosa com cascalho	S	S	N
S4	≥ 20	SP	Areias mal graduadas; areias mal graduadas com cascalho	S	S	P
		SW	Areias bem graduadas; areias bem graduadas com cascalho.	S	S	P
		GC	Cascalho argiloso; cascalho argiloso com areia	S	S	P
		GM-u	Cascalho siltoso; Cascalho siltoso com areia (6)	S	S	P
S5	≥ 40	GP	Cascalho mal graduado; cascalho mal graduado com areia (7)	S	S	P
		GM-d	Idem (6)	S	S	S
		GP	Idem (7)	S	S	S
		GW	Cascalho bem graduado; cascalho bem graduado com areia.	S	S	S

N- Não admissível; S- Admissível; P- Possível

2.1.5. Materiais de Pavimentação

2.1.5.1. Materiais Granulares

Os agregados são materiais provenientes das rochas e podem ser classificados em agregados naturais ou seja não passaram por nenhum processo, são eles as areias, cascalhos, pedregulhos. Outro tipo de agregados são os artificiais, que são estes

passados por processos industriais também conhecido como processo de britagem. Os agregados usados precisam apresentar a capacidade de suportar tensões em sua superfície e em seu interior. Esta capacidade de suporte está relacionada com a maneira em que são produzidas no processo de britagem, por exemplo.

O comportamento mecânico dos materiais é influenciado por vários fatores, especificamente pelas suas características intrínsecas. O módulo de deformabilidade, este é afetado pelas condições de estado; compacidade, teor em água, estado de tensão. Destacando-se o teor em água uma vez que o comportamento das camadas é altamente dependente dele.

No manual, os materiais granulares caracterizam-se pelos seus parâmetros de resistência mecânica, módulo de deformabilidade E, e o coeficiente de Poisson ν , ver Tabela 11. Estes materiais apresentam o comportamento elástico linear. No entanto sabe-se que o comportamento mecânico destes materiais é elastoplástico.

Tabela 11: Características de deformabilidade dos materiais granulares (Adaptado de JAE,1995).

Código	E	ν
BGr	2,5 * E camada inferior	0,35
BGr	2 * E camada inferior	0,35
SbG	2 * E camada inferior	0,35

Os materiais granulares são designados pelos respectivos códigos indicados na Tabela 12 onde se apresenta a descrição destes códigos.

Tabela 12: Materiais granulares constituintes das estruturas dos pavimentos flexíveis (Adaptado de JAE, 1995)

Símbolo	Descrição
Materiais Granulares	
BGr	Material britado recomposto em central
BG	Material britado sem recomposição (tout-venant) aplicado em camada de base
SbG	Material britado sem recomposição (tout-venant) aplicado em camada de sub-base
GN	Material não britado
SS	Solo seleccionado

2.1.5.2. Materiais Betuminosos

Em uma forma geral, as misturas betuminosas, são compostas pela junção de agregados e ligantes asfálticos. As camadas subjacentes também são compostas por agregados podendo haver adição de materiais complementares como cimento Portland. Essas misturas constituem as camadas superiores do pavimento: camada de desgaste (em contato direto com os agentes solicitadores), camada de regularização e camada de base. Assim as misturas devem exibir características de:

- Trabalhabilidade;
- Durabilidade;
- Resistência a fadiga;
- Resistência a deformação permanente;
- Deformabilidade.

O manual do MACOPAV prevê dois tipos de materiais betuminosos, as misturas com ligantes hidráulicos ou as misturas betuminosas fabricadas a quente indicadas na Tabela 13.

Tabela 13: Materiais betuminosos aplicados nas camadas das estruturas do pavimento flexível

Símbolo	Descrição
Misturas Betuminosas	
MB	Macadame betuminoso em camada de base
MB reg	Macadame betuminoso em camada de regularização
MDB	Mistura betuminosa densa em camada de regularização
BD	Betão betuminoso em camada de desgaste

2.1.5.3. Critérios de Ruína

De acordo com o método empírico-mecanicista para dimensionamento de pavimentos flexíveis, depois de calculada a resposta estrutural das estruturas de pavimento em estudo, para obter o número acumulado de eixo padrão admissíveis (eixo padrão de 80 kN para o dimensionamento de pavimentos flexíveis de acordo

com o MACOPAV) aplicam-se modelos de desempenho de pavimentos associados a critérios de ruína. (Brás, 2012)

Em termos de dimensionamento de pavimentos, os critérios usualmente adaptados para pavimentos flexíveis referem-se a dois tipos de mecanismos de ruína:

- Critério de fadiga relacionado com o fendilhamento excessivo com origem nas camadas mais tracionadas das camadas ligadas, e consiste no controle da extensão radial de tracção, ϵ_t , na zona mais tracionada das camadas betuminosas;
- Critério de deformação permanente, ocorrência de deformações excessivas à superfície na zona das rodeiras, e consiste no controle da extensão máxima de compressão, ϵ_c , geralmente no topo do solo de fundação, principalmente devido à fraca deformabilidade do material. (Morais, 2011)

Os critérios adotados para efetuar a verificação do critério de ruína à fadiga e do critério de comportamento à deformação permanente foram os preconizados pela Shell (Shell, 1978).

- Critério de ruína a fadiga das camadas betuminosas. Equação 04

$$\epsilon_t = (0,856 * V_b + 1,08) * E^{-0,36} * N_{80}^{-0,2} \quad (04)$$

sendo:

ϵ_t → Extensão máxima de tracção;

N_{80} → Número de eixos-padrão de 80 kN admissível pelo pavimento;

V_b → Percentagem volumétrica de betume no volume total (%);

E → Módulo de deformabilidade da mistura betuminosa.

- Critério à deformação permanente. Equação (05):

$$\epsilon_c = k_s * N_{80}^{-0,25} \quad (05)$$

sendo:

ε_c → Extensão vertical máxima de compressão no topo do solo de fundação para uma fiabilidade de 95% (adimensional);

k_s → Módulo de rigidez;

N_{80} → Número de eixos-padrão de 80 kN admissível pelo pavimento.

2.1.6. Estrutura do Pavimento

Analisadas as variáveis de entrada, o MACOPAV propõe um conjunto de estruturas, possíveis soluções tipo para serem adaptadas nos pavimentos da faixa de rodagem. Dentro do manual de dimensionamento são propostas estruturas que representam graficamente as camadas, para três tipos de pavimento: os flexíveis, semi-rígidos e os rígidos. Para a definição dessas camadas são integrados os materiais anteriormente definidos, diante da combinação do tráfego e da fundação. A Figura 2 abaixo representa uma estrutura hipotética de um pavimento.

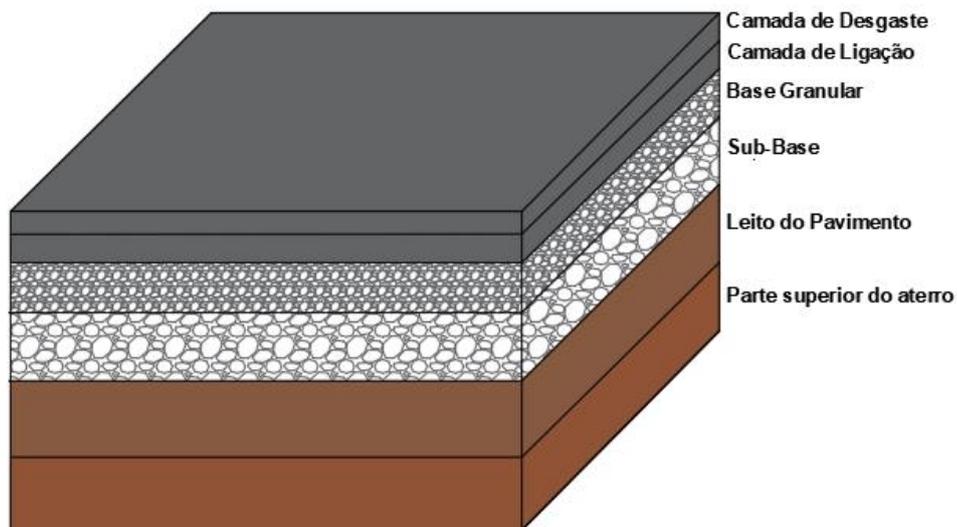


Figura 2: Representação gráfica de um pavimento flexível

A estrutura indicada na Figura 3, é uma das estruturas-tipo definida pelo MACOPAV. As demais estruturas-tipo se encontram no Anexo A.

- Pavimento flexível

CLASSE DE PLATAFORMA F3

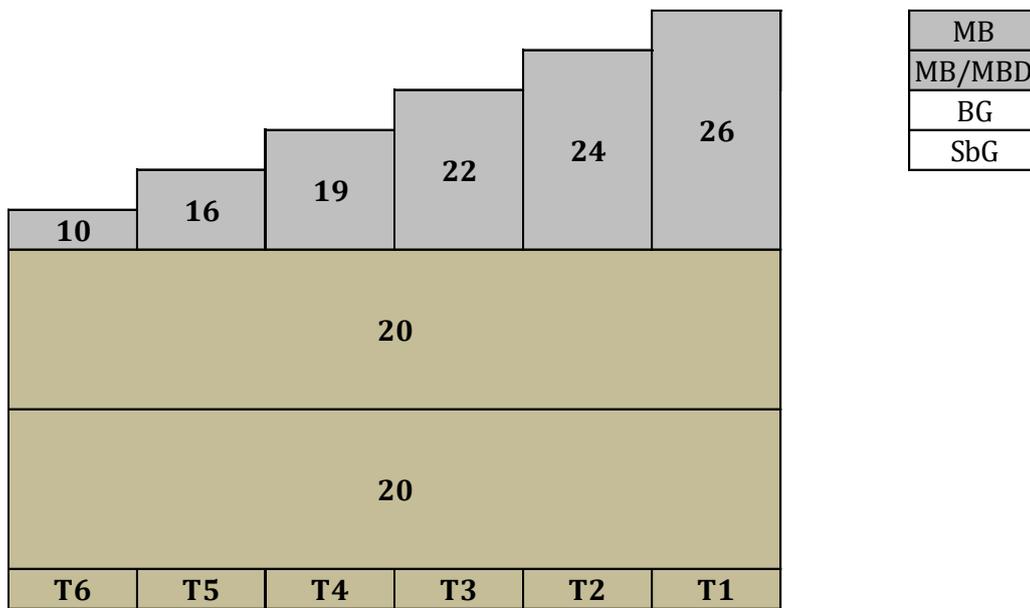


Figura 3: Estrutura-tipo de pavimento flexível (Adaptada de JAE, 1995)

*As espessuras são indicadas em cm.

F1	+ 5 cm (T5,T6)
F2	+ 2 cm
F4	Não adequado

A Figura 4 a seguir foi criada pela empresa espanhola (CEPSA) Compañía Española de Petróleos, S.A.U. A qual representa de forma esquemática das estruturas propostas para os pavimentos flexíveis, semi-rígidos e rígidos. Sendo uma forma adaptada do manual do MACOPAV. Em Anexo A estão dispostas outras dezessete estruturas como esta, em variadas situações de tráfego e fundação.

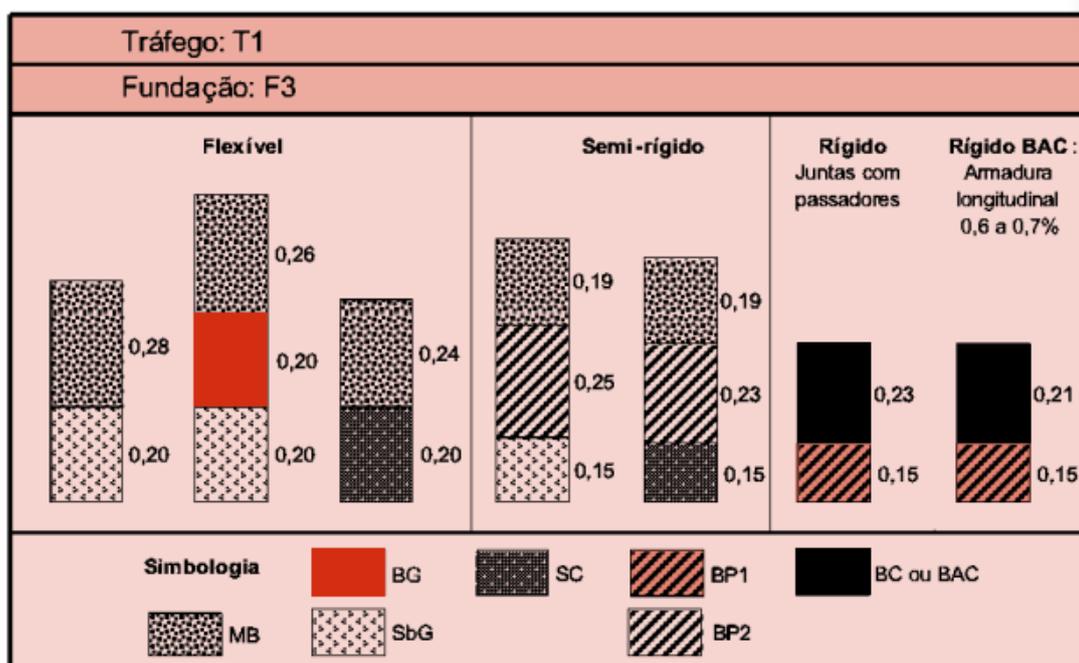


Figura 4: Estrutura de pavimento para as classes T1 e F3 (CEPSA, 2014; Adaptado de JAE, 1995)

MB→Macadame Betuminoso;

BG→Base Granular;

SbG→Sub-base Granular;

SC→Solo cimento;

BP1→Betão Pobre de reduzida erodibilidade;

BP2→Betão Pobre (Agregado recomposto em central);

BC→Betão de Cimento.

2.1.7. Perfis Transversais

O sétimo e último capítulo do manual de dimensionamento trata-se de parâmetros geométricos do pavimento como, a sobre largura e a variação de espessura do perfil transversal. São levadas em consideração questões da drenagem do pavimento, e aspectos práticos como deslocamento do veículo ao longo do trajeto.

2.2. MÉTODO EMPIRICO DE DIMENSIONAMENTO DO DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM (DNER)

2.2.1. Considerações Iniciais

A partir dos anos 50, obteve-se um grande desenvolvimento nas técnicas de pavimentação devido ao um intercâmbio entre o Brasil e os Estados Unidos. Isto foi feito para suprir a necessidade de normalizar e uniformizar as especificações de serviço e as técnicas de construção, isso deu origem a primeira edição do manual de pavimentação em 1960. A segunda edição foi lançada em 1996, e a terceira em 2006, adquirindo todo o processo tecnológico acumulado durante os anos, incluindo modificações nos materiais, nos equipamentos e nas técnicas usadas. (DNIT-2006)

O manual foi criado pelo Departamento Nacional de Estrada de Rodagem (DNER), que em 2001 sofreu uma alteração, sendo então renomeado como Departamento Nacional de Infra-estrutura e Transportes (DNIT).

2.2.2. Objetivo do Manual

O DNIT é responsável pela manutenção, ampliação, construção, fiscalização, e elaboração de estudos técnicos de qualquer problema relacionado ao tráfego nos transportes terrestres e aquáticos do país.

Implantado em Fevereiro de 2002 o manual tem como objetivos:

- Operar e administrar a infra-estrutura de transportes;
- Gerir projetos;
- Supervisionar e fiscalizar as atividades de entidades delegatárias de obras e serviços de infra-estrutura.

2.2.3. Áreas de Atuação e Competências do DNIT

O manual trabalha nas seguintes áreas de atuação:

- Vias navegáveis;

- Ferrovias e rodovias federais;
- Instalações e vias de transbordo e de interface inter-modal;
- Instalações portuárias.

Possui as seguintes funções e competências:

- Investimentos em infra-estruturas de transporte terrestre e aquático;
- Manutenção e recuperação das vias terminais;
- Gestão, operação e administração dos modais de transporte;
- Estabelecimento de padrões e normas técnicas para projetos e construções de infra-estrutura.

2.2.4. Etapas de Dimensionamento do Método DNER

2.2.4.1. Determinação dos Materiais

Os pavimentos flexíveis são aqueles compostos por uma camada superficial asfáltica – revestimento, apoiadas em camadas de base, sub-base e de reforço do subleito, constituídas por materiais granulares, solos ou misturas de solos, sem adição de agentes cimentantes, e que sob carregamento sofre deformação elástica em todas as camadas, ou seja, a carga se distribui em parcelas aproximadamente equivalentes e com pressões concentradas, ver Figura 5. (DNIT, 2006)

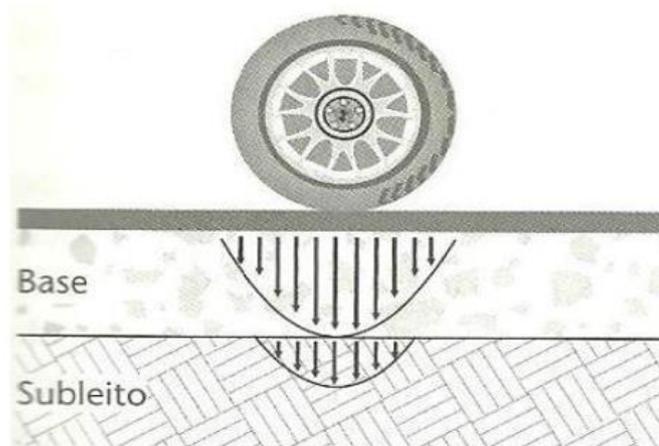


Figura 5: Resposta mecânica do pavimento flexível. (Balbo, 2007)

Em relação os materiais utilizados nos pavimentos flexíveis, os agregados correspondem entre 90% e 95% do revestimento, sendo responsável por suportar e

transmitir as cargas aplicadas pelos veículos e resistir ao desgaste sofrido pelas solicitações. Já o material betuminoso, corresponde entre 5% e 10% do revestimento, tendo função aglutinante e ação impermeabilizante (Bernucci, 2010).

A determinação da capacidade de suporte do subleito e dos materiais constituintes do pavimento é feita pelo ensaio CBR, adaptando-se o método recomendado pelo DNER, provetes de amostras indeformados ou moldados em laboratórios para as condições esperadas no campo. Para certificar que o pavimento não sofrerá rotura precocemente, o método exige que os materiais utilizados na sua construção possuam certas características, descritas a seguir na Tabela 14:

Tabela 14: Classificação dos materiais granulares empregados nos pavimentos (Adaptado de Souza, 1981)

Material do sub-leito	CBR \geq 2%	Expanssão menor que 2%	
Material para reforço do sub-leito	CBR maior que o sub-leito	Expanssão menor que 1%	
Material do sub-base	CBR \geq 20%	Expanssão menor que 1%	Índice de grupo (IG) igual a zero
Material de base	CBR \geq 80%	Expanssão menor que 0,5%	LL \leq 25% IP \leq 6%

Caso o limite de liquidez (LL) seja superior a 25 e/ou o índice de plasticidade (IP) seja superior a 6, o material pode ser empregado em base (se satisfeitas as demais condições) desde que o equivalente de areia seja superior a 30%.

Os materiais de base devem ainda ser enquadrados numa das seguintes faixas granulométrica conforme a Tabela 15:

Tabela 15: Percentagem passada nos peneiros

Peneiros	Percentagem que passa			
	A	B	C	D
2"	100	100	-	-
1"	-	75-90	100	100
3/8"	30-65	40-75	50-85	60-100
nº 4	25-55	30-60	35-65	50-85
nº 10	15-40	20-45	25-50	40-70
nº 40	8-20	15-30	15-30	25-45
nº 200	2-8	5-15	5-15	5-20

A fracção que passa no peneiro de n°200 deve ser inferior a 2/3 de fracção que passa no peneiro n°40. A fracção graúda (grossa) deve apresentar um desgaste Los Angeles inferior a 50. Pode ser aceito um valor de desgaste maior, desde que haja experiência no uso do material. (SOUZA, 1981)

2.2.4.2. Determinação do Tráfego

O dimensionamento de pavimentos é dado em função do número equivalente (N) de operações de um eixo padrão durante o período de projeto definido. Na Figura 6, são dados os fatores de equivalência de operação entre eixos simples e em “tandem” com diferentes cargas e o eixo simples com carga de 8,2t (80 kN).

Sendo V1 o volume médio diário de tráfego no ano de abertura, em um sentido e admitindo-se uma taxa t% de crescimento anual, em progressão aritmética, o volume médio diário de tráfego, Vm (em um sentido) durante o período de P anos, será conforme a equação (06):

$$V_m = \frac{V_1[2+(P-1)t/100]}{2} \quad (06)$$

O volume total de tráfego, (num sentido) durante o período, Vt, será da equação (07):

$$V_t = 365 * P * V_m \quad (07)$$

Admitindo-se uma taxa t% de crescimento anual em progressão geométrica, o volume total do tráfego, Vt, durante o período e dado pela equação (08):

$$V_t = 365 \frac{V_1 \left[\left(1 + \frac{t}{100} \right)^P - 1 \right]}{\frac{t}{100}} \quad (08)$$

Com V_t já conhecido, calcula-se então N , que o número equivalente de operações do eixo simples padrão durante o período de projeto e o parâmetro de tráfego usado no dimensionamento, ver equação (09):

$$N = V_t * (F.E) * (F.C) * (F.E) * (F.C) = FV \quad (09)$$
$$N = V_t * FV * FR$$

Onde:

N = Número de operações do eixo padrão de 8,2 t (80 kN);

P = Período de projeto em anos;

V_m = Volume médio diário de tráfego em um sentido;

FV = Fator de veículo da frota;

FR = Fator climático regional (adota-se $FR=1,0$);

FE = Fator de eixos;

FC = Fator de carga.

FE é um fator de eixos, isto é, um número que, multiplicado pelo número de veículos, dá o número de eixos correspondentes. FC é um fator de carga, isto é, um número que, multiplicado pelo número de eixos que operam, dá o número de eixos equivalentes ao eixo padrão. FV é um fator de veículos, isto é, um número que multiplicado pelo número de veículos que operam, dá, diretamente, o número de eixos equivalentes ao eixo padrão. Para a realização do cálculo de FC , FE , FV , é necessário conhecer a composição do tráfego, para isso faz-se a contagem do tráfego na estrada que está a ser considerada estudando-se um certo volume total de tráfego, V_t , ver Figura 6. (DNIT,2006)

Devido a grande variedade de veículos, tipos de eixo e cargas, o DNIT faz uma homogeneização do tráfego, criando uma relação entre estas variantes transformando-as em um número equivalente de eixos padrão que será utilizado no dimensionamento.

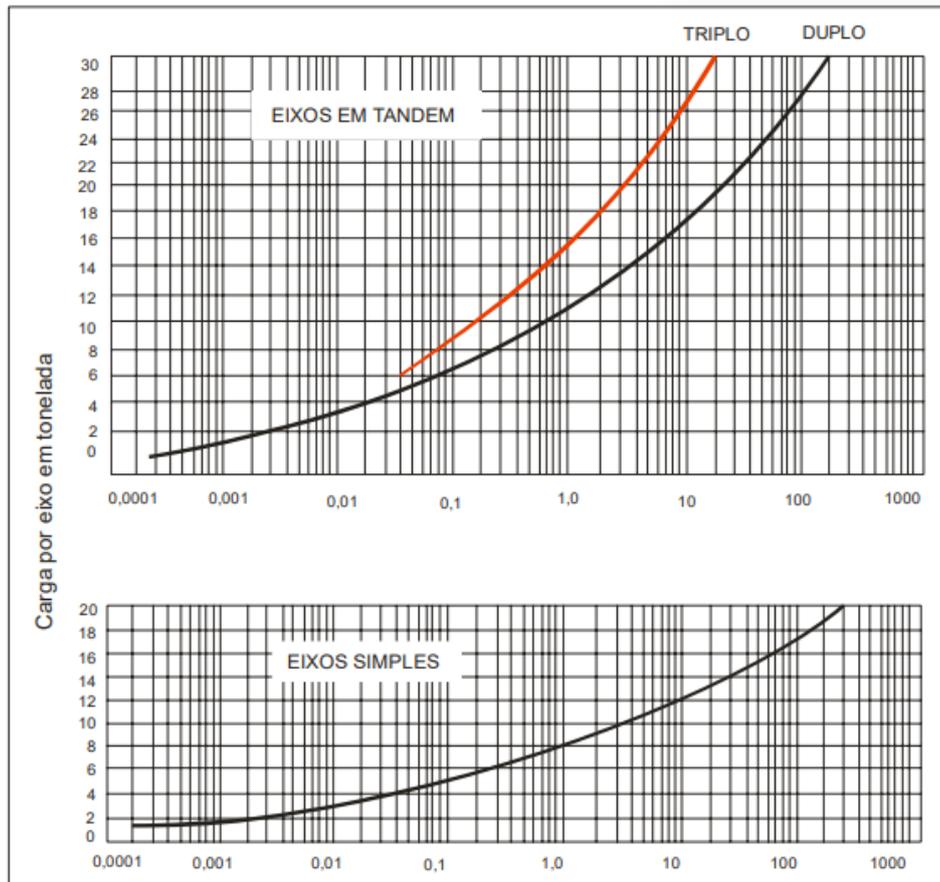


Figura 6:Fatores de equivalência de operação. (DNIT, 2006)

2.2.4.3. Fator Regional Climático

Segundo o (DNIT, 2006) “As variações de umidade dos materiais dos pavimentos são levadas em consideração durante as estações do ano, o número equivalente de operações do eixo-padrão (N), deve ser multiplicado por um coeficiente (FR) que, na pista experimental da AASHTO, variou de 0,2 (ocasião em que prevalecem baixos teores de umidade) a 5,0 (ocasiões em que os materiais estão praticamente saturados). É possível que, estes coeficientes sejam diferentes, em função da diferença de sensibilidade a variação do número N; é possível, ainda, pensar-se num fator climático que afetaria a espessura do pavimento (em vez do número N), e que seria, ao mesmo tempo, função desta espessura. O coeficiente final a adaptar é uma média ponderada dos diferentes coeficientes sazonais, levando em consideração o espaço de tempo em que ocorrem”.

Seria mais apropriado a adição de um coeficiente, quando se torna, para projeto, um valor C.B.R. compreendido entre o que se obtém antes e o que se obtém

depois da embebição, isto é, um valor correspondente a umidade de equilíbrio. Tem-se adotado um $F.R=1,0$ diante dos resultados desenvolvidos no IPR/DNER.

2.2.4.4. Estrutura do Pavimento

O pavimento consiste em uma superestrutura formada por um sistema de camadas de espessura finita, construída após a terraplanagem, destinada a resistir e distribuir esforços verticais oriundos dos veículos, a melhorar as condições de rolamento quanto ao conforto e segurança, e a resistir os esforços horizontais tornando durável a superfície de rolamento (DNIT,2006). A estrutura dos pavimentos são divididas em camadas, sendo elas (Figuras 7 e 8):

- Subleito - Maciço de terra que serve de fundação para o pavimento ou revestimento;
- Reforço do subleito – Camada granular executada com o objetivo de melhorar a capacidade de suporte de carga do subleito e de reduzir espessura da sub-base (indicada para quando a espessura de sub-base for maior que 20 cm);
- Sub-base – Camada corretiva de subleito e complementar a base com as mesmas funções desta, e executada quando, por razões de ordem econômica, for conveniente reduzir espessura de base;
- Base – Camada destinada a resistir aos esforços verticais oriundos do veículos, distribuindo-os ao subleito, e sobre o qual se constrói o revestimento;
- Revestimento – Camada mais acima do pavimento, que recebe diretamente as ações dos veículos, e destinada a melhorar as condições de rolamento quanto ao conforto e segurança.

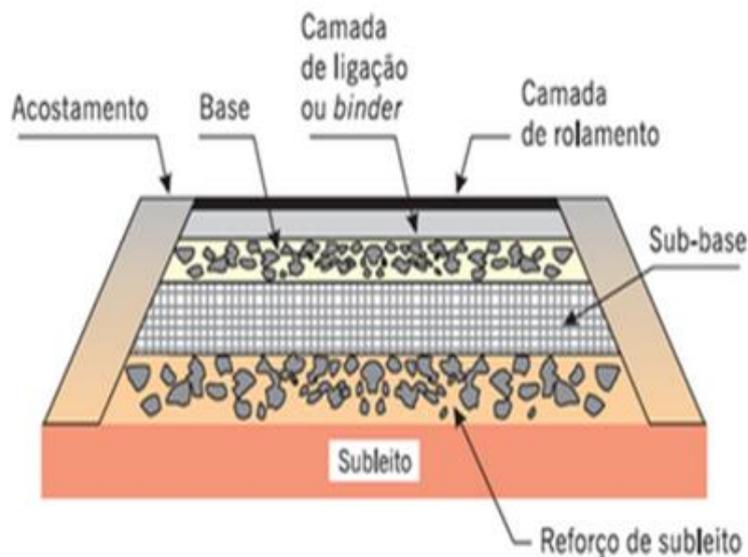


Figura 7: Estrutura do pavimento flexível. (Bernucci, 2010)

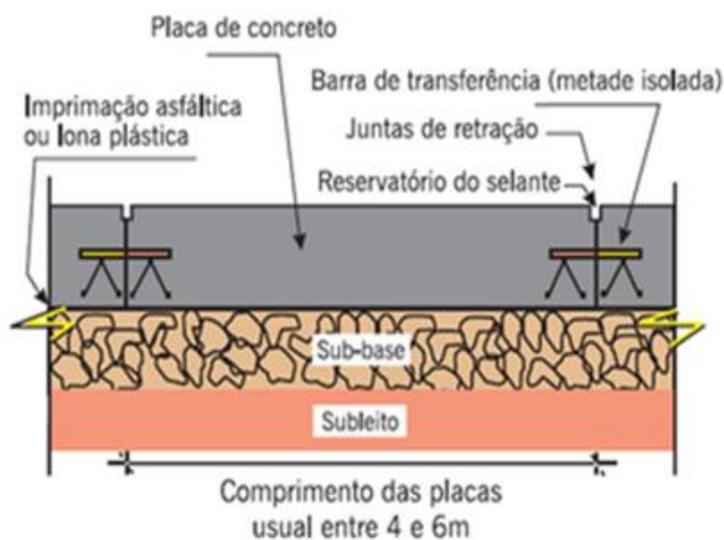


Figura 8: Estrutura do pavimento rígido. (Bernucci, 2010)

2.2.4.5. Dimensionamento de Pavimentos

Com o tráfego definido que solicitará a via durante o período de projeto (número N) e o índice de suporte (CBR) do subleito, a espessura total (H_m) do pavimento, em termos de material granular, é determinada utilizando-se o ábaco da Figura 9 ou a expressão (10) a seguir:

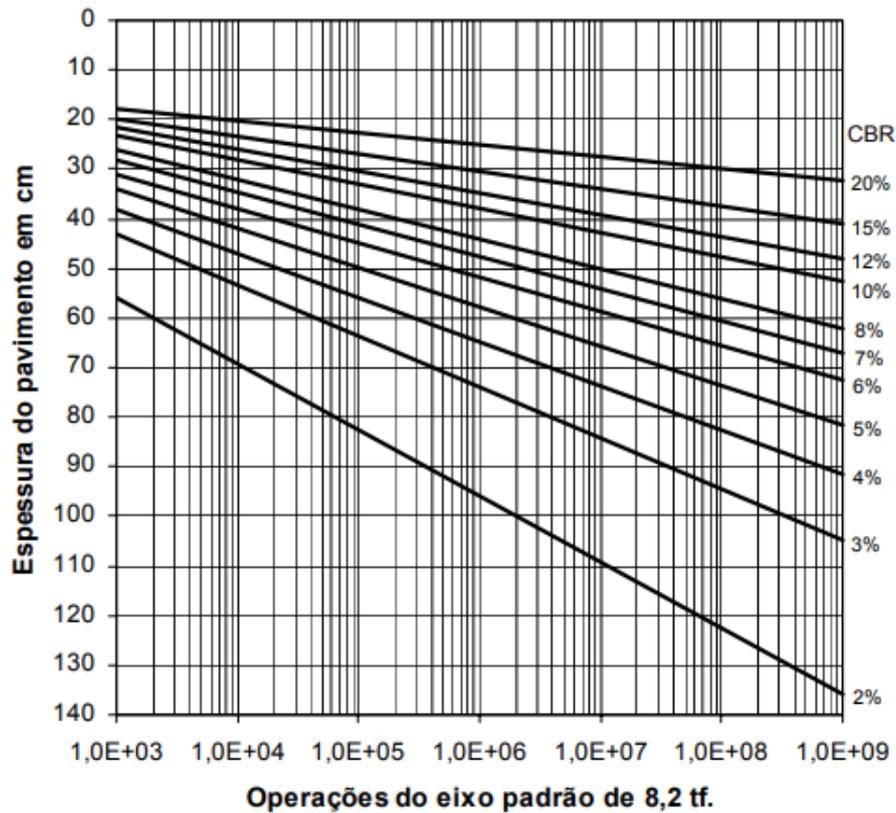


Figura 9: Ábaco de dimensionamento de pavimentos flexíveis utilizado no método do DNER. (Souza, 1981).

$$H_m = 77,67 * N^{0,0482} * CBR^{-0,598} \quad (10)$$

Conforme a Figura 10 apresenta o dimensionamento do pavimento calculado.

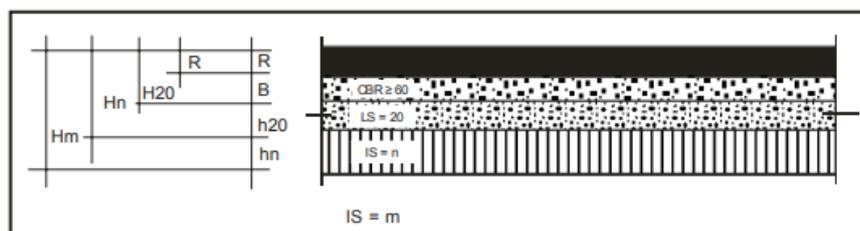


Figura 10: Dimensionamento dos pavimentos. (Souza, 1981).

2.2.5. Tipo e Espessura Mínima da Camada de Revestimento

A espessura mínima do revestimento betuminoso (R) é estabelecida em função do tráfego (número N), de acordo com a Tabela 16 abaixo:

Tabela 16: Espessura mínima do revestimento. (Adaptado de Souza, 1981)

N	Tipo de Revestimento	Espessura Mínima do Revestimento
$N \leq 10^6$	Tratamento Superficial	-
$10^6 < N \leq 5 * 10^6$	Revestimento Betuminoso	5 cm
$5*10^6 < N \leq 10^7$	Concreto Betuminoso	7,5 cm
$10^7 < N \leq 5 * 10^7$	Concreto Betuminoso	10 cm
$N > 5 * 10^7$	Concreto Betuminoso	12,5 cm

2.2.6. Espessura das demais Camadas

Após determinar a espessura (Hm), em termos de material granular, e fixada a do revestimento (R), procede-se o cálculo das espessuras das demais camadas como as de base (B) e sub-base (h20), considerando-se os materiais disponíveis para cada uma delas e seus respectivos coeficientes de equivalência estrutural (Tabela 17) (Neto, 2004).

O coeficiente de equivalência estrutural de um material é um valor empírico definido como a relação entre as espessuras de uma base granular e de uma camada de material considerado, que apresente desempenho semelhante, ou seja, considera-se que uma camada de 10 centímetros de um material com coeficiente de equivalência estrutural igual a 1,5 apresenta comportamento igual ao de uma camada de 15 cm de base granular. (IP.05, 2004)

Tabela 17: Coeficientes de equivalência estrutural. (Adaptado de DNIT, 2006)

Componentes do Pavimento	Coefficiente estrutural (K)
Base ou revestimento de concreto betuminoso	2,0
Base ou revestimento de pré-misturado a quente, de graduação densa	1,7
Base ou revestimento de pré-misturado a frio, de graduação densa	1,4
Base ou revestimento betuminoso por penetração	1,2
Camadas granulares	1,0
Solo-cimento com resistencia a compressão a 7 dias superior a 45 kg/cm ²	1,7
Solo-cimento com resistencia a compressão a 7 dias entre 45 kg/cm ² e 28 kg/cm ²	1,4
Solo-cimento com resistencia a compressão a 7 dias entre 28 kg/cm ² e 21kg/cm ²	1,2
Base de solo-cal	1,2

As espessuras da base (B), sub-base (h₂₀) e do reforço do subleito (h_n) são obtidas pela resolução sucessiva das seguintes inequações (11):

$$R \cdot K_R + B \cdot K_B \geq H_{20} \quad (11)$$

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

$$R \cdot K_R + B \cdot K_B + H_{20} \cdot K_S + h_n \cdot K_{REF} \geq H_m$$

Temos que:

K_R → Coeficiente de equivalência estrutural do revestimento;

R → Espessura do revestimento;

K_B → Coeficiente de equivalência estrutural de base;

B → Espessura da base;

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

K_s → Coeficiente de equivalência estrutural da sub-base;

h_{20} → Espessura da sub-base;

H_n → Espessura do pavimento necessária para proteger o reforço do subleito;

K_{REF} → Coeficiente de equivalência estrutural do reforço do subleito;

h_n → Espessura do reforço do subleito;

H_m → Espessura total do pavimento necessária para proteger o material com CBR igual a m%;

Os valores de H_{20} , H_n e H_m , são determinados através do abaco da Figura 9.

2.2.7. Bermas

Segundo o manual de pavimentação o que se refere aos acostamentos (bermas), não se dispõe de dados seguros para o seu dimensionamento, sendo que a sua espessura está, de antemão, condicionada a pista de rolamento, podendo ser feitas reduções de espessura, praticamente apenas na camada de revestimento. A solicitação das cargas é, no entanto, diferente e pode haver uma solução estrutural diversa da pista de rolamento.

A adoção nos acostamentos da mesma estrutura da pista de rolamento tem efeitos benéficos em seu comportamento, e simplifica os problemas de drenagem; geralmente, na parte correspondente às camadas de reforço de subleito e sub-base, adota-se, para acostamentos e pista de rolamento, a mesma solução, procedendo-se de modo idêntico para a parte correspondente à camada de base, quando o custo desta camada não é muito elevado. O revestimento dos acostamentos pode ser, sempre, de categoria inferior ao da pista de rolamento.

Quando a camada de base é de custo elevado, pode-se dar uma solução de menor custo para os acostamentos. Algumas sugestões têm sido apontadas para a solução dos problemas aqui focalizados, como:

a) Adoção, nos acostamentos, na parte correspondente à camada de base, de materiais próprios para sub-base granular de excepcional qualidade, incluindo solos modificados por cimento, cal, etc.

b) Consideração, para efeito de escolha de revestimento, de um tráfego nos acostamentos da ordem de, até 1% do tráfego na pista de rolamento. (DNIT, 2006)

3. APLICAÇÃO DOS MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO

O presente estudo tem como principal objetivo analisar os métodos de dimensionamento de pavimentos flexíveis a fim de os comparar, no que se diz respeito a estrutura e espessura de pavimento. Para isso foi utilizado dois manuais; O Manual de Concepção de Pavimentos para a Rede Rodoviária Nacional (MACOPAV) referente ao método expedito usado em Portugal, e o Manual do Departamento Nacional de Estradas e Rodagem (DNER) referente ao método empírico Brasileiro.

Foram realizadas diversas abordagens e situações combinando fundação (F_i) e tráfego (T_i) para o método MACOPAV. Para o método do DNER as situações de estudo foram feitas a partir de combinações com o número N referente ao tráfego, o CBR referente a fundação e o coeficiente de equivalência estrutural, a fim de obter possíveis estruturas respeitando as espessuras indicadas pelos manuais.

3.1. CONCEPÇÃO DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS SEGUNDO O MÉTODO EXPEDITO MACOPAV

3.1.1. Parâmetros de Projeto

A definição dos parâmetros de projeto é uma medida que possibilita a execução do estudo, em questões de termos práticos devido ao grande volume de dados e suas diversas possibilidades de combinação. Os ábacos de dimensionamento propostos pelo MACOPAV utilizados no presente trabalho são baseados na tipificação de variáveis de entrada como temperatura de serviço, classe do betume, módulo de deformabilidade das misturas, coeficiente de Poisson e outros.

3.1.2. Tráfego

O fator de tráfego, considerado para este trabalho, pode ser descrito por um conjunto de eixos padrão de 80 kN, assim como propõe o manual. O número do tráfego médio diário anual de veículos pesados no ano de abertura, por sentido e na via mais solicitada (TMDAp), é dado pelas classes apresentadas na Tabela 4,

anteriormente mencionada no Capítulo 2. Serão consideradas no dimensionamento as classes de tráfego T1, T2, T3, T4, T5 e T6, as quais apresentam valor de TMDAp entre 50 e 2000 veículos pesados passados por dia. As classes T0 e T7 serão desconsideradas no dimensionamento, pois apresentam a maior e menor faixa de tráfego respectivamente, sendo condições extremas necessitando assim de um estudo especial.

3.1.3. Zona Climática

A divisão geográfica de Portugal para fins de zoneamento climático apresentada no MACOPAV é baseada em três regiões (média, temperada e quente), conforme apresentado no Capítulo 2. Para fins de dimensionamento, considerou-se a zona climática média.

3.1.4. Classe de Fundação

Os parâmetros de dimensionamentos referentes às condições de fundação são adotados conforme a proposta feita pelo manual. Foram consideradas as quatro classes de fundação (F1, F2, F3, F4) utilizadas nas combinações juntamente com as classes de tráfego.

3.1.5. Classe de Betume

A classe do betume é dada em função da zona climática e da classe de tráfego, podendo variar entre dois tipos de acordo com o ensaio padrão de penetração. Porém a classe $pen_{25}50/70$ será fixada para este estudo, por estar presente em um maior de número de zonas climáticas e suas classes de tráfego.

3.1.6. Materiais

O manual apresenta os materiais de pavimentação (betuminosos e granulares) a serem utilizados no dimensionamento, e suas características estão apresentados conforme as características das misturas betuminosas na Tabela 18, Coeficiente de

Poisson para materiais de pavimentação na Tabela 19 e a composição volumétrica para materiais de pavimentação na Tabela 20:

Tabela 18: Características das misturas betuminosas (Adaptado de JAE, 1995)

Símbolo	Descrição
MB	Macadame betuminoso em camada de base
	Dimensão máxima do agregado: 37,5 mm
	Teor de betume: 4,0 - 4,8 %
	Porosidade: 6 - 9 %
	Espessura recomendável: 9 - 15 cm (min. 8cm; máx. 16 cm)
MB	Macadame betuminoso em camada de regularização
	Dimensão máxima do agregado: 25 mm
	Teor de betume: 4,0 - 4,8 %
	Porosidade: 8 - 10 %
	Espessura recomendável: 8 - 12 cm
MBD	Mistura betuminosa densa em camada de regularização
	Dimensão máxima do agregado: 16 mm
	Teor de betume: 4,8 - 5,4 %
	Porosidade: 4 - 6 %
	Espessura recomendável: 5 - 8 cm
BD	Betão betuminoso em camada de desgaste
	Dimensão máxima do agregado: 14 mm
	Teor de betume: 5,2 - 5,8 %
	Porosidade: 3 - 5 %
	Espessura recomendável: 4 - 6 cm

Tabela 19: Coeficiente de Poisson para materiais de pavimentação. (Adaptado de JAE, 1995)

Código	Coeficiente de poisson (v)
BGr	0,35
BG	0,35
SbG	0,35
GN	0,35
SS	0,40

Tabela 20: Composição volumétrica para materiais de pavimentação. (Adaptado de JAE, 1995)

Código	Composição volumétrica		
	Agregado (Va)	Betume (Vb)	Vazios (Vv)
BD	84%	12%	4%
MBD	84%	11%	5%
MB	84%	9%	7%

3.1.7. Dimensionamento

Nesta etapa consiste na adoção de uma classe de tráfego T_i , juntamente com uma classe de fundação F_i , com o objetivo de obter diferentes soluções em termos de espessura tanto para as camadas betuminosas quanto para as granulares. As situações de dimensionamento são baseadas nos ábacos de dimensionamento do MACOPAV.

Em relação as simulações feitas para a obtenção das espessuras finais, estas constituídas por camadas, composta por uma mistura de ligante asfáltico e agregados. Sendo assim considerou-se as três estruturas-tipo definidas no manual MACOPAV:

Estrutura tipo 1:

- Betão Betuminoso (BD) - Camada de desgaste;
- Mistura Betuminosa densa (MBD) - Camada de regularização;
- Macadame betuminoso (MB) - Camada de Base;
- Material britado sem recomposição (SbG) - Camada de Sub-base.

Estrutura tipo 2:

- Betão Betuminoso (BD) - Camada de desgaste;
- Macadame betuminoso (MB) /Mistura Betuminosa densa (MBD) - Camada de regularização;
- Material britado sem recomposição (BG) - Camada de Base;
- Material britado sem recomposição (SbG) - Camada de Sub-base.

Estrutura tipo 3:

- Betão Betuminoso (BD) - Camada de desgaste;
- Macadame betuminoso (MB) /Mistura Betuminosa densa (MBD) - Camada de regularização;

- Solo-Cimento fabricado em central (Sc) - Camada de base.

Com base nesses modelos de estruturas tipo foram efetuados 15 simulações com a estrutura tipo 1 (de base betuminosa e sub-base granular), outras 15 simulações para a estrutura tipo 2 (de base granular) e 10 simulações para a estrutura tipo 3 (de base solo-cimento).

3.2. CONCEPÇÃO DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS SEGUNDO O MÉTODO EMPIRICO DNER

O dimensionamento pelo método empírico DNER é baseado em ábacos e inequações para obtenção das espessuras. Este estudo tem como objetivo criar estruturas variando e combinando as entradas de dados como o número N e o valor de CBR da fundação, alterando os materiais e conseqüentemente o coeficiente de equivalência estrutural.

3.2.1. Definição do Tráfego

Para dimensionar um pavimento pelo método do DNER, como em qualquer outro método, é necessário a definição de alguns parâmetros de projeto, como o número N referente ao tráfego.

Neste trabalho em estudo foram adotados e fixados valores de tráfego para fins de dimensionamento equivalentes com os tráfegos já definidos pelo MACOPAV, com o objetivo de criar soluções estruturais referentes as espessuras. A Tabela 21 indica as equivalências feitas entre os tráfegos nos dois dimensionamentos:

Tabela 21: Equivalência entre o tráfego nos dois dimensionamentos

Classes de tráfego segundo o MACOPAV	Número de operações do eixo padrão segundo DNER
T1	$4 * 10^7$
T2	$2,3 * 10^7$
T3	$1 * 10^7$
T4	$7 * 10^6$
T5	$2,8 * 10^6$

3.2.2. Espessura de Revestimento

A camada de revestimento é responsável por proteger a camada de base dos esforços imposta pela ação do tráfego e que se trate de evitar a rotura do próprio revestimento por esforços repetidos de tração na flexão (DNIT, 2006). As espessuras do revestimento são escolhidas de acordo com o número N como mostrado na tabela 16 do capítulo anterior.

3.2.3. Determinação do Índice de Suporte Califórnia (CBR)

O ensaio de CBR consiste na determinação da relação entre a pressão necessária para produzir uma penetração de um pistão em um corpo de prova de solo, e a pressão necessária para produzir a mesma penetração numa brita padronizada. O valor dessa relação, expressa em porcentagem, permite determinar, por meio de equações empíricas, a espessura do pavimento flexível necessária, em função do tráfego. (DNIT, 2006)

Os CBRs adotados para todas as situações de dimensionamento neste método foram:

- Base: 40% (Para quando a estrutura possuir Base Granular);
- Sub-Base: 20%;
- Reforço do Subleito: 12% (Para quando for necessário o uso de reforço);
- Subleito: 4%, 6%, 12%, 15%.

Para o MACOPAV as fundações são definidas em quatro classes relacionadas com o módulo de deformabilidade do solo, já para o DNER, as fundações são dadas em função do valor do CBR. Com isso fez-se a alteração do valor do módulo de deformabilidade (E_f) das fundações para CBR através da equação (11), sendo esta proposta pela SHELL na qual estabelece uma relação entre o CBR e o módulo de deformabilidade (E_f) com base em ensaios de carregamento dinâmico.

$$E_f = 10 * CBR \quad (11)$$

Onde:

E_f → Módulo de deformabilidade. (MPa)

Sendo assim os valores de CBRs (Tabela 22) usados no dimensionamento DNER correspondente a cada classe de fundação do MACOPAV foram:

Tabela 22: Valores de CBR usados no dimensionamento DNER

Classes de fundação segundo o MACOPAV	Valores de CBR correspondentes as fundações
F1	4%
F2	6%
F3	12%
F4	15%

3.2.4. Coeficiente de Equivalência Estrutural

Nas situações de dimensionamento foram usados os seguintes coeficientes de equivalência estrutural:

- Para as estruturas de Base Granular:
 - K_r (Coeficiente de Revestimento) = 2;
 - K_b (Coeficiente de Base) = 1;
 - K_s (Coeficiente de Sub-Base) = 1;
 - K_{ref} (Coeficiente do Reforço do Subleito) = 1.
- Para as estruturas de Base Betuminosa (CBUQ):
 - K_r (Coeficiente de Revestimento) = 2;
 - K_b (Coeficiente de Base) = 1,7;
 - K_s (Coeficiente de Sub-Base) = 1;
 - K_{ref} (Coeficiente do Reforço do Subleito) = 1.

- Para as estruturas de Base Betuminosa (CBUQ) e Sub-base de Solo-cimento:
 - K_r (Coeficiente de Revestimento) = 2;
 - K_b (Coeficiente de Base) = 1,7;
 - K_s (Coeficiente de Sub-Base) = 1,4;
 - K_{ref} (Coeficiente do Reforço do Subleito) = 1.

3.2.5. Dimensionamento

Para efeitos de dimensionamento e comparações, adotou-se três estruturas tipo equivalentes as estruturas definidas e propostas pelo manual do MACOPAV

Estrutura tipo 1:

- Concreto Betuminoso – Revestimento;
- Pré-misturado a quente, de graduação densa (CBUQ) – Camada de Base;
- Material Granular- Camada de sub-base;
- Material Granular- Camada de reforço de subleito.

Estrutura tipo 2:

- Concreto Betuminoso – Revestimento;
- Material Granular – Camada de Base;
- Material Granular- Camada de sub-base;
- Material Granular- Camada de reforço de subleito.

Estrutura tipo 3:

- Concreto Betuminoso – Revestimento;
- Solo-cimento - Camada de base;
- Material Granular- Camada de reforço de subleito.

4. RESULTADOS E ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE OS MÉTODOS DE ESTUDO

A qualidade de um pavimento é um indicativo do seu desempenho que, para tanto, passou por diversas etapas consideradas bem sucedidas.

O projeto determina os requisitos de qualidade, a oportunidade de influenciar a qualidade e o custo, selecionando a combinação de materiais e espessura do pavimento, necessários para satisfazer as metas definidas pelo planejamento.

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos dos dimensionamentos e simulações feitos através do método empírico DNER e o método expedito MACOPAV. Além disso, apresenta-se também uma análise comparativa entre os métodos apresentados, analisando as estruturas e espessuras dos pavimentos.

Esta etapa foi realizada com auxílio da folha de cálculo do Microsoft Excel, para a determinação das espessuras.

4.1. RESULTADOS OBTIDOS NO DIMENSIONAMENTO

Para o dimensionamento do MACOPAV o período de vida útil é de 20 anos, porém para se poder comparar com o método DNER esse período foi reduzido para 10 anos, para isso ser possível, foi necessário a realização do cálculo um novo N_{dim} (para 10 anos) através da equação 12.

$$N_{dim} = \alpha * NAVP \quad (12)$$

Onde:

N_{dim} → Número acumulado de passagens do eixo padrão;

α → Fator de agressividade do tráfego;

NAVP → Número acumulado de veículos pesados. (ver equação 13)

$$NAVP = 365 * (TMDA)^p * C * p * \alpha \quad (13)$$

Onde:

TMDAp → Tráfego médio diário anual de veículos pesados no ano de abertura, por sentido na via mais solicitada;

p → Período de dimensionamento;

C → Fator de crescimento do tráfego. (ver equação 14)

$$C = \frac{(1+t)^P - 1}{p*t} \quad (14)$$

Na tabela 23 são mostrados os resultados obtidos dos cálculos do novo Ndim e a classe de tráfego correspondente.

Tabela 23: Cálculo do Ndim (10 anos)

	T1	T2	T3	T4	T5	T6
TMDAp	1600	1000	650	400	225	100
Taxa de crescimento (%)	5,00	5,00	4,00	4,00	3,00	3,00
Tipo de pavimento	Flexível	Flexível	Flexível	Flexível	Flexível	Flexível
Período de dimensionamento (anos)	10	10	10	10	10	10
Fator de crescimento de tráfego	1,26	1,26	1,20	1,20	1,15	1,15
Número acumulado de veículos pesados (NAVP)	7345489,24	4590930,78	2848448,91	1752891,64	941471,09	418431,59
Fator de agressividade	5,50	5,00	4,50	4,00	3,00	2,00
Número acumulado de passagens do eixo padrão (Ndim)	4,04E+07	2,30E+07	1,28E+07	7,01E+06	2,82E+06	8,37E+05
Classes de tráfego resultantes para 10 anos	Classe T2	Classe T3	Classe T4	Classe T5	Classe T6	-

A classe T6 (10 anos) passou a ter um valor de Ndim referente a uma classe de estudo especial, por este motivo não foi considerada para o dimensionamento

Os dados apresentados nas tabelas 24 e 25 contém os resultados das espessuras obtidas para os dois métodos de dimensionamento com a classe de tráfego mais pesado e menos pesado, respectivamente (Classe T1 e T5; e o número $N = 4 * 10^7$; $2,8 * 10^6$). Foram elaboradas outras quatro tabelas como estas, uma para cada classe de tráfego presentes no anexo C.

Conforme indicado no Manual MACOPAV, as estruturas-tipo 1 e 3 não são adequadas para a classe de fundação F1, possibilitando assim apenas o dimensionamento da estrutura-tipo 2. O mesmo acontece pra as estruturas-tipo 2 e 3

as quais não são adequadas para classe de fundação F4. Para o DNER este problema não acontece, como o dimensionamento é baseado em abacos e equações, não se sofre limitações em relação a fundação, desde que esta possua um $\text{CBR} \geq 2\%$.

Tabela 24: Resultados obtidos dos dimensionamentos

MACOPAV			DNER			
Espessuras para a Classe de Tráfego T1 (10 Anos)			Espessuras resultantes $N = 4 \cdot 10^7$			
Estrutura tipo 1		Estrutura tipo 2	Estrutura tipo 3	Estrutura tipo 1	Estrutura tipo 2	Estrutura tipo 3
F1	-	BD/MBD/MB = 24 cm BG/SbG = 40 cm	-	CBR=4% CBUQ/PMQ = 25 cm MG=33,5 cm	CBUQ=10 cm MG=59 cm	CBUQ/PMQ = 25 cm Sc=33,5 cm
F2	BD/MBD/MB = 30 cm SbG=20 cm	BD/MBD/MB = 26 cm BG/SbG = 40 cm	BD/MB/MBD = 26 cm Sc=20 cm	CBR=6% CBUQ/PMQ = 25 cm MG=15 cm	CBUQ=10 cm MG=43 cm	CBUQ/PMQ = 25 cm Sc=15 cm
F3	BD/MBD/MB = 26 cm SbG=20 cm	BD/MBD/MB = 24 cm BG/SbG = 40 cm	BD/MB/MBD = 22 cm Sc=20 cm	CBR=12% CBUQ/PMQ = 25 cm MG=15 cm	CBUQ=10 cm MG=30 cm	CBUQ/PMQ = 25 cm Sc=15 cm
F4	BD/MBD/MB = 24 cm SbG=20 cm	-	-	CBR=15% CBUQ/PMQ = 25 cm MG=15 cm	CBUQ=10 cm MG = 30 cm	CBUQ/PMQ = 25 cm Sc=15 cm

Tabela 25: Resultados obtidos dos dimensionamentos

MACOPAV			DNER			
Espessuras para a Classe de Tráfego T5 (10 Anos)			Espessuras resultantes $N = 2,8 \cdot 10^6$			
Estrutura tipo 1		Estrutura tipo 2	Estrutura tipo 3	Estrutura tipo 1	Estrutura tipo 2	Estrutura tipo 3
F1	-	BD/MBD/MB = 12 cm BG/SbG = 40 cm	-	CBR=4% CBUQ/PMQ = 20 cm MG=31,5 cm	CBUQ=5 cm MG=62 cm	CBUQ/PMQ = 25 cm Sc=23 cm
F2	BD/MBD/MB = 16 cm SbG=20 cm	BD/MBD/MB = 12 cm BG/SbG = 40 cm	BD/MB/MBD = 12 cm Sc=20 cm	CBR=6% CBUQ/PMQ = 20 cm MG=20 cm	CBUQ=5 cm MG=48 cm	CBUQ/PMQ = 20 cm Sc=15 cm
F3	BD/MBD/MB = 12 m SbG=20 cm	BD/MBD/MB = 10 cm BG/SbG = 40 cm	BD/MB/MBD = 8 cm Sc=20 cm	CBR=12% CBUQ/PMQ = 20 cm MG=15 cm	CBUQ=5 cm MG=35 cm	CBUQ/PMQ = 20 cm Sc=15 cm
F4	BD/MBD/MB = 10 cm SbG=20 cm	-	-	CBR=15% CBUQ/PMQ = 20 cm MG=15 cm	CBUQ=5 cm MG =35 cm	CBUQ/PMQ = 20 cm Sc=15 cm

4.1.1. Fundação

As condições de fundação dos pavimentos têm um papel muito importante no desempenho da estrutura ao longo da vida útil dos pavimentos, dado que para efetuar o dimensionamento de pavimentos através dos métodos analíticos requer o conhecimento das características mecânicas dos materiais das camadas que o constituem, e da sua fundação, (Antunes, M. L.; et al, 1996).

Segundo os mesmos autores, é essencial que na fase de projeto sejam adaptadas, características adequadas para a fundação dos pavimentos, as quais, dependerão, dos solos de fundação existentes e dos materiais utilizados para a execução dos aterros, e das medidas que se adoptarem com vista à execução do leito do pavimento.

- **Comportamento das Camadas Granulares**

Após o dimensionamento, nota-se mudanças nas espessuras conforme se altera a classe de fundação. Para o MACOPAV as espessuras granulares não são alteradas com a mudança de fundação, permanecendo constantes para todas as classes, com exceção das classes F1 e F4 as quais não são adequadas em alguns casos como mencionado anteriormente.

No dimensionamento do DNER, as camadas granulares reduzem suas espessuras de acordo com que o valor de CBR aumenta, isso acontece devido ao aumento da capacidade resistente do solo. Porém para as estruturas tipo 2 por exemplo, as camadas granulares ultrapassam os 60 cm quando o CBR é igual a 4%. O motivo destas camadas terem espessuras assim, se da pelo baixo valor de CBR. Para garantir a funcionalidade dos pavimentos optou-se pelo uso da camada de reforço de subleito. Com a baixa resistência do solo de fundação as camadas de base tendem a ter grandes espessuras ultrapassando os 20 cm (espessura máxima imposta pelo DNIT), nestes casos, o Manual propõe a inserção de uma nova camada com a finalidade de reforçar o leito do pavimento e de otimizar as espessuras da base.

- Comportamento das Camadas Betuminosas

Conforme a capacidade resistente da fundação aumenta (F1→F4), as camadas betuminosas reduzem gradativamente as suas espessuras.

Para o DNER as camadas betuminosas mantem sua espessura ao longo da mudança da fundação, uma vez que, ela está ligada as condições de tráfego.

4.1.2. Tráfego

Um dos objetivos do dimensionamento de pavimentos é calcular e verificar as espessuras e compatibilizar os materiais de forma que, durante a vida útil, este pavimento seja capaz de resistir aos esforços impostos pelo tráfego.

A classificação do tráfego muda de acordo com a sua caracterização, ou seja, a cada classe de tráfego, associa-se uma taxa geométrica média anual de crescimento de pesados, dado fundamental para a previsão do tráfego pesado que solicitará o pavimento a projetar no período de dimensionamento. Sendo assim, temos que a classe T1 representa o tráfego mais pesado, e T6 o menos pesado. A seguir mostra-se o comportamento das camadas com a evolução do tráfego

- Comportamento das Camadas Granulares

Para o dimensionamento das camadas granulares o MACOPAV propõe espessuras fixas para todas as classes de tráfego variando de 20 a 40 cm, sendo essas variadas de acordo com a escolha do tipo de estrutura.

No DNER essas camadas não variam muito de acordo com o tráfego mais sim com tipo da fundação e da estrutura como mencionado no ponto 5.1.1.

- Comportamento das Camadas Betuminosas

Com a diminuição da solicitação do tráfego é comum que as camadas tem suas espessuras reduzidas o que acontece com o MACOPAV, porém o mesmo não acontece para o DNER, onde mesmo com o diminuir do tráfego suas espessuras se mantém quase as mesmas, variando apenas 5 cm entre o tráfego mais pesado (T1), e

um trafego mais leve (T6). Para o MACOPAV essa variação de espessura pode chegar aos 15 cm.

4.1.3. Estruturas Resultantes

- **Estruturas Tipo 1**

Essas estruturas tipo são menos recomendadas por possuírem camadas betuminosas mais espessas, uma vez que, estes materiais são considerados nobres, e pela a necessidade de instalações complexas para o seu fabrico, isso faz com que aumente assim consideravelmente o custo da obra.

Para esse tipo de estrutura onde ambas são dimensionadas com uma base betuminosa verificou-se que:

- A estrutura do MACOPAV referente a classe de tráfego T1 (10 anos), teve espessuras maiores, em média 7,6 % em seu resultado final para as camadas betuminosas e média de 25 % para as camadas granulares.

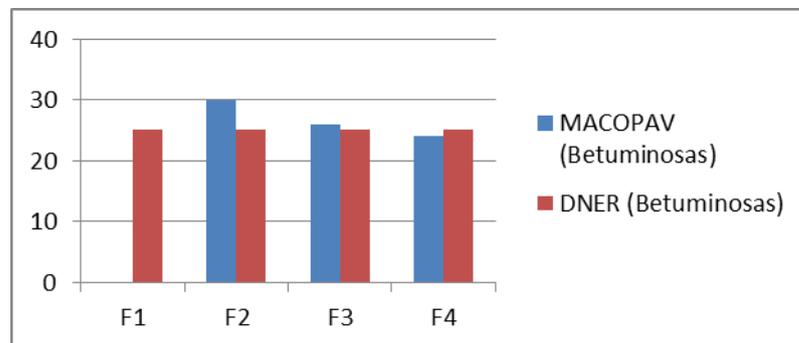


Figura 11: Resultantes das camadas betuminosas para estrutura-tipo 1; tráfego T1;

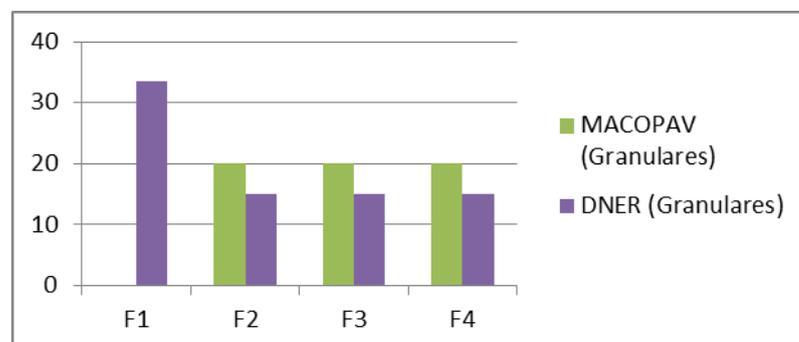


Figura 12: Resultantes das camadas granulares para estrutura-tipo 1; tráfego T1;

- Já para classe de tráfego mais leve T5 (10 anos) o inverso acontece, onde esta sofre uma redução de cerca de 63 % em relação a estrutura do DNER.

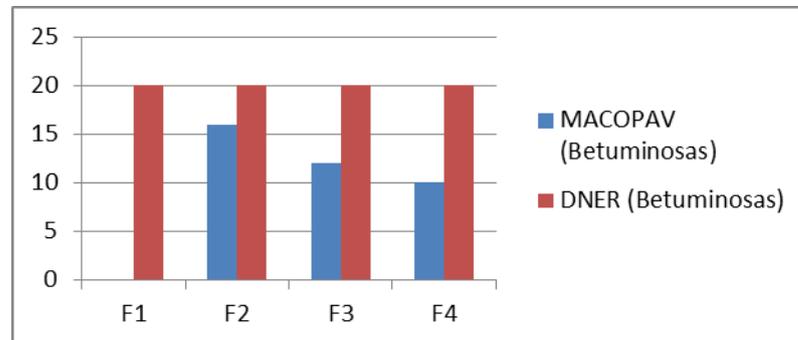


Figura 13: Resultantes das camadas betuminosas para estrutura-tipo 1; tráfego T5;

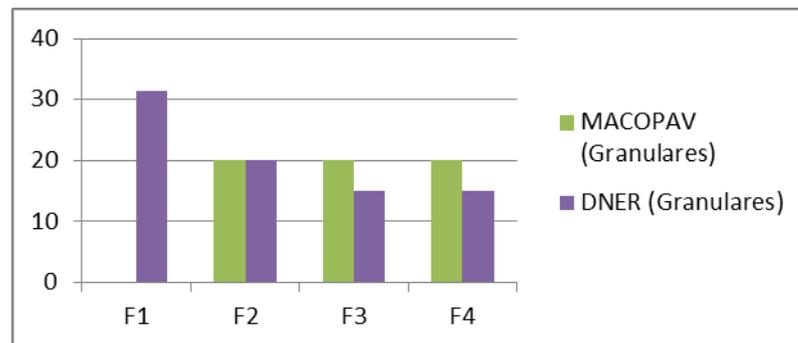


Figura 14: Resultantes das camadas granulares para estrutura-tipo 1; tráfego T5;

• Estruturas Tipo 2

Estruturas com base granular é o tipo de estrutura mais usual, devido o seu custo benefício, por ter espessuras betuminosas menores em relação as estruturas tipo 1 que são constituídas por bases betuminosas.

- Nos dimensionamentos isso acontece para os dois métodos durante toda a variação de tráfego (de T1 a T6), as camadas betuminosas tendem a reduzir sua espessura de acordo com a redução do tráfego.

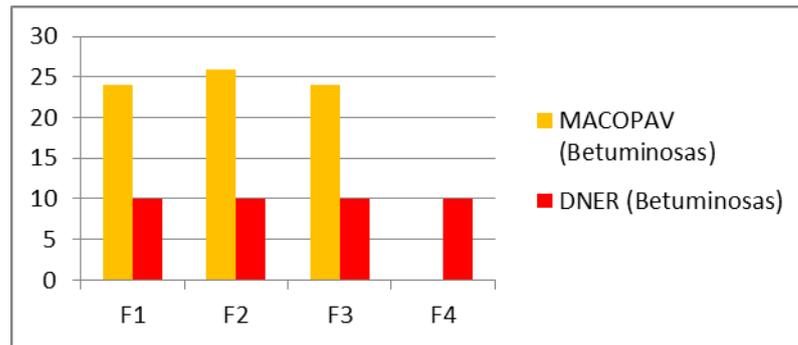


Figura 15: Resultantes das camadas betuminosas para a estrutura-tipo 2; tráfego T1;

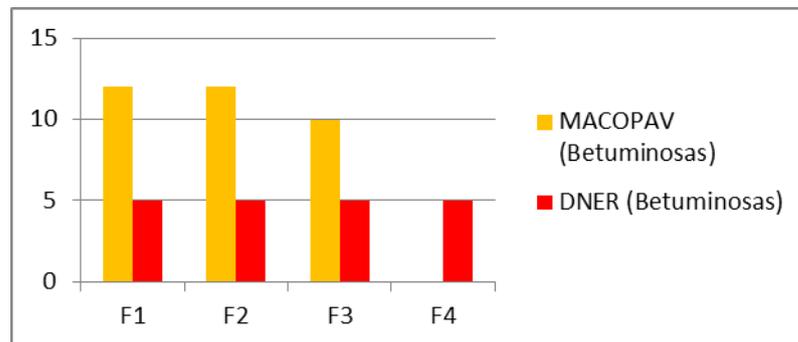


Figura 16: Resultantes das camadas betuminosas para a estrutura-tipo 2; tráfego T5;

- Porém as camadas granulares resultantes do DNER, possuem grandes espessuras principalmente onde o CBR é menor como já mencionado anteriormente.



Figura 17: Resultantes das camadas granulares para estrutura-tipo 2; tráfego T1;



Figura 18: Resultantes das camadas granulares para estrutura-tipo 2; tráfego T5;

- **Estruturas Tipo 3**

- Para as estruturas com solo-cimento em sua composição, dimensionadas pelo método DNER, as espessuras mantiveram-se com valores muito próximos variando de 20 a 25 cm, com as mudanças no tráfego.
- Já para as estruturas MACOPAV, as espessuras sofreram uma redução significativa cerca de 59% em suas camadas betuminosas analisando de um tráfego para o outro. Obtendo assim camadas mais finas em relação ao DNER

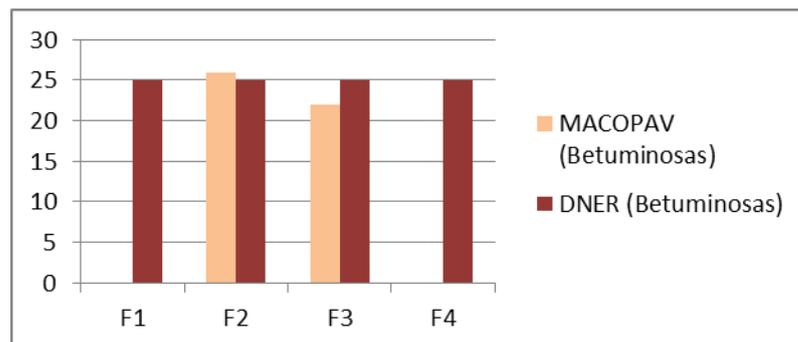


Figura 19: Resultantes das camadas betuminosas para estrutura-tipo 3; tráfego T1;

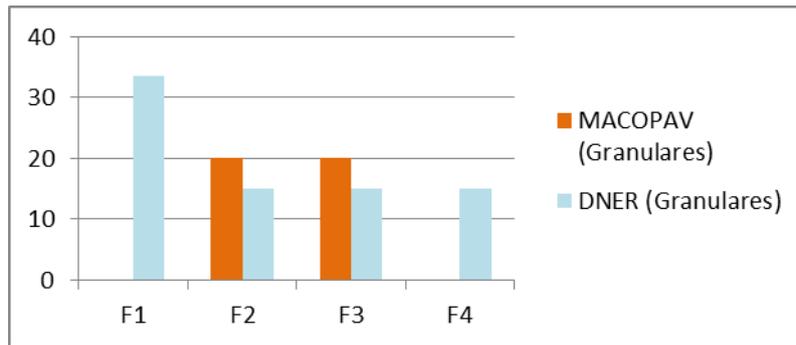


Figura 20: Resultantes das camadas granulares para estrutura-tipo 3; tráfego T1;

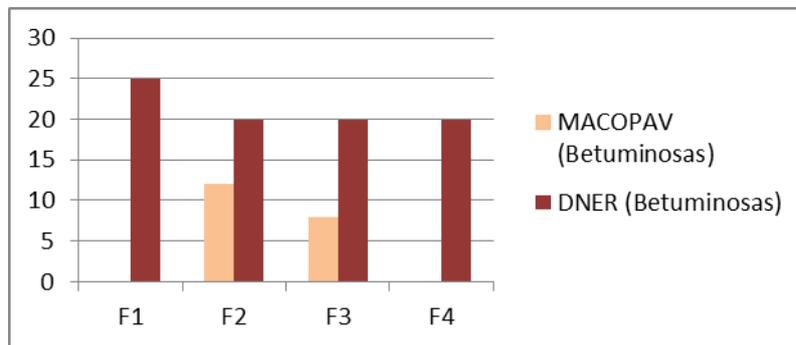


Figura 21: Resultantes das camadas betuminosas para estrutura-tipo 3; tráfego T5;

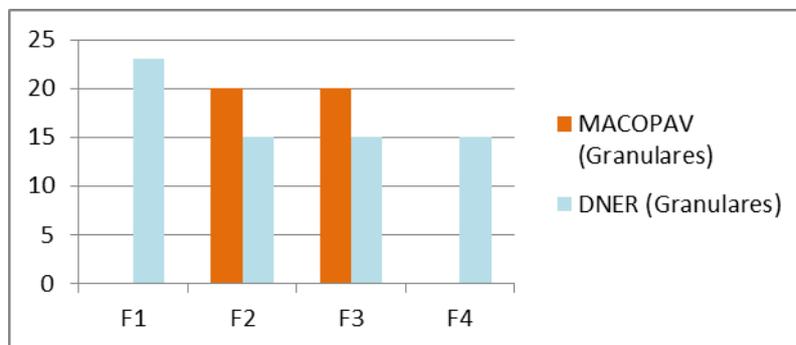


Figura 22: Resultantes das camadas granulares para estrutura-tipo 3; tráfego T5;

5. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

5.1. CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como objetivo demonstrar a aplicação a casos específicos de carregamento do tráfego e condições de fundação de dois métodos expeditos de dimensionamento de pavimentos flexíveis, determinados pelo manual brasileiro e o manual português, a fim de realizar um estudo de caso visando discutir o dimensionamento em termos das espessuras finais dos pavimentos.

Este trabalho seguiu o Manual português proposto pela (ex JAE, 1995), o MACOPAV (Manual de Concepção De Pavimentos para a rede Rodoviária Nacional), e o Manual de pavimentação proposto pelo DNER (Departamento Nacional de Estradas e Rodagem). Por meio deles pode se seguir o processo detalhado dos cálculos para a obtenção dos resultados de todas as 124 estruturas analisadas, estas estão dispostas de uma forma representativa, para cada classe de tráfego e fundação.

Após esta determinação, realizou-se comparações entre os métodos, abordando os tipos de estruturas, espessuras, materiais e vida útil dos pavimentos. Observou-se que em termos de espessura para algumas classes de tráfego o MACOPAV possui espessuras betuminosas maiores em relação aos do DNER.

Por sua vez, no que diz respeito as camadas granulares observa-se que, o MACOPAV propõe que estas sejam fixas para cada tipo de estrutura. Para a estrutura tipo 1 por exemplo essas camadas são fixadas com o valor de 20 cm para qualquer classe de tráfego e fundação, o mesmo acontece para as outras estruturas tipo 2 e 3. Em relação ao DNER as espessuras dessas camadas são influenciadas diretamente com o CBR da fundação, onde conforme o valor de CBR aumenta, as espessuras das camadas diminui.

Apesar disso, conclui-se que das variadas estruturas tipo resultantes, não se encontram diferenças significativas em termos de espessuras e materiais usados, observa-se que, na sua aplicação no dia a dia, o pavimento português é dimensionado para um tempo de vida útil de 20 anos onde este se torna um pavimento de custo elevado em sua fase de construção porém requer menos manutenção ao longo de sua vida útil. Para o pavimento brasileiro este dimensionamento é feito para 10 anos visando um menor custo por tempo de vida útil porém, este requer manutenções

constantes o que acaba gerando um custo mais alto se comparado com o outro método.

Assim os principais objetivos foram alcançados durante a realização deste estudo que detalha todo o seu desenvolvimento e a execução necessária para esta pesquisa.

5.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com este trabalho realizado pode desenvolver algumas sugestões de estudos futuros baseados em pesquisa similares a este tema proposto dentre eles são:

- Otimizar as espessuras das camadas para baixo volume de tráfego propostas pelo método DNER e avaliar se desempenho e influência na estrutura;
- Desenvolver estudos mais aprofundados para dimensionamentos realizados com a Classe de Fundação F1;
- Realizar análises acerca do dimensionamento de estruturas (para ambos os métodos) compostos por materiais recicláveis, como asfalto-borracha;
- Efetuar estudos, de forma análoga à este trabalho, em relação aos pavimentos rígidos exposto pelos métodos;

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Antunes, M. L.; Branco, F.; Barros, R., (1996). “Avaliação in situ das Condições de Fundação dos Pavimentos Rodoviários com Base em Ensaio de Carga”
- BASTOS, J. B. S. (2013) - Influência da variação da umidade no comportamento de pavimentos da região metropolitana de Fortaleza. (Mestrado em Engenharia de Transportes)-Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.
- BERNUCCI, L. B. (2008) - Pavimentação Asfáltica - Formação Básica para Engenheiros. 1. ed. Rio de Janeiro: [s.n.], v. 1, Pág.504.
- Brás, M.I.M. (2012) - Validação estrutural dos pavimentos flexíveis indicados no “Manual de Concepção de Pavimentos para a Rede Rodoviária Nacional”. Faculdade de Engenharia Universidade do Porto.
- Coutinho, J.C.P. (2011) - Dimensionamento de pavimento asfáltico: comparação do método do DNER com um método Mecanístico-Empírico aplicada a um trecho. Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto-MG.
- CNT (2017) - Confederação Nacional do Transporte. Por que os pavimentos das rodovias no Brasil não duram.
- CEPSA.(2014) Manual de Pavimentação. Companhia Espanhola de Petróleos. Lisboa.
- Dias. W; Silva. C; Adorno. A; Vasconcelos. J; (2020). Base de solo-cimento para pavimentos flexíveis. Artigo publicado no Brazilian Journal of development.
- DNIT. (2006) - Manual de Pavimentação - IPR -719. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Rio de Janeiro
- DNIT. (2017) - Manual de Custos de Infraestrutura de Transportes. Volume 8. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Brasília.
- Ferreira, E.B.N (2019) - Contribuição para aplicação do MACOPAV na concepção expedita de pavimentos rodoviários flexível. Escola Superior de Tecnologia e de Gestão, Instituto Politécnico de Bragança.

JAE. (1995) - Manual de Concepção de Pavimentos para a Rede Rodoviária Nacional. Junta Autónoma de Estradas. Portugal.

Morais. M. M. H. (2011) - Estudo da fundação dum pavimento rodoviário flexível. Escola Superior de Tecnologia e de Gestão, Instituto Politécnico de Bragança.

Neto, R. S. B. (2004) - Análise comparativa de pavimentos dimensionados através dos métodos empíricos do DNER e mecanísticos e proposta de um catálogo simplificado de pavimento para a região de campo grande (MS). Escola de engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos.

Pereira, P.; Pais, J. (2017) - Main flexible pavement and mix design methods in Europe and challenges for the development of an European method. Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition). [S.l.].

IP-05. (2004) - Dimensionamento de pavimentos flexíveis tráfego meio pesado, pesado, muito pesado e faixa exclusiva de ônibus. Arquivo da secretaria de Infraestrutura da prefeitura de São Paulo.

Rodrigues. J. P. L. (2013) – Análise e aplicação do método de dimensionamento de pavimentos da AASHTO. Departamento de engenharia civil- Faculdade de ciências e tecnologia Universidade de Coimbra

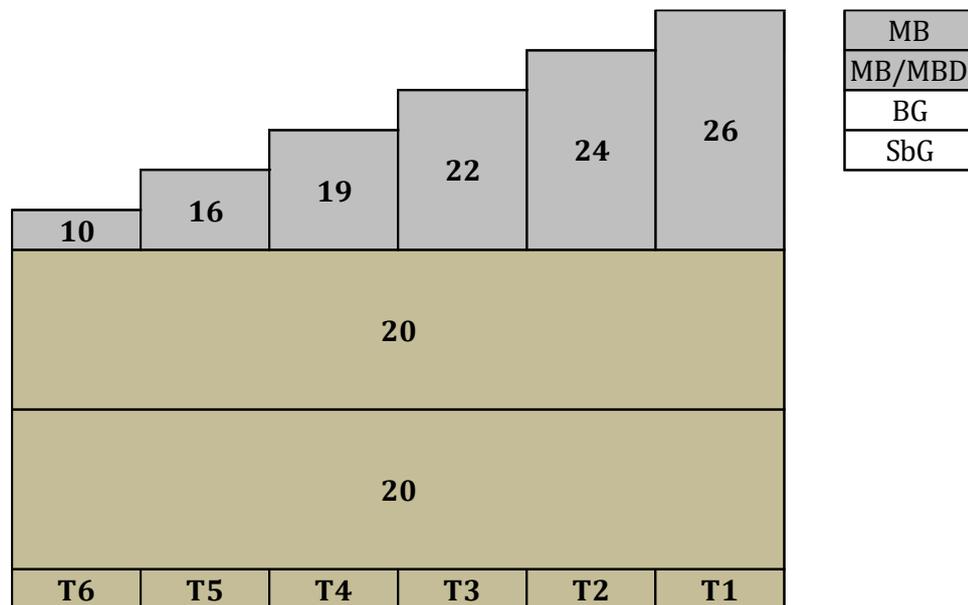
Santos. C. R. G. (2011), Dimensionamento e análise do ciclo de vida de pavimento rodoviários: Uma abordagem probabilística. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

SOUZA. M. L. (1981), Método de projeto de pavimentos flexíveis. 3 Ed. Rio de Janeiro

ANEXOS

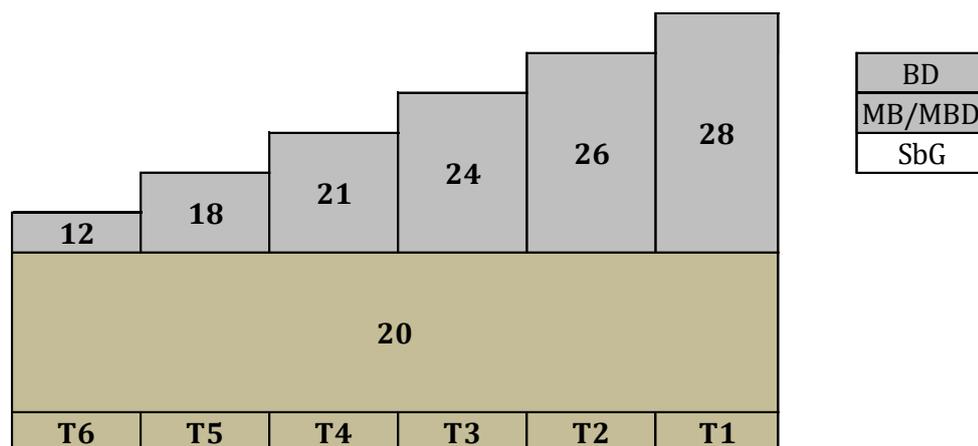
(Dimensionamento MACOPAV)

- Estruturas Tipo de pavimento flexível propostas pelo manual MACOPAV
- Plataforma de fundação F3



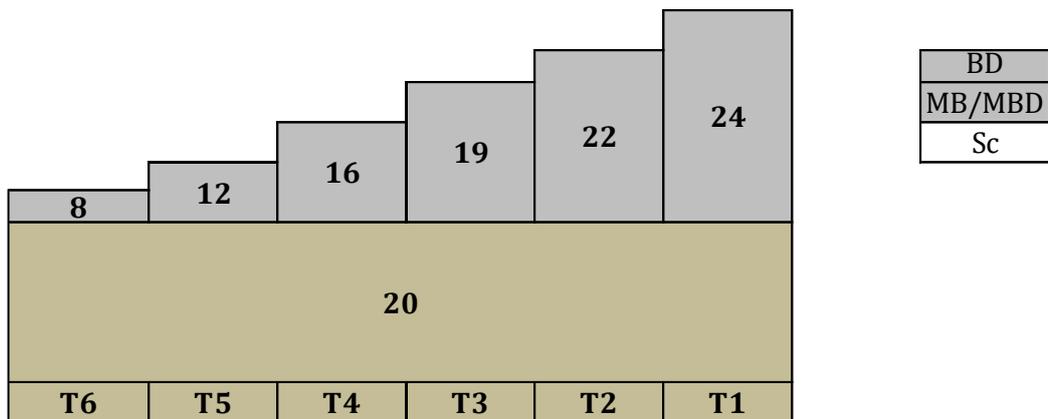
Correção das espessuras, medidas dadas em centímetro

F1	+5 cm (T5,T6)
F2	+ 2 cm
F4	Não adequado



Correção das espessuras, medidas dadas em centímetro

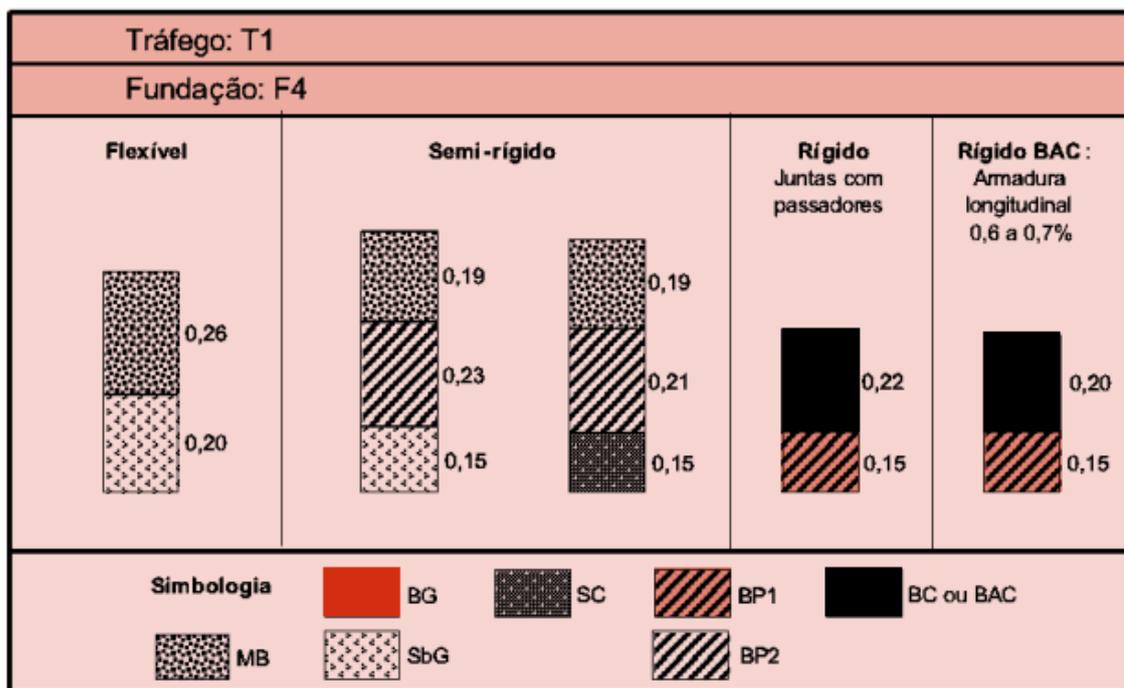
F1	Não adequado
F2	+ 4 cm
F4	-2 cm



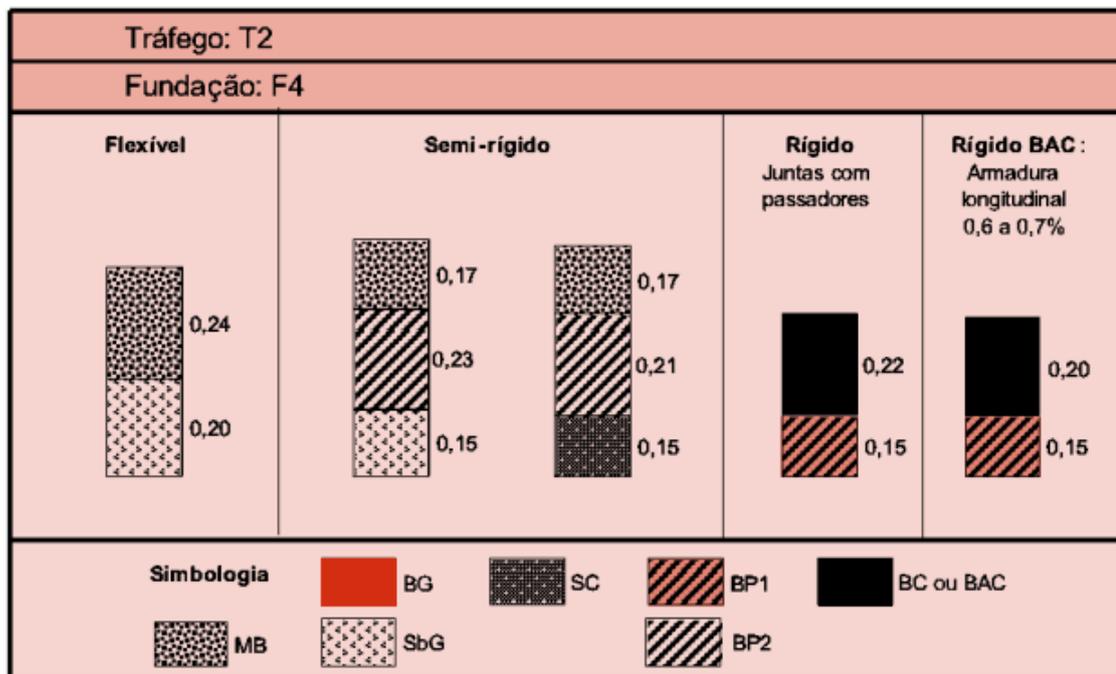
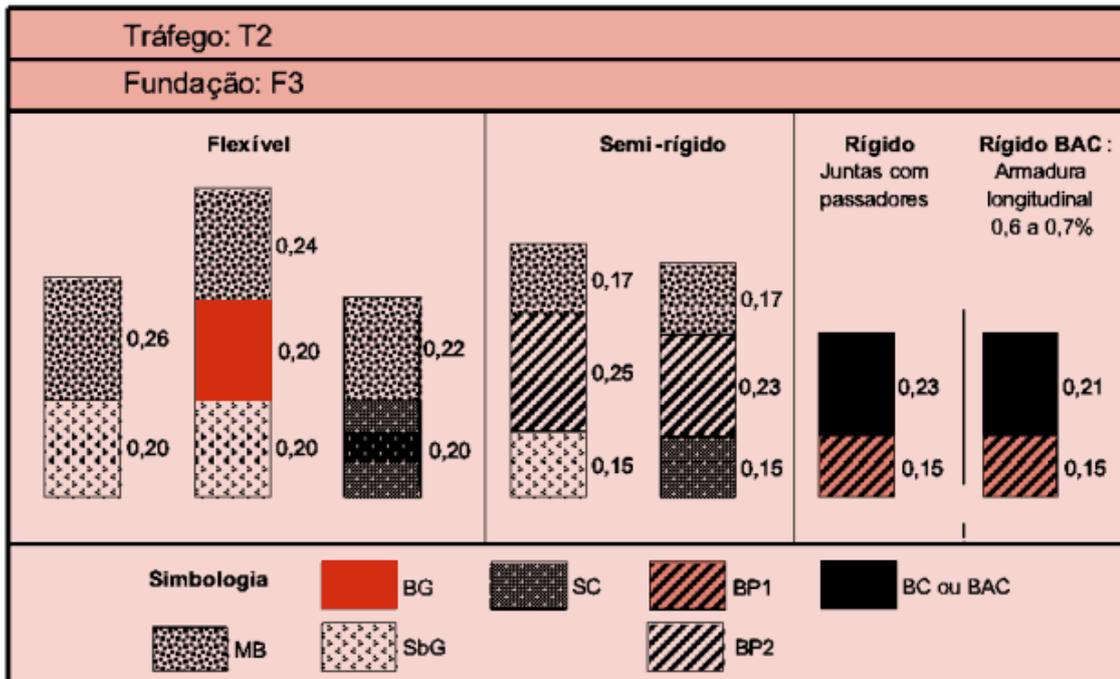
Correção das espessuras, medidas dadas em centímetro

F1	Não adequado
F2	+ 4 cm
F4	Não adequado

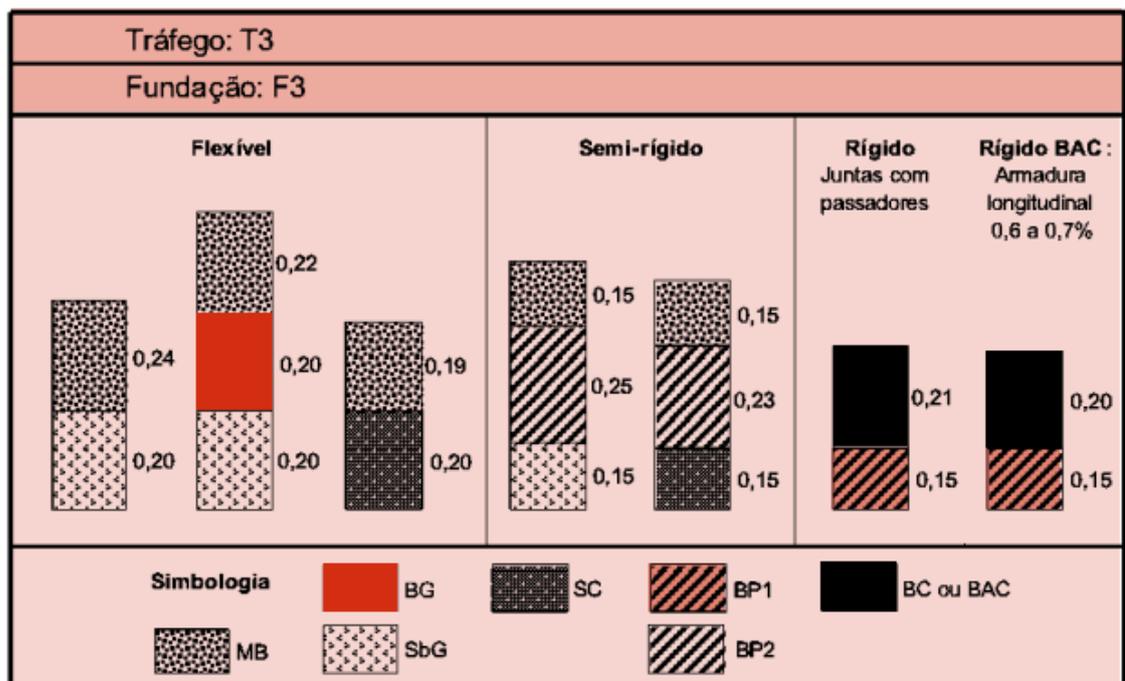
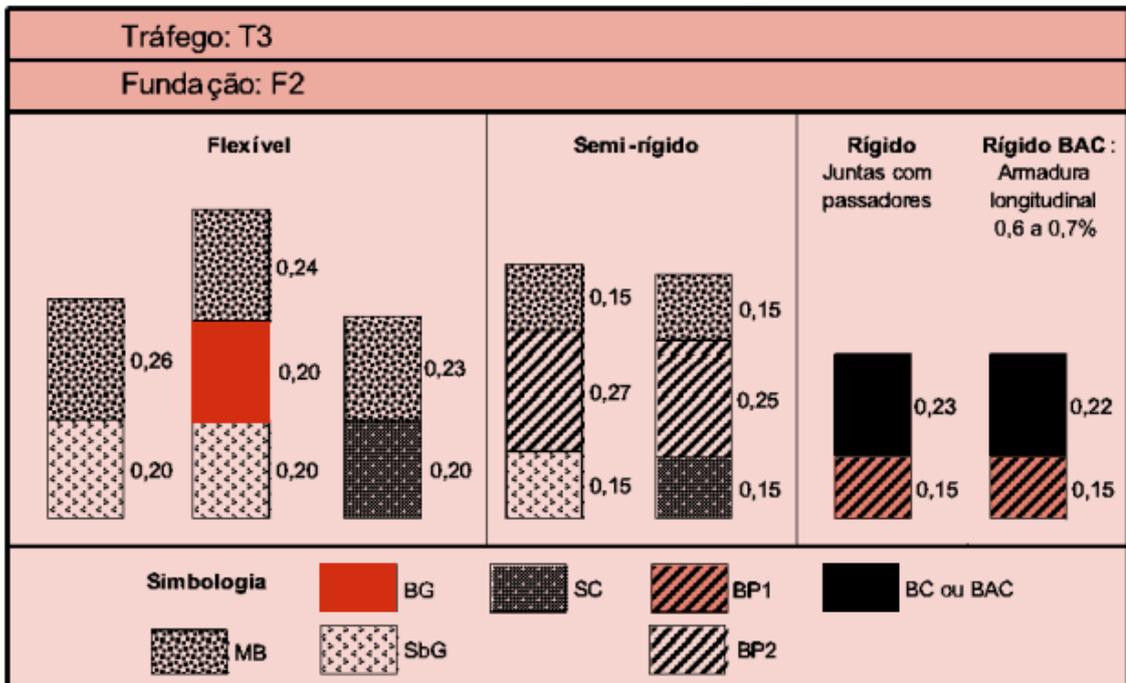
- Estruturas de pavimento para a classe de Tráfego T1 (CESPA, 2014; Adaptado de JAE, 1995)

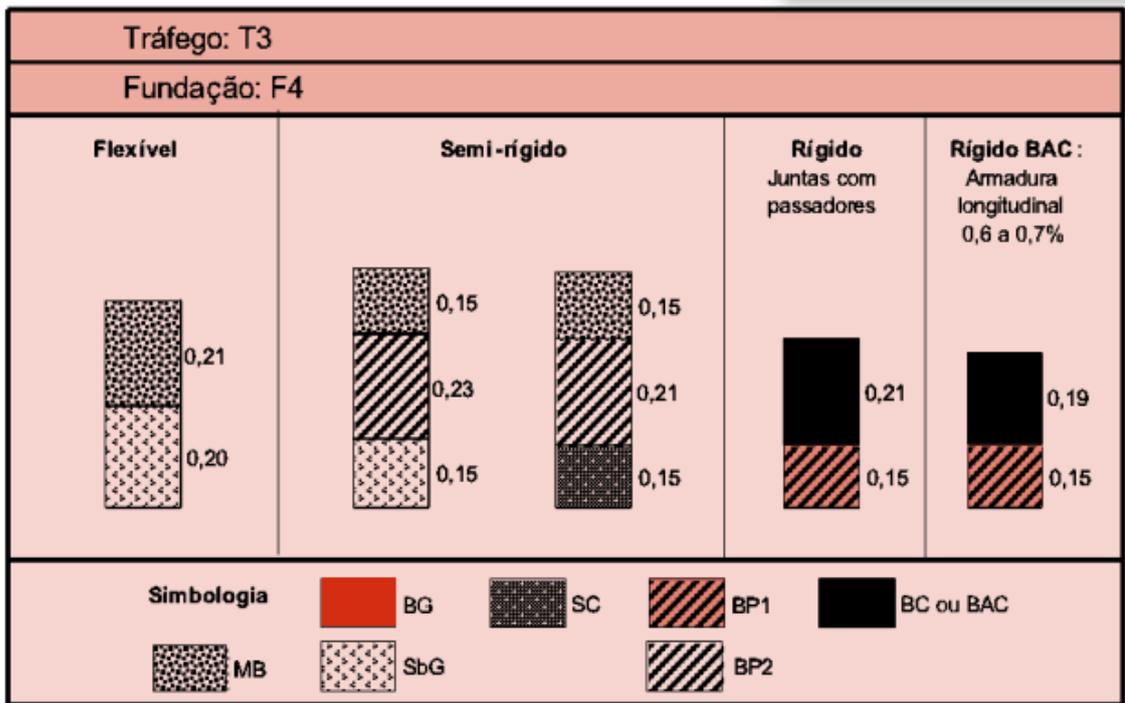


- Estruturas de pavimento para a classe de Tráfego T2 (CESPA, 2014; Adaptado de JAE, 1995)

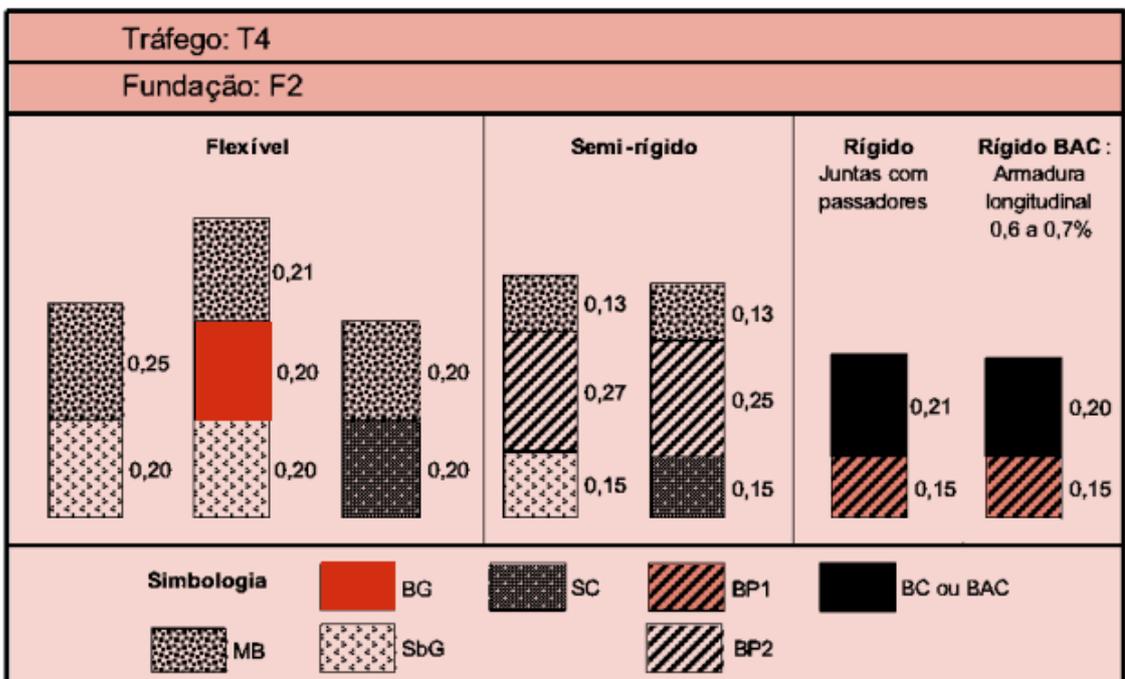


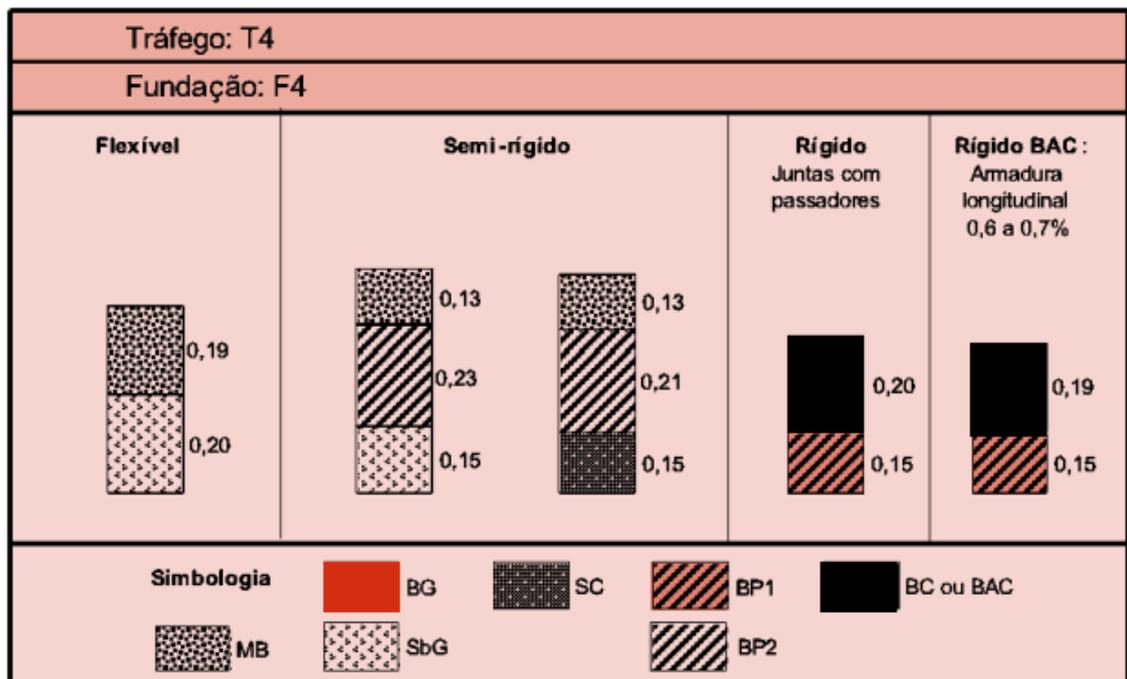
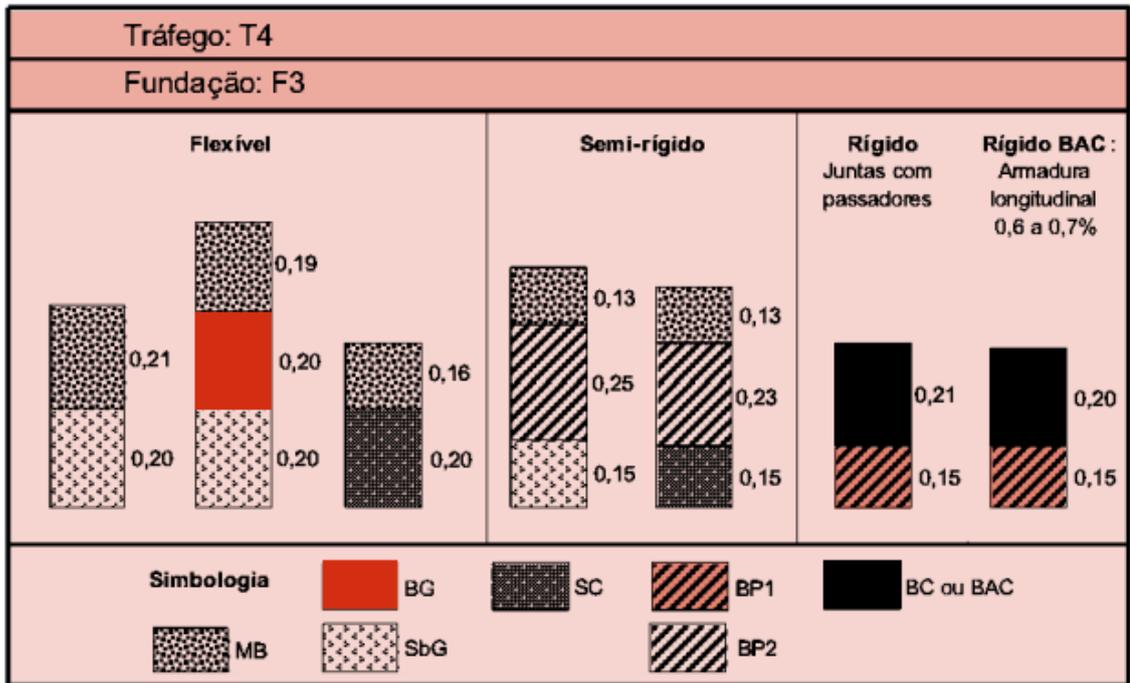
- Estruturas de pavimento para a classe de Tráfego T3 (CESPA, 2014; Adaptado de JAE, 1995)



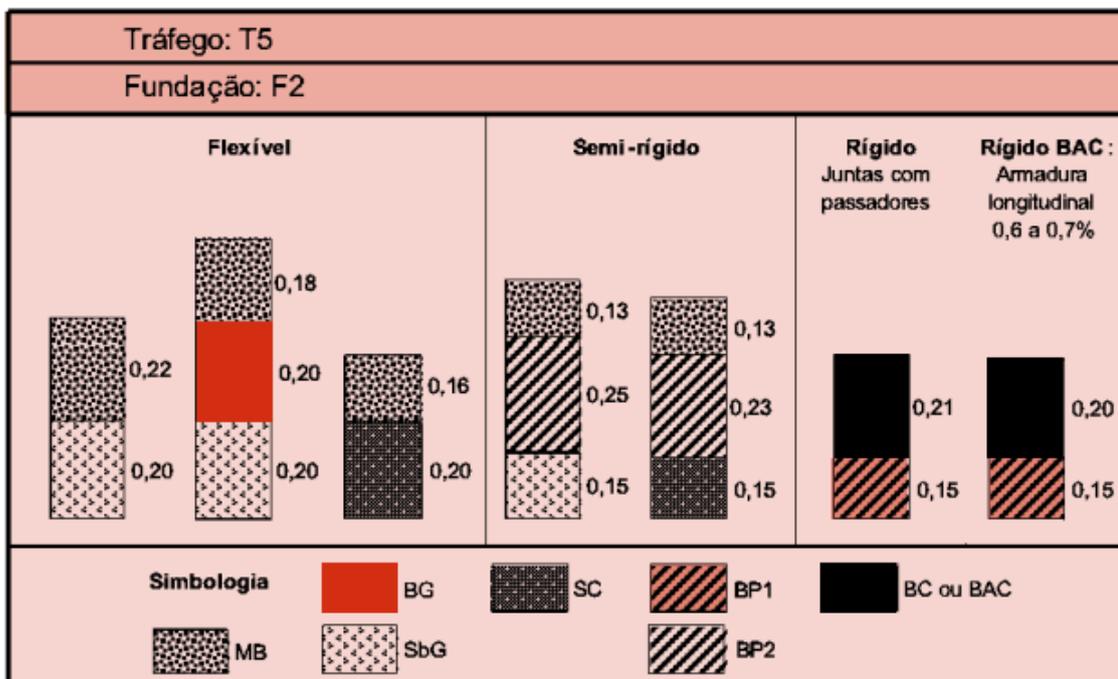
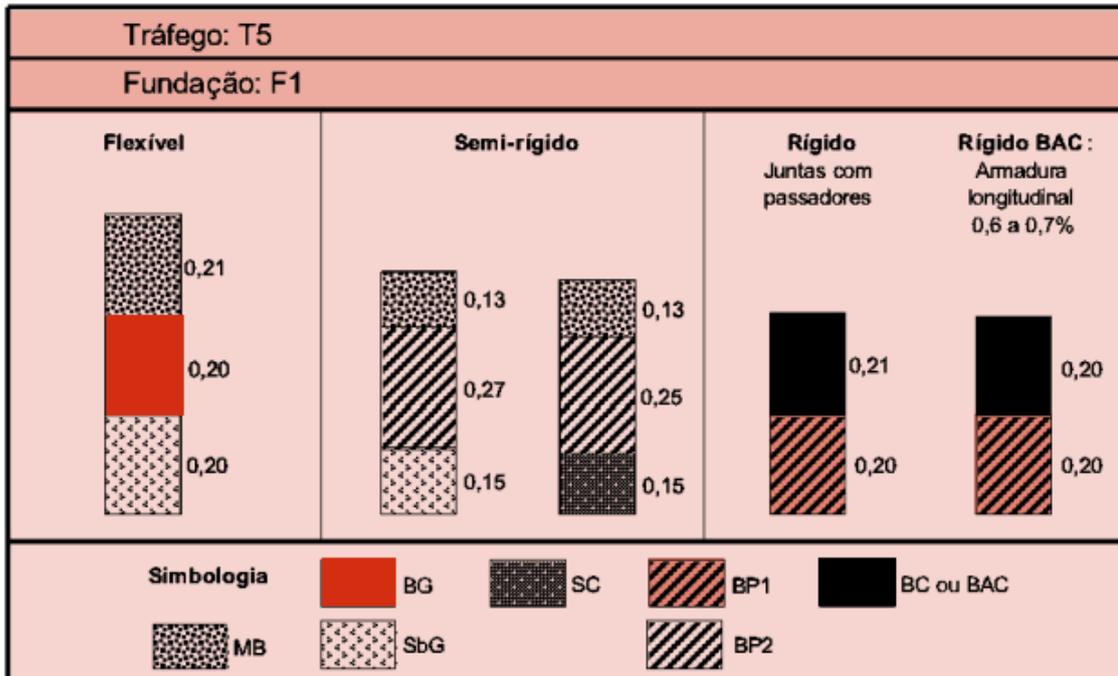


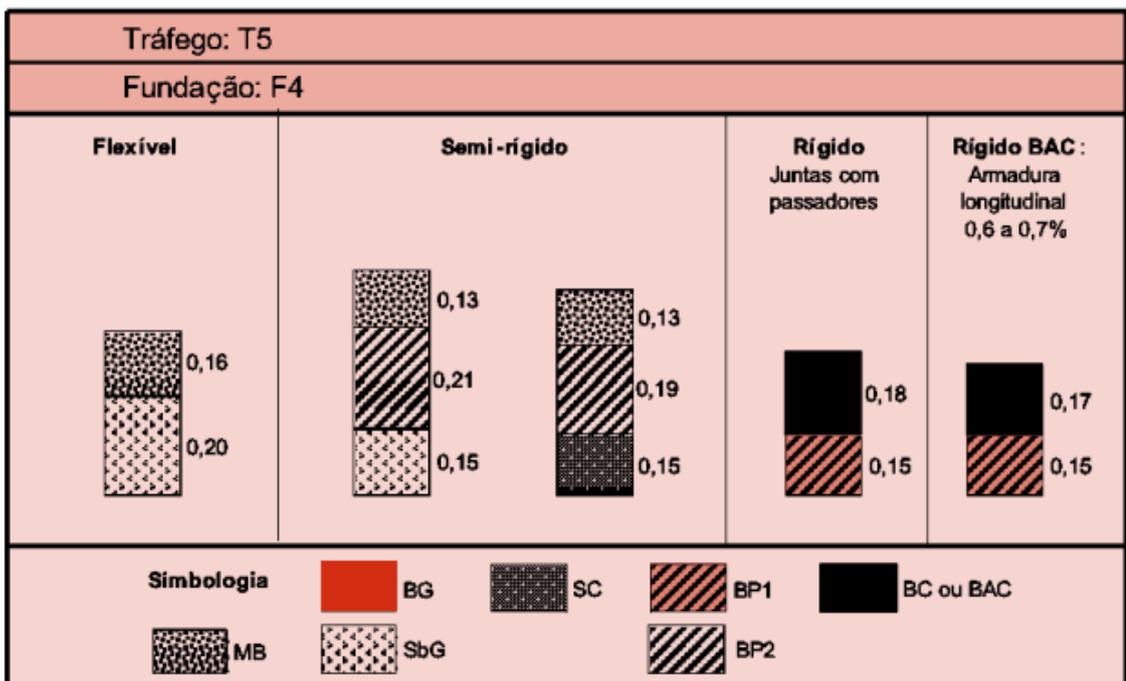
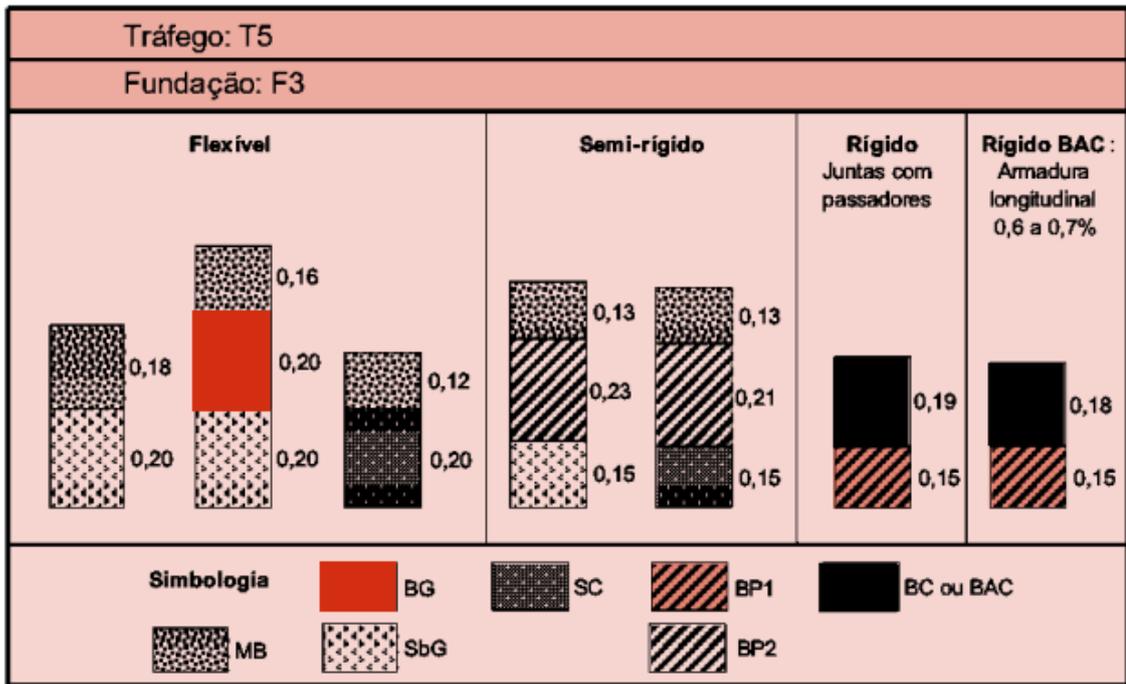
- Estruturas de pavimento para a classe de Tráfego T4 (CESPA, 2014; Adaptado de JAE, 1995)



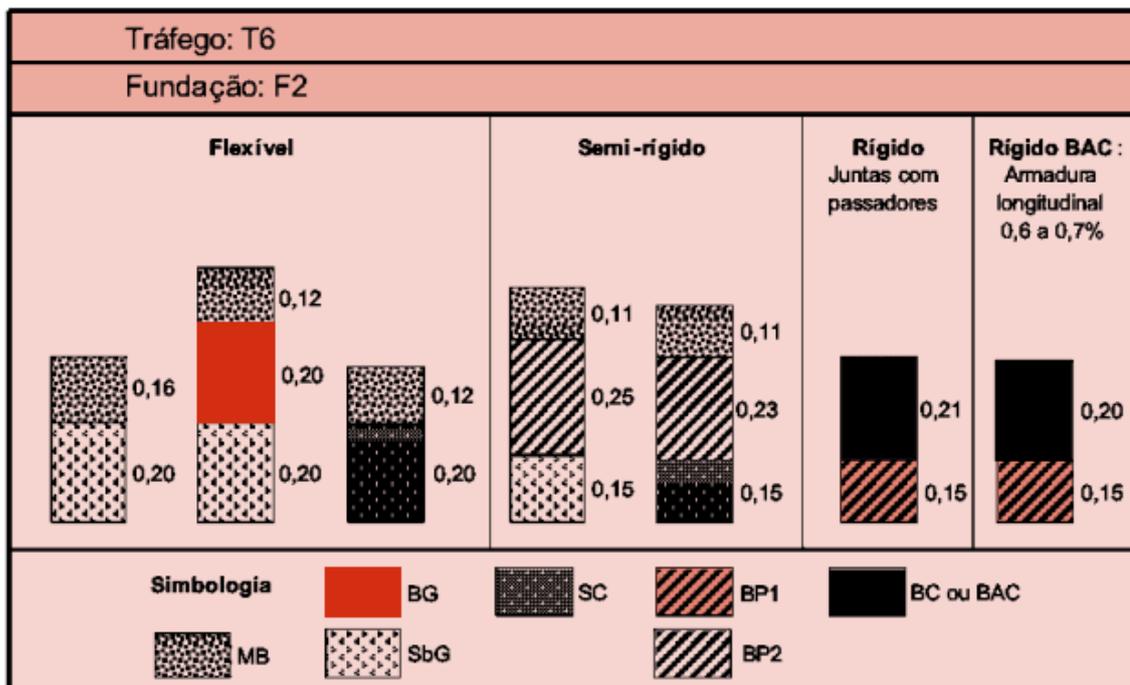
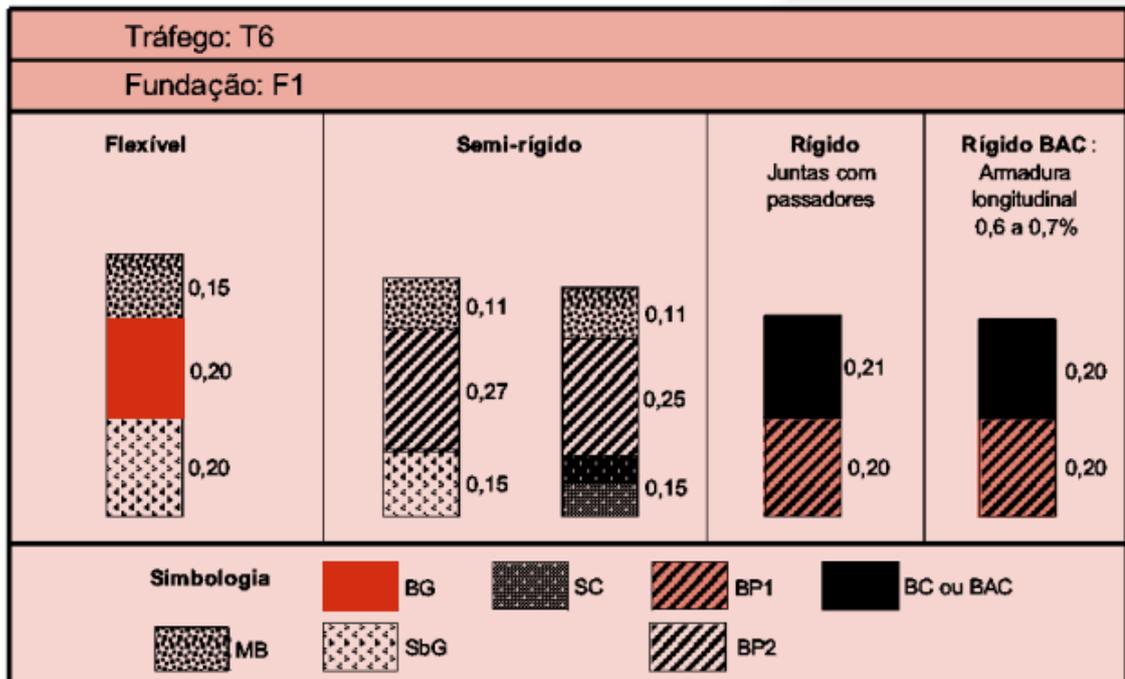


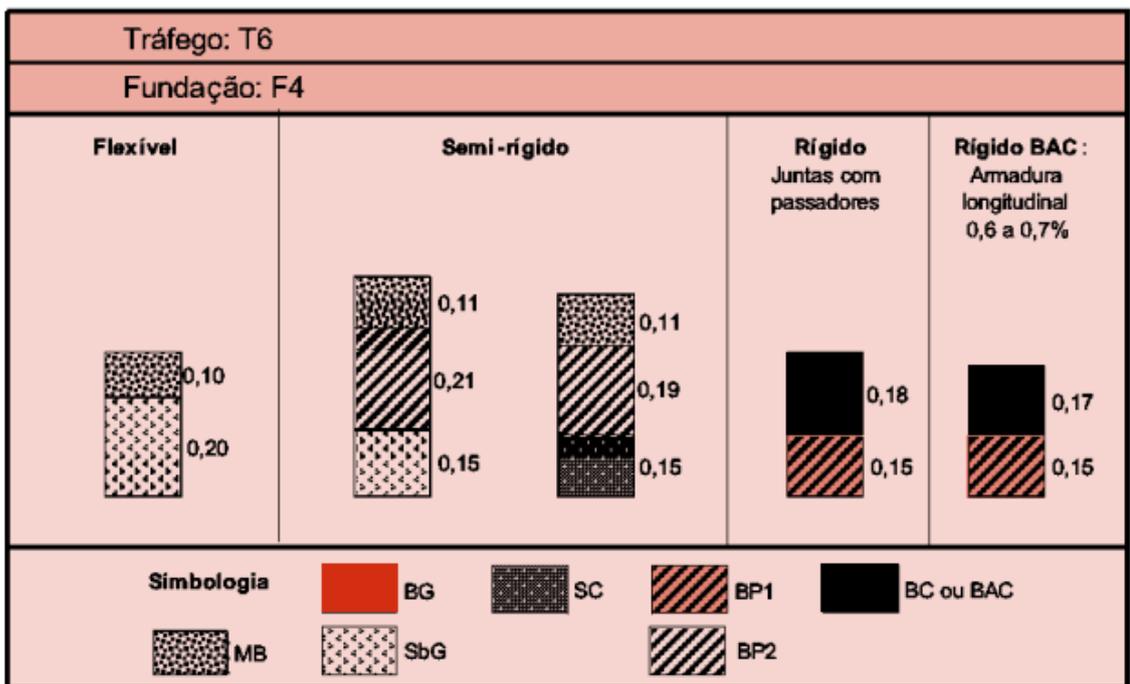
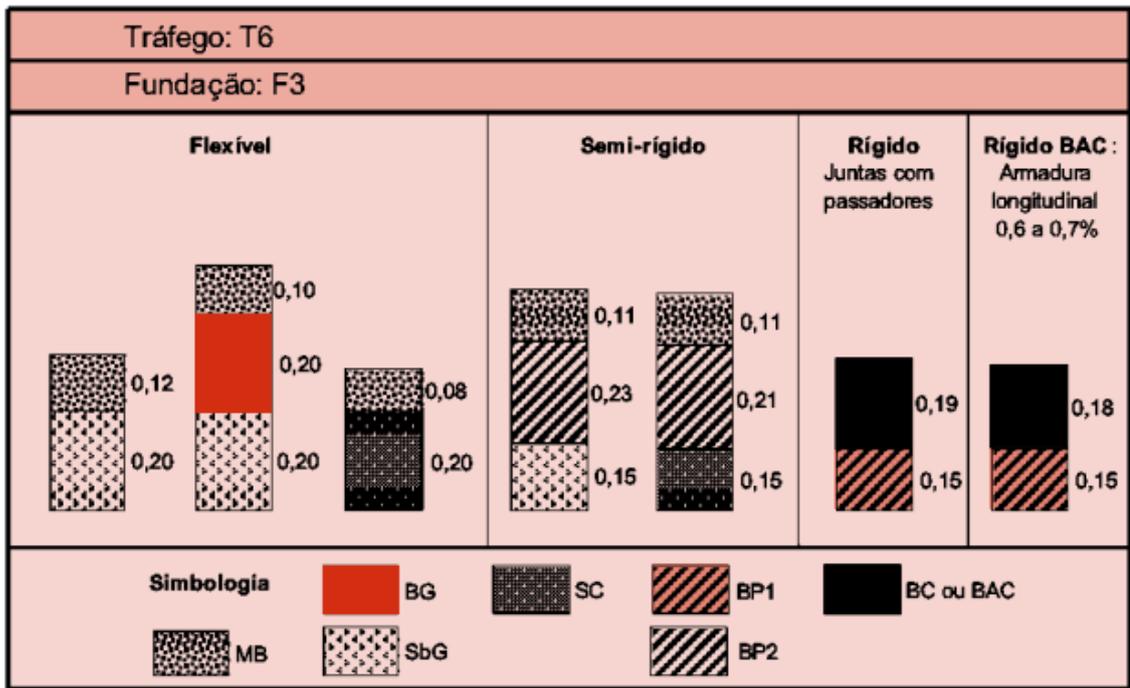
- Estruturas de pavimento para a classe de Tráfego T5 (CESPA, 2014; Adaptado de JAE, 1995)





- Estruturas de pavimento para a classe de Tráfego T6 (CESPA, 2014; Adaptado de JAE, 1995)





ANEXO B
(Dimensionamento DNER)

- Planilhas de Cálculo

Estrutura Tipo 1

	CBR do Subleito (Fundação) 4%					CBR do Subleito (Fundação) 6%				
	$N = 4 * 10^7$	$N = 2,3 * 10^7$	$N = 1 * 10^7$	$N = 7 * 10^6$	$N = 2,8 * 10^6$	$N = 4 * 10^7$	$N = 2,3 * 10^7$	$N = 1 * 10^7$	$N = 7 * 10^6$	$N = 2,8 * 10^6$
R	10	10	7,5	7,5	5	10	10	7,5	7,5	5
Kr	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
B	8,70588235	8	10,9411765	10,2352941	11,76470588	8,705882353	8	10,9411765	10,23529412	11,76470588
Base Adotada	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
Kb	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7
H20	29	28	28	27	25	29	28	28	27	25
Ks	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
h20	-4,5	-5,5	-1,5	-2,5	1,5	17,5	15,5	17,5	16,5	17,5
Sub-base Adotada	15	15	15	15	15	15	20	15	20	20
Hn	41	40	39	38	37	41	40	39	38	37
Kref	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
hn	18,5	15,5	18,5	16,5	16,5					
Hm	79	76	74	72	67	63	61	58	57	53
Camadas Granulares	33,5	30,5	33,5	31,5	31,5	15	20	15	20	20
Camadas Betuminosas	25	25	22,5	22,5	20	25	25	22,5	22,5	20

CBR do Subleito (Fundação) 12%					CBR do Subleito (Fundação) 15%				
$N = 4 * 10^7$	$N = 2,3 * 10^7$	$N = 1,28 * 10^7$	$N = 7 * 10^6$	$N = 2,8 * 10^6$	$N = 4 * 10^7$	$N = 2,3 * 10^7$	$N = 1,2 * 10^7$	$N = 7 * 10^6$	$N = 2,8 * 10^6$
10	10	10	7,5	5	10	10	10	7,5	5
2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
8,705882353	8	8	10,2352941	11,76470588	8,70588235	8	8	10,235294	11,76470588
15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7
29	28	28	27	25	29	28	28	27	25
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
-3,5	-5,5	-6,5	-4,5	0,5	-10,5	-11,5	-12,5	-8,5	-4,5
15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
41	40	39	38	37	41	40	39	38	37
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
42	40	39	36	36	35	34	33	32	31
15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
25	25	25	22,5	20	25	25	25	22,5	20

- Estrutura Tipo 2

	CBR do Subleito (Fundação) 4%					CBR do Subleito (Fundação) 6%				
	$N = 4 * 10^7$	$N = 2,3 * 10^7$	$N = 1 * 10^7$	$N = 7 * 10^6$	$N = 2,8 * 10^6$	$N = 4 * 10^7$	$N = 2,3 * 10^7$	$N = 1 * 10^7$	$N = 7 * 10^6$	$N = 2,8 * 10^6$
R	10	10	7,5	7,5	5	10	10	7,5	7,5	5
Kr	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
B	14,8	13,6	18,6	17,4	20	14,8	13,6	18,6	17,4	20
Base Adotada	15	15	20	20	20	15	15	20	20	20
Kb	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
H20	29	28	28	27	25	29	28	28	27	25
Ks	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
h20	6	5	9	8	12	6	5	9	8	12
Sub-base Adotada	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
Hn	41	40	39	38	37	41	40	39	38	37
Kref	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
hn	29	26	29	27	27	13	11	13	12	13
Hm	79	76	74	72	67	63	61	58	57	53
Camadas Granulares	59	56	64	62	62	43	41	48	47	48
Camadas Betuminosas	10	10	7,5	7,5	5	10	10	7,5	7,5	5

CBR do Subleito (Fundação) 12%					CBR do Subleito (Fundação) 15%				
$N = 4 * 10^7$	$N = 2,3 * 10^7$	$N = 1 * 10^7$	$N = 7 * 10^6$	$N = 2,8 * 10^6$	$N = 4 * 10^7$	$N = 2,3 * 10^7$	$N = 1,2 * 10^7$	$N = 7 * 10^6$	$N = 2,8 * 10^6$
10	10	10	7,5	5	10	10	10	7,5	5
2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
14,8	13,6	13,6	17,4	20	14,8	13,6	13,6	17,4	20
15	15	15	20	20	15	15	15	15	20
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
29	28	28	27	25	29	28	28	27	25
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
7	5	4	6	11	0	-1	-2	2	6
15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
41	40	39	38	37	41	40	39	38	37
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
42	40	39	36	36	35	34	33	32	31

30	30	30	35	35	30	30	30	30	35
10	10	7,5	7,5	5	10	10	7,5	7,5	5

- Estrutura Tipo 3

	CBR do Subleito (Fundação) 4%					CBR do Subleito (Fundação) 6%				
	$N = 4 * 10^7$	$N = 2,3 * 10^7$	$N = 1 * 10^7$	$N = 7 * 10^6$	$N = 2,8 * 10^6$	$N = 4 * 10^7$	$N = 2,3 * 10^7$	$N = 1 * 10^7$	$N = 7 * 10^6$	$N = 2,8 * 10^6$
R	10	10	7,5	7,5	5	10	10	7,5	7,5	5
Kr	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
B	8,70588235	8	10,9411765	10,2352941	11,76470588	8,705882353	8	10,9411765	10,23529412	11,76470588
Base Adotada	15	15	15	20	20	15	15	15	15	15
Kb	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7
H20	29	28	28	27	25	29	28	28	27	25
Ks	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4
h20	23,9285714	21,7857143	23,9285714	22,5	22,5	12,5	11,07142857	12,5	11,78571429	12,5
Sub-base Adotada	20	20	20	20	20	15	15	15	15	15
Hn	41	40	39	38	37	41	40	39	38	37
Kref	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
hn	13,5	10,5	13,5	3	3					
Hm	79	76	74	72	67	63	61	58	57	53
Camadas Granulares	33,5	30,5	33,5	23	23	15	15	15	15	15
Camadas Betuminosas	25	25	22,5	27,5	25	25	25	22,5	22,5	20

CBR do Subleito (Fundação) 12%					CBR do Subleito (Fundação) 15%				
$N = 4 * 10^7$	$N = 2,3 * 10^7$	$N = 1,28 * 10^7$	$N = 7 * 10^6$	$N = 2,8 * 10^6$	$N = 4 * 10^7$	$N = 2,3 * 10^7$	$N = 1,2 * 10^7$	$N = 7 * 10^6$	$N = 2,8 * 10^6$
10	10	10	7,5	5	10	10	10	7,5	5
2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
8,705882353	8	8	10,2352941	11,76470588	8,70588235	8	8	10,235294	11,76470588
15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7
29	28	28	27	25	29	28	28	27	25
1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4
-2,5	-3,928571429	-4,642857143	-3,2142857	0,357142857	-7,5	-8,214285714	-8,92857143	-6,0714286	-3,21428571
15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
41	40	39	38	37	41	40	39	38	37
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
42	40	39	36	36	35	34	33	32	31
15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
25	25	25	22,5	20	25	25	25	22,5	20

Anexo C (Resultados)

Esessuras para a Classe de Tráfego T2 (10 Anos)

Estrutura tipo 1		Estrutura tipo 2	Estrutura tipo 3
F1	-	BD/MBD/MB =22 cm BG/SbG= 40 cm	-
F2	BD/MBD/MB =28 cm SbG=20 cm	BD/MBD/MB =24 cm BG/SbG= 40 cm	BD/MB/MBD =23 cm Sc=20 cm
F3	BD/MBD/MB =24 cm SbG=20 cm	BD/MBD/MB =22 cm BG/SbG= 40 cm	BD/MB/MBD =19 cm Sc=20 cm
F4	BD/MBD/MB =22 cm SbG=20 cm	-	-

Esessuras resultantes N= 2,3*10⁷

Estrutura tipo 1	Estrutura tipo 2	Estrutura tipo 3
CBR=4% CBUQ/PMQ = 25 cm MG=30,5 cm	CBUQ=10 cm MG=56 cm	CBUQ/PMQ = 25 cm Sc=30,5 cm
CBR=6% CBUQ/PMQ = 25 cm MG=20 cm	CBUQ=10 cm MG=41 cm	CBUQ/PMQ = 25 cm Sc=15 cm
CBR=12% CBUQ/PMQ = 25 cm MG=15 cm	CBUQ=10 cm MG=30 cm	CBUQ/PMQ = 25 cm Sc=15 cm
CBR=15% CBUQ/PMQ = 25 cm MG=15 cm	CBUQ=10cm MG =30 cm	CBUQ/PMQ = 25 cm Sc=15 cm

Espessuras para a Classe de Tráfego T3 (10 Anos)

Estrutura tipo 1		Estrutura tipo 2	Estrutura tipo 3
F1	-	BD/MBD/MB = 19 cm BG/SbG = 40 cm	-
F2	BD/MBD/MB = 25 cm SbG = 20 cm	BD/MBD/MB = 21 cm BG/SbG = 40 cm	BD/MB/MBD = 20 cm Sc = 20 cm
F3	BD/MBD/MB = 21 cm SbG = 20 cm	BD/MBD/MB = 19 cm BG/SbG = 40 cm	BD/MB/MBD = 16 cm Sc = 20 cm
F4	BD/MBD/MB = 19 cm SbG = 20 cm	-	-

Espessuras resultantes N = 1,28*10⁷

Estrutura tipo 1	Estrutura tipo 2	Estrutura tipo 3
CBR=4% CBUQ/PMQ = 22,5 cm MG = 33,5 cm	CBUQ = 7,5 cm MG = 64 cm	CBUQ/PMQ = 22,5 cm Sc = 33,5 cm
CBR=6% CBUQ/PMQ = 22,5 cm MG = 15 cm	CBUQ = 7,5 cm MG = 48 cm	CBUQ/PMQ = 22,5 cm Sc = 15 cm
CBR=12% CBUQ/PMQ = 25 cm MG = 15 cm	CBUQ = 7,5 cm MG = 30 cm	CBUQ/PMQ = 25 cm Sc = 15 cm
CBR=15% CBUQ/PMQ = 25 cm MG = 15 cm	CBUQ = 7,5 cm MG = 30 cm	CBUQ/PMQ = 25 cm Sc = 15 cm

Esessuras para a Classe de Tráfego T4 (10 Anos)

Estrutura tipo 1		Estrutura tipo 2	Estrutura tipo 3
F1	-	BD/MBD/MB = 21 cm BG/SbG = 40 cm	-
F2	BD/MBD/MB = 22 cm SbG = 20 cm	BD/MBD/MB = 18 cm BG/SbG = 40 cm	BD/MB/MBD = 16 cm Sc = 20 cm
F3	BD/MBD/MB = 18 cm SbG = 20 cm	BD/MBD/MB = 16 cm BG/SbG = 40 cm	BD/MB/MBD = 12 cm Sc = 20 cm
F4	BD/MBD/MB = 16 cm SbG = 20 cm	-	-

Esessuras resultantes N= 7*10^6

Estrutura tipo 1	Estrutura tipo 2	Estrutura tipo 3
CBR=4% CBUQ/PMQ = 22,5 cm MG=31,5 cm	CBUQ=7,5 cm MG=62 cm	CBUQ/PMQ = 27,5 cm Sc=23 cm
CBR=6% CBUQ/PMQ = 22,5 cm MG=20 cm	CBUQ=7,5 cm MG=42 cm	CBUQ/PMQ = 22,5 cm Sc=15 cm
CBR=12% CBUQ/PMQ = 22,5 cm MG=15 cm	CBUQ=7,5 cm MG=35 cm	CBUQ/PMQ = 22,5 cm Sc=15 cm
CBR=15% CBUQ/PMQ = 22,5 cm MG=15 cm	CBUQ=7,5 cm MG=30 cm	CBUQ/PMQ = 22,5 cm Sc=15 cm

Espessuras para a Classe de Tráfego T5 (10 Anos)

Estrutura tipo 1		Estrutura tipo 2	Estrutura tipo 3
F1	-	BD/MBD/MB = 12 cm BG/SbG = 40 cm	-
F2	BD/MBD/MB = 16 cm SbG = 20 cm	BD/MBD/MB = 12 cm BG/SbG = 40 cm	BD/MB/MBD = 12 cm Sc = 20 cm
F3	BD/MBD/MB = 12 cm SbG = 20 cm	BD/MBD/MB = 10 cm BG/SbG = 40 cm	BD/MB/MBD = 8 cm Sc = 20 cm
F4	BD/MBD/MB = 10 cm SbG = 20 cm	-	-

Espessuras resultantes N= 2,8*10⁶

Estrutura tipo 1	Estrutura tipo 2	Estrutura tipo 3
CBR=4% CBUQ/PMQ = 20 cm MG=31,5 cm	CBUQ=5 cm MG=62 cm	CBUQ/PMQ = 25 cm Sc=23 cm
CBR=6% CBUQ/PMQ = 20 cm MG=20 cm	CBUQ=5 cm MG=48 cm	CBUQ/PMQ = 20 cm Sc=15 cm
CBR=12% CBUQ/PMQ = 20 cm MG=15 cm	CBUQ=5 cm MG=35 cm	CBUQ/PMQ = 20 cm Sc=15 cm
CBR=15% CBUQ/PMQ = 20 cm MG=15 cm	CBUQ=5 cm MG=35 cm	CBUQ/PMQ = 20 cm Sc=15 cm