



Universidade Federal de Sergipe

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL



VITOR MEIRELES DÓRIA

**ANÁLISE MECANICISTA DE DIFERENTES PAVIMENTOS TIPOS EM VIAS
LOCAIS URBANAS:
UMA AVALIAÇÃO DO DIMENSIONAMENTO EMPÍRICO**

SÃO CRISTÓVÃO-SE

2021

VITOR MEIRELES DÓRIA

**ANÁLISE MECANICISTA DE DIFERENTES PAVIMENTOS TIPOS EM VIAS
LOCAIS URBANAS:
UMA AVALIAÇÃO DO DIMENSIONAMENTO EMPÍRICO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Universidade Federal de Sergipe – UFS, para o
encerramento do componente curricular e
conclusão da graduação em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. DSc. Fernando Silva
Albuquerque

SÃO CRISTÓVÃO-SE

2021

É concedida à Universidade Federal de Sergipe permissão para reproduzir cópias desta monografia e emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte deste trabalho acadêmico pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Assinatura

DÓRIA, Vitor Meireles

Análise Mecanicista de Diferentes Pavimentos Tipos em Vias Locais Urbanas:
Uma Avaliação do Dimensionamento Empírico / Vitor Meireles Dória – 2021.

28f.: il.

Monografia (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de
Sergipe - UFS, São Cristóvão, 2021.

Orientação: Fernando Silva Albuquerque

1. Pavimentação. 2. Revestimento asfáltico. 3. Paralelepípedo 4. Bloco intertravado de concreto

CDD - 625.8 D696a

VITOR MEIRELES DÓRIA

**ANÁLISE MECANICISTA DE DIFERENTES PAVIMENTOS TIPOS EM VIAS
LOCAIS URBANAS:
UMA AVALIAÇÃO DO DIMENSIONAMENTO EMPÍRICO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Universidade Federal de Sergipe – UFS, para o
encerramento do componente curricular e
conclusão da graduação em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. DSc. Fernando Silva
Albuquerque

Aprovado em: _____ de _____ de _____.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. DSc. Fernando Silva Albuquerque – Universidade Federal de Sergipe
(Presidente – Orientador)

Prof. MSc. Demóstenes de Araújo Cavalcanti Júnior
(Examinador 1)

Eng. Francisco Nascimento Filho
(Examinador 2)

Se tivermos considerado tudo isso, e se as condições de nossa vida nos permitirem escolher qualquer profissão que quisermos, podemos adotar aquela que nos garanta o maior valor, aquela que se baseia em ideias de cuja verdade estamos plenamente convencidos, que nos oferece a mais ampla possibilidade de trabalhar pela humanidade e para nos aproximarmos do objetivo geral para o qual toda profissão é apenas um meio - a perfeição. O valor de uma profissão é aquele que mais ergue um homem, o qual transmite alta nobreza à suas ações e seus esforços, que o faz invulnerável, admirado pela massa e elevado acima dela.

(Karl Marx)

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha mãe Magna por todo apoio dado ao longo da minha vida e que foi fundamental para que eu pudesse concluir este curso.

A meu pai Luiz Oziel por ter sido talvez o ponto inicial que me levou ao curso de Engenharia Civil.

A minha filha Elis por ser, mesmo que ainda sem sequer entender, a minha maior motivação para enfrentar todas as lutas do dia-a-dia.

Aos amigos que fiz durante a minha vida e que contribuíram de alguma para eu ser quem eu sou e para que pudesse chegar neste momento.

Aos colegas de curso que compartilharam dos conhecimentos durante as aulas e até fora delas.

Aos colegas de trabalho durante o estágio na CEHOP e no DPS da SMTT de Aracaju por terem contribuído para a formação do profissional que eu sou e terem sido grandes influenciadores no direcionamento do meu trabalho e da área que devo seguir.

Aos colegas de trabalho da SMTT de São Cristóvão que respeitaram o meu trabalho e deram a sua contribuição para a realização dele.

Ao engenheiro Pedro Diniz pela ajuda compartilhando sua experiência durante a realização deste trabalho.

Ao Prof. Fernando Silva Albuquerque por ter aceitado o desafio e ter exercido seu papel de orientador com responsabilidade, dedicação e paciência, transmitindo sua experiência na área de pesquisa.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1:** Nomograma para determinação da espessura da sub-base (ABCP, 1998)..... 14
- Figura 2:** Tela inicial do AEMC com um pavimento e pontos de análise definidos..... 19

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Espessuras mínimas de revestimentos betuminosos (DNIT, 2006a)	12
Tabela 2: Espessura e resistência dos blocos de concreto (PREFEITURA MUNICIPAL DE SÃO PAULO, 2004b)	13
Tabela 3: Constantes para Concreto Asfáltico com 5cm de espessura (SAPEM, 2014)	16
Tabela 4: Constantes para a Equação 8 (SAPEM, 2014)	17
Tabela 5: Valores de Φ_{term} e C_{term} (SAPEM, 2014)	17
Tabela 6: Valores de a para cada Nível de Confiabilidade (SAPEM, 2014).....	17
Tabela 7: Estruturas obtidas através dos dimensionamentos	18
Tabela 8: Valores de M_R utilizados para a análise elástica	19
Tabela 9: Pontos de análise no AEMC.....	20
Tabela 10: Cenários de análise para revestimentos asfálticos e para o subleito	20
Tabela 11: Cenários de análise para as camadas granulares de base e sub-base.....	20
Tabela 12: Valores de N para os pavimentos de Concreto Asfáltico	21
Tabela 13: Valores de N para os pavimentos de tratamento superficial duplo	22
Tabela 14: Valores de N para os pavimentos de blocos graníticos	23
Tabela 22: Valores de N para os pavimentos de blocos de concreto intertravados	24

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO – *American Association of State Highway and Transportation Officials*

ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland

AGETOP – Agência Goiana de Transportes e Obras Públicas

CBR ou ISC – *California Bearing Ratio* ou Índice de Suporte Califórnia

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura Rodoviária

ELSYM – *Elastic Layered System*

FAA - *Federal Aviation Administration*

FEPAVE – *Finite Element Analysis of Pavement Structures*

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IPR – Instituto de Pesquisas Rodoviárias

JULEA - *Jacob Uzan Layered Elastic Analysis*

km – Quilômetro

m – Metro

MPa – Megapascal

N – Número N

NCHRP - *National Cooperative Highway Research Program*

SIURB – Secretaria Municipal de Infraestrutura Urbana e Obras

TSD – Tratamento Superficial Duplo

USACE – *United States Army Corps of Engineers* ou Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos da América

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	10
2. MÉTODOS EMPÍRICOS	12
2.1. Pavimentos asfálticos (Método do DNER, 1981)	12
2.2. Blocos graníticos (Equação de Peltier, 1969).....	13
2.3. Blocos intertravados de concreto pré-moldado (ABCP, 1998)	13
3. ABORDAGEM MECANICISTA	14
3.1. Análise estrutural.....	14
3.2. Estimativa de capacidade estrutural (SAPEM, 2014)	16
3.2.1. <i>Fadiga do revestimento asfáltico</i>	16
3.2.2. <i>Deformação permanente nas camadas granulares de base e sub-base</i>	16
3.2.3. <i>Deformação permanente do subleito</i>	17
4. METODOLOGIA.....	17
4.1. Dimensionamento.....	17
4.2. Análise elástica das camadas do pavimento	18
4.3. Cenários de análise estrutural	20
4.3.1. <i>Fadiga do revestimento asfáltico e deformação permanente no subleito</i>	20
4.3.2. <i>Deformação permanente nas camadas granulares</i>	20
5. RESULTADOS	20
5.1. Pavimento de Concreto Asfáltico (Método do DNER, 1981).....	21
5.2. Pavimento de Tratamento Superficial Duplo (Método do DNER, 1981)	22
5.3. Pavimento de Blocos Graníticos (Equação de Peltier, 1969).....	22
5.4. Pavimento de Blocos Intertravados de Concreto Pré-moldado (ABCP, 1998).....	23
5.5. Análise dos resultados	24
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	25

ANÁLISE MECANICISTA DE DIFERENTES PAVIMENTOS TIPOS EM VIAS LOCAIS URBANAS: UMA AVALIAÇÃO DO DIMENSIONAMENTO EMPÍRICO

Vitor Meireles Dória
Fernando Silva Albuquerque
Departamento de Engenharia Civil
Universidade Federal de Sergipe

RESUMO

Os métodos empíricos de dimensionamento não consideram a fadiga do revestimento asfáltico e nem as respostas mecânicas do pavimento em termos de tensões, deformações e deflexões. Para contornar essas limitações surgem os métodos que se utilizam de conceitos mecanicistas. Desta forma, o presente trabalho teve como objetivo realizar uma análise, com emprego de conceitos mecanístico-empíricos, de quatro estruturas de pavimentos dimensionadas através dos métodos empíricos mais comuns, a fim de se estimar o comportamento estrutural dos pavimentos. Foi utilizada a ferramenta AEMC, constituinte do MeDiNa, para que fossem determinados os dados necessários para a análise através da estimativa de capacidade estrutural apresentada no *South Africa Pavement Engineering Manual* (SAPEM, 2014). Observou-se que os métodos empíricos de dimensionamento para pavimentos asfálticos atendem a vasta maioria das situações por causa do baixo tráfego utilizado no dimensionamento, no entanto os pavimentos compostos por blocos tendem a sofrer com deformações permanentes nas camadas granulares.

ABSTRACT

The empirical design methods do not consider the fatigue of the asphalt coating nor the mechanical responses of the pavement in terms of stresses, deformations and deflections. To work around these limitations, the methods that use mechanistic concepts emerge. Thus, the present work aimed to carry out an analysis, using mechanistic-empirical concepts, of four pavement structures dimensioned using the most common empirical methods, in order to estimate the structural behavior of the pavements. The AEMC tool, a part of MeDiNa, was used to determine the necessary data for the analysis through the structural capacity estimate presented in the *South Africa Pavement Engineering Manual* (SAPEM, 2014). It was observed that the empirical design methods for asphalt pavements meet the vast majority of situations because of the low traffic used in the design, however pavements composed of blocks tend to suffer from permanent deformations in the granular layers.

1. INTRODUÇÃO

Existem diversos métodos de dimensionamento para pavimentos flexíveis e o mais difundido no Brasil ainda é o elaborado pelo antigo Departamento Nacional de Estradas de Rodagens (DNER), devido, de acordo com Bastos (2016), a experiência adquirida pelos órgãos rodoviários e a simplicidade de uso de métodos empíricos de dimensionamento de pavimentos.

No entanto, segundo Coutinho (2011), a metodologia empírica apresenta um caráter generalista e várias situações específicas são tratadas de forma média e muitas vezes de maneira simplificada. A utilização desses modelos generalistas leva a uma análise superficial sobre a situação e das especificidades das diversas variáveis que influenciam no desempenho funcional e estrutural de um pavimento. Ainda assim é a mais utilizada no Brasil.

O método proposto pelo DNER se baseia nos parâmetros do solo de fundação e das demais camadas para dimensionar a estrutura de modo que o subleito não venha a sofrer deformações permanentes excessivas, mas não considera as deformações resilientes ou recuperáveis que provocam a ruptura do pavimento por fadiga e que hoje constitui a manifestação patológica mais comum nas rodovias brasileiras (JACQUES, 2015).

Em 2014, o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), atualmente o órgão responsável pelas rodovias federais do Brasil, através do Projeto DNIT TED nº682/2014, começou a conduzir estudos e testes para o estabelecimento de um método mecanístico-empírico homologado para pavimentos asfálticos no país (DNIT, 2014). No dia 14 de dezembro

de 2020, o DNIT anunciou que iniciaria procedimentos para transição do método de dimensionamento de pavimentos do modelo empírico vigente para um mecanístico-empírico que foi denominado de Método de Dimensionamento Nacional (MeDiNa), que busca uma maior vida útil do pavimento e, consequentemente, redução nos custos de manutenção (DNIT, 2020).

O DNIT (2006b) aponta que os pavimentos são concebidos para durarem um determinado período. Durante cada um destes períodos ou ciclos de vida, o pavimento inicia numa condição ótima até alcançar uma condição ruim. O pavimento pode ser analisado quanto ao desempenho funcional, que se refere à capacidade do pavimento de satisfazer sua função principal, que é a de fornecer uma superfície com serventia adequada em termos de qualidade ao rolamento, bem como quanto ao desempenho estrutural, que se refere à capacidade de um pavimento em manter sua integridade estrutural, sem apresentar falhas significativas.

Para DNIT (2011), a não execução de atividades de manutenção no momento adequado gera efeitos negativos em cadeia no planejamento em termos de gerência de uma rede viária. É possível observar que o Índice de Serventia, medida subjetiva das condições de superfície de um pavimento, tem uma queda de 40% após o pavimento consumir 75% de sua vida útil. Nos 17% seguintes de vida útil, o Índice de Serventia cai mais 40%, podendo implicar em um aumento de 300% no custo das atividades de manutenção, evidenciando a importância da intervenção de manutenção no tempo adequado.

No entanto, Villibor *et al.* (2009) afirmam que as prefeituras têm o hábito de executar sempre pavimentos de um determinado tipo, com determinada técnica construtiva, demonstrando grande resistência à inovação. Segundo Almeida *et al.* (2015), apenas 4,3% dos profissionais de engenharia tem experiência ou efetivamente trabalha com métodos mecanístico-empíricos.

Para a Agência Goiana de Transportes e Obras Públicas (AGETOP, 2016), uma das maiores dificuldades dos municípios de pequeno e médio porte é reduzir o déficit de pavimentação de sua malha viária devido ao crescimento desordenado, a falta de planejamento e a dificuldade de manter profissionais qualificados na área de pavimentação em seu quadro de funcionários.

De acordo com Shoji (2000) e Scaranto (2007), devido à ausência de procedimentos técnicos bem estabelecidos, o poder municipal toma decisões baseadas em soluções que não representam a real necessidade dos pavimentos, uma vez que decisões com relação à manutenção dos pavimentos são tomadas conforme a necessidade de serviço produzido, não sendo adotado qualquer critério técnico que considere a qualidade dos mesmos. Desta forma, segundo essa política de “fazer mais”, os pavimentos têm sido subdimensionados e, consequentemente, resultando em pavimentos inaceitáveis.

Segundo o IBGE (2010) na região metropolitana de Aracaju verifica-se que em 81,61% dos domicílios particulares permanentes há a presença de pavimentação. No entanto, em apenas 52,30% dos domicílios verifica-se a existência de bueiro/boca-de-lobo. Para Nascimento e Araújo (2017), é possível observar que a pavimentação sem a ocorrência de obras de microdrenagem traz benefícios para a mobilidade, no entanto apresenta menor durabilidade, levando a ocorrência de patologias nos pavimentos e alagamentos. Sendo assim, evidencia-se a ocorrência de efeitos adversos que se desencadeiam pela prática da falta de obras de drenagem e estudos técnicos adequados para a implantação da pavimentação na Região Metropolitana de Aracaju.

Desta forma, este trabalho tem como objetivo realizar uma análise mecanicista para os principais tipos de pavimentos utilizados em vias locais urbanas de Sergipe, sendo eles os pavimentos asfálticos (concreto asfáltico e tratamento superficial duplo), blocos intertravados de concreto pré-moldado e blocos graníticos (ou paralelepípedos), dimensionados pelos métodos empíricos mais comuns para cada um deles, possibilitando o diagnóstico da estrutura e uma previsão do seu desempenho.

2. MÉTODOS EMPÍRICOS

Os primeiros métodos empíricos surgem no final da década de 1920, quando O. J. Porter coordenou pesquisas na área rodoviária e apresentou a primeira curva de dimensionamento de pavimento flexível que descrevia a espessura necessária de um pavimento em função do CBR (*California Bearing Ratio* ou Índice de Suporte Califórnia) do subleito. Nas décadas seguintes foram realizados diversos ensaios e equacionamentos matemáticos possibilitaram o cálculo das tensões, deformações e deflexões de um pavimento, ainda que limitados à interface de duas ou três camadas (COUTINHO, 2011).

A partir do início da década de 1940, o Corpo de Engenheiros do Exército Americano ou *United States Army Corps of Engineers* (USACE) promoveu o desenvolvimento da metodologia CBR de O. J. Porter utilizando as equações de Boussinesq e ensaios em pavimentos que eram submetidos a tráfegos acelerados para o desenvolvimento de um método de dimensionamento baseado no ensaio CBR.

Esses estudos serviram de base para o desenvolvimento de outros métodos empíricos como o método das resistências, desenvolvido pelo engenheiro Murilo Lopes de Souza e que viria a se tornar o Método do DNER. Para a fórmula empírica proposta por Raymond Peltier no Laboratório de *Ponts et Chaussées* que, de acordo com Senço (2007), procurou associar a família de curvas de dimensionamento da USACE a uma equação para o dimensionamento de pavimentos com blocos graníticos, bem como para o método apresentado pela Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) através da ET-27 (ABCP, 1998) para blocos de concreto, que é uma adaptação do método concebido por Lilley e Walker (1978).

2.1. Pavimentos asfálticos (Método do DNER, 1981)

O Método do DNER determina a espessura mínima do revestimento a partir do Número N, conforme a Tabela 1.

Tabela 1: Espessuras mínimas de revestimentos betuminosos (DNIT, 2006a)

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

As espessuras totais do pavimento são obtidas a partir da Equação 1 e da Equação 2:

$$H = 77,67 \cdot N^{0,0482} \cdot ISC^{-0,598} \quad (1)$$

$$H_{20} = 77,67 \cdot N^{0,0482} \cdot ISC_{20}^{-0,598} \quad (2)$$

Onde H é a espessura total do pavimento [m], N o Número N característico da via, o ISC é o Índice de Suporte Califórnia do subleito [%], H_{20} é a espessura do pavimento sobre a sub-base [m] e o ISC_{20} é o Índice de Suporte Califórnia da sub-base [%].

Para obter a espessura de cada camada do pavimento, são relacionadas as espessuras totais com os coeficientes de equivalência estrutural de cada material utilizado, conforme Equação 3 e a Equação 4:

$$R \cdot K_R + B \cdot K_B \geq H_{20} \quad (3)$$

$$R \cdot K_R + B \cdot K_B + h_{20} \cdot K_S \geq H \quad (4)$$

Onde R e K_R são, respectivamente, a espessura [m] e o coeficiente de equivalência estrutural da camada de revestimento, B e K_B são, respectivamente, a espessura [m] e o coeficiente de equivalência estrutural da camada de base, h_{20} e K_S são, respectivamente, a espessura [m] e o coeficiente de equivalência estrutural da camada de sub-base, além disso o H_{20} é a espessura do pavimento sobre a sub-base [m] e o H é a espessura total do pavimento [m].

2.2. Blocos graníticos (Equação de Peltier, 1969)

O método de dimensionamento proposto por Hammond Peltier parte da Equação 5 para determinar a espessura total do pavimento de blocos graníticos (PELTIER, 1969).

$$h = \frac{100 + 150 \cdot \sqrt{P}}{I_S + 5} \quad (5)$$

Onde h é a espessura do pavimento [m], P é carga de roda [toneladas] e I_S é Índice de Suporte Califórnia [%] do subleito.

2.3. Blocos intertravados de concreto pré-moldado (ABCP, 1998)

O método de dimensionamento apresentado na ET-27 da ABCP (1998), que é utilizado pela Prefeitura Municipal de São Paulo (2004b) dentro de um plano de pavimentação de baixo custo para vias residenciais de baixas solicitação, onde os veículos comerciais são apenas os veículos de serviços públicos ou similares, determina a resistência dos blocos de concreto através da Tabela 2 e a espessura da camada de sub-base pelo nomograma da Figura 1.

Tabela 2: Espessura e resistência dos blocos de concreto (PREFEITURA MUNICIPAL DE SÃO PAULO, 2004b)

Tráfego	Espessura do bloco	Resistência a compressão simples
$N \leq 5 \times 10^5$	6,0 cm	35 MPa
$5 \times 10^5 < N < 10^7$	8,0 cm	35 a 50 MPa
$N \geq 10^7$	10,0 cm	50 MPa

A espessura da sub-base é dada pelo nomograma da Figura 1, que fornece as espessuras em função do valor de CBR do subleito e do número de solicitações do eixo padrão (N) do trecho dimensionado. É importante observar que, quando o número de solicitações do eixo padrão (N) for inferior a $1,5 \times 10^6$ (1,50E+06), a camada de base não será necessária. No entanto, recomenda-se o emprego dessa camada com espessura mínima de 10 cm, quando o número de solicitações (N) estiver compreendido entre $1,5 \times 10^6$ (1,50E+06) e 10^7 (1,00E+07).

Quando o N for menor que $0,5 \times 10^6$ (5,00E+05), o material de sub-base deve apresentar um CBR mínimo de 20% e se o subleito apresentar um CBR igual ou superior a 20%, não é necessária a camada de sub-base. Quando o N for igual ou maior que $0,5 \times 10^6$ (5,00E+05), o material de sub-base deve apresentar um CBR mínimo de 30% e se o subleito apresentar um CBR igual ou superior a 30%, não é necessária a camada de sub-base.

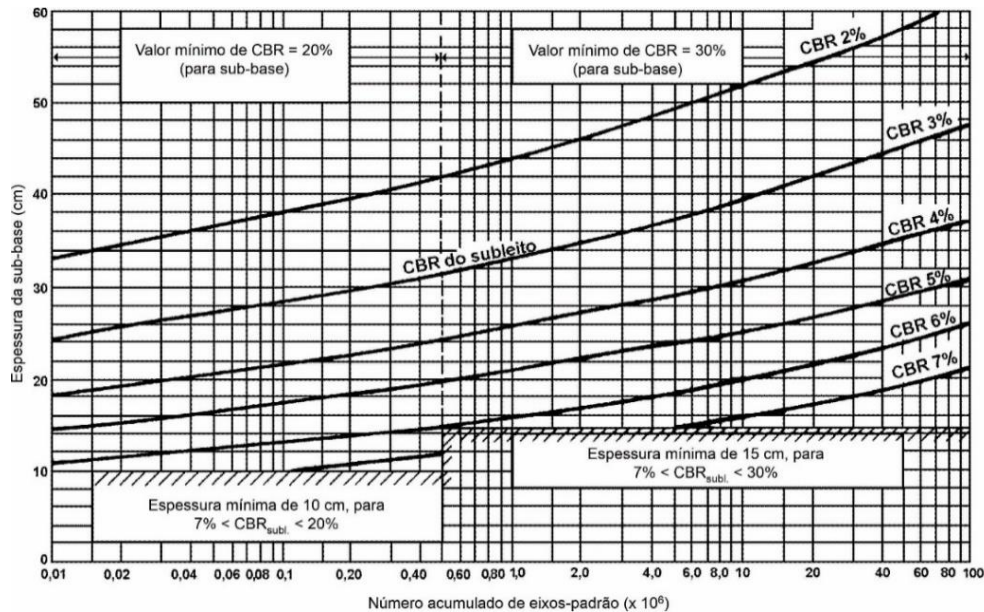


Figura 1: Nomograma para determinação da espessura da sub-base (ABCP, 1998)

3. ABORDAGEM MECANICISTA

Segundo Medina e Motta (2015), nas últimas décadas, a engenharia de pavimentos vem adotando uma abordagem mais racional no dimensionamento de pavimentos flexíveis, fazendo uso de métodos analíticos para prever, devido às cargas do tráfego, as respostas mecânicas do pavimento em termos de tensões, deformações e deflexões, considerando as propriedades de deformabilidade dos materiais e os efeitos do clima no comportamento estrutural.

3.1. Análise estrutural

Com o objetivo de preencher as lacunas apresentadas pelos métodos empíricos, Motta (1991), Medina (1997), Franco (2000, 2007) e Medina e Motta (2015) elaboraram trabalhos no âmbito do desenvolvimento de um método mecanístico-empírico para a realidade brasileira. No entanto, as suas sugestões não se tornaram oficiais pelo pelos órgãos rodoviários, mas trouxeram importantes contribuições para os trabalhos futuros e para o método MeDiNa.

Segundo Franco (2007), diversos trabalhos brasileiros exploraram ou basearam seus estudos na ferramenta computacional chamada FEPAVE (*Finite Element Analysis of Pavement Structures*), apresentado por Duncan, Monismith e Wilson (1968) com base em um programa desenvolvido por Wilson (1965), e que, de acordo com Motta (1991), baseia-se no método dos elementos finitos, não admitindo cargas múltiplas, mas permitindo até doze camadas e considerando a elasticidade não linear.

O FEPAVE recebeu uma série de atualizações como uma rotina amigável para a entrada de dados e a visualização de resultados (SILVA, 1995), uma rotina que realiza análises de confiabilidade (MOTTA, 1991), uma rotina que permite a utilização de diversos tipos de modelos de não linearidade de módulos dos materiais e uma planilha eletrônica que permite utilizar o FEPAVE diretamente do programa Excel (FRANCO, 2004).

No entanto, como o FEPAVE foi desenvolvido na década de 1960, encontra-se hoje desatualizado nos aspectos referentes à capacidade de manipular número elevado de elementos na malha de Elementos Finitos, à forma simples do elemento considerado nos cálculos, às limitações da consideração da axissimetria e de não permitir análises em três dimensões (FRANCO, 2007).

Para Motta (1991), além do FEPAVE, outro programa importante para a solução de problemas de mecânica dos pavimentos no Brasil é o ELSYM 5 (*Elastic Layered System*), apresentado por Kopperman, Tiller e Tseng (1986), e que utiliza o método das diferenças finitas no cálculo das tensões deformações e deslocamentos produzidos, admitindo até cinco camadas incluindo o subleito e até dez cargas de roda circulares.

Segundo Ramalho (2011), além destes também podem ser citados os programas computacionais MCF, que utiliza o método das camadas finitas, proposto por Booker e Small (1985) e adaptado por Rodrigues (1991) para o uso em pavimentos. O JULEA (*Jacob Uzan Layered Elastic Analysis*), desenvolvido por Uzan (1978), o KENLAYER, da Universidade de Kentucky (HUANG, 2003) e o CAP3D, que foi desenvolvido no Laboratório de Mecânica dos Pavimentos da Universidade Federal do Ceará (HOLANDA *et al.*, 2006) são outros exemplos.

É importante citar também o programa PAVE, desenvolvido por Franco (2000) a partir do JULEA, que permite avaliar o desempenho de estruturas de pavimentos em relação aos danos de fadiga, deformação permanente da estrutura e deformação no topo do subleito.

No entanto, para Franco (2007), apesar do PAVE apresentar resultados relativos ao desempenho, o programa não dimensiona diretamente estruturas de pavimentos, sendo utilizado para verificação de uma estrutura de pavimento previamente estabelecida em relação aos danos de fadiga e aos afundamentos de trilha de roda causados pela passagem de um tipo específico de eixo. Ainda de acordo com Franco (2007), o JULEA foi utilizado em diversos outros métodos como o AYMA (AYRES, 1997), o LEDFAA da *Federal Aviation Administration* (FAA), o Guia de Projeto da AASHTO (NCHRP, 2004) e pelo PCASE das Forças Armadas norte-americanas.

Além desses, há também os programas BISAR desenvolvido em 1978 pela Shell Oil (SHELL, 1998), o francês ALIZE III, desenvolvido pelo Laboratório de *Ponts et Chaussées*, o australiano CIRCLY (WARDLE, 1996), o LEAF que substituiu o JULEA no LEDFAA, o português PaviFlex (BAPTISTA; PICADO-SANTOS, 2000), o RIOPAVE (AEDO, 1997) e outros como o ILLIPAVE e o MICHPAVE.

O *South African Pavement Engineering Manual* (SAPEM, 2014) relaciona outros softwares para pavimentos flexíveis. O Cyrano, baseado no ELSYM 5, o conjunto de softwares PADS, que utiliza o programa GAMES (Maina, 2004), e o Rubicon Toolbox, que utiliza o WESLEA, um motor de análise desenvolvido pela USACE para pavimentos flexíveis. Para pavimentos compostos por blocos, o SAPEM apresenta o Lockpave, desenvolvido pela *Concrete Manufacturers Association* (CMA), e o blokPAVE, que está em desenvolvimento como parte do *South African Pavement Design Method* (SAPDM).

Em seu trabalho e inspirado nesses métodos, Franco (2007) se baseia nos programas PAVE (FRANCO, 2000), FEPAVE, JULEA (UZAN, 1978), AYMA (AYRES, 1997) e outros para propor o SisPav, um programa com uma abordagem elástica não linear realizada de forma simplificada, com a divisão das camadas com este comportamento em três subcamadas, mas que busca reunir todo o estado-da-arte atual referente ao projeto de estruturas de pavimentos asfálticos e permitir dimensionar mecanisticamente as espessuras das camadas com base nas informações detalhadas do tráfego, das condições ambientais e das características dos materiais.

Entre os anos de 2015 e 2018, o Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR) e o Instituto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE), com a colaboração do Centro de Pesquisas da Petrobrás (CENPES) e de diversas universidades do Brasil, desenvolveram pesquisas que levaram ao estabelecimento do Método de Dimensionamento Nacional de Pavimentos (MeDiNa), uma evolução do Sispav apresentado por Franco (2007), e que se apresenta como uma ferramenta computacional de dimensionamento de estruturas de pavimentos asfálticos dentro da metodologia mecanístico-empírica.

3.2. Estimativa de capacidade estrutural (SAPEM, 2014)

O *South African Pavement Engineering Manual* (SAPEM, 2014), elaborado pela *South African National Road Agency SOC Limited* (SANRAL), busca fornecer um “Guia de Melhores Práticas” para a engenharia de pavimentação na África do Sul e engloba em seu conteúdo o *South African Mechanistic Design Method* (SAMDM), cujo desenvolvimento dos seus componentes foram publicados extensivamente desde os anos 1970 e discutiram a abordagem mecanística do projeto (incluindo o comportamento do material e do pavimento, o tráfego de projeto, o nível de serviço desejado etc.), bem como o procedimento de análise mecanística atual (THEYSE *et al.*, 1996). Os modelos de dano do SAPEM (2014) foram utilizados neste trabalho devido a semelhança existente entre África do Sul e Brasil na formação dos solos, materiais para pavimentos e no tráfego atuante.

3.2.1. Fadiga do revestimento asfáltico

As camadas de revestimento asfáltico são analisadas apenas quanto à fadiga e presume-se que as trincas começam na parte inferior da camada e se propagam até a superfície. A capacidade estrutural, ou Vida de Fadiga, determinada representa a fissuração da superfície em uma área definida da estrada. A Vida de Fadiga é dada pela Equação 6.

$$N_f = SF \cdot 10^{\alpha \left(1 - \frac{\log \varepsilon_t}{\beta}\right)} \quad (6)$$

Onde N_f é a Vida de Fadiga do revestimento, SF é o fator de correção devido a propagação de trincas dado pela Equação 7, α e β são constantes apresentadas na Tabela 3, que correlacionam o Nível de Confiança da análise e a espessura do pavimento, e ε_t é a deformação específica de tração na fibra inferior do revestimento.

$$SF = 0,0489 \cdot t - 0,2225 \quad (7)$$

Onde SF é o fator de correção devido a propagação de trincas e t é a espessura do revestimento.

Tabela 3: Constantes para Concreto Asfáltico com 5cm de espessura (SAPEM, 2014)

Nível de Confiança	α	β
95%	17,40	3,40
90%	17,46	3,41
80%	17,54	3,42
50%	17,71	3,46

3.2.2. Deformação permanente nas camadas granulares de base e sub-base

As camadas granulares são analisadas determinando o estado de tensão de cisalhamento no meio da camada e comparando-o com a resistência ao cisalhamento, em termos de coesão e ângulo de atrito, usando o modelo de Mohr-Coulomb. A análise é realizada a partir da Equação 8.

$$N = 10^{(\alpha F + \beta)} \quad (8)$$

Onde N é o número de eixos padrão equivalentes para proteção contra falha por cisalhamento, α e β são constantes dada pela Tabela 4 e F é o *Stress Ratio* dada pela Equação 9.

Tabela 4: Constantes para a Equação 8 (SAPEM, 2014)

Nível de Confiança	α	β
95%	2,605122	3,480098
90%	2,605122	3,707667
80%	2,605122	3,983324
50%	2,605122	4,510819

$$F = \frac{\sigma_3 \Phi_{term} + C_{term}}{(\sigma_1 - \sigma_3)} \quad (9)$$

Onde σ_1 e σ_3 são, respectivamente, as tensões principais maior e menor, e Φ_{term} e C_{term} são constantes relacionadas com o ângulo de atrito e a coesão dos solos, respectivamente, conforme valores adotados na Tabela 5.

Tabela 5: Valores de Φ_{term} e C_{term} (SAPEM, 2014)

Camada	Cód. SAPDM	Seca		Moderada		Úmida	
		C_{term}	Φ_{term}	C_{term}	Φ_{term}	C_{term}	Φ_{term}
Base	G4	223	5,50	160	4,40	109	3,47
Sub-base	G6	103	2,88	84	2,32	64	1,76

3.2.3. Deformação permanente do subleito

O subleito é analisado quanto à deformação permanente que se manifesta na superfície do pavimento e é calculada a partir da deformação na parte superior da camada de subleito para prever a deformação permanente a partir da Equação 10.

$$N_{PD} = 10^{(a - 10 \log \varepsilon_v)} \quad (10)$$

Onde N_{PD} é número de eixos padrão equivalentes para atingir determinada deformação, a é uma constante dada pela Tabela 6 e ε_v é a deformação vertical de compressão na parte superior da camada de subleito.

Tabela 6: Valores de a para cada Nível de Confiabilidade (SAPEM, 2014)

Nível de Confiabilidade	Profundidade Terminal do Afundamento	
	10 mm	20 mm
95%	33,30	36,30
90%	33,38	36,38
80%	33,47	36,47
50%	33,70	36,70

4. METODOLOGIA

Primeiramente, para possibilitar a comparação dos resultados, foi determinado um trecho hipotético padrão baseado nas características físicas das vias urbanas locais das capitais brasileiras. A largura da via é de 10 metros e o comprimento adotado é de 1000 metros (1 km).

4.1. Dimensionamento

O período de projeto considerado para todos os pavimentos é de 10 anos e o Número N característico da via é considerado conforme o padrão de via de tráfego leve da IP-02/2004 (PREFEITURA MUNICIPAL DE SÃO PAULO, 2004a), com o valor de 10^5 (1,00E+05). Foi

considerado estável devido a condição urbana genérica não prever o incremento de tráfego. Considerou-se a região ocupada, adensada e sem perspectivas de novos polos geradores de tráfego nas proximidades. Além disso, o subleito foi considerado predominantemente arenoso e com Índice de Suporte Califórnia (ISC) em três situações, sendo elas 6, 8 e 10%. Para todos os dimensionamentos foram consideradas apenas camadas granulares com valores de ISC correspondente a sua aplicação.

Os pavimentos asfálticos foram dimensionados utilizando o Método do DNER (1981), onde a espessura mínima do revestimento foi considerada de 5,0 cm para um pavimento de Concreto Asfáltico e 2,5 cm para um Tratamento Superficial Duplo (TSD). O coeficiente de equivalência estrutural para as camadas granulares de base e de sub-base foram considerados 1,00 e 0,77, respectivamente.

Para o pavimento de blocos graníticos foi utilizada Equação de Peltier devido a sua simplicidade e disseminação no dimensionamento de pavimentos com revestimento por calçamento no país conforme observado em AMMOC (2014), Prefeitura Municipal de Cajazeirinhas-PB (2015), Prefeitura Municipal de Bandeirante-SC (2016), Prefeitura Municipal de Jaborá-SC (2017) e Prefeitura Municipal de Limoeiro-PE (2018). A carga de roda considerada foi de 6 toneladas.

A prática apresentada pelas prefeituras de pequeno e médio porte e seguida neste trabalho é aquela demonstrada pela Mineropar (1983) na Equação 11, onde é adotado o valor mínimo de 23 cm para a soma das espessuras da base de areia e do revestimento de pedra como fixo, conforme a Norma Rodoviária nº 71 do DER/SP (AMMOC, 2014; PREFEITURA MUNICIPAL DE JABORÁ-SC, 2017).

$$23 = \frac{100 + 150 \cdot \sqrt{6}}{I_s + 5} \rightarrow I_s = 15,3\% \quad (11)$$

Sendo assim, segundo a Mineropar (1983), conclui-se que se o subleito tiver um ISC menor que 15,3%, a espessura total do pavimento será maior que 23,0 cm. Devido ao alto custo e problemas de estabilidade, esse aumento de espessura não será realizado mediante aumento da espessura do bloco granítico ou do colchão de areia. Esta situação se resolve com a execução de uma sub-base na espessura exigida pelo dimensionado e cujo ISC será, necessariamente, superior a 15,3%. Foi adotado um colchão de areia de 5,0 cm para o assentamento dos blocos graníticos e de concreto.

4.2. Análise elástica das camadas do pavimento

A partir das estruturas obtidas nos dimensionamentos para cada situação de subleito e tipo de pavimento, conforme apresentado na Tabela 7, foi utilizado o software AEMC, parte integrante do MeDiNa, para realizar uma análise elástica do pavimento com o objetivo de determinar as tensões e deformações nas camadas, conforme ilustrado na Figura 2.

Tabela 7: Estruturas obtidas através dos dimensionamentos

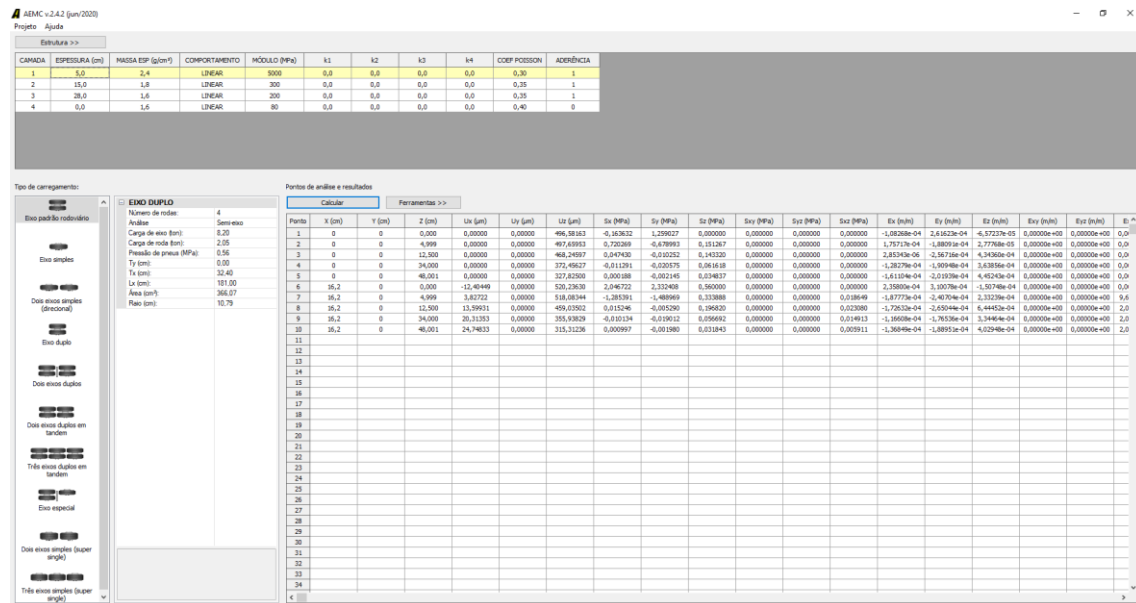
(continua)

ISC	Pavimento	Método	Revestimento (cm)	Colchão de Areia (cm)	Base (cm)	Sub-base (cm)	Total (cm)
6%	TSD	DNER (1981)	2,5	-	20,0	31,0	53,5
	Concreto Asfáltico	DNER (1981)	5,0	-	15,0	28,0	48,0
	Blocos Graníticos	Peltier (1969)	10,0	5,0	-	20,0	35,0
	Blocos de Concreto	ABCP (1998)	6,0	5,0	-	13,0	24,0

Tabela 7: Estruturas obtidas através dos dimensionamentos

(conclusão)

ISC	Pavimento	Método	Revestimento (cm)	Colchão de Areia (cm)	Base (cm)	Sub-base (cm)	Total (cm)
8%	TSD	DNER (1981)	2,5	-	20,0	21,0	43,5
	Concreto Asfáltico	DNER (1981)	5,0	-	15,0	19,0	39,0
	Blocos Graníticos	Peltier (1969)	10,0	5,0	-	13,0	27,0
	Blocos de Concreto	ABCP (1998)	6,0	5,0	-	10,0	21,0
10%	TSD	DNER (1981)	2,5	-	20,0	15,0	37,5
	Concreto Asfáltico	DNER (1981)	5,0	-	15,0	15,0	35,0
	Blocos Graníticos	Peltier (1969)	10,0	5,0	-	10,0	24,0
	Blocos de Concreto	ABCP (1998)	6,0	5,0	-	10,0	21,0

**Figura 2:** Tela inicial do AEMC com um pavimento e pontos de análise definidos

Considerando os valores típicos para o Módulo de Resiliência (M_R) apresentados por Preussler (1983), Vertamatti (1988), Franzoi (1990), Bernucci (1995), Rodrigues (1997), Werk (2000), Guimarães (2009), Medrado (2009), Bonzanini (2011) e Weber (2013), foram adotados três cenários diferentes conforme apresentado na Tabela 8 para as respectivas camadas dos pavimentos, onde também foi considerado que as camadas do pavimento aderem entre si, de forma que fosse possível aplicar os modelos do SAPEM (2014), que estabelece esse pré-requisito.

Tabela 8: Valores de M_R utilizados para a análise elástica

	Pessimista	Moderado	Otimista
Camada	M_R -10% (MPa)	M_R (MPa)	M_R +10% (MPa)
Subleito	72	80	88
Sub-base	180	200	220
Base	270	300	330
Colchão de areia	90	100	110
Tratamento Superficial Duplo	450	500	550
Concreto Asfáltico	4500	5000	5500

Para os pavimentos de blocos graníticos (paralelepípedos) e blocos intertravados de concreto pré-moldado, conforme apontado por Senço (2001), foi considerado que os blocos transmitem 50% da carga do eixo padrão rodoviário para o restante da estrutura do pavimento. Portanto, considerou-se apenas as espessuras das camadas subjacentes nas análises.

4.3. Cenários de análise estrutural

Todas as análises foram realizadas para pontos (x, y) no centro de aplicação da carga, bem como para o ponto imediatamente embaixo de uma das rodas do semi-eixo padrão rodoviário, conforme Tabela 9.

Tabela 9: Pontos de análise no AEMC

Ponto	x	y
1	0,0	0,0
2	16,2	0,0

4.3.1. Fadiga do revestimento asfáltico e deformação permanente no subleito

Para a análise da fadiga no concreto asfáltico e da deformação permanente no subleito, foram estabelecidos seis cenários possíveis, combinando os dois pontos de análise e três cenários de Módulo de Resiliência, conforme apresentados na Tabela 10.

Tabela 10: Cenários de análise para revestimentos asfálticos e para o subleito

Cenário	Ponto (x, y)	M _R
1A	(0,0; 0,0)	Pessimista
1B	(0,0; 0,0)	Moderado
1C	(0,0; 0,0)	Otimista
2A	(16,2; 0,0)	Pessimista
2B	(16,2; 0,0)	Moderado
2C	(16,2; 0,0)	Otimista

4.3.2. Deformação permanente nas camadas granulares

Para a análise da deformação permanente nas camadas granulares de base e sub-base também foram estabelecidos seis cenários possíveis, combinando os dois pontos de análise e três cenários de condição de umidade conforme apresentado na Tabela 11. Somente a variação dos Módulos de Resiliência, conforme os cenários apresentados na Tabela 10, não retorna alteração no estado de tensão no centro das camadas granulares, já que este está em função da espessura da camada e do arranjo da estrutura do pavimento determinados pelos métodos empíricos de dimensionamento, que por sua vez se baseiam no ISC dos materiais.

Tabela 11: Cenários de análise para as camadas granulares de base e sub-base

Cenário	Ponto (x, y)	Condição
1D	(0,0; 0,0)	Seca
1E	(0,0; 0,0)	Moderada
1F	(0,0; 0,0)	Úmida
2D	(16,2; 0,0)	Seca
2E	(16,2; 0,0)	Moderada
2F	(16,2; 0,0)	Úmida

5. RESULTADOS

A partir dos dimensionamentos realizados através dos métodos empíricos estabelecidos e com os dados obtidos pelo AEMC para as tensões, deformações e deflexões nas camadas do pavimento, foi possível utilizar os modelos de estimativa de desempenho estrutural do *South Africa Pavement Engineering Manual* (SAPEM, 2014) para analisar o comportamento e a integridade das estruturas dimensionadas para diferentes cenários de Módulos de Resiliência, condições de umidade das camadas da estrutura e suas diferentes espessuras.

5.1. Pavimento de Concreto Asfáltico (Método do DNER, 1981)

Conforme os resultados apresentados na Tabela 12, o revestimento de concreto asfáltico atenderá às expectativas em todos os pavimentos dimensionados e em todos os cenários de análise, não apresentando problemas de fadiga.

Tabela 12: Valores de N para os pavimentos de Concreto Asfáltico

ISC _{subleito} = 6%					ISC _{subleito} = 8%				ISC _{subleito} = 10%			
Nível de Confiabilidade					Nível de Confiabilidade				Nível de Confiabilidade			
95%	90%	80%	50%		95%	90%	80%	50%	95%	90%	80%	50%
Revestimento (Concreto Asfáltico)												
1A	7,5E+05	8,5E+05	9,7E+05	1,5E+06	6,9E+05	7,9E+05	9,0E+05	1,4E+06	6,5E+05	7,3E+05	8,4E+05	1,3E+06
1B	1,3E+06	1,5E+06	1,7E+06	2,6E+06	1,2E+06	1,3E+06	1,5E+06	2,4E+06	1,1E+06	1,3E+06	1,5E+06	2,3E+06
1C	2,1E+06	2,4E+06	2,7E+06	4,2E+06	1,9E+06	2,2E+06	2,5E+06	3,9E+06	1,8E+06	2,0E+06	2,4E+06	3,7E+06
2A	2,1E+05	2,4E+05	2,8E+05	4,3E+05	2,0E+05	2,3E+05	2,6E+05	4,1E+05	1,9E+05	2,2E+05	2,5E+05	3,9E+05
2B	3,6E+05	4,1E+05	4,7E+05	7,3E+05	3,5E+05	3,9E+05	4,5E+05	7,0E+05	3,2E+05	3,7E+05	4,2E+05	6,6E+05
2C	5,9E+05	6,7E+05	7,7E+05	1,2E+06	5,6E+05	6,4E+05	7,3E+05	1,1E+06	5,4E+05	6,1E+05	7,0E+05	1,1E+06
Base (Granular)												
1D	1,8E+07	3,1E+07	5,8E+07	2,0E+08	1,8E+07	3,0E+07	5,6E+07	1,9E+08	1,7E+07	2,8E+07	5,3E+07	1,8E+08
1E	1,6E+06	2,6E+06	5,0E+06	1,7E+07	1,5E+06	2,6E+06	4,8E+06	1,6E+07	1,5E+06	2,5E+06	4,7E+06	1,6E+07
1F	2,1E+05	3,6E+05	6,8E+05	2,3E+06	2,1E+05	3,5E+05	6,7E+05	2,2E+06	2,0E+05	3,4E+05	6,5E+05	2,2E+06
2D	2,1E+06	3,5E+06	6,6E+06	2,2E+07	2,0E+06	3,3E+06	6,3E+06	2,1E+07	1,9E+06	3,2E+06	6,1E+06	2,0E+07
2E	3,3E+05	5,5E+05	1,0E+06	3,5E+06	3,2E+05	5,3E+05	1,0E+06	3,4E+06	3,1E+05	5,2E+05	9,8E+05	3,3E+06
2F	7,3E+04	1,2E+05	2,3E+05	7,9E+05	7,2E+04	1,2E+05	2,3E+05	7,7E+05	7,1E+04	1,2E+05	2,3E+05	7,6E+05
Sub-base (Granular)												
1D	5,6E+06	9,4E+06	1,8E+07	6,0E+07	1,5E+06	2,6E+06	4,9E+06	1,7E+07	8,6E+05	1,5E+06	2,8E+06	9,3E+06
1E	1,4E+06	2,3E+06	4,4E+06	1,5E+07	4,9E+05	8,2E+05	1,6E+06	5,2E+06	3,0E+05	5,1E+05	9,7E+05	3,3E+06
1F	3,2E+05	5,5E+05	1,0E+06	3,5E+06	1,5E+05	2,5E+05	4,6E+05	1,6E+06	1,0E+05	1,7E+05	3,2E+05	1,1E+06
2D	7,6E+06	1,3E+07	2,4E+07	8,2E+07	1,9E+06	3,2E+06	6,0E+06	2,0E+07	1,0E+06	1,7E+06	3,2E+06	1,1E+07
2E	1,8E+06	3,0E+06	5,7E+06	1,9E+07	5,7E+05	9,7E+05	1,8E+06	6,1E+06	3,5E+05	5,8E+05	1,1E+06	3,7E+06
2F	3,9E+05	6,6E+05	1,3E+06	4,2E+06	1,6E+05	2,8E+05	5,2E+05	1,8E+06	1,1E+05	1,9E+05	3,6E+05	1,2E+06
Subleito												
1A	2,3E+06	2,7E+06	3,3E+06	5,7E+06	1,6E+05	1,9E+05	2,3E+05	3,9E+05	4,5E+04	5,4E+04	6,6E+04	1,1E+05
1B	6,6E+06	7,9E+06	9,7E+06	1,7E+07	4,5E+05	5,4E+05	6,6E+05	1,1E+06	1,3E+05	1,5E+05	1,9E+05	3,2E+05
1C	1,7E+07	2,0E+07	2,5E+07	4,2E+07	1,2E+06	1,4E+06	1,7E+06	2,9E+06	3,3E+05	4,0E+05	4,9E+05	8,3E+05
2A	6,1E+06	7,4E+06	9,1E+06	1,5E+07	4,3E+05	5,1E+05	6,3E+05	1,1E+06	1,1E+05	1,7E+05	1,7E+05	2,8E+05
2B	1,8E+07	2,1E+07	2,6E+07	4,4E+07	1,2E+06	1,5E+06	1,8E+06	3,0E+06	3,3E+05	3,9E+05	4,8E+05	8,2E+05
2C	4,6E+07	5,6E+07	6,8E+07	1,2E+08	3,1E+06	3,8E+06	4,6E+06	7,9E+06	8,5E+05	1,0E+06	1,3E+06	2,1E+06

No entanto, para a camada de base do pavimento de concreto asfáltico, no cenário 2F, que representa o ponto (16,2; 0,0) e condição úmida da camada de base, e para uma confiabilidade de 95%, a camada granular começa a apresentar deformações permanentes antes de atingir o N de dimensionamento (1,00E+05), apresentando os valores 7,33E+04; 7,18E+04 e 7,05E+04 para, respectivamente, ISC_{subleito} de 6, 8 e 10%.

A camada de sub-base do pavimento, por sua vez, atenderá o N de dimensionamento (1,00E+05) em todas as estruturas e cenários de análise e não apresentará deformações permanentes no período de dimensionamento.

O subleito atenderá ao dimensionamento para os pavimentos com ISC_{subleito} de 6 e 8%, no entanto para o pavimento dimensionado para um ISC_{subleito} de 10%, o subleito já começa a

apresentar valores de N_{PD} inferiores ao N de dimensionamento ($1,00E+05$) para níveis de confiabilidade entre 95, 90 e 80% no cenário 1A, ponto (0,0; 0,0) e M_R pessimista ($M_R-10\%$), com valores de $4,46E+04$; $5,36E+04$ e $6,59E+04$, respectivamente.

5.2. Pavimento de Tratamento Superficial Duplo (Método do DNER, 1981)

Conforme observado na Tabela 13, a camada de base, sub-base e o subleito atenderão o N de dimensionamento ($1,00E+05$) em todas as estruturas e cenários de análise e não apresentarão deformações permanentes. Para este pavimento, não foi considerada a fadiga do revestimento, uma vez que, devido a sua maior capacidade de acompanhar as deformações da estrutura, torna praticamente inexistente o trincamento por fadiga. Além disso, o dimensionamento não retornou diferença na camada de base dos pavimentos com ISC do subleito de 8 e 10%, mantendo os mesmos resultados na análise do SAPEM (2014) para ambas as condições.

Tabela 13: Valores de N para os pavimentos de tratamento superficial duplo

	ISC _{subleito} = 6%				ISC _{subleito} = 8%				ISC _{subleito} = 10%			
	Nível de Confiabilidade				Nível de Confiabilidade				Nível de Confiabilidade			
	95%	90%	80%	50%	95%	90%	80%	50%	95%	90%	80%	50%
Base (Granular)												
1D	1,8E+10	3,0E+10	5,6E+10	1,9E+11	2,2E+10	3,7E+10	6,9E+10	2,3E+11	2,2E+10	3,7E+10	6,9E+10	2,3E+11
1E	3,2E+08	5,4E+08	1,0E+09	3,4E+09	3,7E+08	6,3E+08	1,2E+09	4,0E+09	3,7E+08	6,3E+08	1,2E+09	4,0E+09
1F	1,2E+07	2,1E+07	3,8E+07	1,3E+08	1,3E+07	2,2E+07	4,2E+07	1,4E+08	1,3E+07	2,2E+07	4,2E+07	1,4E+08
2D	1,5E+07	2,5E+07	4,7E+07	1,6E+08	1,5E+07	2,5E+07	4,8E+07	1,6E+08	1,5E+07	2,5E+07	4,8E+07	1,6E+08
2E	1,8E+06	3,1E+06	5,9E+06	2,0E+07	1,8E+06	3,1E+06	5,8E+06	2,0E+07	1,8E+06	3,1E+06	5,8E+06	2,0E+07
2F	3,2E+05	5,5E+05	1,0E+06	3,5E+06	3,2E+05	5,5E+05	1,0E+06	3,5E+06	3,2E+05	5,5E+05	1,0E+06	3,5E+06
Sub-base (Granular)												
1D	5,9E+06	9,9E+06	1,9E+07	6,3E+07	1,5E+06	2,6E+06	4,8E+06	1,6E+07	1,1E+06	1,8E+06	3,4E+06	1,1E+07
1E	1,5E+06	2,5E+06	4,6E+06	1,6E+07	4,8E+05	8,1E+05	1,5E+06	5,2E+06	3,6E+05	6,1E+05	1,1E+06	3,9E+06
1F	3,3E+05	5,6E+05	1,1E+06	3,6E+06	1,4E+05	2,4E+05	4,6E+05	1,6E+06	1,2E+05	1,9E+05	3,7E+05	1,2E+06
2D	7,7E+06	1,3E+07	2,5E+07	8,2E+07	1,7E+06	2,8E+06	5,3E+06	1,8E+07	9,5E+05	1,6E+06	3,0E+06	1,0E+07
2E	1,8E+06	3,1E+06	5,8E+06	1,9E+07	5,2E+05	8,7E+05	1,7E+06	5,6E+06	3,3E+05	5,6E+05	1,1E+06	3,5E+06
2F	3,9E+05	6,7E+05	1,3E+06	4,2E+06	1,5E+05	2,6E+05	4,9E+05	1,6E+06	1,1E+05	1,8E+05	3,4E+05	1,2E+06
Subleito												
1A	2,3E+06	2,8E+06	3,4E+06	5,8E+06	1,3E+05	1,5E+05	1,9E+05	3,2E+05	6,3E+06	7,5E+06	9,3E+06	1,6E+07
1B	6,7E+06	8,1E+06	9,9E+06	1,7E+07	3,6E+05	4,3E+05	5,3E+05	9,0E+05	1,8E+07	2,2E+07	2,7E+07	4,6E+07
1C	1,7E+07	2,1E+07	2,6E+07	4,3E+07	9,3E+05	1,1E+06	1,4E+06	2,3E+06	4,6E+07	5,6E+07	6,8E+07	1,2E+08
2A	6,1E+06	7,4E+06	9,1E+06	1,5E+07	3,4E+05	4,0E+05	5,0E+05	8,4E+05	1,4E+07	1,6E+07	2,0E+07	3,4E+07
2B	1,8E+07	2,1E+07	2,6E+07	4,4E+07	9,6E+05	1,2E+06	1,4E+06	2,4E+06	3,9E+07	4,7E+07	5,8E+07	9,9E+07
2C	4,6E+07	5,6E+07	6,8E+07	1,2E+08	2,5E+06	3,0E+06	3,7E+06	6,3E+06	1,0E+08	1,2E+08	1,5E+08	2,6E+08

5.3. Pavimento de Blocos Graníticos (Equação de Peltier, 1969)

Conforme a Tabela 14, para o pavimento de blocos graníticos a camada de colchão de areia irá atender o N de dimensionamento ($1,00E+05$) em todas as estruturas e cenários de análise e não irá apresentar deformações permanentes. No entanto, a camada de sub-base começa a apresentar valores de N inferiores ao N de dimensionamento ($1,00E+05$) no ponto (16,2; 0,0) em todas as estruturas e para níveis de confiabilidade acima de 50%.

Já o subleito começa a apresentar valores de N inferiores ao N de dimensionamento ($1,00E+05$) no ponto (16,2; 0,0) em todas as estruturas e para quase todos os cenários de condição de umidade e nível de confiabilidade. No pavimento dimensionado para ISC_{subleito} de 8%, o cenário 1A, ponto (0,0; 0,0) e M_R pessimista ($M_R-10\%$), também apresenta N inferior ao N de dimensionamento para as confiabilidades de 80, 90 e 95%.

Tabela 14: Valores de N para os pavimentos de blocos graníticos

ISC _{subleito} = 6%					ISC _{subleito} = 8%				ISC _{subleito} = 10%			
Nível de Confiabilidade					Nível de Confiabilidade				Nível de Confiabilidade			
95%	90%	80%	50%		95%	90%	80%	50%	95%	90%	80%	50%
Colchão de areia												
1D	9,7E+09	1,6E+10	3,1E+10	1,0E+11	7,9E+09	1,3E+10	2,5E+10	8,5E+10	1,1E+10	1,8E+10	3,3E+10	1,1E+11
1E	6,1E+08	1,0E+09	1,9E+09	6,5E+09	5,2E+08	8,7E+08	1,6E+09	5,5E+09	6,5E+08	1,1E+09	2,1E+09	7,0E+09
1F	3,3E+07	5,6E+07	1,1E+08	3,6E+08	2,9E+07	4,9E+07	9,3E+07	3,1E+08	3,5E+07	5,9E+07	1,1E+08	3,7E+08
2D	6,0E+10	1,0E+11	1,9E+11	6,4E+11	1,2E+11	2,0E+11	3,8E+11	1,3E+12	2,1E+11	3,6E+11	6,8E+11	2,3E+12
2E	2,3E+09	3,9E+09	7,4E+09	2,5E+10	4,0E+09	6,8E+09	1,3E+10	4,3E+10	6,5E+09	1,1E+10	2,1E+10	7,0E+10
2F	8,9E+07	1,5E+08	2,8E+08	9,5E+08	1,3E+08	2,3E+08	4,3E+08	1,5E+09	1,9E+08	3,3E+08	6,2E+08	2,1E+09
Sub-base (Granular)												
1D	3,8E+07	6,4E+07	1,2E+08	4,1E+08	2,2E+07	3,8E+07	7,1E+07	2,4E+08	9,9E+06	1,7E+07	3,1E+07	1,1E+08
1E	6,7E+06	1,1E+07	2,1E+07	7,2E+07	4,3E+06	7,3E+06	1,4E+07	4,6E+07	2,2E+06	3,8E+06	7,1E+06	2,4E+07
1F	1,1E+06	1,8E+06	3,4E+06	1,2E+07	7,6E+05	1,3E+06	2,4E+06	8,2E+06	4,6E+05	7,8E+05	1,5E+06	5,0E+06
2D	1,1E+05	1,9E+05	3,6E+05	1,2E+06	4,2E+04	7,1E+04	1,3E+05	4,5E+05	3,0E+04	5,0E+04	9,5E+04	3,2E+05
2E	5,8E+04	9,9E+04	1,9E+05	6,3E+05	2,6E+04	4,4E+04	8,3E+04	2,8E+05	2,0E+04	3,3E+04	6,2E+04	2,1E+05
2F	2,9E+04	4,9E+04	9,2E+04	3,1E+05	1,6E+04	2,6E+04	5,0E+04	1,7E+05	1,3E+04	2,1E+04	4,0E+04	1,3E+05
Subleito												
1A	1,2E+05	1,5E+05	1,8E+05	3,1E+05	5,8E+04	7,0E+04	8,6E+04	1,5E+05	1,2E+05	1,5E+05	1,8E+05	3,1E+05
1B	3,5E+05	4,2E+05	5,1E+05	8,7E+05	1,7E+05	2,0E+05	2,5E+05	4,2E+05	3,5E+05	4,2E+05	5,2E+05	8,9E+05
1C	9,0E+05	1,1E+06	1,3E+06	2,3E+06	4,3E+05	5,2E+05	6,4E+05	1,1E+06	9,1E+05	1,1E+06	1,4E+06	2,3E+06
2A	1,6E+04	1,9E+04	2,4E+04	4,0E+04	9,6E+03	1,2E+04	1,4E+04	2,4E+04	6,1E+03	7,4E+03	9,0E+03	1,5E+04
2B	4,5E+04	5,5E+04	6,8E+04	1,2E+05	2,8E+04	3,3E+04	4,1E+04	6,9E+04	1,8E+04	2,1E+04	2,6E+04	4,4E+04
2C	1,2E+05	1,4E+05	1,7E+05	3,0E+05	7,2E+04	8,6E+04	1,1E+05	1,8E+05	4,5E+04	5,5E+04	6,7E+04	1,1E+05

5.4. Pavimento de Blocos Intertravados de Concreto Pré-moldado (ABCP, 1998)

Para os pavimentos de blocos intertravados de concreto pré-moldado, foram agrupados os pavimentos dimensionados para o ISC_{subleito} de 8 e 10%, uma vez que ambos atingiram a espessura mínima para as camadas conforme o método da ABCP (1998) e resultaram na mesma estrutura final.

Conforme a Tabela 15, a camada de colchão de areia do pavimento de blocos de concreto irá atender o N de dimensionamento (1,00E+05) em todas as estruturas e cenários de análise e não irá apresentar deformações permanentes.

Para a sub-base, a camada começa a apresentar valores de N inferiores ao N de dimensionamento (1,00E+05) no ponto (16,2; 0,0) em todas as estruturas e para quase todos os cenários de condição de umidade e nível de confiabilidade igual ou superior a 80%.

Já para o subleito do pavimento, os resultados apontam que o ponto (16,2; 0,0) apresenta valores de N inferiores ao N de dimensionamento (1,00E+05) em todas as estruturas, cenários de análise e nível de confiabilidade. Além disso, o ponto (0,0; 0,0) começa a apresentar problemas de deformação permanente na estrutura com ISC_{subleito} de 6% para o cenário 1A e nível de confiabilidade igual ou superior a 80%.

Tabela 15: Valores de N para os pavimentos de blocos de concreto intertravados

	ISC _{subleito} = 6%				ISC _{subleito} = 8 e 10%			
	Nível de Confiabilidade				Nível de Confiabilidade			
	95%	90%	80%	50%	95%	90%	80%	50%
Colchão de areia								
1D	7,9E+09	1,3E+10	2,5E+10	8,5E+10	1,1E+10	1,8E+10	3,3E+10	1,1E+11
1E	5,2E+08	8,7E+08	1,6E+09	5,5E+09	6,5E+08	1,1E+09	2,1E+09	7,0E+09
1F	2,9E+07	4,5E+07	9,3E+07	3,1E+08	3,5E+07	5,9E+07	1,1E+08	3,7E+08
2D	1,2E+11	2,0E+11	3,8E+11	1,3E+12	2,1E+11	3,6E+11	6,8E+11	2,3E+12
2E	4,0E+09	6,8E+09	1,3E+10	4,3E+10	6,5E+09	1,1E+10	2,1E+10	7,0E+10
2F	1,4E+08	2,3E+08	4,3E+08	1,5E+09	1,9E+08	3,3E+08	6,2E+08	2,1E+09
Sub-base (Granular)								
1D	2,2E+07	3,8E+07	7,1E+07	2,4E+08	9,9E+06	1,7E+07	3,1E+07	1,1E+08
1E	4,3E+06	7,3E+06	1,4E+07	4,6E+07	2,2E+06	3,8E+06	7,1E+06	2,4E+07
1F	7,6E+05	1,3E+06	2,4E+06	8,2E+06	4,6E+05	7,8E+05	1,5E+06	5,0E+06
2D	4,2E+04	7,1E+04	1,3E+05	4,5E+05	3,0E+04	5,0E+04	9,5E+04	3,2E+05
2E	2,6E+04	4,4E+04	8,3E+04	2,8E+05	2,0E+04	3,3E+04	6,2E+04	2,1E+05
2F	1,6E+04	2,6E+04	5,0E+04	1,7E+05	1,3E+04	2,1E+04	4,0E+04	1,3E+05
Sub-leito								
1A	5,8E+04	7,0E+04	8,6E+04	1,5E+05	1,2E+05	1,5E+05	1,8E+05	3,1E+05
1B	1,7E+05	2,0E+05	2,5E+05	4,2E+05	3,5E+05	4,2E+05	5,2E+05	8,9E+05
1C	4,3E+05	5,2E+05	6,4E+05	1,1E+06	9,1E+05	1,1E+06	1,4E+06	2,3E+06
2A	9,6E+01	1,2E+02	1,4E+02	2,4E+02	6,1E+00	7,3E+00	9,0E+00	1,5E+01
2B	2,8E+02	3,3E+02	4,1E+02	6,9E+02	1,8E+01	2,1E+01	2,6E+01	4,4E+01
2C	7,2E+02	8,6E+02	1,1E+03	1,8E+03	4,5E+01	5,5E+01	6,7E+01	1,1E+02

5.5. Análise dos resultados

A partir dos resultados obtidos aplicando os modelos de estimativa de desempenho estrutural do SAPEM (2014) observa-se que, ainda que os métodos empíricos sejam baseados na capacidade de suporte dos solos e em coeficientes de equivalência estrutural para os materiais utilizados, os mesmos não foram capazes de proteger completamente os pavimentos de deformações permanentes para os valores considerados de M_R para as camadas do pavimento.

Com a utilização de valores maiores para o ISC do subleito, os métodos empíricos utilizados retornam uma redução da espessura das camadas de base e sub-base, reduzindo assim a capacidade estrutural do pavimento sem que haja, necessariamente, um ganho estrutural através do aumento dos Módulos de Resiliência dos materiais. Desta forma, para um mesmo material utilizado, quanto maior o ISC do subleito, mais o pavimento dimensionado pelos métodos empíricos baseados na capacidade de suporte do solo poderá estar vulnerável às cargas aplicadas.

Comparando o pavimento de Tratamento Superficial Duplo (TSD) e o pavimento de Concreto Asfáltico, observa-se que o pavimento de TSD apresenta melhores resultados, o que pode indicar que a redução do coeficiente de equivalência estrutural do revestimento de TSD age de forma a proteger a estrutura do pavimento, uma vez que isso implica no aumento da espessura das camadas subsequentes. Desta forma, caracteriza-se a importância dos valores de coeficientes de equivalência estrutural estabelecidos pelo Método do DNER (1981) nos resultados do dimensionamento empírico, bem como a sua devida correlação com os módulos de resiliência dos materiais.

Para a análise da deformação permanente no subleito dos pavimentos foi considerada a profundidade terminal de afundamento de 10 mm, o que levou a valores muito baixos de N para alguns cenários. Considerar uma profundidade mais permissiva, no valor de 20 mm, retornaria valores maiores para o N , mais condizentes com o restante das camadas do pavimento, mas ainda assim aqueles resultados que ficaram abaixo de 10^2 (1,00E+02) não iriam atender ao N de dimensionamento 10^5 (1,00E+05).

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho teve como objetivo realizar uma análise mecanicista de estruturas de pavimentos dimensionadas pelos métodos empíricos mais comuns e, com isso, estimar a capacidade estrutural dos respectivos pavimentos. Os dimensionamentos foram realizados utilizando o Método do DNER (1981) para pavimentos asfálticos, a Equação de Peltier (1969) para pavimentos de blocos graníticos e o método proposto pela ABCP (1998) na ET-27 para pavimentos de blocos intertravados de concreto pré-moldado. Para todos os métodos foram consideradas três condições de subleito, apresentando o ISC_{subleito} de 6, 8 e 10%.

Foi utilizado o software AEMC, ferramenta integrante do MeDiNa, para realizar a análise elástica das camadas e encontrar as tensões, deformações e deflexões nos pontos de interesse do pavimento. Para a estimativa de capacidade estrutural foram utilizados os modelos propostos pelo SAPEM (2014), onde o concreto asfáltico foi analisado quanto à tração na fibra inferior da camada de revestimento, enquanto as camadas granulares foram analisadas determinando o estado de tensão de cisalhamento no centro da camada e, por sua vez, o subleito foi analisado a partir da deformação vertical na porção superior da camada. Todas as análises foram realizadas para dois pontos (x , y), sendo um no centro de aplicação da carga do semi-eixo rodoviário padrão (0,0; 0,0) e outro imediatamente abaixo de uma das rodas (16,2; 0,0). Foram considerados também três níveis de Módulos de Resiliência (pessimista, moderado e otimista) para os materiais da estrutura, bem como três condições de umidade (seca, moderada e úmida) para as camadas granulares de base e sub-base.

Foi possível observar que os métodos empíricos de dimensionamento, por serem baseados em métodos que surgiram através dos estudos sobre o ISC dos materiais, de fato não contemplam uma avaliação do real comportamento da estrutura do pavimento e suas camadas. Por se tratar de uma via de baixo volume de tráfego, o efeito da fadiga nos revestimentos asfálticos não se apresentou como o principal problema para o Método do DNER, que apresentou somente problemas pontuais de deformação permanente no pavimento de concreto asfáltico quando avaliada a base em níveis altos de confiabilidade (95%) e em uma situação desfavorável como a condição úmida das camadas granulares ou quando avaliado o subleito com os menores valores estabelecidos para o M_R . No entanto, tanto para a Equação de Peltier (1969), quanto para o método da ABCP (1998), quando considerada a transmissão de 50% da carga do eixo padrão rodoviário, os efeitos da deformação permanente nas camadas granulares de sub-base e no subleito se mostraram relevantes em várias estruturas e cenários de análise, o que piora com a redução das espessuras das camadas devido a resposta dos métodos de dimensionamento ao uso de ISC_{subleito} maiores, o que corrobora a incompatibilidade destes métodos com a realidade do comportamento das estruturas.

Identifica-se neste estudo a importância do aprofundamento da utilização da metodologia mecanístico-empírica no dimensionamento de pavimentos, uma vez que a metodologia empírica parte de condições simplificadas e cujo desempenho pode não atender ao esperado. É evidente que esse aprofundamento esbarra em algumas barreiras técnicas, como a necessidade de informações mais completas sobre os materiais empregados na estrutura e ensaios mais

complexos que dependem de equipamentos mais modernos, o que implica em uma mudança comportamental no dimensionamento do pavimento. No entanto, somente o método mecanístico-empírico oferece uma análise estrutural do pavimento que está sendo projetado. A ferramenta AEMC se apresentou como de fácil utilização para o usuário, permitindo a obtenção dos dados necessários para a aplicação dos modelos de desempenho relativos aos pavimentos dimensionados pelos métodos empíricos. Desta forma, evidencia-se a possibilidade do uso concomitante das metodologias diante da escolha do projetista de acordo com as informações e dados disponíveis para o dimensionamento, proporcionando uma análise, ainda que simplificada, dos pavimentos dimensionados pelo método empírico. O SAPEM (2014) se mostrou eficaz na obtenção da previsão de vida útil do pavimento e sua escolha se justificou pela semelhança geológica entre Brasil e África do Sul, no entanto, apesar de ser um bom ponto de partida, é de grande importância o desenvolvimento de modelos de previsão de desempenho regionais que levem em consideração os materiais, o clima e as condições de tráfego existentes no Brasil.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABCP (1998). ET-27. *Pavimentação com peças pré-moldadas de concreto*, São Paulo, 1998.
- Aedo, J. L. C. (1992) *Programa para análise tridimensional de pavimentos asfálticos*. 1992. Dissertação (Mestrado). Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1992.
- AGETOP (2016) IT-02. *Manual de Pavimentação Urbana*. 1. ed. Goiânia: [s. n.], 2016. 60 p.
- Almeida, L. C.; F. H. L. de Oliveira; S. P. Ramos e M. F. P. de Aguiar (2015). Abordagens sobre o dimensionamento de pavimentos flexíveis rodoviários: uma visão prévia do profissional brasileiro. *Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia 2015*, Fortaleza-CE. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/323267825>. Acesso: 18 mar 2021.
- AMMOC (2014) *Memorial Descritivo – Especificações Técnicas Pavimentação em Paralelepípedos de parte da Rua Tiradentes*. 2014. 20 p. Joaçaba, 2014.
- Ayres, M. (1997) *Development of a rational probabilistic approach for flexible pavement analysis*. 1997. Dissertação (Doutorado) - Universidade de Maryland, College Park, EUA, 1997.
- Baptista, A.; L. Picado-Santos. (2000) PaviFlex – Programa de Dimensionamento de Pavimentos Rodoviários Flexíveis. 2000. In: *ESTRADA 2000 – 1º Congresso Rodoviário Português*, LNEC, Lisboa, 28 a 30 de nov. de 2000. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/238081349>. Acesso: 18 mar 2021.
- Bastos, J. B. de S. (2016) *Considerações sobre a deformação permanente de pavimentos asfálticos no dimensionamento mecanístico-empírico*. 2016. 200 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes). Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.
- Bernucci, L. L. B. (1995) *Considerações sobre o dimensionamento de pavimentos utilizando solos lateríticos para rodovias de baixo volume de tráfego*. São Paulo, Tese (Doutorado). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- Bonzanini, J. A. F. (2011) *Estudo dos efeitos do tamanho de corpos-de-prova nos módulos de resiliência de quatro solos*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.
- Booker, J. R. e J.C. Small (1985) The Use of Micro-computers to Solve Problems in Geomechanics Using Finite Layer Methods. 1985. In: *Fifth International Conference on Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*. 1683-1689 p. Nagoia, Japão, 1985. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/320033710>. Acesso: 18 mar 2021.
- Coutinho, J. C. P. (2011) *Dimensionamento de Pavimento Asfáltico: Comparação do Método do DNER com um Método Mecanístico - Empírico aplicada a um trecho*. Mestrado Profissional em Engenharia Geotécnica da Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2011.
- DNIT (2006a). IPR-719. *Manual de Pavimentação*. 3. ed. Rio de Janeiro: [s. n.], 2006a. 274 p. Disponível em: <http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/manuais/publicacoes>. Acesso em: 21 out. 2019.
- DNIT (2006b) IPR-720. *Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos*. 2. ed. Rio de Janeiro: [s. n.], 2006b. 310 p. Disponível em: <http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/manuais/publicacoes>. Acesso em: 21 out. 2019.
- DNIT (2011) IPR-745. *Manual de Gerência de Pavimentos*. 1. ed. Rio de Janeiro: [s. n.], 2011. 189 p. Disponível em: <http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/manuais/publicacoes>. Acesso em: 21 out. 2019.
- DNIT (2014) Projeto DNIT TED nº682/2014. *Execução de estudos e pesquisa para elaboração de método mecanístico - empírico de dimensionamento de pavimentos asfálticos*, [S. l.], 2014. 1 p. Disponível em: <http://ipr.dnit.gov.br/pesquisa>. Acesso em: 22 maio 2020.

- DNIT (2020). *DNIT inicia procedimentos para transição do método de dimensionamento de pavimentos*. 14 dez. 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/noticias/dnit-inicia-testes-para-implementacao-do-metodo-medina-no-dimensionamento-dos-pavimentos-das-rodovias-federais>. Acesso em: 14 janeiro 2020.
- Duncan, J. M.; C. L. Monismith e E. L. Wilson (1968). Finite element analyses of pavements, 1968. In: 47th *Annual Meeting of the Highway Research Board*. Universidade da Califórnia, Berkeley, 1968. Disponível em: <http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/hrr/1968/228/228-003.pdf>. Acesso: 18 mar 2021.
- Franco, F. A. C. de P. (2000) *Um Sistema para Análise Mecânica de Pavimentos Asfálticos*. Dissertação (Mestre em Ciências em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2000.
- Franco, F. A. C. de P. (2004) *Versão da macro de Excel Desenvolvida para o Programa FEPAVE de maio de 2004*. Divulgação Interna. Laboratório de Geotecnia da COPPE/UFRJ.
- Franco, F. A. C. de P (2007) *Método de Dimensionamento Mecânico-Empírico de Pavimentos Asfálticos - SisPav*. Orientadora: Prof.^a DSc. Laura Maria Goretti da Motta. 2007. Dissertação (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.
- Franzoi, S. (1990) *Algumas Peculiaridades Resilientes de Solos Lateríticos e Saprolíticos*. São Paulo, Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- Guimarães, A. C. R. (2009) *Um método mecânico-empírico para a previsão da deformação permanente em solos tropicais constituintes de pavimentos*. Tese de doutorado. Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.
- Holanda, Á. S. de; E. Parente Júnior; T. D. P. de Araújo; L. T. B. de Melo; F. Evangelista Júnior e J. B. Soares (2006) Finite element modeling of flexible pavements. In: *Iberian Latin American Congress on Computational Methods in Engineering*, 27., 2006, Belém. Anais... Belém: Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering, 2006. p. 1-14. Disponível em: <http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/1380>. Acesso: 18 mar 2021.
- Huang, Y. H. (2003) *Pavement Analysis and Design*. 2. ed. Nova Jérsei: Pearson Education, 2003. 775 p. ISBN 0-13-142473- 4.
- IBGE (2012) *Censo Brasileiro de 2010*. Rio de Janeiro, 2012.
- Jacques, G. E. (2015) *Análise Mecânica-Empírica de um pavimento dimensionado pelo método do DNER: Estudo de caso da duplicação da rodovia RSC-287 em Santa Cruz do Sul/RS*. Universidade de Santa Cruz do Sul, Santa Cruz do Sul/RS.
- Kopperman, S.; G. Tiller e M. Tseng (1986) *ELSYM5 - Elastic Layered System: Interactive Microcomputer Version, User's Manual for IBM-PC and Compatible Microcomputer*. 1986. 33 p. Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation, Washington, U.S.A.
- Lilley, A A. e B. J. Walker (1978) *Concrete block paving for heavily trafficked roads and paved areas*. London: C.C.A., 1978.
- Maina, J. W. e K. Matsui (2004) Developing Software for Elastic Analysis of Pavement Structure Responses to Vertical and Horizontal Surface Loadings. *Transportation Research Record*, No. 1896, pp. 107–118. 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.3141/1896-11>. Acesso: 18 mar 2021.
- Medina, J. de (1997) *Mecânica dos Pavimentos*. 1. ed. Rio de Janeiro: UFRJ, 1997.
- Medina, J. de e L. M. G. da Motta (2015) *Mecânica dos Pavimentos*. 3. ed. Rio de Janeiro: UFRJ, 2015. 640 p. ISBN 9788571933668.
- Medrado, W. A. (2009) *Caracterização geotécnica de solo da região norte de Minas Gerais para aplicação em obras rodoviárias*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geotécnica). Universidade Federal de Ouro Preto, Minas Gerais, 2009.
- Mineropar (1983) *Paralelepípedos e Alvenaria Polidétrica: Manual de utilização*, Curitiba, 1983.
- Motta, L. M. G. da (1991) *Método de dimensionamento de pavimentos flexíveis; critério de confiabilidade e ensaios de cargas repetidas*. 1991. 366 p. Tese (Doutorado em ciências em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- Nascimento, M. M. P. do e H. M. de Araújo (2017) Ocupação habitacional na Região Metropolitana de Aracaju/SE: Relações com o ambiente e condições de infraestrutura urbana. 2017. In: *Revista Brasileira de Geografia Física* v.10, n.01. 160-175p. Recife, 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5935/1984-2295.20170008>. Acesso: 18 mar 2021.
- NCHRP (2004). *Guide for Mechanistic-Empirical Design of new and rehabilitated pavement structures*: Program 1-37A, Final Report. Washington, 2004. 39 v. Disponível em: <<http://www.trb.org/mepdg/guide.htm>>. Acesso em: 30 jan. 2020.
- Peltier, R. (1969) *Manuel Du Laboratoire Routier*. 3° ed. Paris: Dunot, 1969. 291 p.
- Prefeitura Municipal de Bandeirante-SC. (2016) *Memorial Descritivo de Pavimentação Em Pedras Irregulares*. 2016. Bandeirante, Santa Catarina, 2016.
- Prefeitura Municipal de Cajazeirinhas-PB. (2015) *Pavimentação e Drenagem em diversas Ruas no município de Cajazeirinhas – PB*. 2015. Cajazeirinhas, Paraíba, 2015.

- Prefeitura Municipal de Jaborá-SC. (2017) *Projeto de Drenagem Pluvial e Pavimentação em Paralelepípedo*. 2017. Jaborá, Santa Catarina, 2017.
- Prefeitura Municipal de Limoeiro-PE. (2018) *Projeto Básico - Pavimentação em Paralelepípedos de diversas Ruas de Limoeiro/PE*. 2018. Limoeiro, Pernambuco, 2018.
- Prefeitura Municipal de São Paulo (2004a) Secretaria Municipal de Infraestrutura Urbana e Obras - SIURB. IP-02. *Classificação das Vias*, São Paulo, 2004a. Disponível em: https://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/obras/normas_tecnicas/index.php?p=33669. Acesso em: 21 out. 2019.
- Prefeitura Municipal de São Paulo (2004b) Secretaria Municipal de Infraestrutura Urbana e Obras - SIURB. IP-06. *Dimensionamento de Pavimentos com Blocos Intertravados de Concreto*, São Paulo, 2004b. Disponível em: https://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/obras/normas_tecnicas/index.php?p=33669. Acesso em: 21 out. 2019.
- Preussler, E. S. (1983) *Estudo da deformação resiliente de pavimentos flexíveis e aplicação ao projeto de camadas de reforço*. Tese (Doutorado). COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro.
- Ramalho, A. M. C. (2010) *Análise das tensões e deformações em camadas de pavimento flexível*. Orientador: Prof.^a DSc. Lícia Mouta da Costa. 2010. 164 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2010.
- Rodrigues, M. R. (1997) *Influência da sucção no módulo de resiliência de solos típicos de subleito de pavimentos do Rio Grande do Sul*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1997.
- Rodrigues, R. M. (1991) *Estudo do trincamento dos pavimentos*. Orientador: Prof.^a DSc. Jacques de Medina. 1991. 208 f. Dissertação (Doutorado em Ciências) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1991.
- SAPEM (2014). *South African Pavement Engineering Manual*. The South African National Roads Agency Ltd.
- Scaranto, M. (2007) *Procedimentos aplicáveis na definição de medidas para a manutenção de pavimentos urbanos com revestimentos asfálticos*. Orientador: Prof. DSc. Fernando Pugliero Gonçalves. 2007. 161 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2007.
- Senço, W. de (2001) *Manual de técnicas de pavimentação*: Volume 2. 1. ed. São Paulo: Pini, 2001. 671 p. v. 1. ISBN 85-7266-125-5.
- Senço, W. de (2007) *Manual de técnicas de pavimentação*: Volume 1. 2. ed. São Paulo: Pini, 2007. 761 p. v. 1. ISBN 978-85-7266-199-7.
- Shell (1998). *Bitumen Stress Analysis in Roads BISAR 3.0 User's Manual*. 1998. Shell International Oil Products, Bitumen Business Group.
- Shoji, E. S (2000) *Desenvolvimento de um Programa de Sistema de Gerência de Pavimentos Urbanos para Cidades Brasileiras de Médio Porte*. Orientador: Prof. DSc. José Leomar Fernandes Júnior. 2000. 175 f. Tese (Mestrado em Transportes) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.
- Silva, P. D. E. A. da (1995). *Contribuição para o aperfeiçoamento do emprego do programa FEPAVE2 em estudos e projetos de pavimentos flexíveis*. Orientadora: Prof.^a DSc. Laura Maria Goretti da Motta. 1995. 118 p. Tese (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1995.
- Theyse, H.L.; M. De Beer e F.C. Rust (1996) Overview of South African Mechanistic Pavement Design Method. *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board*, [s. l.], ed. 1539, 1996. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/0361198196153900102>. Acesso: 18 mar 2021.
- Uzan, J. (1978) *JULEA - Jacob Uzan Layered Elastic Analysis Program*. 1978.
- Vertamatti, E. (1988) Novas considerações geotécnicas sobre solos tropicais amazônicos de textura fina. In: 23^a *Reunião Anual de Pavimentação*, Florianópolis-SC. Anais. ABPv, Rio de Janeiro. p. 533-564.
- Villibor, D. F.; J. S. Nogami; J. R. Cincerre; P. R. M. Serra e A. Z. Neto (2009) *Pavimentos de Baixo Custo para Vias Urbanas*. 2. ed. São Paulo: Arte & Ciência, 2009. 196 p. ISBN 978-85-61165-29-1.
- Wardle, L. J. (1996) *CIRCLY Users' Manual, Version 3.0*. 1996. MINCAD Systems Pty Ltd, Richmond, Austrália.
- Weber, R. C. (2013) *Avaliação das trajetórias de umedecimento e secagem na deformabilidade elástica de solos compactados*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.
- Werk, S. M. S. (2000) *Estudo da influência dos métodos de compactação no comportamento resiliente de solos*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.
- Wilson, E. L. (1965) *A Digital Computer Program for the Finite Element Analysis of Solids With Non-Linear Material Properties*. Berkeley: Univ. of California, Dept. of Civil Engineering, 1965.