



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES**  
**CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

**FELIPE SILVEIRA CAVALCANTI BEZERRA**

**AVALIAÇÃO DOS MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS**  
**ASFÁLTICOS, INTERTRAVADOS E COM CONCRETO: PREVISÕES DE**  
**COMPORTAMENTO**

**FORTALEZA**

**2021**

FELIPE SILVEIRA CAVALCANTI BEZERRA

AVALIAÇÃO DOS MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS  
ASFÁLTICOS, INTERTRAVADOS E COM CONCRETO: PREVISÕES DE  
COMPORTAMENTO

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Francisco Heber Lacerda de Oliveira, D. Sc.

FORTALEZA

2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

B1a BEZERRA, FELIPE SILVEIRA CAVALCANTI.  
AVALIAÇÃO DOS MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS,  
INTERTRAVADOS E COM CONCRETO: PREVISÕES DE COMPORTAMENTO / FELIPE  
SILVEIRA CAVALCANTI BEZERRA. – 2021.  
76 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de  
Tecnologia, Curso de Engenharia Civil, Fortaleza, 2021.  
Orientação: Prof. Dr. Francisco Heber Lacerda de Oliveira.

1. Dimensionamento. 2. Pavimento. 3. Mecanicista-Empírico. I. Título.

CDD 620

---

FELIPE SILVEIRA CAVALCANTI BEZERRA

AVALIAÇÃO DOS MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS  
ASFÁLTICOS, INTERTRAVADOS E COM CONCRETO: PREVISÕES DE  
COMPORTAMENTO

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovada em: 30/03/2021

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Francisco Heber Lacerda de Oliveira (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Profa. Dra. Marisete Dantas de Aquino  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Dr. Jorge Luiz Oliveira Lucas Júnior  
Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Asfalto (INCT-Asfalto)

A Deus.

Aos meus pais, Francisco de Assis e Socorro.

À minha irmã e à namorada, Andressa e Tici

## AGRADECIMENTOS

Tenho a agradecer a Deus por ter me permitido realizar o sonho de criança de fazer engenharia em um centro de excelência como a Universidade Federal do Ceará. Quero agradecer aos meus pais que me possibilitaram alcançar meus objetivos, fornecendo todo o suporte necessário, em especial agradecer meu pai pelo encantamento pela engenharia e minha mãe por todos os ensinamentos.

Nesse momento, devo agradecimentos a minha irmã, Andressa Silveira, por ter sonhado junto e está nessa jornada comigo desde o início. Devido a todo apoio e compreensão incondicional durante essa jornada, quero agradecer a minha namorada, Ticiane Farias. Não posso esquecer meu companheiro inseparável de estudo desde a época de colégio, o Teo, pelo companheirismo e fidelidade de sempre.

Durante a faculdade fiz excelentes amigos que pretendo levar para toda a vida, as quais são pessoas excelentes e muito competentes, devo citar Alexandre Feitosa, Carlos Mateus Gonzaga, Gabriel Donnantuoni, Gabriel Correia, Lucas Firmeza, Matheus Musy, Mateus Saboia, Fabio Silva, Francisco Nogueira, Daniel Tardin, Glauber Esmeraldo, Felipe Moreira, Ciro Paiva, Pedro Rebelo, Renan Melo, Italo Viana, Yvna Leorne e Lucas Mapurunga.

Antes de iniciar este projeto tive pessoas que sonharam comigo e sou muito grato por isso, pois com seu apoio pude chegar até aqui. Quero citar o Luis André Bastos, João Lucas Nunes, Hanna Aguiar, Sara Figueiredo, Roberto Frota, Sarah Fontenele, Magno Filho, Samuel Marinho, Guilherme Huet, Everton Duarte, Natan Viana, Anne Sanford, Deborah Karizze, Daniel Bessa, Caio Abner, Victor Aires e Kaue Colaço.

Gostaria de agradecer todos meus familiares pelo apoio que me deram para alcançar meus objetivos, em especial Tia Regina, Tia Bel, Tia Aladia, Tio Flávio, Tio Luis André, Leopoldo e Tibério. Tive oportunidades de trabalhar com brilhantes profissionais, os quais sou muito grato pela oportunidade como, Assis Bezerra, Guilherme Gouveia, Danilo Almeida e Alana Sampaio.

Durante o tempo de faculdade tive contato com excelentes professores, em especial o professor Heber Oliveira, o qual pude participar de alguns projetos em conjunto. Nesse momento oportuno, gostaria de gratificá-lo pelo compromisso e competência demonstrados em todos os momentos! Tenho agradecimentos também ao Bruno Mota, que me ajudou em importantes projetos durante a graduação.

“Mesmo quando eu andar por um vale de trevas e morte, não temerei perigo algum, pois tu estás comigo; a tua vara e o teu cajado me protegem.”

**Salmo 23:4**

## RESUMO

Este trabalho realizou o dimensionamento da superestrutura do pavimento para estruturas com revestimento em concreto betuminoso usinado a quente, em blocos de concreto intertravados e em placas de concreto simples dadas as mesmas condições de contorno, por intermédio de modelos de dimensionamentos semiempíricos ou modelos mecanicistas-empíricos que desprezem algum aspecto relevante. Foram utilizados os seguintes modelos de dimensionamento: Souza (1981) para pavimentos asfálticos, PMSP (2004a) para pavimentos intertravados e PCA (1984) para pavimentos em concreto. Então, procedeu-se para realização da verificação mecanicista-empírica a respeito dos principais modos de ruína de cada dimensionamento, considerando aspectos que foram ignorados no dimensionamento. Quando identificado que o dimensionamento da superestrutura não atendia o volume de tráfego de projeto, buscou-se adequar a superestrutura para atender os critérios mecanicistas-empíricos adotados, apenas alternando a espessura do revestimento. Constatou-se que, para a situação analisada, o pavimento com revestimento em concreto betuminoso usinado a quente e com revestimento em placas de concreto simples apresentou ruína precoce pela fadiga do revestimento.

**Palavras-chave:** Dimensionamento. Pavimento. Mecanicista-Empírico.



## ABSTRACT

This work realized the dimensioning of the pavement superstructure for structures with revestment in bituminous concrete hot machined, in interlocking concrete blocks and in simple concrete slabs given the same contour conditions. through semi-empirical dimensioning models or mechanistic models that disregard some relevant aspect. Were used this models of dimensioning: Souza (1981) for asphaltic pavements, PMSP (2004a) for interlocking pavements e PCA (1984) for concrete pavements. So, proceeded for the realization of the mechanist verification about the main models of ruin of each dimensioning, considering aspects that were ignored in the dimensioning. When identified that the dimensioning of the superstructure don't attend the project traffic volume, an adequate superstructure was sought to meet the mechanistic criteria adopted, only alternating the thickness of the coating. It was found that for the situation analyzed the pavement with revestment of hot-machined bituminous concrete and with simple concrete slabs presented early ruin due to the fatigue of the coating.

**Keywords:** Dimensioning. Pavement. Mechanistic.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Ábaco para dimensionamento de pavimentos asfálticos .....	21
Figura 2 – Ábaco para definição da espessura de sub-base .....	25
Figura 3 – Ábaco para definição da espessura da base .....	26
Figura 4 – Ábaco para verificação da fadiga .....	31
Figura 5 – Ábaco para verificação da erosão (com acostamento) .....	32
Figura 6 – Fluxograma do método de pesquisa .....	42
Figura 7 – Deflexão total no topo da superestrutura para cada tipo de revestimento .....	57
Figura 8 – Deflexão no topo do subleito para cada pavimento .....	58
Figura 9 – Tensão no topo do subleito para cada pavimento .....	58
Figura 10 – Tensões verticais no pavimento asfáltico .....	59
Figura 11 – Tensões verticais no pavimento intertravado .....	60
Figura 12 – Tensões verticais no pavimento com placas de concreto .....	62

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Fatores de Equivalência de Carga – USACE .....	17
Tabela 2 – Espessura Mínima de Revestimentos Asfálticos .....	20
Tabela 3 – Coeficientes de Equivalência Estrutural .....	20
Tabela 4 – Tabela para definição da espessura da base .....	26
Tabela 5 – Aumento de k em função de sub base granular .....	29
Tabela 6 – Fatores de segurança para as cargas .....	32
Tabela 7 – Critério de parada do dimensionamento MeDiNa .....	36
Tabela 8 – Critério para determinação do diferencial térmico .....	38
Tabela 9 – Distribuição horária do tráfego .....	39
Tabela 10 – Coeficientes da regressão múltipla .....	40
Tabela 11 – Contagem classificatória .....	43
Tabela 12 – Número N para cada ano de serviço do pavimento .....	50
Tabela 13 – Carregamentos anuais para o pavimento com placas de concreto .....	51
Tabela 14 – Estrutura para o pavimento com revestimento asfáltico .....	52
Tabela 15 – Estrutura do pavimento com revestimento em blocos intertravados .....	54
Tabela 16 – Pavimento dimensionado para revestimento em placas de concreto simples	55
Tabela 17 – Número N para cada ano de serviço do pavimento de placas de concreto ...	66
Tabela 18 – Tensão de tração por horário em cada estação do ano .....	67
Tabela 19 – Estimação do número de repetições admissíveis .....	68

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
BGS	Brita Graduada Simples
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CAUQ	Concreto Asfáltico Usinado a Quente
CBUQ	Concreto Betuminoso Usinado à Quente
CCR	Concreto Compactado com Rolo
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
DT	Diferenciais Términos
FC	Fator de Carga
FE	Fator de Eixo
FEC	Fatores de Equivalência de Carga
FV	Fator de Veículo
IP	Índice de Plasticidade
IPR	Instituto de Pesquisas Rodoviárias
ISC	Índice de Suporte Califórnia
LL	Limite de Liquidez
MeDiNa	Método de Dimensionamento Nacional
MR	Módulo de Resiliência
PBT	Peso Bruto Total
PCA	<i>Portland Cement Association</i>
PCS	Placa de Concreto Simples
PMSP	Prefeitura Municipal de São Paulo
RT	Resistência característica à tração na flexão
TSCE	Teoria de Sistemas de Camadas Elásticas
VMD	Volume Diário Médio
Vt	Volume total de tráfego

## LISTA DE SÍMBOLOS

%	Porcentagem
cm	Centímetro
Hz	Hetz
MPa	Megapascal
m	Metro
tf	tonelada-força
°C	Graus Celsius

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	14
<b>1.1</b>	<b>Justificativa</b> .....	14
<b>1.2</b>	<b>Problema de pesquisa</b> .....	15
<b>1.3</b>	<b>Objetivos</b> .....	15
<i>1.3.1</i>	<i>Objetivo geral</i> .....	15
<i>1.3.2</i>	<i>Objetivos específicos</i> .....	15
<b>1.4</b>	<b>Estrutura do trabalho</b> .....	16
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	17
<b>2.1</b>	<b>Dimensionamento de pavimento asfáltico</b> .....	17
<b>2.2</b>	<b>Dimensionamento com blocos de concreto intertravado</b> .....	24
<b>2.3</b>	<b>Dimensionamento com placa de concreto simples</b> .....	28
<b>2.4</b>	<b>Verificação mecanicista-empírica</b> .....	34
<i>2.4.1</i>	<i>Revestimento asfáltico</i> .....	34
<i>2.4.2</i>	<i>Revestimento com blocos de concreto intertravado</i> .....	37
<i>2.4.3</i>	<i>Revestimento com placas de concreto simples</i> .....	38
<b>3</b>	<b>MÉTODO DE PESQUISA</b> .....	43
<b>3.1</b>	<b>Pavimento asfáltico</b> .....	45
<b>3.2</b>	<b>Pavimento com blocos intertravados</b> .....	47
<b>3.3</b>	<b>Pavimento com placas de concreto</b> .....	48
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	51
<b>4.1</b>	<b>Tráfego</b> .....	51
<b>4.2</b>	<b>Superestrutura</b> .....	53
<i>4.2.1</i>	<i>Revestimento asfáltico</i> .....	53
<i>4.2.2</i>	<i>Revestimento intertravado</i> .....	54
<i>4.2.3</i>	<i>Revestimento em placas de concreto simples (PCS)</i> .....	56
<b>4.3</b>	<b>Estado de tensões</b> .....	57
<i>4.3.1</i>	<i>Pavimento asfáltico: análise de tensões</i> .....	60
<i>4.3.2</i>	<i>Pavimento intertravado: análise de tensões</i> .....	61
<i>4.3.3</i>	<i>Pavimento com placas de concreto: análise de tensões</i> .....	62
<b>4.4</b>	<b>Verificação mecanicista-empírica do pavimento asfáltico</b> .....	63
<b>4.5</b>	<b>Verificação mecanicista-empírica do pavimento intertravado</b> .....	66

<b>4.6</b>	<b>Verificação mecanicista-empírica do pavimento com placas de concreto ....</b>	<b>67</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>70</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>72</b>

## **1 INTRODUÇÃO**

A principal função de um pavimento é garantir o rolamento ao tráfego de maneira confortável, segura e econômica, sendo um elemento importante para o desenvolvimento de uma região. No Brasil, grande parte das atividades exercidas pela sociedade necessita do transporte rodoviário, evidenciando a relevância de um sistema rodoviário intercomunicado, eficaz e eficiente.

O desenvolvimento do Brasil ocorre em função do crescimento e da melhoria do sistema rodoviário, tendo em vista que se trata de um país de dimensões continentais e com diversos setores relevantes para economia, os quais são interdependentes e necessitam estar conectados. Ressalta-se que, os outros modos de transportes também são necessários, todavia, o modo rodoviário é o mais utilizado historicamente no país. Portanto, trata-se de uma área com grande demanda por profissionais capacitados, sejam eles projetistas, empreiteiros ou fiscais, evidenciando a relevância de estudos na área rodoviária.

No Brasil existem cerca de 1,3 milhões km de vias não pavimentadas e 157,3 mil km de vias planejadas, de acordo com o Confederação Nacional de Transportes (2019). Dentre essas vias a serem implantadas existem diferentes situações geotécnicas, condições climáticas, disponibilidade de materiais e tráfego. Diante disso, urge a necessidade de métodos de dimensionamento de pavimentos que sejam capazes de reconhecer as singularidades e propor soluções, considerando as diferentes opções de pavimentos.

De acordo com o DNIT (2006), tem-se que o pavimento é a superestrutura constituída por um sistema de camadas de espessuras finitas. Esses elementos são definidos por meio do dimensionamento para um volume de tráfego preestabelecido, com intuito de proteger a estrutura da ruptura. Os métodos para determinação das camadas podem ser baseados em teorias de distribuição de tensões em solos e nas observações obtidas em experimentos. Cada processo de dimensionamento possui suas particularidades em relação ao modo de ruptura considerado da estrutura e simplificações inerentes aos modelos.

### **1.1 Justificativa**

Os modelos de dimensionamento podem ser para pavimentos em asfalto, em concreto e em blocos pré-moldados intertravados. Cada um deles possui especificidades sobre sua utilização e considerações no seu dimensionamento. Dependendo do modelo e do revestimento adotado, é possível realizar previsões sobre as respostas da estrutura em dada



condição de tráfego, fato que evidencia a importância do processo de dimensionamento para a infraestrutura rodoviária.

Dessa forma, fica notória a importância da compreensão dos diversos métodos de dimensionamento para os diferentes tipos de pavimento, reconhecendo-se as suas premissas e limitações. Dada compreensão faz-se necessária para que se tenha o conhecimento de como cada método deve ser utilizado e em qual situação, para que se tenha uma solução tecnicamente confiável e economicamente vantajosa.

## **1.2 Problema de pesquisa**

De acordo com a Confederação Nacional de Transportes (2019), 59 % das vias implantadas no Brasil estão em uma condição regular, ruim ou péssima. A partir dessa informação, o dimensionamento de pavimentos pode ter influência nesse cenário, pois são utilizados modelos que não consideram importantes formas de ruptura e outros semiempíricos que não são adequados para determinada situação.

Vale salientar que os métodos de dimensionamento são modelos com diversas considerações sobre o modo de ruptura de um pavimento para um determinado nível de tráfego. Então, ressalta-se que não se trata de um problema do modelo de dimensionamento, mas da sua aplicação com uma consideração inadequada ou a ausência de alguma ponderação complementar necessária.

## **1.3 Objetivos**

### ***1.3.1 Objetivo geral***

O principal objetivo deste trabalho é analisar o dimensionamento de um pavimento por métodos semiempíricos e mecanistas-empíricos, para tráfego pesado, em pavimentos com revestimento em asfalto, em concreto e em blocos pré-moldados intertravados.

### ***1.3.2 Objetivos específicos***

Como objetivos específicos têm-se:

- a) analisar a interação entre a carga e o pavimento associada aos materiais utilizados no dimensionamento;

- b) verificar o desempenho do pavimento dimensionado baseado na verificação mecanicista-empírico, evidenciando possíveis discrepâncias com os métodos de dimensionamento semiempíricos;
- c) realizar a adequação nos dimensionamentos semiempíricos com intuito de que a estrutura suporte o tráfego previsto, de acordo com os critérios mecanicistas-empíricos.

#### **1.4 Estrutura do trabalho**

O trabalho foi dividido em cinco capítulos. Além do capítulo introdutório, há o segundo que foi destinado à revisão bibliográfica, no qual foram apresentados os métodos de dimensionamento adotados e os modelos utilizados para a verificação mecanicista-empírica. O capítulo três foi redigido com a apresentação do método de pesquisa utilizado.

No capítulo quatro foram apresentados os resultados com base na definição das camadas constituintes do pavimento segundo os métodos adotados. Posteriormente, foram apresentadas as relações entre a carga e o pavimento para cada concepção obtida, considerando uma análise estrutural pela Teoria de Sistemas de Camadas Elásticas (TSCE).

Após a definição da superestrutura do pavimento e o conhecimento do estado de tensões atuantes nos materiais do pavimento, foram evidenciados e comparados os resultados obtidos das verificações mecanicistas-empíricas nos diferentes tipos de pavimentos. Na ocorrência de insuficiência da superestrutura projetada foi realizada a adequação, segundo o critério mecanicista-empírica. Por fim, no capítulo cinco, foram apresentadas as conclusões para este trabalho e sugestões para futuros.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Na revisão bibliográfica foram apresentados os métodos de dimensionamento de pavimentos com revestimentos de material asfáltico, de blocos intertravados e de placas de concreto simples provenientes da extrapolação de dados empíricos, exceto o dimensionamento de placas de concreto que considera o estado de tensões das placas de concreto, apesar de não considerar todos os aspectos relevantes para formação do estado de tensões em pista. Para cada método de dimensionamento foram apresentados os critérios de verificação mecanicista-empírica, por meio de uma análise do estado de tensões dos materiais, para os modos de ruptura específicos de cada pavimento.

### 2.1 Dimensionamento de pavimento asfáltico

O método de dimensionamento de Souza (1981), exposto pelo DNIT (2006), possui sua formulação teórica embasada nos estudos de Turnbull *et al.* (1962), os quais transformam os efeitos de um carregamento qualquer para o efeito de um eixo simples de roda dupla com uma carga de 80 kN, considerado como padrão. Assim, o estudo de tráfego é baseado no conceito de número equivalentes de passagens de um eixo padrão durante a vida de serviço do pavimento.

Salienta-se que a conversão dos carregamentos existentes em uma carga padrão é difícil, pois ocorre uma elevada heterogeneidade dos tipos de veículos, da composição dos eixos, dos carregamentos, das pressões de contato do pneu com o pavimento, da velocidade do veículo e da frequência dos carregamentos, de acordo com Mota *et al.* (2018). A partir disso, urge o conceito de equivalência de carga, definido por Balbo (2011) como a relação entre os carregamentos, pois para estruturas idênticas, os danos causados por diferentes veículos são desiguais. O fator de equivalência de carga pode ser compreendido como a transformação de um carregamento qualquer no eixo padrão rodoviário, baseado nos danos causados por cada um. Na Tabela 1 estão valores recomendados para Fatores de Equivalência de Carga (FEC) do USACE.

Tabela 1 – Fatores de Equivalência de Carga – USACE

<b>Tipo de Eixo</b>	<b>Faixas de Carga (tf)</b>	<b>Equações (P em tf)</b>
Simples	0 – 8	$FEC = 2,0782 \times 10^{-4} \times p^{4,0175}$
	$\geq 8$	$FEC = 1,8320 \times 10^{-6} \times p^{6,2542}$
Tandem Duplo	0 – 11	$FEC = 1,5920 \times 10^{-4} \times p^{3,4720}$
	$\geq 11$	$FEC = 1,5280 \times 10^{-6} \times p^{5,4840}$
Tandem Triplo	0 – 18	$FEC = 8,0359 \times 10^{-5} \times p^{3,3549}$
	$\geq 18$	$FEC = 1,3229 \times 10^{-7} \times p^{5,5789}$

Fonte: DNIT (2006)

Outro conceito importante é o de Fator de Carga (FC) que é relativo à frota de veículos que operam na via. Segundo Balbo (2011), o FC representa quantas passagens do eixo médio são equivalentes ao eixo padrão. Assim, trata-se de um fator de equivalência ponderado pelos eixos que operam na via. Soares e Motta (2001) alertam que para obtenção do fator de carga deve-se utilizar o conceito de conjunto de eixos, ou seja, um tandem duplo composto por dois eixos individuais consiste em um conjunto de eixo. A expressão para o cálculo do Fator de Carga está expressa na Equação 1.

$$FC = \frac{\sum(P_j \times FEC_j)}{100} \quad \text{Eq. (1)}$$

em que,

P<sub>j</sub>: porcentagem dos eixos na amostragem em relação ao total de eixos;

FEC: fator de equivalência de carga.

Ademais, apresenta-se o conceito de Fator de Eixo (FE), que segundo Balbo (2011), é um valor médio que indica quantos eixos possuem, em média, os veículos da frota. Nota-se que esse conceito abrange todos eixos que trafegam sobre a via, sendo relacionado a frota. Soares e Motta (2001) indicam que para obtenção do fator de eixo deve-se utilizar o conceito de conjunto de eixos também. A Equação 2 apresenta esse conceito.

$$FE = \sum(O_j \times FEC_j) \quad \text{Eq. (2)}$$

em que,

O: operações de um dado eixo;

FEC: fator de equivalência de carga.

O Fator de Veículo (FV) consiste num valor que, multiplicado pela frota de projeto, obtém-se o número de eixos equivalentes ao eixo padrão. O FV pode ser obtido pela multiplicação do FE e do FC, pois, ao multiplicar a frota de veículos pelo FE tem-se o valor de eixos no horizonte de projeto. Então, ao se multiplicar esse valor pelo FC consegue-se obter o número de repetições do eixo padrão. Vale ressaltar que o FV pode ser calculado pelo fator de veículo individual para diferentes veículos. Todavia, no presente trabalho foi adotado o método apresentado. A Equação 3 é utilizada para definir o FV.

$$FV = FE \times FC \quad \text{Eq. (3)}$$

em que,

FE: fator de eixo;

FC: fator de carga.

O Volume Diário Médio (VMD) consiste no total de veículos que passam por uma seção completa da via em um dia, sendo adotado como parâmetro para o número de repetições de eixos equivalentes de projeto. Ressalta-se que, em alguns casos, faz-se necessária a aplicação de fatores de expansão, os quais podem considerar variações de tráfego ao longo do ano.

Admitindo uma taxa de crescimento geométrico do tráfego e baseado no VMD, obtém-se o volume total de tráfego ao longo da vida de serviço da via. Assim, multiplicando o volume total pelo FV da frota encontra-se o número equivalente de operações do eixo simples de roda dupla padrão, definido como número N, conforme a Equação 4:

$$N = \frac{365 \times VMD \times [(1 + t/100)^P - 1]}{t/100} \times FV \quad \text{Eq. (4)}$$

em que,

VMD: volume médio diário;

t: taxa de crescimento (%);

P: tempo(anos);

FV: fator de veículo.

É importante reconhecer que os FEC dependem diretamente do modo de ruptura adotado pelo método de dimensionamento. A metodologia adotada no dimensionamento do Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER) é a ruptura por intermédio da plastificação do subleito. Portanto, assume-se que o dano gerado pelo eixo-padrão rodoviário é um dano específico, o qual é independente da condição de degradação do pavimento, de acordo com a teoria para formulação dos fatores de equivalência de carga (BALBO, 2011).

Além disso, uma limitação do procedimento supracitado é não considerar fatores relacionados com a espessuras das camadas do pavimento e dos seus materiais constituintes, segundo Pereira (1985) *apud* Balbo (2011). Assim, verifica-se que uma análise mais coerente seria avaliar o estado de tensões causados na estrutura pelo carregamento e, então, relacionar com modelos de degradação para obtenção dos fatores de equivalência de carga.

Existe também o fator climático regional (FR) que considera a variação de suporte dos materiais ao longo do ano devido as variações climáticas, faz-se essa correção multiplicando esse fator pelo FV e o volume total de tráfego (Vt). Segundo o DNIT (2006), as pesquisas desenvolvidas pelo Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR) indicam o uso do FR = 1, apesar do Brasil possuir dimensões continentais e os mais variados tipos de climas. Coutinho (2011) cita que no desenvolvimento da metodologia no Brasil o FR foi considerado redundante, pois no ensaio de Índice de Suporte Califórnia (ISC) o material fica embebido por quatro dias.

Ademais, Coutinho (2011) afirma que os estudos para a realização do método de dimensionamento consideraram os fatores que levaram à ruptura dos pavimentos na Califórnia, como a compactação inadequada, umidade excessiva, espessuras de camadas insuficientes e materiais com resistências inadequadas ao cisalhamento. Os parâmetros iniciais de projeto são os valores tratados estatisticamente do subleito e o número de repetições de carga do eixo padrão (N). A partir do Número N obtém-se a espessura mínima de revestimento asfálticos. Então, o dimensionamento é realizado pela resolução sucessivas das equações (5), (6) e (7), considerando a espessura e o tipo de revestimento baseado nos níveis de tráfego, conforme a Tabela 2.

$$R \times Kr + B \times Kb \geq H20 \quad \text{Eq. (5)}$$

$$R \times Kr + B \times Kb + h20 \times Ks \geq Hn \quad \text{Eq. (6)}$$

$$R \times Kr + B \times Kb + h20 \times Ks + hn \times Kn \geq Hm \quad \text{Eq. (7)}$$

em que,

R: espessura do revestimento asfáltico (cm);

Kr: coeficiente estrutural do revestimento;

B: espessura da base (cm);

Kb: coeficiente estrutural da base;

h20: espessura da sub-base (cm);

Ks: coeficiente estrutural da sub-base;

hn: espessura do reforço do subleito (cm);

Kn: coeficiente estrutural do reforço do subleito;

H20: espessura equivalente para proteger a sub-base (cm);

Hn: espessura equivalente para proteger o subleito ou o reforço do subleito (cm);

Hm: espessura equivalente para proteger o subleito (cm).

Tabela 2 – Espessura Mínima de Revestimentos Asfálticos

<b>N</b>	<b>Espessura Mínima de Revestimentos Betuminosos</b>
$N \leq 10^6$	Tratamentos Superficiais Asfálticos
$10^6 < N \leq 5 \times 10^6$	Revestimentos Asfálticos com 5,0 cm de Espessura
$5 \times 10^6 < N \leq 10^7$	Concreto Asfáltico com 7,5 cm de Espessura
$10^7 < N \leq 5 \times 10^7$	Concreto Asfáltico com 10,0 cm de Espessura
$10^7 > N$	Concreto Asfáltico com 12,5 cm de Espessura

Fonte: DNIT (2006).

Observa-se a utilização do conceito de equivalência estrutural, o qual Balbo (2011) define como a relação entre a espessura de uma camada de pedregulho equivalente (conforme padrão criado na Califórnia, em finais da década de 1920) e a espessura real da camada do material em questão. Esse fato advém dos diferentes valores de rigidez dos materiais utilizados nas camadas de pavimentação, os quais resultam de diferentes capacidades de distribuir as tensões nas camadas inferiores. Assim, por intermédio dos fatores de equivalência busca-se diferenciar os materiais utilizados na pavimentação e justificar a utilização de materiais com características superiores. Os coeficientes de equivalência estrutural adotados pelo DNIT (2006) são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Coeficientes de Equivalência Estrutural

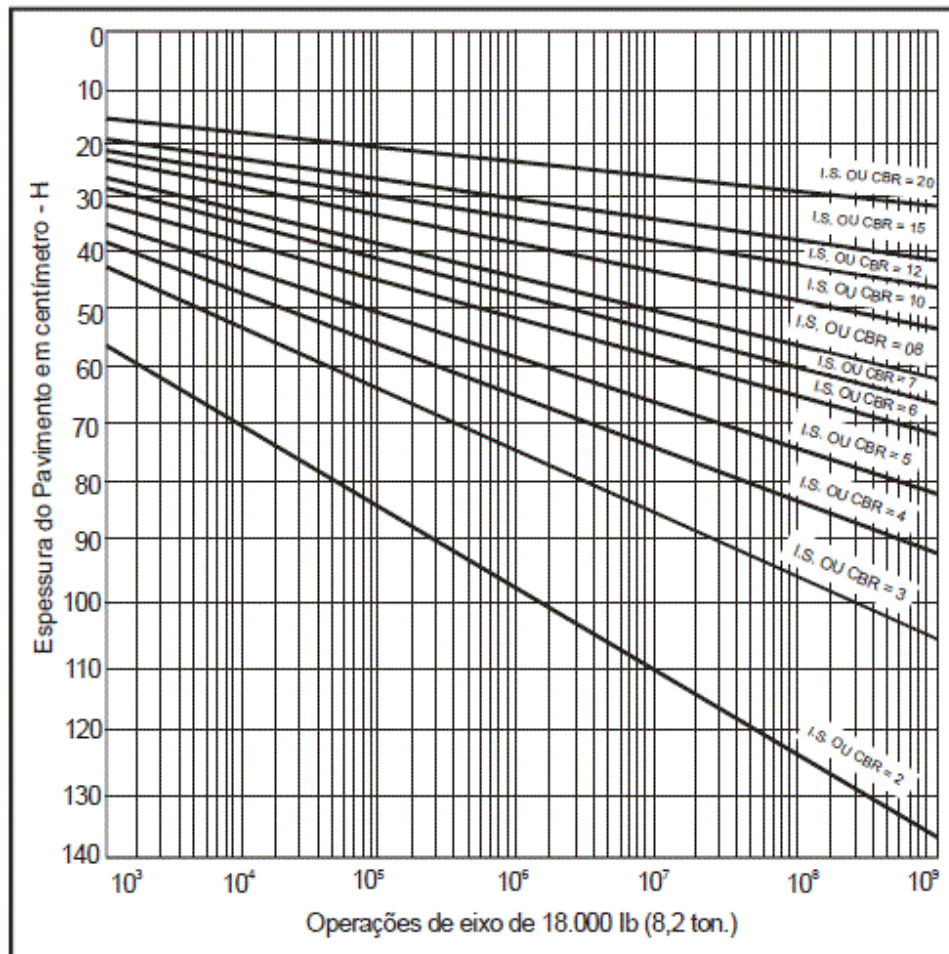
<b>Componentes do Pavimento</b>	<b>Coefficiente K</b>
Base ou revestimento de concreto asfáltico	2,00
Base ou revestimento pré-misturado a quente, de graduação densa	1,70
Base ou revestimento pré-misturado a frio, de graduação densa	1,40
Base ou revestimento asfáltico por penetração	1,20
Camadas granulares	1,00
Solo cimento com resistência à compressão a 7 dias, superior a 45 kg/cm	1,70
Idem, entre 45 kg/cm e 28 kg/cm	1,40
Idem, entre 28 kg/cm e 21 kg/cm	1,20

Fonte: DNIT (2006)

A premissa desse método é compatibilizar as tensões atuantes nas camadas inferiores e suas pressões admissíveis, por meio da consideração da capacidade de suporte do subleito, classificação dos materiais granulares, análise de tráfego, coeficiente estrutural e espessura mínima do revestimento.

Uma das críticas ao método consiste de não considerar a possibilidade de um ISC superior a 20 % para as camadas de sub-base, reforço do subleito ou subleito, pois caso haja um suporte maior do que este nestas camadas, para o dimensionamento deve ser considerado um ISC de 20 %. De acordo com Ferreira (2013), a utilização de uma metodologia mecanicista-empírica permite um melhor aproveitamento dos materiais, pois há consideração dos estados de tensões atuantes, então por meio desta análise torne-se possível representar os diferentes tipos de comportamento do material. Na Figura 1 estão apresentadas as espessuras necessárias em centímetro (cm) para a proteção da camada inferior, considerando o ISC da camada a ser protegida e o nível de tráfego atuante.

Figura 1 – Ábaco para dimensionamento de pavimentos asfálticos



Fonte: DNIT (2006)



Contudo, ao invés de usar o ábaco, pode-se utilizar a Equação (8).

$$Heq = 77,67 \times N^{0,0482} \times CBR^{-0,598} \quad \text{Eq. (8)}$$

em que,

Heq: espessura equivalente (cm);

N: número de repetições de carga;

ISC: índice de suporte califórnia (%).

Existem algumas características mínimas exigidas para cada camada de pavimentação utilizada pelo DNIT (2006), tais como:

- a) para os subleitos exige-se que tenha uma expansão máxima de 2 % e que tenha um ISC igual ou superior a 2 %. Caso possua um suporte inferior ao especificado deve haver a substituição de 1,00 m de material por um com as exigências mínimas;
- b) os reforços do subleito devem possuir um ISC superior ao do subleito e uma expansão inferior a 2 %;
- c) nas sub-bases exige-se um ISC mínimo de 20 %, uma expansão inferior a 1 % e um índice de grupo igual 0;
- d) quando o tráfego for superior ao número N de  $10^6$  deve-se utilizar na base um material com ISC igual ou superior a 80 %. Caso o tráfego seja inferior ao mencionado admite-se um ISC de 60 %. Ademais, exige-se uma expansão máxima de 0,5 %, o limite de liquidez (LL) máximo de 25 % e um índice de plasticidade (IP) máximo de 6 %. Caso o LL e o IP ultrapassem os limites estabelecidos e tenham um equivalente de areia superior a 30 %, o material pode ser utilizado.

O dimensionamento em questão possui seu modo de ruptura fundamentado no cisalhamento do subleito e nas demais camadas granulares, tendo em vista que possui como um dos principais parâmetros o valor do ISC, o qual evidencia um comportamento plástico do material. A ausência de considerações acerca da fadiga em camadas com maior rigidez e da deformação permanente no revestimento tratam-se de claras limitações do método, segundo Ferreira (2013).

A espessura das camadas de base e sub-base dimensionadas por intermédio do método em questão são superdimensionadas, ocasionando custos desnecessários. Fernandes *et. al* (2017) realizaram uma análise mecanicista-empírica averiguando a proteção da camada de

subleito contra a ruptura por cisalhamento numa estrutura dimensionada pelo método apresentado no DNIT (2006) e identificaram que estruturas com espessuras inferiores as especificadas atendiam a demanda com eficácia. Por outro lado, a inexistência de uma análise de fadiga no método de dimensionamento favorece que o revestimento sofra ruína de forma precoce, pois permite, em alguns casos, uma elevada concentração de tensões no concreto asfáltico, tendo em vista que não é realizado uma análise elástica da superestrutura.

Outrossim, acerca do dimensionamento de espessuras elevadas sem uma real necessidade, Coutinho (2011) concluiu que estas concepções podem ser menos eficientes do ponto de vista da flexibilidade-resistência e comprometer a vida útil do pavimento. Assim, o dimensionamento leva à especificação de espessura de camadas de pavimentos com propriedades elásticas generalistas, expressas por meio dos coeficientes de equivalência estrutural, os quais não retrataram a realidade dos materiais, tendo em vista que diferentes materiais granulares possuem rigidez diferentes, alterando as distribuições de esforços atuantes em todas as camadas do pavimento. Além disso, camadas muito espessas de algum material inadequado favorece para o surgimento de afundamentos permanentes.

Outra crítica realizada para o método empírico do DNER (1981) está na premissa de que os danos causados no pavimento são gerados apenas por deflexões, pois os esforços são estimados a partir do Número N, o qual é determinado baseado nas deflexões do pavimento ocasionada por um carregamento padrão, segundo Coutinho (2011). Na determinação dos esforços não há consideração alguma a respeito da estrutura a ser dimensionada. A utilização de um processo interativo relacionando os esforços atuantes e a superestrutura dimensionada geraria resultados mais próximos da realidade.

## **2.2 Dimensionamento com blocos de concreto intertravado**

O método de dimensionamento da Prefeitura Municipal de São Paulo (PMSP, 2004a) exposto na Instrução de Projetos nº 06, consiste de dois procedimentos de dimensionamento já existentes com algumas pequenas adaptações. O primeiro procedimento é oriundo do estudo técnico elaborado por Carvalho (1998). O segundo procedimento é baseado nas instruções da *Portland Cement Association*. Para cada nível de tráfego é indicada uma metodologia específica.

Para a realização do dimensionamento de pavimentos em blocos intertravados, a Instrução de Projetos nº 02 (PMSP, 2004b) admite que, caso não haja disponibilidade de dados de pesagens dos eixos dos veículos, devem ser adotadas as recomendações de DNIT (2006)

para pavimentos flexíveis, conforme supracitado. Ademais, a própria especificação expõe um quadro com as estimativas de tráfego a partir das classificações da via, a qual pode ser utilizado para o dimensionamento.

A respeito da consideração do tráfego similar ao proposto pelo DNIT (2006) para pavimentos com revestimento em concreto asfálticos usinado a quente, Cruz (2003) afirma que a maioria dos métodos de dimensionamento de pavimentos com blocos de concreto intertravados vem de adaptações dos dimensionamentos de cálculo para pavimentos flexíveis. Apesar disso, para uma representação mais fidedigna da realidade o ideal seria considerar todos os eixos e suas proporções com intuito da definição de tensões.

O conceito de fatores de equivalência está intimamente relacionado com um modo de ruptura analisado, segundo Balbo (2011). Em um pavimento asfáltico há dois tipos de ruptura preponderantes, que são as deformações plásticas excessivas e a fadiga das camadas mais rígidas, todavia o método de dimensionamento do DNIT (2006) analisa apenas a ruptura plástica. Em pavimentos com revestimento de blocos de concreto intertravados as deformações plásticas devem ser controladas por meio do dimensionamento, outrossim não há fadiga na camada de revestimento, pois devido às descontinuidades entre os blocos, as tensões de tração não se perpetuam, de acordo com Cruz (2003).

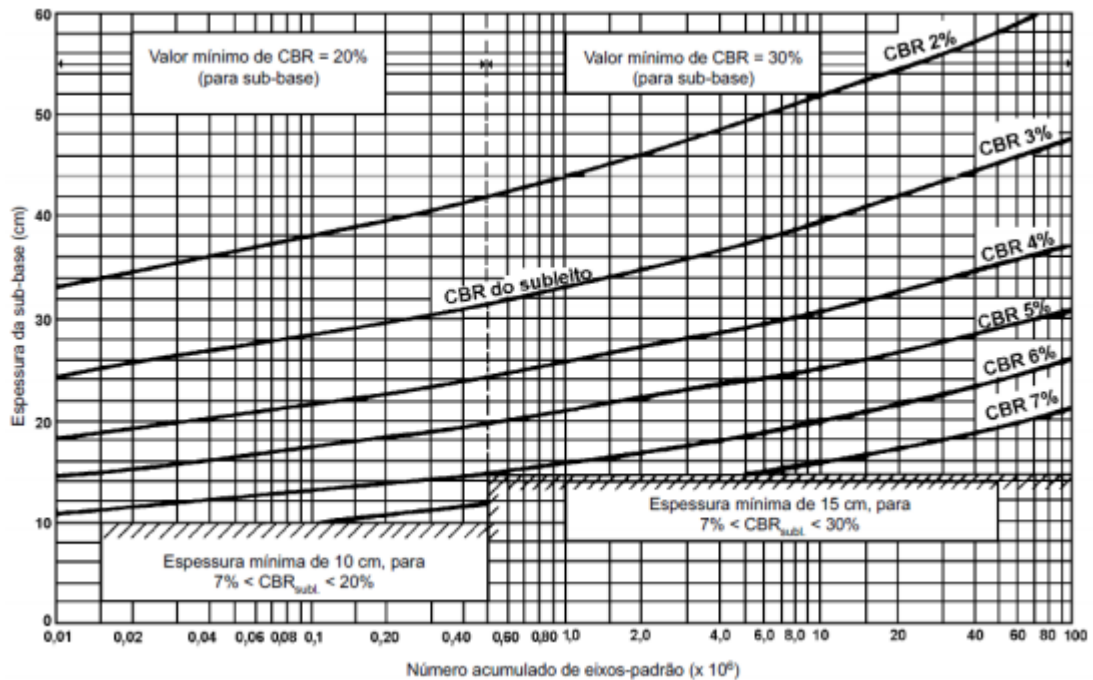
Assim, é possível identificar um certo nível de correlação entre a especificação do tráfego para pavimentos asfálticos e pavimentos com blocos de concreto. Apesar das similaridades, caso ocorra a presença de alguma camada inferior com rigidez elevada, a qual esteja sujeita à fadiga os fatores de equivalência adotados, não consideram este aspecto.

Carvalho (1998), por sua vez, desenvolveu em seu estudo fatores de equivalência especificamente para pavimentos com blocos de concreto articulados, o qual possui valores de fatores de equivalência específicos para transformação de um eixo qualquer em um eixo padrão. Em comparação com o critério adotado por PMSP (2004a), verifica-se que a consideração da metodologia da Prefeitura de São Paulo é a favor da segurança, gerando um número de repetições de eixo padrão superior a metodologia de Carvalho (1998).

O procedimento baseado na metodologia de Carvalho (1998) é o único que os ábacos de dimensionamento permitem dimensionamento para tráfego pesado, apesar de a PMSP (2004a) indicar essa metodologia para tráfego leve. O dimensionamento é fundamentado em ábacos de dimensionamento que especificam a espessura da sub-base e base. Além disso, o método define a partir do nível de tráfego qual deve ser a espessura e resistência a compressão dos blocos utilizados.

Para a camada de sub-base, a metodologia especifica dois valores distintos de ISC, dependendo do nível de tráfego previsto para a via. Se o número de repetições do eixo-padrão previsto for inferior a  $5 \times 10^5$ , o ISC mínimo é 20 %; caso o tráfego seja superior a este, o ISC mínimo da camada de sub base deve ser 30 %. A espessura da sub-base é determinada a partir do nível de tráfego e do ISC do subleito, conforme a Figura 2.

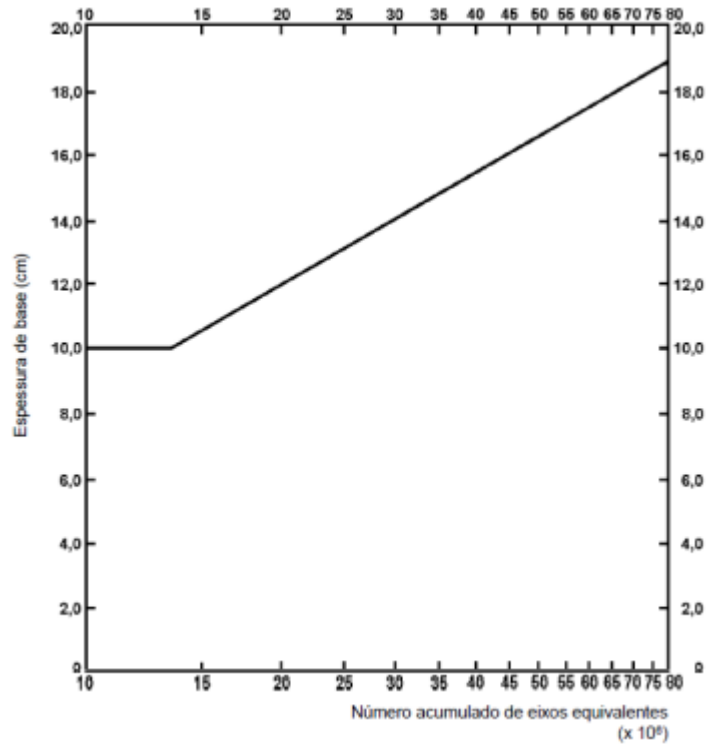
Figura 2 – Ábaco para definição da espessura de sub-base



Fonte: Carvalho (1998)

Na definição da camada de base essa metodologia exige a utilização material cimentado para níveis de tráfego com o número de repetições do eixo-padrão superior a  $1,5 \times 10^6$ . Balbo (2011) afirma que um material mais rígido possui uma capacidade de reter esforços da maneira mais eficiente do que materiais flexíveis. Entretanto, a utilização de espessuras superiores de materiais granulares alcança os mesmos efeitos de dissipação de tensões em camadas inferiores. Assim, uma limitação dessa metodologia é a não consideração da possibilidade de camadas granulares na base do pavimento. A espessura da base cimentada é estimada a partir do volume de tráfego, de acordo com Figura 3.

Figura 3 – Ábaco para definição da espessura da base



Fonte: Carvalho (1998)

O dimensionamento define a espessura e a resistência à compressão dos blocos utilizados no pavimento a partir dos níveis de tráfego, conforme a Tabela 4. Bezerra *et. al* (2020), numa análise elástica linear e com a utilização de modelos analíticos de deformação permanente, concluíram que para o controle da deformação permanente, uma das principais causas de ruína da pavimentos intertravados, a variação da espessura dos blocos possui influência. Todavia, a variação da resistência à compressão dos blocos não evidenciou efeito significativo no controle das deformações plásticas. A resistência à compressão tem uma maior correlação com a quebra das peças de concreto.

Tabela 4 – Tabela para definição da espessura da base

<b>Tráfego</b>	<b>Espessura</b>	<b>Resistência à Compressão Simples</b>
$N \leq 5 \times 10^5$	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

Fonte: Carvalho (1998)

Um aspecto importante, que não é considerado nessa metodologia de dimensionamento, é o funcionamento das juntas, as quais têm grande influência no desempenho elástico da estrutura do pavimento, de acordo com Moghadas e Shadravan (2010), baseado em

análise com o método de elementos finitos. Isso ocorre porque as juntas são responsáveis pela transmissão do esforço entre os blocos. Caso não haja uma interação adequada com os blocos adjacentes, a carga fica concentrada em uma pequena região sem ser aliviada para áreas adjacentes.

Shackel (1992) afirma que o dimensionamento deve especificar a forma dos blocos, a espessura e o padrão de seu assentamento, pois isso influi no desempenho do pavimento. Shackel e Lim (2003) citam que o padrão de assentamento mais eficiente para a transmissão de esforços entre blocos é espinha de peixe, pois favorece a transmissão das tensões entre as peças de concreto. Além disso, o formato dos blocos altera desempenho das juntas, pois blocos com maior número de faces possuem a tendência de transmitir melhor os esforços para blocos adjacentes.

A camada de assentamento também modifica o desempenho do pavimento em relação às deformações plásticas. O aumento da espessura da camada de assentamento gera maiores níveis de deformação plástica, de acordo com Shackel (1990) *apud* Silva (2016). Além disso, o excesso de finos na granulometria da camada de assentamento gera condições inadequadas de drenagem, ocasionando poropressões que geram instabilidade na camada e afetam o desempenho pavimento, segundo Silva (2016). Outrossim, a granulometria do material de rejuntamento também deve ser controlada, pois deve-se garantir que não ocorra um teor vazios elevado, fato que diminuiria o intertravamento dos blocos, conforme Silva (2016)

O método da PMSP aborda alguns pontos importantes para o desempenho do pavimento. Entretanto alguns fatores relevantes não são considerados, como o formato dos blocos, a espessura e a granulometria da camada de assentamento, o controle das juntas e o padrão de assentamento dos blocos. No Brasil, a ABNT (2011) cita esses esclarecimentos para a execução de pavimentos intertravados, os quais auxiliam na complementação do método. Contudo, neste material não se verifica qualquer consideração a respeito sobre o padrão de assentamento das peças de concreto.

### **2.3 Dimensionamento com placa de concreto simples**

O modelo de dimensionamento analisado é o proposto pela *Portland Cement Association* (PCA, 1984), a partir da análise de tensões por intermédio da utilização dos métodos de elementos finitos. Apesar da consideração do estado de tensões atuantes o método possui limitações por não considerar importantes aspectos que modificam os estados de tensões.

Balbo (2011) descreve que os critérios de ruptura são distintos entre pavimentos flexíveis e rígidos. Então, não se pode adotar o método relacionado a pavimentos asfálticos, pois as estruturas flexíveis e rígidas apresentam diferentes fatores de equivalência de carga já que possuem conceito de danos diferentes. Assim, para dimensionamento de pavimentos rígidos, o DNIT (2006) recomenda que se conheça, no período de projeto, o número de repetições de cada eixo, separados por um intervalo de carga de 1 tonelada.

O método de dimensionamento da PCA (1984) também considera a discretização dos eixos simples, tandem duplo e tandem triplo por carga. Isso ocorre devido a metodologia em questão considerar fatores de danos para fadiga e erosão dependentes do tipo de eixo e do carregamento. Para realizar o estudo de tráfego deve-se realizar inicialmente uma contagem do volume de cada tipo de eixos diário e realizar a projeção para o final da vida útil da via, com um fator de crescimento anual que pode ser definido com base em fatores sociais, econômicos entre outros, conforme a Equação 9.

$$V_n = V_0 \times (1 + a)^n \quad \text{Eq. (9)}$$

em que,

$V_n$ : volume de tráfego no ano “n”;

$V_0$ : volume de tráfego no ano base;

a: taxa de crescimento anual;

n: número de anos decorridos.

Então, para todos os eixos e seus respectivos intervalos de carga deve ser realizada a acumulação para cada ano da vida de projeto. Dessa forma, obtêm-se para o eixo simples, tandem duplo e tandem triplo, o número de repetições acumuladas para cada intervalo de carga, sendo possível a realização do dimensionamento, o qual constata o dano para cada carregamento. Nesse contexto, não se utiliza fatores de equivalência de carga, pois o dano para cada tipo de eixo é calculado especificamente para cada intervalo de carga em cada tipo de eixo.

O método de dimensionamento da PCA (1984) é representado no Brasil por Pitta (1996), em que a Associação Brasileira de Cimento Portland é responsável pela publicação. Como premissa para o dimensionamento, o método utiliza o conceito de coeficiente de recalque para representar a resposta estrutural do sistema de apoio às placas de concreto. A teoria que define essa grandeza é o modelo do líquido denso, a qual Oliveira (2000) ressalta que a resposta estrutural da fundação é similar a uma série de molas, nas quais a tensão em um ponto depende da deformação no local e não tem relação com as tensões de regiões adjacentes.

A partir do coeficiente de recalque do subleito surge o conceito de módulo de reação do subleito, o qual permite a utilização de uma sub-base granular ou cimentada para o melhoramento da capacidade de reação do subleito, considerando o subleito e a sub-base como um sistema único. Balbo (2009) cita que é imprudente essa consideração, pois uma diminuição no nível de deflexões não tem correlação direta com módulo de reação. O autor afirma que o correto seria analisar o comportamento mecânico de cada camada.

DNIT (2005) permite a utilização das correlações entre o coeficiente de recalque e o valor de ISC para o dimensionamento. Em relação a essas considerações, Balbo (2009) afirma que o ISC tem relação com a resposta plástica do solo, que não tem relação com respostas elásticas, assim as correlações são bastante empíricas, refletindo condições restritas do clima temperado, região onde foram realizadas as verificações para obtenção das correlações. Na Tabela 5 estão apresentados os valores do coeficiente de recalque considerado um certo ISC do subleito e uma espessura específica de sub-base granular.

Tabela 5 – Aumento de k em função de sub base granular

Valor de suporte do subleito		Coeficiente de recalque no topo do sistema (MPa/m), para espessuras de base iguais a (cm)			
ISC (%)	K (MPa/m)	10	15	20	30
2	16	19	22	27	33
3	24	27	31	37	45
4	30	34	38	44	54
5	34	38	42	49	59
6	38	42	46	53	65
7	41	45	50	56	69
8	44	48	53	60	72
9	47	52	56	63	76
10	49	54	58	65	79
11	51	56	60	67	81
12	53	58	62	69	84
13	54	59	63	70	85
14	56	61	65	72	87
15	57	62	66	73	88
16	59	64	68	75	91
17	60	65	69	76	92
18	61	66	70	77	93
19	62	67	71	78	94
20	63	68	72	79	96

Fonte: adaptado Pitta (1996)

De acordo com Rodrigues (2011), sempre que possível deve-se buscar a utilização de sub-bases nos pavimentos de concreto simples, pois elas auxiliam na uniformização do



suporte da fundação, impedem a ocorrência de bombeamento de finos, promovem aumento do coeficiente de recalque da fundação e reduzem os efeitos prejudiciais de solo expansivo. Outrossim, a utilização de uma camada de sub-base permite a utilização de uma espessura de placa de concreto inferior, o que é vantajoso financeiramente.

O PCA (1984) é baseado na análise por meio de elementos finitos com o programa J-SLAB. Nesse contexto, foram introduzidos importantes conceitos relacionados ao uso de barras de transferência entre as placas, acostamentos em concreto e considerado o modo de ruptura relacionado à contaminação e à erosão. O trabalho apresentado pela PCA (1984) pode ser aplicado em:

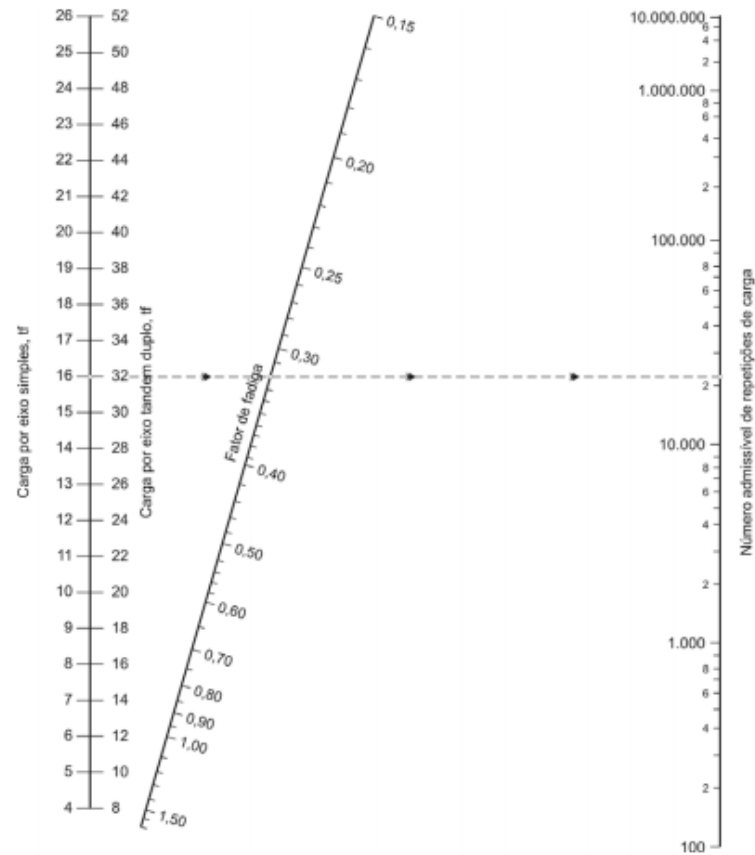
- a) pavimento de concreto simples sem barras de transferência;
- b) pavimento de concreto simples com barras de transferência;
- c) pavimentos de concreto simples sem acostamento de concreto;
- d) pavimentos de concreto simples com acostamento de concreto.

O dimensionamento considera dois modos de ruptura dos pavimentos de concreto simples, os quais são a fadiga das placas de concreto e a erosão de material, que é responsável por garantir suporte à placa de concreto. A definição da espessura da placa de concreto é dependente de que o consumo total admissível de ambos os modos de ruptura não seja superior a 100%, considerando todo o tráfego da vida de projeto. Uma das considerações do método, de acordo com o Balbo (2009), é que todo o dimensionamento é realizado para um concreto com módulo de elasticidade de 28.000 MPa, fato que limita seu campo de aplicação.

A fadiga nas placas de concreto simples pode ser compreendida como a ocorrência de microfissuras que possuem comportamento progressivo, ocasionando a ruptura do material, segundo Balbo (2009). Na verificação de fadiga é utilizada a Lei de Miner para o dano acumulado (CHIROLLI *et al*, 2019). A fadiga do material é baseada na relação entre a tensão equivalente e a resistência característica à tração na flexão (RT). Então, a partir do tipo de eixo e do carregamento deste é possível identificar quanto foi o consumo da vida de fadiga da placa de concreto simples. Na Figura 4 estão expostas as correlações gráficas em função da carga por eixo, tipo de eixo, fator de fadiga e número admissível de repetições.

A posição crítica da carga para a avaliação da fadiga das placas de concreto é tangente à borda longitudinal; na implantação do método foi considerado que 6% do tráfego total está sob esta condição (OLIVEIRA, 2000). O autor afirma que a utilização de acostamento de concreto diminui as tensões impostas nas placas de concreto para a posição crítica, e atenuam o efeito da fadiga. Todavia, conforme Balbo (2009), com o aumento da espessura da placa, a sensibilidade à presença de acostamento de concreto diminui.

Figura 4 – Ábaco para verificação da fadiga



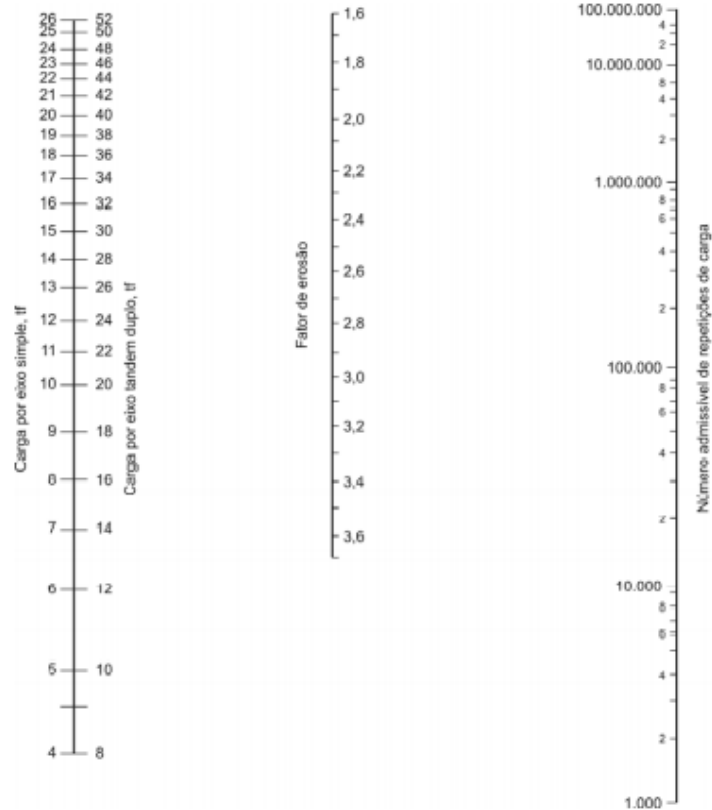
Fonte: DNIT (2005)

A erosão do material de suporte para a placa de concreto é apontada pela metodologia como um dos modos de ruptura do pavimento rígido. Chirolli *et al* (2019) afirmam que as consequências da erosão consistem na ocorrência de degraus nas juntas, bombeamento de finos e formações de vazios sobre as placas de concreto. Oliveira (2000) cita que a utilização de barras de transferência e acostamento de concreto amenizam os efeitos da erosão, e possibilitam a adoção de uma espessura inferior da placa. Então, a partir da Figura 5 torna-se possível identificar quanto foi o consumo da vida útil considerando o dano de erosão da placa a partir dos tipos de eixo, carregamento, fator de erosão, acostamento de concreto e número de repetições admissíveis.

A definição de fatores de erosão é dependente de fatores climáticos (BALBO, 2009). Dessa maneira, o autor cita que não é correto transpor as considerações do método da PCA (1984) para o Brasil, tendo em vista que o local de desenvolvimento da metodologia possui clima distinto do brasileiro. Apesar das limitações apresentadas, Oliveira (2000) indica que a análise da ruptura por erosão é necessária, uma vez que, com o aumento e modernização da

frota rodoviária, é cada vez maior a presença de solicitações por eixos tandem, os quais são os mais críticos para esse modo de ruptura.

Figura 5 – Ábaco para verificação da erosão (com acostamento)



Fonte: DNIT (2005)

Em relação à obtenção dos valores de tensão equivalente e dos fatores de erosão em tabelas específicas, Chirolli *et al* (2019) cita que há divergências em literaturas oficiais acerca dos valores, fato que traz incerteza na sua aplicação. Ademais, para obtenção do número de repetições admissíveis de carga, o método indica a utilização de fatores de segurança multiplicados pela carga para a entrada de dados nos ábacos, conforme a Tabela 6.

Tabela 6 – Fatores de segurança para as cargas

Tipo de Pavimento	FSC
Para ruas com tráfego com pequena porcentagem de caminhões e pisos em condições semelhantes de tráfego (estacionamentos, por exemplo)	1,0
Para estradas e vias com moderada frequência de caminhões	1,1
Para altos volumes de caminhões	1,2
Pavimentos que necessitam de um desempenho acima do normal	Até 1,5

Fonte: DNIT (2005)

Uma limitação do método é a não consideração do empenamento térmico das placas de concreto. Sobre o assunto, Balbo (2009) afirma que a PCA (1984) alegou que não foram realizadas tais considerações porque os dados disponíveis não eram confiáveis. A presença de gradientes térmicos induz tensões nas placas. Sobre as tensões geradas pelo empenamento térmico, Balbo (2009) declara que gradientes térmicos elevados podem elevar os valores de tensão próximo da resistência à tração, resultando em uma vida de serviço mais curta do que a prevista pelo método de fadiga proposto pela PCA (1984).

## 2.4 Verificação mecanicista-empírica

### 2.4.1 Revestimento asfáltico

A verificação de fadiga é essencial para a verificação da vida útil de pavimentos asfálticos, tendo em vista a rigidez elevada da camada. Dessa maneira, há uma tendência de a camada reter mais os esforços, possuindo um comportamento de placa, a qual ocorre uma tensão de tração na fibra inferior do revestimento que ocasiona microfissuras progressivas que podem afetar toda a espessura da camada, as quais findam na fadiga do material.

Para um revestimento em concreto asfáltico usinado à quente com CAP 50/70, o modelo adotado no trabalho é o proposto por Pinto (1991) a partir de ensaios de flexão alternada, de acordo com Balbo (2011). O modelo proposto por Pinto (1991) utilizou o ensaio de flexão alternada com deformação controlada, obtendo a partir do tratamento estatístico dos resultados a Equação 10.

$$N = 6,64 \times 10^{-7} e^{-2,93} \quad \text{Eq. (10)}$$

em que,

N: número admissível de repetições do eixo padrão

e: deformação específica de tração (m/m)

Sobre a utilização do modelo, Pinto (1991) reconhece que o ensaio de flexão alternada gera um estado de tensões uniaxial. Entretanto, o pavimento está exposto a carregamentos que geram estado de tensões triaxiais. Dessa maneira, o autor afirma que é mais coerente utilizar o conceito de invariante de tensões, o qual pode ser definido como a densidade de energia de deformação, que objetiva eliminar a dependência direcional. Apesar disso, o modelo supracitado é visto como um dos mais bens elaborados (BALBO,2011).

Por sua vez, a deformação permanente foi verificada por intermédio da utilização de modelos analíticos em função do estado de tensões e do tráfego. Cabe salientar que existem modelos mais complexos que expressam resultados mais confiáveis como o proposto por Guimarães (2009) para o comportamento plástico de solos finos e de solos pedregulhosos e o conceito de *Flow Number* para o comportamento plástico do material asfáltico. Guimarães (2009) afirma que para encontrar resultados satisfatórios com a utilização dos modelos, devem ser realizados ensaios laboratoriais rigorosos. Caso não se tenha conhecimento desses valores, não há motivos para utilização desses modelos mais complexos.

O modelo analítico desenvolvido por Cardoso e Witczak (1991) para deformação permanente de misturas asfálticas foi desenvolvido a partir de regressão múltipla baseada nos resultados de testes de carga repetida permanente em laboratório. No modelo, a deformação plástica na camada asfáltica é dependente do estado de deformações atuantes, conforme a Equação 11.

$$\varepsilon_p = 4,49 \times e \times N^{0,25} \quad \text{Eq. (11)}$$

em que,

$\varepsilon_p$ : deformação plástica específica (m/m)

$e$ : deformação elástica vertical específica (m/m)

$N$ : número admissível de repetições do eixo padrão

O trabalho desenvolvido por Motta (1991), para a definição da deformação plástica específica em britas graduadas, é dependente apenas do número de repetições previstas do eixo-padrão. A autora afirma que o modelo foi obtido por meio de ensaios, os quais permitiram a obtenção de constantes empíricas que representam os níveis de tensões compatíveis com os gerados no campo, referente ao carregamento do eixo-padrão. A formulação está na Equação 12.

$$\varepsilon_p = 0,00466 \times N^{0,0773} \quad \text{Eq. (12)}$$

em que,

$\varepsilon_p$ : deformação plástica específica (m/m)

$N$ : número admissível de repetições do eixo padrão

O modelo de Backer (1982) *apud* Balbo (2011) para determinação das deformações plásticas específicas em solos genéricos, considerando o Módulo de Resiliência do material

analisado, além do nível de tráfego previsto e o nível de deformações elásticas. Apesar de utilizar uma propriedade elástica não se pode extrapolar o modelo para qualquer tipo de solo, tendo em vista a variabilidade dos materiais do modelo. O modelo está apresentado na Equação 13.

$$\epsilon_p = 0,14 \times e \times \frac{492,15^{0,2 \times N^{0,12}}}{MR} \quad \text{Eq. (13)}$$

em que,

$\epsilon_p$ : deformação plástica específica (m/m)

N: número admissível de repetições do eixo padrão

e: deformação elástica vertical específica (m/m)

MR: módulo de resiliência do material (MPa)

Então, com a posse das deformações plásticas específicas é possível estimar a deformação permanente total por intermédio da multiplicação dos valores de deformação específica pela espessura de cada camada. A respeito disso, Motta (1991) afirma que todas as camadas contribuem para as deformações plásticas. Assim, quanto mais espessa a camada, mais acentuada é sua contribuição para deformação, desde que seja mais deformável que o subleito. Desse modo, deve-se conciliar a definição da estrutura para que proteja o subleito de ruptura por cisalhamento e, concomitantemente, não gere deformações permanentes elevadas devido a espessura.

O método de dimensionamento mecanístico-empírico de pavimentos asfálticos, que está sendo elaborado pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), estabelece como critério para o dimensionamento valores de deformação permanente admissíveis para cada classificação de via, conforme a Tabela 7. A utilização de modelos analíticos para estimar a deformação permanente não estabelece critério para o dimensionamento, sendo necessário a utilização de material complementar.

Tabela 7 – Critério de parada do dimensionamento MeDiNa

<b>Tipo de Via</b>	<b>Confiabilidade</b>	<b>Área Trincada</b>	<b>Def. Permanente</b>
Sistema Arterial Principal	95%	30%	10 mm
Sistema Arterial Primário	85%	30%	13 mm
Sistema Arterial Secundário	75%	30%	20 mm
Sistema Coletor Primário	85%	30%	13 mm
Sistema Coletor Secundário	75%	30%	20 mm
Sistema Local	65%	30%	20 mm

Fonte: Franco e Motta (2018)

#### 2.4.2 Revestimento com blocos de concreto intertravado

O pavimento intertravado possui ruptura somente por deformações permanentes excessivas quando se constitui apenas de camadas granulares (BEZERRA *et al*, 2020). Isso ocorre devido a não existência de fadiga no revestimento, pois o tamanho limitado dos blocos e existência das juntas não permite a propagação das tensões de tração na parte inferior do revestimento, a qual ocasiona a fadiga. Apesar disso, caso ocorra uma camada com rigidez elevada na estrutura do pavimento, haverá o fenômeno da fadiga neste material específico, tendo em vista que Balbo (2011) afirma que se trata de um processo relacionado a materiais com ligantes asfálticos ou hidráulico.

No Brasil, há critérios para a verificação mecanicista-empírica de pavimento com blocos intertravados desenvolvidos por Hallack (1998) *apud* Morgado (2008), nos quais são estabelecidos modelos analíticos para verificação do desempenho da estrutura. Para a utilização de concreto compactado a rolo, a metodologia estabelece a utilização do modelo desenvolvido por Trichês (1993), o qual depende do número de repetições de carga e da resistência à tração por flexão do concreto compactado a rolo para determinação da tensão máxima admissível na fibra inferior da camada, conforme a Equação 14.

$$\frac{\sigma}{f} = 0,961 - 0,060 \times \log N \quad \text{Eq. (14)}$$

em que,

$\sigma$ : tensão máxima admissível na fibra inferior da camada (kPa)

N: número admissível de repetições do eixo padrão

f: resistência à tração por flexão (kPa)

Acerca da deformação permanente, a metodologia estabelece a deformação vertical específica máxima no topo do subleito em função do número de repetições de carga. Torna-se necessário reconhecer que a deformação corresponde a uma propriedade de comportamento elástico do material. A deformação permanente é resultado de um comportamento plástico do material, todavia as respostas elásticas são responsáveis por apresentar indícios do desempenho plástico (BEZERRA *et al*, 2020). O modelo utilizado como critério para pavimentos com alguma camada com ligante hidráulico é o desenvolvido por Knapton (1992) *apud* Morgado (2008), conforme apresentado na Equação 15:

$$\varepsilon = \frac{25000}{N^{0,28}} \times 10^{-6} \quad \text{Eq. (15)}$$

em que,

$\varepsilon$ : deformação vertical específica admissível (m/m)

N: número admissível de repetições do eixo padrão

### ***2.4.3 Revestimento com placas de concreto simples***

O principal modo de ruptura de pavimentos rígidos com placas de concreto simples é a ruína por fadiga, pois devido à rigidez acentuada no revestimento, os esforços alcançam as camadas do pavimento atenuados, diminuindo a geração de deformações plásticas. O dimensionamento proposto pela PCA (1984) propõe o critério de ruína por erosão, ocasionado pelo bombeamento de finos da camada de suporte da placa. Todavia, Balbo (2009) afirma que este critério possui empirismo na sua formulação, pois é dependente das condições climáticas do local analisado. Assim, não se pode simplesmente transpor esses critérios e utilizar na realidade do Brasil.

Um critério essencial para análise da fadiga nas placas de concreto é o empenamento térmico, conforme Rodolfo e Balbo (2008). O empenamento térmico impõe tensões às placas de concreto que precisam ser consideradas no dimensionamento do pavimento. Pois, de acordo com Huang (2004), quando a temperatura na superfície da placa é superior a encontrada na parte inferior ocorre uma expansão na superfície, enquanto no fundo da placa ocorre uma contração. Essas variações são limitadas pelo peso próprio e pelo contato da placa com o seu suporte nas camadas de pavimento. Desse modo, essa restrição ocasiona



tensões da tração no fundo da placa. O autor afirma ainda que caso a temperatura na superfície da placa for inferior ao encontrado na parte inferior, as tensões de tração surgem na parte de cima da placa.

Balbo e Severi (2002) concluíram, em estudos realizados na cidade de São Paulo, que o gradiente térmico noturno é desprezível. Os autores afirmam, também, que os gradientes térmicos na placa de concreto durante o dia são dependentes da estação climática. Balbo *et al.* (2004) *apud* Balbo (2009) tiveram as mesmas conclusões realizando o estudo na cidade de Recife/PE. Então, verifica-se que, como no Brasil não há predominância de temperaturas muito baixas, gradientes térmicos negativos podem ser desconsiderados.

O método de dimensionamento proposto pela Instrução de Projetos nº 07 (PMSP, 2004c) propõe algumas simplificações para a definição dos diferenciais térmicos (DT) diurnos nas placas de concreto: (i) considera-se o DT nulo durante o período que não há insolação; (ii) o DT máximo é constante no intervalo de horário estipulado pelo documento e (iii) nos horários restantes em que há insolação deve ser realizada uma interpolação linear para obtenção dos valores de DT nas placas. Estes valores bases para a definição do diferencial térmico estão expostos na Tabela 8.

Tabela 8 – Critério para determinação do diferencial térmico

<b>Estação do Ano</b>	<b>Horário de Início de DT Positivo</b>	<b>Horário Final de DT Positivo</b>	<b>Horário de DT Máximo</b>	<b>DT Máximo</b>
Primavera	8h	18h	13 – 15 h	12,5 °C
Verão	8h	19h	13 – 15 h	11,5 °C
Outono	9h	18h	13 – 15 h	8 °C
Inverno	9h	17h	13 – 15 h	10 °C

Fonte: PMSP (2004c).

Balbo (2009) afirma que para obtenção das tensões de tração crítica considerando o empenamento térmico faz-se necessário sobrepor os horários de frequência de veículos e os valores horários de diferenciais térmicos, tendo em vista que o consumo da resistência a fadiga é peculiar para cada diferencial térmico. Nesse contexto, a PMSP (2004c) dispõe de uma distribuição de frequência do tráfego diário que pode ser utilizado quando não se tem a frequência real, conforme apresentado na Tabela 9.

Tabela 9 – Distribuição horária do tráfego

<b>Horários</b>	<b>Frequência do Tráfego Diário (%)</b>	<b>Horários</b>	<b>Frequência do Tráfego Diário (%)</b>	<b>Horários</b>	<b>Frequência do Tráfego Diário (%)</b>
0h – 1h	1,75	8h – 9h	12,00	16h – 17h	6,00
1h – 2h	1,75	9h – 10h	6,00	17h – 18h	12,00
2h – 3h	1,75	10h – 11h	1,75	18h – 19h	12,00
3h – 4h	1,75	11h – 12h	1,75	19h – 20h	6,00
4h – 5h	1,75	12h – 13h	1,75	20h – 21h	1,75
5h – 6h	1,75	13h – 14h	1,75	21h – 22h	1,75
6h – 7h	6,00	14h – 15h	1,75	22h – 23h	1,75
7h – 8h	12,00	15h – 16h	1,75	23h – 24h	1,75

Fonte: PMSP (2004c)

O método de dimensionamento proposto pela PCA (1984) não considera o efeito do empenamento térmico das placas de concreto simples; além desses outros métodos também desconsideram esse importante aspecto, como o método de dimensionamento da PMSP (2004c) para pavimentos com camadas granulares. Diante disso, Rodolfo e Balbo (2008) propuseram um modelo de análise das tensões considerando o empenamento térmico e as cargas do eixo padrão rodoviário; este modelo pode auxiliar na verificação mecanicista-empírica do dimensionamento. Um problema em relação à compatibilidade da utilização do modelo de tensões de Rodolfo e Balbo (2008) para verificação do dimensionamento pelo método da PCA (1984) é que este trata os eixos individualizados em função do tipo e da carga, enquanto aquele transforma tudo para o eixo padrão rodoviário.

Oliveira (2000) afirma que o método de dimensionamento de pavimento rígido proposto pela *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO) prevê a utilização do conceito de números de eixo equivalentes, por intermédio da transformação dos eixos individualizados com fatores de equivalência dependentes do nível de serventia final do pavimento desejado. Oliveira (2000) apresenta estes valores de fatores de equivalência convertidos para as unidades utilizadas no Brasil, as quais são tonelada-força (tf) e centímetros (cm).

O modelo para análise de tensões proposto por Rodolfo e Balbo (2008) foi obtido por intermédio de tratamento estatístico dos dados obtidos por meio de simulações com métodos de elementos finitos, utilizando o programa ILSL2. Os autores assumiram que o valor resultante das tensões nas placas é função de uma tensão inicial, a qual depende da espessura da placa e do módulo de reação equivalente do sistema de apoio, multiplicado por um fator de correção, que considera o empenamento térmico. A equação está apresentada por meio da Equação 16 e os coeficientes obtidos das correlações estão apresentados na Tabela 10.

$$\sigma = 10^{C1} \times h^{C2} \times Keq^{C3} \times [(C4 \times Keq^2 + C5 \times Keq + C6) \times \Delta T \times h^2 + (C7 \times Keq^2 + C8 \times Keq + C9) \times \Delta T \times h + (C10 \times Keq^2 + C11Keq + C12) \times \Delta T + 1] \quad \text{Eq. (16)}$$

em que,

$\sigma$ : tensão de tração na flexão na placa de concreto simples (MPa)

h: espessura da placa de concreto (cm)

$\Delta T$ : diferencial térmico (°C)

Keq: módulo de reação do sistema de apoio (MPa/m)

Ci: coeficientes

Tabela 10 – Coeficientes da regressão múltipla

<b>Coeficiente</b>	<b>Valor</b>	<b>Coeficiente</b>	<b>Valor</b>
C1	-0,384	C7	-0,0000362
C2	-1,482	C8	0,00894
C3	-0,174	C9	0,472
C4	0,000039	C10	0,00000358
C5	-0,007	C11	-0,000875
C6	-0,96	C12	-0,0166

Fonte: Rodolfo e Balbo (2008)

A incorporação do empenamento térmico na análise de tensões ocasiona um acréscimo de tensões que usualmente não são consideradas nos métodos de dimensionamento. Cervo (2004) afirma que quanto maior o nível das tensões, menor será a vida útil pela fadiga da placa de concreto simples. Desse modo, verifica-se a importância de considerar o efeito do empenamento térmico na análise da vida útil das placas de concreto. Cervo (2004) propôs um modelo para estimar o número de ciclos à fadiga dos revestimentos de concretos convencionais saturados, considerando os aspectos de tensão máxima aplicada e a resistência à tração na flexão estática com uma frequência de carregamento de 10 Hz e a tensão constante. O modelo está apresentado na Equação 17.

$$\text{Log } N = 13,408 - 12,102 \times \frac{\sigma}{f} \quad \text{Eq. (17)}$$

em que,

$\sigma$ : tensão máxima de tração na flexão na placa de concreto simples (MPa);

f: resistência à tração na flexão estática (MPa);

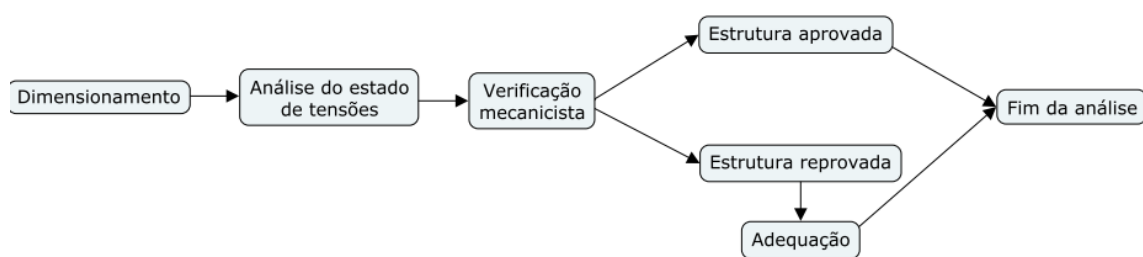
N: número de ciclos de fadiga admitidos.

A respeito da utilização de modelos de fadiga elaborados em laboratório, Balbo (2011) cita que as condições da forma do carregamento, homogeneidade do material, temperatura de serviço, conceito de ruína e frequência do carregamento são distintos das condições existentes em campo. Dessa forma, o autor incita uma cuidadosa avaliação minuciosa em qual modelo deve ser utilizado em detrimento de outros a depender de cada situação.

### 3 MÉTODO DE PESQUISA

O método utilizado no trabalho consistiu de três etapas, sendo uma para cada tipo de pavimento analisado. Realizou-se o dimensionamento da superestrutura dos pavimentos a serem estudados, o qual especificou as espessuras e os materiais de cada camada do pavimento. Então, procedeu-se para a aplicação do carregamento na estrutura dimensionada, obtendo o estado de tensões atuantes no pavimento. Foi realizada a verificação mecanicista-empírica para cada estrutura estudada, nos casos em que houve incompatibilidade entre a superestrutura e o critério mecanicista-empírico buscou-se a adequação da estrutura. O fluxograma apresentado na Figura 6 evidencia os macroprocessos utilizados.

Figura 6 – Fluxograma do método de pesquisa



Fonte: o autor (2021)

O dimensionamento foi realizado preconizando a utilização de camadas granulares, sendo utilizadas camadas com ligantes hidráulicos apenas quando exigido pelos métodos. Os métodos utilizados para o dimensionamento foram:

- a) método de dimensionamento do DNER (Souza, 1981; DNIT, 2006) para revestimento asfáltico;
- b) método de dimensionamento da PMSP (2004a) para revestimento com blocos de concreto intertravado;
- c) método de dimensionamento da PCA (1984) para revestimento com placas de concreto simples.

Com intuito de avaliar as respostas estruturais dos pavimentos foram consideradas as mesmas condições de contorno em todos os dimensionamentos. O Índice de Suporte Califórnia (ISC) do subleito adotado foi de 6 %. Além disso, foi considerado o valor de Módulo

de Resiliência (MR) do subleito igual a 72,80 MPa e o valor do coeficiente de Poisson de 0,45, sendo caracterizado como um solo que necessita da superestrutura para proteção contra a ruptura, pois possui um desempenho incapaz de não gerar deformações excessivas após cessar as solicitações.

O nível de tráfego previsto para as estruturas dimensionadas possui a contagem classificatória no ano-base apresentado na Tabela 11. O estudo de tráfego para todos os dimensionamentos foi realizado para uma projeção de 10 anos com uma taxa de crescimento anual geométrica de 2,5 %, a qual pode ser representativa de uma região já desenvolvida e altamente adensada, possuindo uma taxa de crescimento de tráfego mais atenuada. Outrossim, a ausência de dados de pesagem dos veículos comerciais que trafegam sobre a via obrigou a utilização dos valores de Peso Bruto Total (PBT) que a legislação brasileira permite.

Tabela 11 – Contagem classificatória

<b>Classificação</b>	<b>VMD</b>
2C	214
3C	222
4C	217
2S1	175
2S2	173
2S3	47
3S2	187
3S3	55
2C2	1
3C2	123

Fonte: o autor (2021)

A realização da verificação do estado de tensões atuantes no pavimento foi feita por intermédio do *software* ELSYM5, o qual utiliza como premissa as propriedades elásticas dos materiais, a espessura das camadas dos pavimentos e as características do carregamento padrão. Na análise foi realizada a simplificação de considerar o Módulo de Resiliência constante. Os pontos de interesse estudados foram no topo de cada camada e na fibra inferior das camadas que sofrem ruína por fadiga, pois as tensões de tração surgem nessa região, fazendo com que os esforços de tração se propaguem a partir da parte inferior das camadas que possuem o comportamento de placa.

A partir do conhecimento do estado de tensões atuantes em cada camada foi realizada a verificação mecanicista-empírica, baseada em critérios analíticos. Então, verificou-se a compatibilidade das estruturas dimensionadas com os critérios estabelecidos na verificação mecanicista-empírica. Quando foi identificado inconformidade entre os métodos, houve a

tentativa de adequação da superestrutura para suportar o nível de tráfego solicitante em projeto, baseado na verificação mecanicista-empírica.

As projeções de tráfego foram feitas de acordo com exigências de cada método de dimensionamento. Em todos os casos foram realizadas as projeções anualmente até a atingir a vida de serviço do pavimento, tendo em vista que, caso após a verificação mecanicista-empírica a superestrutura dimensionada não suporte toda a vida de serviço, seja possível identificar em qual período o pavimento sofreria ruína.

Desse modo, para analisar interação carga e pavimento atuante em cada superestrutura foram definidos alguns critérios para uma avaliação comparativa, os quais são relevantes em todos os dimensionamentos, como a deflexão no topo do revestimento, a deflexão no topo do subleito e a tensão normal vertical no topo do subleito. Ademais, em cada superestrutura houve uma análise de como as tensões se distribuem nas camadas do pavimento, com intuito de constatar como os materiais utilizados interagem entre si e impactam o comportamento global do pavimento.

Com o fito de constatar a compatibilidade do estado de tensões atuantes em cada superestrutura com o nível de tráfego projetado foram utilizados critérios mecanicistas-empíricos analíticos, os quais definem os valores admissíveis dessas premissas. Então, evidenciou-se em quais pavimentos ocorreram discrepâncias entre a estrutura dimensionada e a verificação mecanicista-empírica. Para uma análise mais profunda das diferenças entre os métodos, foi identificado em qual período a estrutura viria a ruptura, segundo critério mecanicista-empírico, e comparado com a vida útil prevista nos dimensionamentos.

Quando ocorreu insuficiência da superestrutura dimensionada em atingir sua vida útil foram realizadas alterações nas camadas do pavimento, com propósito de o pavimento suportar toda a vida de serviço. Nos casos em que ocorreram ruína por fadiga em alguma camada, a alteração na superestrutura ocorreu apenas na camada específica que colapsou, sendo utilizado os mesmos materiais do dimensionamento na correção, alterando apenas a geometria da camada para aliviar o estado de tensões atuantes.

### **3.1 Pavimento asfáltico**

De posse dos valores médios diários no ano base de cada tipo de veículo que trafega sobre a via obtêm-se a quantidade de eixos simples de rodagem simples, eixos simples de rodagem dupla, eixos tandem duplos e eixos tandem triplos. Então, procedeu-se a realização da

projeção de tráfego considerando as premissas do método de dimensionamento utilizado, transformando todos os carregamentos no eixo padrão de 8,2tf.

Realizou-se o dimensionamento utilizando o método do DNER (Souza, 1981; DNIT, 2006), o qual estipula os materiais utilizados e a espessura das camadas do pavimento a partir do Número N e na capacidade de suporte da camada a ser protegida. No revestimento foi utilizado Concreto Asfáltico Usinado a Quente (CAUQ), devido ao nível de tráfego de projeto e foi definido material granular para as camadas de base e sub-base.

O método de dimensionamento utilizado especifica apenas a utilização de CAUQ, permitindo ao projetista definir o tipo de Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) e a faixa granulométrica utilizada. Então, optou-se por utilizar o CAP 50/70, pois o CAUQ com esse material, apesar de possuir um MR inferior ao que se utiliza CAP 30/45, apresenta uma relação entre o MR e a resistência à tração superior. Fato que, para mesmas espessuras de material, auxilia na vida de fadiga do material.

Em relação à deformação permanente, a solução adotada possui um desempenho inferior a um CAUQ feito com CAP 30/45, tendo em vista o CAP utilizado é menos viscoso. Todavia, é possível controlar a deformação permanente com a utilização de uma granulometria adequada, a qual garanta um intertravamento do esqueleto pétreo do CAUQ.

O material utilizado na base foi Brita Graduada Simples (BGS), pois apesar de ser um material granular, apresenta propriedades elásticas que permitem reter os esforços provenientes do revestimento na camada sem ocasionar deformações excessivas após cessadas as solicitações. Na camada de sub-base utilizou-se solo estabilizado granulometricamente, pois é um material menos nobre que o BGS, todavia suporta as solicitações atuantes sem ocorrer deformações plásticas excessivas.

A definição da estrutura permite a realização da análise do estado de tensões atuantes no pavimento, como o método preconiza a transformação de todos os esforços sobre a superestrutura em um único carregamento padrão, então a avaliação do estado de tensões partirá da mesma premissa, a qual foi avaliado o estado de tensões gerado pela passagem do eixo padrão de 8,2tf. A verificação mecanicista-empírica para pavimentos com revestimentos asfálticos foi realizada para dois critérios de ruína. Para a fadiga do revestimento, foi utilizado o modelo desenvolvido por Pinto (1991) para Concreto Betuminoso Usinado à Quente (CBUQ), o qual a partir do valor de deformação específica de tração na fibra inferior do revestimento ocasionado pelo carregamento padrão estima-se o número de repetições admissíveis até a ruína pela fadiga.



A respeito das deformações permanentes a análise foi feita com a utilização do modelo de Cardoso e Witzak (1987) que determina a deformação plástica específica na camada asfáltica. Ademais, o modelo utilizado para o material da base foi o proposto por Motta (1991) para BGS que estima a deformação plástica específica com a utilização apenas do número de repetições do eixo padrão. Outrossim, nas demais camadas granulares foi utilizado o modelo proposto por Backer (1982) *apud* Balbo (2011) para solos genéricos.

O critério mecanicista-empírico adotado para o limite das deformações permanentes foi o proposto por Franco e Motta (2018), nos quais os limites de deformação são dependentes do tipo de via a ser projetada. No trabalho em questão, como foi adotado um volume de tráfego bastante elevado, admitiu-se que a via se trata de um sistema arterial principal.

### **3.2 Pavimento com blocos intertravados**

A análise de tráfego feita para o dimensionamento do pavimento com blocos intertravados é similar a avaliação realizada para pavimentos asfálticos. O método utilizado para a realização do dimensionamento é preconizado pela PMSP (2004a). São apresentadas pela PMSP (2004a) duas metodologias de dimensionamento. Neste trabalho foi utilizado o método baseado nas considerações Carvalho (1998), pois é o único que possui em seus ábacos o nível de tráfego muito pesado. A definição da superestrutura, nesse caso, possui uma peculiaridade, pois o método restringe materiais cimentados para a utilização na base.

Como o dimensionamento está sendo realizado para um nível de tráfego elevado, superior a  $5 \times 10^5$  repetições do eixo padrão, o método indica a utilização de um ISC mínimo de 30% para a camada de sub-base. Na camada de base, o método estipula apenas a utilização de material cimentado, o qual tem sua espessura definida baseado no Número N.

O bloco utilizado para realização do dimensionamento foi o com espessura de 10 cm e resistência à compressão de 50 MPa, pois possui características mais adequadas para tráfego pesado. Ademais, foi considerado uma camada de assentamento para os blocos com areia média grossa numa espessura de 5 cm para conformação dos blocos, conforme ABNT (2011).

Na camada de base, como foi exigida a adoção de uma camada com ligante hidráulico, foi definido o Concreto Compactado com Rolo (CCR), o qual deve possuir um MR de 19.422,81 MPa e uma resistência à tração na flexão ( $f_{ct}$ ) de 2,00 MPa. O método utilizado para o dimensionamento permite definir as propriedades elásticas dos materiais, então esses

foram utilizados devido ao nível de tráfego elevado. A camada de sub-base foi definida com solo estabilizado granulometricamente com um MR de 133,86 MPa.

O valor do MR adotado na camada dos blocos intertravados foi o proposto por Bezerra *et al.* (2020), considerando a condição de um rejuntamento adequado entre as peças. Ademais, na realização da modelagem para verificar o estado de tensões, a camada de assentamento e blocos de concreto foram considerados como duas camadas distintas, cada uma com sua geometria e propriedades elásticas. O material utilizado na camada de assentamento na modelagem foi considerado conforme momento do assentamento dos blocos de concreto sob ela.

A verificação mecanicista-empírica para o pavimento intertravado dimensionado consiste de duas avaliações, sendo a primeira referente a fadiga da camada de base, a qual possui maior rigidez e a segunda verificação referente a ruptura do subleito por ruptura plástica. Os modelos de verificação mecanicista-empírica utilizados são os propostos por Hallack (1998) *apud* Morgado (2008), os quais são modelos analíticos com as premissas dos estados de tensões do pavimento e os dados de projeção de tráfego.

O modelo utilizado para a camada de base é o proposto por Trichês (2003) para camadas de concreto compactado a rolo que define a tensão máxima admissível a partir do Número N e da resistência à tração por flexão. Outrossim, a verificação da ruptura do subleito ocorreu por intermédio do modelo de Knapton (1992) *apud* Morgado (2008) para pavimentos intertravados com a presença de camada com ligante hidráulico, o qual determina a deformação vertical admissível no topo do subleito por meio de um modelo analítico que depende do Número N.

### **3.3 Pavimento com placas de concreto**

O estudo de tráfego realizado para o dimensionamento da PCA (1984) para pavimentos com placas de concreto simples, considerando as particularidades do método, sem a necessidade de transformar as diversas cargas em um carregamento padrão foi o adotado para esta etapa. A premissa para dimensionamento é o número de repetições de um eixo qualquer com um dado carregamento e o coeficiente de recalque do sistema de apoio da placa. Além disso, outra premissa adotada no dimensionamento foi o fator de segurança para as cargas, o qual foi adotado o valor de 1,2, sendo o indicado para vias com elevada frequência de caminhões.

Então, definiu-se o coeficiente de recalque do sistema de apoio, considerando uma espessura de 20 cm de sub-base granular, devido ao baixo valor do ISC do subleito e o tráfego muito pesado. Salienta-se que a concepção do pavimento foi feita com a utilização de barras de transferências e acostamento de concreto, com intuito de utilizar espessuras de placas de concreto inferiores.

No método de dimensionamento não há qualquer consideração sobre as propriedades elásticas ou plásticas do material utilizado na sub-base, então neste trabalho adotou-se um material com um ISC de 60%, devido ao nível de tráfego e baixo valor do coeficiente de recalque do sistema de apoio. A espessura da placa de concreto utilizada depende também da resistência do concreto à tração na flexão, o qual foi admitido o concreto com valor de 5,0 MPa. Então, foi buscada a concepção que utilizasse um concreto com menor resistência a tração na flexão e menor espessura de placa possível e, concomitantemente, suportasse o nível de tráfego de projeto.

O método de dimensionamento possui como premissa que a placa de concreto possui um módulo de elasticidade de 28.000 MPa, enquanto o módulo de resiliência do material da sub-base foi definido no projeto com 224,38 MPa e coeficiente de Poisson 0,40. Para a realização do estudo dos estados de tensões atuantes precisou-se transformar os diversos carregamentos adotados no dimensionamento em uma carga padrão por meio de fatores de equivalência de carga.

Os fatores de equivalência considerados são os propostos pelas AASHTO (1986) para pavimentos rígidos com um nível de serventia final do pavimento de 2,5, similar ao nível de serventia final considerado para pavimentos asfálticos. Na análise de tensões atuantes nesse pavimento foram avaliados dois cenários, avaliando-se as distribuições de tensões causadas por um carregamento padrão de 8,2 tf com a utilização do *software* ELSYM5 e as tensões atuantes na placa de concreto, considerando, além do carregamento, o empenamento térmico das placas por meio do modelo analítico de Rodolfo e Balbo (2008).

A análise mecanicista-empírica atuou apenas na avaliação da fadiga das placas de concreto simples, já que os esforços alcançam o subleito atenuados pela presença das placas de concreto não se realizou verificação de ruptura plástica. Para a verificação de fadiga necessitou a compatibilização da incidência de carregamentos em cada diferencial térmico atuante durante o dia, avaliando a frequência que o tráfego atua em cada horário durante o dia e variação dos diferenciais térmicos durante o ano por meio das indicações da PMSP (2004c).

Por fim, foi utilizado o modelo proposto por Cervo (2004) para análise do número de repetições admissíveis nas placas de concreto simples em análise de fadiga para concretos

convencionais saturados. Nesse contexto, foi realizada uma análise discretizada do consumo da vida de fadiga para cada conjunto de tensões atuantes nas placas, considerando o diferencial térmico horário que cada frequência de tráfego atua e a variação dos diferenciais térmicos nas estações do ano. Assim, possibilitando identificar em qual período da vida de serviço estrutura sofrerá ruína segundo esse critério.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo foram realizadas avaliações baseadas nos resultados obtidos pelas simulações. Foram realizadas análises a respeito dos estudos de tráfego, dos resultados dos dimensionamentos, da distribuição de tensões em cada superestrutura e da verificação mecanicista-empírica. Buscou-se identificar as peculiaridades de cada tipo de pavimento e correlacionar com os resultados evidenciados.

### 4.1 Tráfego

O estudo de tráfego foi realizado para cada um dos anos de serviço do pavimento com intuito de evidenciar em qual período pode ocorrer a ruína da superestrutura, caso o pavimento venha a ruir. A respeito das cargas atuantes em cada eixo, foi adotada a máxima carga legal, por não haver conhecimento dos valores disponibilizados por uma balança rodoviária, essa medida possui o intuito de ser a favor da segurança, no entanto é usual a utilização das cargas fora da legislação.

A estimativa de tráfego para o pavimento com revestimento em CBUQ e em blocos de concreto intertravados é a mesma, segundo os métodos de dimensionamento adotados, apesar de tratar-se de uma simplificação, pois cada método de dimensionamento possui seu modo de ruína e os fatores de equivalência possuem relações diretas com essa ruptura. No caso, o dimensionamento de pavimento com revestimento em intertravado aproveitou a metodologia proposta para pavimentos asfálticos.

Essa medida mostrou-se a favor da segurança já que os fatores de equivalência de carga utilizando o método do pavimento intertravados são inferiores aos adotados. Apesar disso, em um dimensionamento o ideal é a representação mais próxima da situação real, portanto a condição mais adequada é a utilização do modelo que melhor represente a realidade. Na Tabela 12 estão apresentados os valores do número N encontrados para cada ano de serviço da superestrutura.

Tabela 12 – Número N para cada ano de serviço do pavimento

<b>Ano</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>
<b>Número N</b>	5,42E+06	1,10E+07	1,67E+07	2,25E+07	2,85E+07
<b>Ano</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>
<b>Número N</b>	3,46E+07	4,09E+07	4,74E+07	5,40E+07	6,07E+07

Fonte: o autor (2021)

Diferente dos outros métodos de dimensionamento, para o pavimento com placas de concreto considera-se cada eixo individualmente, sem a transformação dos carregamentos em um eixo padrão. O próprio dimensionamento relaciona o carregamento com o consumo da vida de fadiga e de erosão, considerando as especificidades de cada. Na Tabela 13 estão apresentados os carregamentos encontrados para cada ano.

Tabela 13 – Carregamentos anuais para o pavimento com placas de concreto

Projeção				Projeção			
Ano	Classe	Carga (tf)	Freq. Proj.	Ano	Classe	Carga (tf)	Freq. Proj.
<b>1</b>	Simple	6	5,29E+05	<b>6</b>	Simple	6	5,99E+05
	Simple	10	3,86E+05		Simple	10	4,37E+05
	Tandem Duplo	17	3,54E+05		Tandem Duplo	17	4,01E+05
	Tandem Triplo	25,5	1,19E+05		Tandem Triplo	25,5	1,35E+05
<b>2</b>	Simple	6	5,42E+05	<b>7</b>	Simple	6	6,13E+05
	Simple	10	3,96E+05		Simple	10	4,48E+05
	Tandem Duplo	17	3,63E+05		Tandem Duplo	17	4,11E+05
	Tandem Triplo	25,5	1,22E+05		Tandem Triplo	25,5	1,38E+05
<b>3</b>	Simple	6	5,56E+05	<b>8</b>	Simple	6	6,29E+05
	Simple	10	4,06E+05		Simple	10	4,59E+05
	Tandem Duplo	17	3,72E+05		Tandem Duplo	17	4,21E+05
	Tandem Triplo	25,5	1,25E+05		Tandem Triplo	25,5	1,42E+05
<b>4</b>	Simple	6	5,70E+05	<b>9</b>	Simple	6	6,45E+05
	Simple	10	4,16E+05		Simple	10	4,71E+05
	Tandem Duplo	17	3,82E+05		Tandem Duplo	17	4,32E+05
	Tandem Triplo	25,5	1,29E+05		Tandem Triplo	25,5	1,45E+05
<b>5</b>	Simple	6	5,84E+05	<b>10</b>	Simple	6	6,61E+05
	Simple	10	4,27E+05		Simple	10	4,83E+05
	Tandem Duplo	17	3,91E+05		Tandem Duplo	17	4,42E+05
	Tandem Triplo	25,5	1,32E+05		Tandem Triplo	25,5	1,49E+05

Fonte: o autor (2021)

Apesar do dimensionamento do pavimento com placas de concreto considerar os eixos individualmente, os modelos utilizados para realização da verificação mecanicista-empírica utilizam o conceito de eixo padrão, sendo necessário realizar a conversão com

parâmetros desse tipo de pavimento. Ademais, a transformação dos diversos carregamentos em um único eixo padrão possui como limitação desconsiderar as propriedades dos materiais constituintes das camadas inferiores dos pavimentos e a sua geometria, aspectos que, segundo Balbo (2011), influenciam nos fatores de equivalência de carga.

## 4.2 Superestrutura

### 4.2.1 Revestimento asfáltico

A superestrutura definida para o pavimento com revestimento asfáltico possui uma camada de base e uma de sub-base com dois materiais granulares distintos, apesar do método de dimensionamento utilizado não evidenciar diferença entre os materiais devido às suas propriedades elásticas. A adoção de materiais com Módulo de Resiliência (MR) superiores nas camadas do pavimento permitem uma maior rigidez, conseqüentemente uma maior capacidade de reter tensões sobre si, aliviando os esforços nas camadas inferiores. A estrutura dimensionada para o nível de tráfego do projeto analisado neste trabalho está apresentada na Tabela 14.

Tabela 14 – Estrutura para o pavimento com revestimento asfáltico

Camada	Material	Espessura (cm)	ISC (%)	MR (MPa)	C. Poisson
1	Concreto Asfáltico Usinado a Quente	12,50	-	4250,00	0,32
2	Brita Graduada Simples	15,00	80	300,00	0,35
3	Solo Estabilizado	25,00	20	118,21	0,40
4	Subleito	-	6	72,80	0,45

Fonte: o autor (2021)

A vida de fadiga do revestimento asfáltico é dependente da resistência de tração na flexão também, pois não adianta, apenas, a camada possuir um elevado MR, o qual auxilia na retenção de tensões, e não apresentar capacidade de suportar esses carregamentos. Para auxiliar na vida de fadiga do revestimento, pode-se aumentar a espessura da camada que alivia os esforços de tração na fibra inferior ou adotar um CAUQ com menor relação entre MR e resistência a tração na flexão. Como o método de dimensionamento utilizado determina a

espessura, definiu-se neste trabalho a utilização do Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) 50/70 com um esqueleto pétreo adequado, os quais buscam uma menor relação entre o MR e a resistência a tração na flexão.

A camada de base, composta por BGS, possui um MR de 300 MPa, valor alto para um material granular que se justifica devido tratar-se de um pavimento flexível e o elevado nível de tráfego de projeto. Como o subleito possui um ISC de 6%, necessita-se que as camadas do pavimento garantam que os carregamentos cheguem atenuados para proteção contra ruptura plástica. Durante a vida de serviço do pavimento, o revestimento sofre microfissuras, as quais diminuem a capacidade de reter os esforços sobre si, assim as camadas inferiores receberão um carregamento superior do que o previsto inicialmente, fato que revela importância de as camadas possuírem propriedades elásticas que suportem tal situação.

Dessa forma, na camada de sub-base foi definida uma espessura superior a camada de base. De acordo com o método de dimensionamento, a camada de base e revestimento são dimensionados para proteção da ruptura plástica na sub-base, enquanto a espessura da sub-base é dimensionada para proteger o subleito contra a ruptura plástica, considerando a existência da base e revestimento.

Assim, como o subleito possui um baixo índice de suporte, a camada de sub-base possuiu uma espessura maior para proteção da camada, por mais que o material tenha um MR de 118,21 MPa, a espessura de 25 cm auxilia na dissipação de tensões, as quais alcançam a sub-base atenuados. Nesse contexto, recomenda-se a utilização de um material com propriedades elásticas superiores na camada de base, pois, do ponto de vista financeiro, torna-se menos oneroso utilizar um material mais caro numa espessura inferior, ademais os esforços alcancem a camada de base mais concentrados, fato que justifica utilização de materiais diferentes.

#### ***4.2.2 Revestimento intertravado***

O dimensionamento da superestrutura com blocos intertravados resultou na camada de base com ligante hidráulico e na camada de sub-base com material granular. No revestimento foi previsto a utilização de blocos retangulares, pois o modelo utilizado para estimativa do MR atende apenas esse tipo de bloco. Assim, trata-se de uma limitação da análise, pois os blocos de 16 faces alcançam maiores valores de MR. A estrutura dimensionada para as condições de contorno de projeto está apresentada na Tabela 15.



Tabela 15 – Estrutura do pavimento com revestimento em blocos intertravados

<b>Camada</b>	<b>Material</b>	<b>Espessura (cm)</b>	<b>ISC (%)</b>	<b>MR (MPa)</b>	<b>C. Poisson</b>
<b>1</b>	Bloco	10	-	2049,72	0,15
<b>2</b>	Camada Assentamento	5	-	93,19	0,30
<b>3</b>	Concreto Compactado com Rolo	18	-	19.422,81	0,17
<b>4</b>	Solo Estabilizado	24	30	133,86	0,40
<b>5</b>	Subleito	-	6	72,80	0,45

Fonte: o autor (2021).

O revestimento é constituído por blocos intertravados e por uma camada de assentamento para as peças. Todavia, na definição da superestrutura foram considerados como duas camadas distintas, pois possuem propriedades elásticas diferentes e o modelo utilizado para estimar o MR da camada de blocos intertravados não considera a camada de assentamento. A utilização dos blocos com espessura de 10 cm é indicada, pois, permite que as tensões alcancem as camadas do pavimento inferiores mais atenuadas em relação a bloco com espessuras inferiores, devido a sua geometria.

A definição de blocos com resistência à compressão de 50 MPa geram uma camada com MR superior à uma camada com blocos com uma menor resistência à compressão, consequentemente possui uma maior capacidade de reter os esforços sobre si. Além disso, com uma maior espessura e com uma maior resistência à compressão, os blocos possuem uma maior vida útil, pois, devido a geometria, os esforços que atuam na fibra inferiores de cada peça são atenuados e a resistência à compressão superior incorre em peças de concreto mais rígidas.

A camada de assentamento deve possuir uma granulometria de acordo com as especificações da ABNT (2011), pois o controle de finos faz-se necessário, visto que essas partículas ficam em suspensão na presença de água, causando instabilidade e más condições de drenagem. Além disso, a granulometria utilizada deve permitir que o material penetre nas juntas dos blocos para auxiliar o material de rejuntamento na transmissão dos esforços entre os blocos. A espessura da camada de assentamento deve ser a definida em projeto, pois espessuras superiores favorecem o surgimento de deformações permanentes e valores inferiores não conseguem regularizar e distribuir os esforços adequadamente, facilitando a ruptura dos blocos.

O material utilizado na camada de base foi Concreto Compactado a Rolo (CCR), com um MR de 19.422,81 MPa que incita o efeito de placa, gerando tensões de tração na base. Devido a isso, foi especificado que o CCR possua uma resistência à tração na flexão de 2,00

MPa, tendo em vista que aumentar apenas a rigidez da camada não proporciona ganhos significativos, pois sem uma resistência adequada a camada perderá suas propriedades elásticas de forma prematura. A superestrutura dimensionada trata-se de um pavimento rígido devido à rigidez da camada de base.

Assim, os esforços que alcançam a camada de sub-base são bem menores. Apesar disso, exige-se uma sub-base com ISC mínimo de 30% sem especificar o MR da camada. Então, no dimensionamento foi definido material com MR de 133,86 MPa, tendo em vista que a camada possuirá uma espessura de 24 cm e necessita resistir aos esforços atuantes protegendo o subleito e não sofrendo deformações permanentes excessivas. O material utilizado foi solo estabilizado, pois trata-se de um material de fácil acesso e atende aos requisitos estruturais requeridos.

#### 4.2.3 Revestimento em placas de concreto simples (PCS)

A definição da superestrutura em pavimento com revestimento em placas de concreto consistiu na determinação do revestimento e de uma sub-base para a proteção do subleito contra a ruptura plástica. O método estipula, para a placa de concreto, o MR de 28.000 MPa e não impõe qualquer propriedade elástica ou plástica no material utilizado na sub-base, o qual no trabalho em questão optou-se pela utilização de material granular. A superestrutura dimensionada está apresentada na Tabela 16.

Tabela 16 – Pavimento dimensionado para revestimento em placas de concreto simples

<b>Camada</b>	<b>Material</b>	<b>Espessura (cm)</b>	<b>ISC (%)</b>	<b>MR (MPa)</b>	<b>C. Poisson</b>
<b>1</b>	PCS	18		28.000	0,15
<b>2</b>	Solo Estabilizado	20	60	224,38	0,40
<b>3</b>	Subleito		6	72,80	0,45

Fonte: o autor (2021).

A espessura da Placa de Concreto Simples (PCS) foi definida a partir do consumo de fadiga e erosão. Neste trabalho, o fator limitante para o dimensionamento foi consumo da vida de fadiga, tendo em vista que a composição do tráfego possui apenas 8,59% de eixos tandem triplos, os quais são os mais críticos para o consumo da vida de serviço por erosão. Como o nível de tráfego é elevado e há um baixo suporte do subleito, foi definida a utilização de material granular na sub-base e o revestimento de concreto com uma resistência a tração na

flexão de 5,00 MPa, pois permite a utilização de espessuras de PCS mais esbeltas e auxilia na vida de fadiga do material.

O material granular utilizado foi solo estabilizado com um ISC de 60%, pois a aplicação da PCS diretamente do subleito implicaria na utilização de espessuras maiores de concreto e, também, caso a granulometria do subleito tenha presença de finos poderia induzir ao bombeamento de finos nas juntas das placas, que acarretaria na ruptura plástica. Então, optou-se por uma camada intermediária com material granular que seja possível ter um controle sobre a granulometria, sobre as propriedades plásticas e sobre as características elásticas, assim a utilização da camada ainda auxilia na dissipação das tensões residuais da placa de concreto que alcançam o subleito.

### **4.3 Estado de tensões**

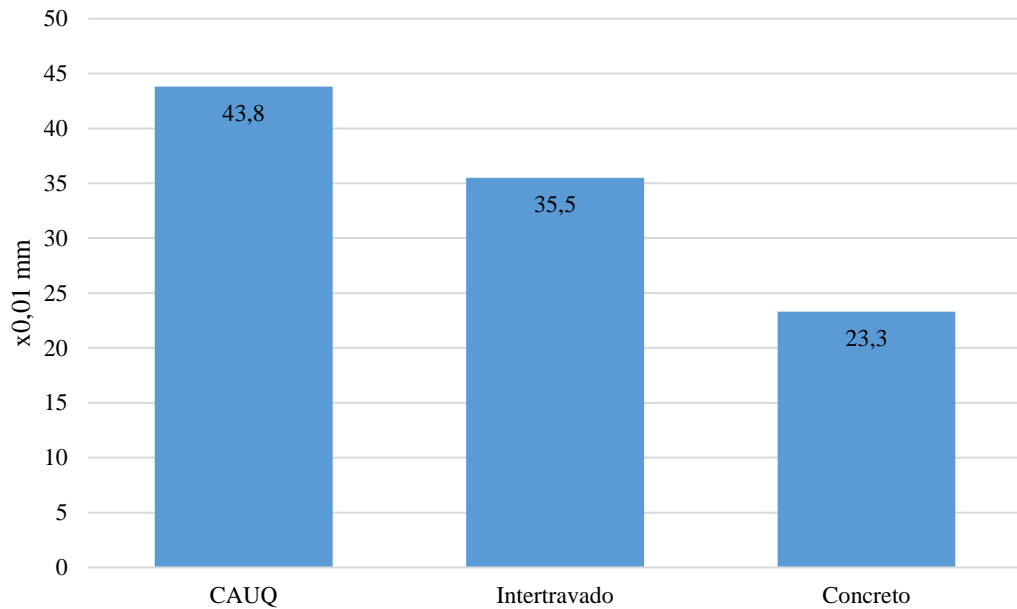
Os materiais utilizados em cada um dos dimensionamentos possuem propriedades elásticas distintas. Assim sendo, as respostas da estrutura para o mesmo carregamento também são distintas. Como uma forma de avaliar o comportamento de cada estrutura, definiu-se parâmetros que são representativos em todas as superestruturas para verificar a distribuição dos esforços, os quais foram a deflexão do pavimento no topo do revestimento, a deflexão no topo do subleito e a tensão normal vertical atuante no topo do subleito. O carregamento utilizado para análise foi o eixo padrão.

O valor da deflexão no topo do revestimento representa o desempenho de toda a estrutura, pois além de considerar as deflexões provenientes do subleito avalia-se as decorrentes das camadas do pavimento, sendo possível identificar estruturas mais flexíveis ou rígidas. O Figura 7 apresenta os valores de deflexão no topo da superestrutura de cada pavimento.

A estrutura que apresentou menor valor deflexão no topo do revestimento foi a com utilização de placas de concreto no revestimento, pois o material possui um valor de MR elevado, assim necessita de uma grande quantidade de energia para gerar deformações. A superestrutura que apresentou maiores valores de deflexões foi a com utilização de revestimento asfáltico, pois nessa superestrutura a única camada que apresenta o efeito de placa é o CAUQ, o qual possui um MR bem inferior de materiais como concreto e CCR, que foram utilizados nos demais pavimentos. O pavimento com revestimento em blocos intertravados apresenta um valor intermediário das deflexões nos três tipos de pavimentos, pois apresenta duas camadas com rigidez elevada que são o revestimento em blocos intertravados e camada de base em CCR, mas que não são suficientes para equivaler a um pavimento com revestimento em placas de

concreto, pois o valor do MR do CCR corresponde a 69,37% do valor definido para as placas de concreto.

Figura 7 – Deflexão total no topo da superestrutura para cada tipo de revestimento

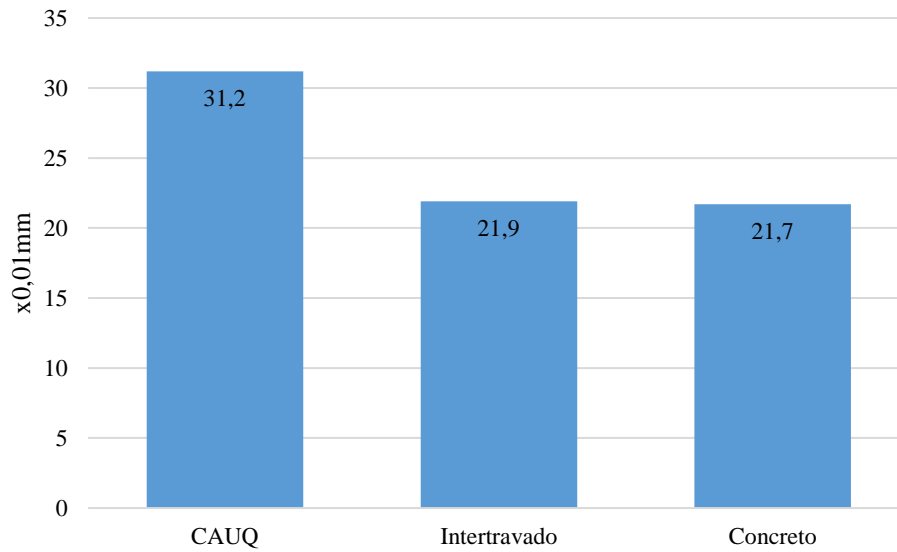


Fonte: o autor (2021)

A análise da deflexão no topo do subleito e das tensões normais verticais atuantes nesse ponto são de extrema importância, pois evidenciam a capacidade da estrutura dimensionada em reter os esforços sobre si e proteger o subleito. É interessante analisar que a deflexão total do pavimento não possui relação direta com as cargas atuantes no subleito, porque uma superestrutura que seja mais flexível pode reter os esforços sobre si de maneira que se deforme mais do que um material rígido, obtendo a mesma capacidade de proteção do subleito. Os Figuras 8 e 9 estão apresentando os valores de deflexão no topo do subleito e tensão no topo do subleito, respectivamente.

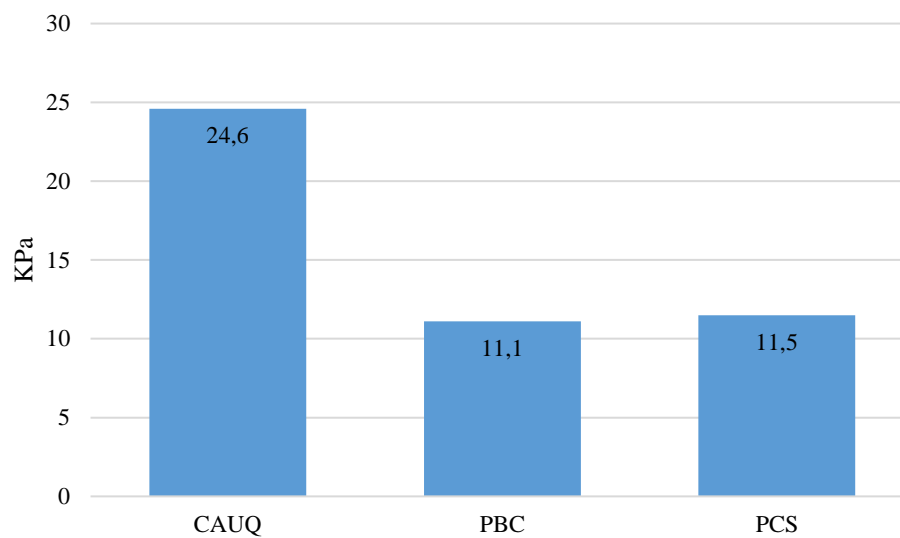
Observa-se que as tensões atuantes no topo do subleito no pavimento com revestimento asfáltico possuem maiores valores e também as maiores deflexões, pois possui camadas com menores capacidades de reter os esforços sobre si e não detém de uma espessura equivalente suficiente para as tensões alcançarem o subleito com valores similares aos outros pavimentos. Isso não necessariamente implica em ruína do pavimento, tendo em vista que os níveis de tensão que atuam sobre o subleito são superiores. No entanto, o subleito pode suportar esses esforços sem ocorrer ruptura plástica.

Figura 8 – Deflexão no topo do subleito para cada pavimento



Fonte: o autor (2021)

Figura 9 – Tensão no topo do subleito para cada pavimento



Fonte: o autor (2021)

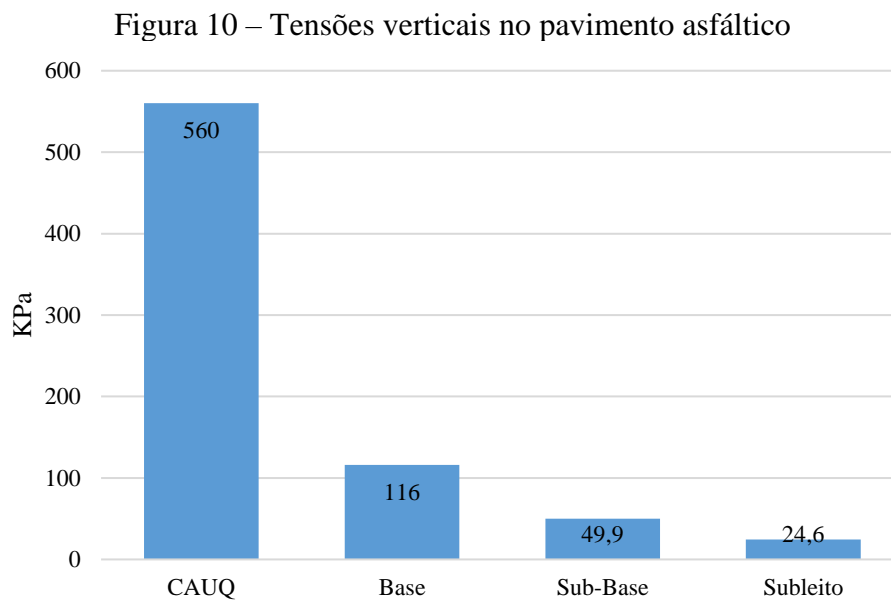
Os valores de tensão normal vertical e deflexão no topo do subleito são similares, pois apesar da deflexão total do pavimento com blocos intertravados ser superior ao pavimento com placas de concreto, as camadas das duas estruturas possuem uma espessura equivalente semelhante. A presença da camada de revestimento com blocos intertravados com MR de 2049,72 MPa, aliada à camada de base utilizando CCR com MR de 19.422,81 MPa, consegue produzir um efeito semelhante ao das placas de concreto com MR de 28.000 MPa, tendo em vista que as camadas granulares utilizadas têm como principal função auxiliar na distribuição

das tensões, já que possuem capacidade bastante inferior de reter os esforços em relação as camadas mais rígidas.

Então, a superestrutura que possui menores valores de MR possuem maior deformação específica para uma mesma quantidade de energia armazenada, justificando os valores encontrados. O pavimento intertravado ainda possui a peculiaridade da camada de assentamento que é bastante flexível e permite um certo grau de movimentação para acomodação dos blocos.

#### 4.3.1 Pavimento asfáltico: análise de tensões

A distribuição de tensões no pavimento asfáltico consiste na retenção em um revestimento mais rígido, o qual é responsável por reter grande parte dos esforços e uma camada de base e sub-base com material granular, contudo, que não possui capacidade elevada de reter os esforços sobre si, apesar de possuir excelentes propriedades elásticas para um material granular. As tensões verticais que alcançam as camadas do pavimento e o subleito estão evidenciadas no Figura 10.



Fonte: o autor (2021).

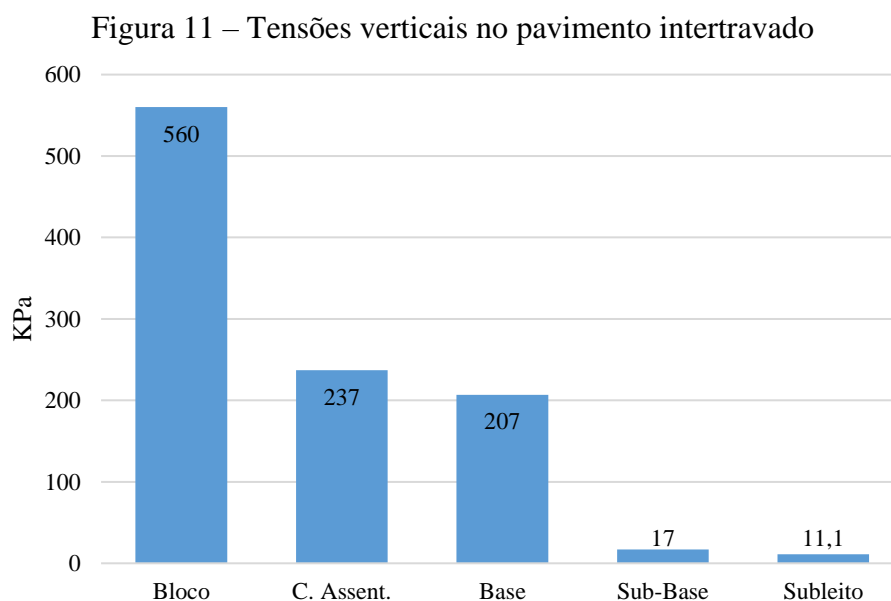
Como os esforços são aplicados diretamente sobre o revestimento e essa camada possui uma rigidez superior as demais camadas, ela é responsável por reter 79,29% das tensões verticais que atuarão sobre o pavimento. Dessa forma, verifica-se a importância de que esta

camada tenha uma condição de rigidez adequada para o funcionamento do pavimento. Todavia, a ocorrência de fadiga durante a vida de serviço compromete o seu desempenho, fato que leva o pavimento a ruína.

A camada de base com BGS é responsável por reter 11,80% das tensões verticais que atuarão sobre o pavimento, enquanto a camada de sub-base retém 4,52% das tensões verticais atuantes. Apesar de a camada de sub-base possuir uma espessura superior à camada de base, isso não é suficiente para compensar a diferença de rigidez entre as camadas. Então, apenas 4,39% das tensões verticais que atuam sobre o pavimento com um carregamento padrão atingem o subleito, assim mesmo com um pavimento flexível consegue-se reter a maior parte dos esforços sobre a superestrutura protegendo o subleito contra a ruptura plástica.

#### 4.3.2 Pavimento intertravado: análise de tensões

A superestrutura definida neste trabalho possui duas camadas com rigidez acentuadas: o revestimento em blocos de concreto e a base em CCR. Então, a distribuição de esforços concentra-se nessas duas camadas, havendo ainda uma camada de sub-base em solo estabilizado para auxiliar na dissipação dos esforços. Apesar de a camada de base possuir um MR superior ao revestimento, a camada que retém a maior parte dos esforços provenientes do tráfego é o revestimento, pois o tráfego atua diretamente sobre ele. As tensões verticais que atuam sobre o topo das camadas do pavimento e do subleito estão apresentadas no Figura 11.



Fonte: o autor (2021).

O revestimento é constituído pelos blocos de concreto e a camada de assentamento, os quais conseguem reter 63,04% das tensões verticais que atingem o pavimento para o carregamento padrão. Torna-se interessante avaliar que a capacidade de reter sobre si os esforços atuantes é inferior ao revestimento asfáltico, justificando a utilização de uma camada inferior com maior rigidez para proteção do pavimento contra a ruptura.

A camada de base recebe os esforços já atenuados pelo revestimento utilizado. No entanto, ainda retém 33,93% dos esforços totais atuantes sobre a superestrutura, isso ocorre devido ao MR elevado e a espessura definida, os quais garantem rigidez elevada para a camada. A tensão vertical que atua sobre a sub-base já está inferior as tensões verticais que atuam sobre o subleito do pavimento asfáltico, devido a isso a camada consegue reter apenas 1,05% das tensões verticais que atuam sobre o pavimento, apesar de possuir um MR de 133,86 MPa e uma espessura de 24 cm.

Então, alcança o subleito 1,98% das tensões verticais que atuam sobre o pavimento por meio do carregamento padrão, considerando que a superestrutura do pavimento está em condições adequadas de uso. Durante a operação do pavimento, a camada com ligante hidráulico pode vir a sofrer com a fadiga do material, prejudicando suas propriedades elásticas. Com o tráfego, no revestimento, ocorre a fuga do material utilizado no rejuntamento, assim caso não ocorra manutenção no momento oportuno a capacidade de transmitir esforços entre os blocos fica bastante prejudicada, afetando a rigidez da camada.

#### ***4.3.3 Pavimento com placas de concreto: análise de tensões***

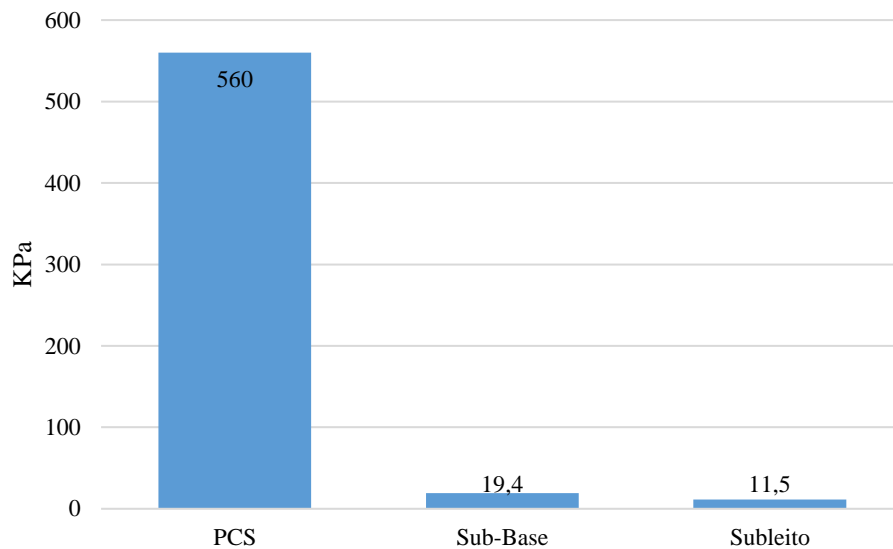
Os esforços no pavimento com placas de concreto simples concentram-se no revestimento, pois trata-se da camada em contato direto com o tráfego e com elevada rigidez, devido a sua espessura e o MR. A camada de sub-base possui uma maior responsabilidade em garantir adequada condição de suporte para as placas de concreto do que reter os esforços sobre si. As tensões verticais no topo das camadas do pavimento e do subleito estão apresentadas no Figura 12.

As placas de concreto conseguem reter 96,54% das tensões verticais atuantes no pavimento proveniente de um carregamento padrão. Dessa forma, percebe-se que apenas as placas de concreto possuem desempenho elástico similar a toda superestrutura dos pavimentos asfálticos e intertravados. Esse fato reforça a importância de que o revestimento possua condições elásticas adequadas durante toda sua vida de serviço, pois, caso ocorra a fadiga e o



material perca rigidez, as camadas inferiores receberão uma carga superior à prevista em projeto, a qual pode levar o pavimento à ruína.

Figura 12 – Tensões verticais no pavimento com placas de concreto



Fonte: o autor (2021).

Salienta-se que, na análise elástica, não foi considerado o efeito dos diferenciais térmicos nas placas, os quais geram o empenamento das placas de concreto implicando acréscimo de tensões. Então, em campo os valores da distribuição de tensões serão diferentes dos valores encontrados nessa análise. Todavia, desenvolveu-se este estudo para realizar a comparação com as demais superestruturas.

A camada de sub-base consegue reter sobre si apenas 1,41% das tensões verticais que atuam sobre o pavimento, apesar de a camada possuir uma espessura de 20 cm e um MR de 224,38 MPa, a elevada rigidez do revestimento não permite que a sub-base retenha uma maior quantidade de esforços. Alcançam o subleito 2,05% das tensões verticais que atuam sobre o pavimento para o carregamento padrão, valor similar ao encontrado no pavimento intertravado, devido à rigidez das placas de concreto e do CCR.

#### 4.4 Verificação mecanicista-empírica do pavimento asfáltico

O pavimento com revestimento em CAUQ e com as camadas inferiores apenas com materiais granulares possui como os principais modos de ruína a fadiga do revestimento e a ruptura plástica do subleito, considerando que a superestrutura foi executada corretamente. A

verificação mecanicista-empírica da fadiga do revestimento asfáltico faz-se necessário pela rigidez da camada, a qual ocasiona o comportamento de placa que gera tensões de tração na fibra inferior, enquanto a ruptura plástica do solo do subleito ocorre devido às cargas provenientes do tráfego serem superiores as cargas que o subleito e as camadas inferiores podem suportar.

O modelo do Pinto (1991) para a verificação mecanicista-empírica depende da deformação específica de tração na fibra inferior do revestimento, a qual foi encontrado o valor de  $1,74 \times 10^{-4}$  m/m no estudo de tensões da superestrutura. O valor da deformação específica de tração na fibra inferior depende da rigidez da camada. Nesse caso, como o CAUQ está no rolamento e é a camada mais rígida da superestrutura, ocorre uma maior concentração de tensões sobre ela, gerando maiores deformações específicas de tração na fibra inferior.

De acordo com o modelo de Pinto (1991), o revestimento suporta  $6,88 \times 10^4$  repetições do eixo padrão até sofrer a ruína. A projeção de tráfego prevê  $6,07 \times 10^7$  repetições de eixo padrão durante a vida de serviço. Então, o pavimento sofrerá ruína antes de atingir sua vida útil. A situação do dimensionamento é crítica, pois antes mesmo da estrutura completar um ano de funcionamento o revestimento sofrerá ruína por fadiga, que tem como consequência sobrecarga sobre toda a superestrutura.

Uma alternativa para melhorar a durabilidade do revestimento seria a utilização de um material com melhor resistência à tração na flexão do que o material estudado por Pinto (1991), o qual utilizou CAP 50/70 no CAUQ. Outra solução que poderia permitir a utilização do mesmo material seria o aumento da espessura do revestimento que induz a diminuição da deformação específica de tração na flexão na fibra inferior do revestimento.

A deformação permanente no pavimento foi modelada a partir de três modelos distintos para estimar a deformação plástica específica. O revestimento asfáltico foi analisado a partir do modelo proposto por Cardoso e Witczak (1991), que dependem da deformação elástica vertical específica e do número de repetições do eixo padrão. Foi encontrada uma deformação vertical específica de  $1,05 \times 10^{-4}$  m/m e com  $6,07 \times 10^7$  repetições do eixo padrão obteve-se com o modelo supracitado uma deformação plástica vertical específica de  $4,16 \times 10^{-2}$  m/m.

O estudo realizado na camada de base, a qual o material constituinte é BGS, utilizou o modelo de Motta (1991) que encontrou a deformação plástica vertical específica de  $1,82 \times 10^{-2}$  m/m. Na determinação do comportamento plástico da sub-base e do subleito foi usado o modelo de Backer *apud* Balbo (2011), assim foi encontrado o valor de deformação plástica vertical específica de  $6,98 \times 10^{-4}$  m/m e  $1,20 \times 10^{-3}$  m/m para as camadas de sub-base e subleito,

respectivamente. Salienta-se que os valores de deformação elástica vertical específica obtidos a partir do estudo de tensões para a sub-base foi  $4,30 \times 10^{-4}$  m/m e para o subleito foi  $3,21 \times 10^{-4}$ .

Dessa forma, o critério estabelecido neste trabalho foi o preconizado pelo novo Método de Dimensionamento Nacional (MeDiNa) para deformação permanente, o qual estabelece para vias do sistema arterial principal o valor máximo admissível de deformação permanente de 10,0 mm. Após a análise plástica obteve-se o valor de deformação plástica para o pavimento dimensionado de 8,41 mm, de tal forma que a superestrutura dimensionada não apresentou ruína pelo critério estabelecido para deformação permanente.

Portanto, a superestrutura especificada pelo método de dimensionamento do DNER (1981) consegue proteger as camadas inferiores contra a ruptura plástica, tendo em vista a aceitação do desempenho da estrutura para esse modo de ruína no trabalho. Todavia, percebe-se, pelos resultados obtidos na análise de fadiga, que o revestimento sofre a ruína por fadiga de maneira precoce, fato que prejudica o desempenho de todo o pavimento, porque a camada de revestimento que sofre ruína por fadiga perde sua capacidade de reter os esforços sobre si, consequentemente sobrecarregando as camadas inferiores.

A adequação da superestrutura para suportar o tráfego previsto em projeto sem sofrer fadiga do revestimento é crítica, tendo em vista que pelo modelo utilizado a deformação específica de tração na fibra inferior do revestimento deve ser no máximo  $1,7 \times 10^{-5}$  m/m. Todavia, aumentando a espessura da camada de revestimento asfáltico com as mesmas propriedades elásticas para 25 cm, encontra-se ainda uma deformação específica de tração na fibra inferior do revestimento de  $7,89 \times 10^{-5}$  m/m. Dessa forma, evidencia-se que para um nível de tráfego tão elevado, a proteção do revestimento asfáltico deve conter medidas que aumentem a rigidez das camadas inferiores e aliviem a concentração no revestimento, como a adoção de uma camada de base com ligante hidráulico.

Outra análise pertinente, trata-se de que os modelos de fadiga são conservadores, pois, de acordo com Balbo (2011), a frequência da aplicação de carga influencia no fenômeno de autorreparação. Assim, em laboratório, com ensaios de frequência contínua, não há tempo hábil para esse fenômeno, diferentemente do que ocorre quando o pavimento está exposto ao tráfego.

#### 4.5 Verificação mecanicista-empírica do pavimento intertravado

O pavimento intertravado com uma camada de base com a presença de ligante hidráulico pode apresentar ruína por meio de rupturas plásticas, causando deformações permanentes excessivas e ruína por meio da fadiga da camada de base, que possui estrutura monolítica. Como o material utilizado na camada de base desse pavimento foi CCR, optou-se pela utilização do modelo de Trichês (2003), enquanto a ruptura plástica foi verificada no topo do subleito por intermédio do estudo do Knapton (1992) *apud* Morgado (2008).

Na verificação de fadiga da camada de base foi encontrado, para a tensão admissível de tração na fibra inferior do material analisado, o valor limítrofe de 987,98 kPa, com o nível de tráfego previsto e com 2,00 MPa de resistência à tração na flexão. No estudo de tensões realizado, o valor observado de tensão de tração na fibra inferior do CCR foi de 846,00 kPa, ou seja, a superestrutura dimensionada não sofrerá ruína por fadiga durante a vida de serviço. Isso comprova a eficiência da utilização de duas camadas de rigidez mais elevadas, pois o revestimento de blocos intertravados consegue garantir que os esforços alcancem o CCR mais atenuados, garantindo um desempenho elástico da base adequado em toda a vida de serviço, sem ocorrência da ruína do material.

A deformação admissível vertical específica no topo do subleito, obtida com base no número de repetições do eixo-padrão, foi de  $1,65 \times 10^{-4}$ , enquanto no estudo de esforços atuantes para o carregamento padrão foi encontrado o valor de  $1,18 \times 10^{-4}$ . Dessa forma, fica evidente a importância da utilização de uma camada inferior ao revestimento com uma grande capacidade de atenuação de cargas. Esse foi um dos objetivos alcançados neste trabalho, pela utilização de uma camada com ligante hidráulico, pois o revestimento alivia as tensões suficientemente para que o CCR não sofra fadiga. No entanto, quando ocorre de o subleito ser pobre em propriedades elásticas e ter-se previsto um elevado nível de tráfego, a utilização única do revestimento como camada rígida para reter sobre si os esforços pode ocasionar a ruína precoce do pavimento por rupturas plásticas.

A superestrutura dimensionada possuiu êxito na verificação mecanicista-empírica realizada com os modelos preconizados. Apesar da dependência da superestrutura como um todo, para sua eficácia, pode-se substituir os materiais utilizados nas camadas do pavimento por outros com piores características elásticas, conquanto aumente-se a espessura da camada, pois a perda de MR pode ser compensada pela geometria. Salienta-se que nessa análise deve haver bastante atenção para que o aumento da espessura de alguma camada não implique em deformações plásticas excessivas.

#### 4.6 Verificação mecanicista-empírica do pavimento com placas de concreto

Em decorrência da elevada rigidez do revestimento, esse tipo de pavimento possui como principal modo de ruína a fadiga do revestimento, a qual diminui a sua capacidade de reter as tensões sobre si e, assim, acarreta a ruptura plásticas das camadas granulares inferiores. O modelo utilizado para representar a vida de fadiga das placas de concreto simples foi o proposto por Cervo (2004), o qual utiliza o conceito de eixo-padrão equivalente.

Dessa forma, utilizou-se os fatores de equivalência da AASHTO (1986) convertidos para unidades do sistema internacional por Oliveira (2000) para transformar todos os tipos de eixo que trafegam sobre a via no padrão considerando um nível de serventia final para o pavimento de 2,5, sendo similar ao considerado para os pavimentos flexíveis. Na Tabela 17 estão apresentados os valores encontrados para o número de repetições do eixo-padrão para cada ano de serviço do pavimento.

Tabela 17 – Número N para cada ano de serviço do pavimento de placas de concreto

Ano	Eixo Equivalente (N)	Ano	Eixo Equivalente (N)
1	$4,46 \times 10^6$	6	$5,04 \times 10^6$
2	$4,57 \times 10^6$	7	$5,17 \times 10^6$
3	$4,68 \times 10^6$	8	$5,30 \times 10^6$
4	$4,80 \times 10^6$	9	$5,43 \times 10^6$
5	$4,92 \times 10^6$	10	$5,56 \times 10^6$

Fonte: o autor (2021).

Como o diferencial térmico influencia diretamente nas tensões atuantes sobre as placas de concreto, faz-se necessário segmentar o tráfego em cada estação do ano. Assim, foi adotado que o tráfego anual se divide igualmente na primavera, verão, outono e inverno. Dessa forma, obtém-se o número de repetições do eixo-padrão em cada estação do ano durante toda a vida de serviço de  $1,39 \times 10^6$ .

A partir dos valores de repetições do número N em cada estação, aplica-se os diferenciais térmicos e distribuição de frequência diária propostos pela PMSP (2004c). Então, procede-se para utilização do modelo de Rodolfo e Balbo (2008), o qual permite estimar as tensões de tração atuantes nas placas de concreto considerando os efeitos dos diferenciais térmicos. Nesse contexto, estima-se a tensão de tração em cada horário para cada estação, conforme Tabela 18.

Tabela 18 – Tensão de tração por horário em cada estação do ano

Horário	Primavera		Verão		Outono		Inverno	
	DT	$\sigma$ (Mpa)	DT	$\sigma$ (Mpa)	DT	$\sigma$ (Mpa)	DT	$\sigma$ (Mpa)
0 - 1	0,00	2,63	0,00	2,63	0,00	2,63	0,00	2,63
1 - 2	0,00	2,63	0,00	2,63	0,00	2,63	0,00	2,63
2 - 3	0,00	2,63	0,00	2,63	0,00	2,63	0,00	2,63
3 - 4	0,00	2,63	0,00	2,63	0,00	2,63	0,00	2,63
4 - 5	0,00	2,63	0,00	2,63	0,00	2,63	0,00	2,63
5 - 6	0,00	2,63	0,00	2,63	0,00	2,63	0,00	2,63
6 - 7	0,00	2,63	0,00	2,63	0,00	2,63	0,00	2,63
7 - 8	0,00	2,63	0,00	2,63	0,00	2,63	0,00	2,63
8 - 9	2,08	2,95	1,92	2,93	0,00	2,63	0,00	2,63
9 - 10	4,17	3,28	3,83	3,23	1,60	2,88	2,00	2,94
10 - 11	6,25	3,60	5,75	3,53	3,20	3,13	4,00	3,25
11 - 12	8,33	3,93	7,67	3,83	4,80	3,38	6,00	3,57
12 - 13	10,42	4,26	9,58	4,13	6,40	3,63	8,00	3,88
13 - 14	12,50	4,58	11,50	4,43	8,00	3,88	10,00	4,19
14 - 15	12,50	4,58	11,50	4,43	8,00	3,88	10,00	4,19
15 - 16	9,38	4,09	9,20	4,07	6,00	3,57	6,67	3,67
16 - 17	6,25	3,60	6,90	3,71	4,00	3,25	3,33	3,15
17 - 18	3,13	3,12	4,60	3,35	2,00	2,94	0,00	2,63
18 - 19	0,00	2,63	2,30	2,99	0,00	2,63	0,00	2,63
19 - 20	0,00	2,63	0,00	2,63	0,00	2,63	0,00	2,63
20 - 21	0,00	2,63	0,00	2,63	0,00	2,63	0,00	2,63
21 - 22	0,00	2,63	0,00	2,63	0,00	2,63	0,00	2,63
22 - 23	0,00	2,63	0,00	2,63	0,00	2,63	0,00	2,63
23 - 00	0,00	2,63	0,00	2,63	0,00	2,63	0,00	2,63

Fonte: o autor (2021).

Analisando as tensões obtidas em cada estação do ano observa-se que ocorrem maiores tensões de tração na fibra inferior durante a primavera e o verão, tendo em vista que são períodos com maiores incidências solares durante o ano, gerando maiores diferenciais térmicos. Ademais, verifica-se a diferença entre as tensões de tração nas placas em uma mesma estação pela variação horária, tendo em vista a relevância da incidência solar durante o dia. De acordo com os dados, chega-se a apresentar um desvio padrão amostral de 0,69, que é bastante relevante para a análise.

Em decorrência do método da PCA (1984) desprezar o efeito dos diferenciais térmicos, utilizou-se o modelo sugerido por Cervo (2004) para estimar o número de repetições admissíveis do eixo-padrão em horário diário de cada estação. Estão apresentados na Tabela 19 os valores obtidos pelo modelo de fadiga ( $N_f$ ) e os encontrados a partir do estudo de tráfego ( $N_p$ ).

Tabela 19 – Estimação do número de repetições admissíveis

Horário	Primavera		Verão		Outono		Inverno	
	Nf	Np	Nf	Np	Nf	Np	Nf	Np
0 - 1	4,39E+12	2,43E+04	1,11E+07	2,43E+04	4,39E+12	2,43E+04	4,39E+12	2,43E+04
1 - 2	1,11E+07	2,43E+04	1,11E+07	2,43E+04	4,39E+12	2,43E+04	4,39E+12	2,43E+04
2 - 3	1,11E+07	2,43E+04	1,11E+07	2,43E+04	4,39E+12	2,43E+04	4,39E+12	2,43E+04
3 - 4	1,11E+07	2,43E+04	1,11E+07	2,43E+04	4,39E+12	2,43E+04	4,39E+12	2,43E+04
4 - 5	1,11E+07	2,43E+04	1,11E+07	2,43E+04	4,39E+12	2,43E+04	4,39E+12	2,43E+04
5 - 6	1,11E+07	2,43E+04	1,11E+07	2,43E+04	4,39E+12	2,43E+04	4,39E+12	2,43E+04
6 - 7	1,11E+07	8,35E+04	1,11E+07	8,35E+04	4,39E+12	8,35E+04	4,39E+12	8,35E+04
7 - 8	1,11E+07	1,67E+05	1,11E+07	1,67E+05	4,39E+12	1,67E+05	4,39E+12	1,67E+05
8 - 9	1,81E+06	1,67E+05	2,10E+06	1,67E+05	4,39E+12	1,67E+05	4,39E+12	1,67E+05
9 - 10	2,96E+05	8,35E+04	3,95E+05	8,35E+04	2,43E+11	8,35E+04	1,18E+11	8,35E+04
10 - 11	4,82E+04	2,43E+04	7,45E+04	2,43E+04	1,34E+10	2,43E+04	3,16E+09	2,43E+04
11 - 12	7,85E+03	2,43E+04	1,40E+04	2,43E+04	7,43E+08	2,43E+04	8,48E+07	2,43E+04
12 - 13	1,28E+03	2,43E+04	2,64E+03	2,43E+04	4,11E+07	2,43E+04	2,27E+06	2,43E+04
13 - 14	2,09E+02	2,43E+04	4,98E+02	2,43E+04	2,27E+06	2,43E+04	6,10E+04	2,43E+04
14 - 15	2,09E+02	2,43E+04	4,98E+02	2,43E+04	2,27E+06	2,43E+04	6,10E+04	2,43E+04
15 - 16	3,17E+03	2,43E+04	3,69E+03	2,43E+04	8,48E+07	2,43E+04	2,54E+07	2,43E+04
16 - 17	4,82E+04	8,35E+04	2,74E+04	8,35E+04	3,16E+09	8,35E+04	1,06E+10	8,35E+04
17 - 18	7,33E+05	1,67E+05	2,03E+05	1,67E+05	1,18E+11	1,67E+05	4,39E+12	1,67E+05
18 - 19	1,11E+07	1,67E+05	1,50E+06	1,67E+05	4,39E+12	1,67E+05	4,39E+12	1,67E+05
19 - 20	1,11E+07	8,35E+04	1,11E+07	8,35E+04	4,39E+12	8,35E+04	4,39E+12	8,35E+04
20 - 21	1,11E+07	2,43E+04	1,11E+07	2,43E+04	4,39E+12	2,43E+04	4,39E+12	2,43E+04
21 - 22	1,11E+07	2,43E+04	1,11E+07	2,43E+04	4,39E+12	2,43E+04	4,39E+12	2,43E+04
22 - 23	1,11E+07	2,43E+04	1,11E+07	2,43E+04	4,39E+12	2,43E+04	4,39E+12	2,43E+04
23 - 00	1,11E+07	2,43E+04	1,11E+07	2,43E+04	4,39E+12	2,43E+04	4,39E+12	2,43E+04

Fonte: o autor (2021).

Durante a operação, a análise evidenciou que a vida de fadiga é consumida em 38.683%, fato que evidencia que o pavimento sofrerá a ruína precocemente por fadiga das placas de concreto. Mesmo realizando a projeção para o primeiro ano de serviço do pavimento, ocorre a ruína por fadiga com um consumo da vida de fadiga de 30.974%.

Evidencia-se a importância de considerar o efeito do empenamento térmico nas tensões de trações nas placas de concreto, tendo em vista a grande diferença encontrada. Salienta-se que o consumo da vida de fadiga nas estações de inverno e outono juntas são responsáveis apenas por 83% de consumo, enquanto todo o restante é consumido no verão e primavera, quando há maiores diferenciais térmicos. Referente a variação horária do consumo de fadiga de 11 horas até as 16 horas é responsável por 98% do consumo de fadiga durante a vida de serviço. Isso ocorre porque é o período com maior incidência solar e possui um nível de tráfego elevado, apesar de não ser horário de pico.

Portanto, a consideração do empenamento térmico é imprescindível para realizar a análise de fadiga das placas de concreto. Apesar do método da PCA utilizar elementos finitos para estimar as tensões de tração nas placas geradas pelos carregamentos, mostrou-se necessitar de uma verificação complementar de fadiga, a qual a estimativa das tensões de tração nas placas considere os diferenciais térmicos na face superior e inferior.

Diante dessa situação, verifica-se que a utilização apenas de camadas granulares ocasiona uma sobrecarga nas placas de concreto que retém sobre si grande parte dos esforços provenientes do tráfego e ainda deve suportar as tensões ocasionadas pelo empenamento térmico. A utilização de camadas mais rígidas melhora a condição de suporte do sistema de apoio, fato que auxilia no alívio dos esforços sobre a placa de concreto.

Caso necessite utilizar apenas camadas granulares, como neste trabalho, seria necessário aumentar a espessura da placa de concreto ou utilizar um concreto com uma resistência a tração na flexão estática superior ao adotado no trabalho, que foi 5,00 MPa. Adotando o mesmo tipo de material seria necessário utilizar uma placa de concreto de 24,00 cm, a qual teria sua vida de fadiga consumida em 65% para as mesmas condições ao final de operação. Assim, percebe-se a sensibilidade do modelo utilizado, pois a alteração de 6,00 cm ocasionou uma redução de consumo de vida de fadiga de 38.618%.

Ressalta-se o fato de que as tensões obtidas neste tópico são distintas das encontradas na análise do estado de tensões, pois foi utilizado um modelo analítico para alcançar a tensão de tração nas placas de concreto, enquanto no estudo de tensões foi utilizado o *software* ELSYM5 as tensões verticais desprezando o efeito do empenamento térmico.



## 5 CONCLUSÕES

A má condição de grande parte dos pavimentos rodoviários do Brasil possui relação direta com os processos de dimensionamento, pois a superestrutura, de acordo com as análises deste trabalho, sofre o processo de ruína precocemente. Então, as vias dimensionadas nessas situações apresentarão condições de conforto e segurança aos usuários inadequadas, antes do fim da vida útil do pavimento.

Diante do contexto apresentado, verifica-se a relevância da análise mecanicista-empírica dos pavimentos, tendo em vista analisar cada modo de ruína do pavimento com critérios estabelecidos no estado de tensões do pavimento e nas condições de contorno do dimensionamento. O dimensionamento utilizado para pavimentos em CAUQ e em PCC apresentaram ruína precoce para a situação analisada neste trabalho, enquanto que o dimensionamento do pavimento com revestimento em blocos de concreto conseguiu suportar o tráfego durante toda sua vida de serviço. Todavia, esse fato não implica que em outras situações de dimensionamento isso ocorra novamente.

O dimensionamento com blocos de concreto intertravados apresentou desempenho satisfatório, segundo os critérios mecanicistas-empíricos propostos. No entanto, vale salientar que nem todas as superestruturas dimensionadas com esse método alcançarão resultados similares, pois, no processo de decisão do dimensionamento deste trabalho, optou-se pela utilização de CCR na camada de base, enquanto que o método de dimensionamento exige apenas a utilização de camada com ligante hidráulico. Portanto, a utilização de algum material com propriedades elásticas inferiores, como uma base de solo-cimento, poderia implicar em ruína da superestrutura.

Em relação à distribuição de tensões nos pavimentos observa-se a diferença de esforços que alcançam o subleito com a utilização de pavimentos rígidos ou pavimentos flexíveis, pois a utilização de pavimentos rígidos permite amenizar os esforços no subleito e geram uma maior proteção desses. O efeito da camada de CCR na superestrutura do pavimento com blocos de concreto intertravados é similar ao causado pela utilização de um pavimento com PCC, devido à elevada rigidez da camada adicionada ao revestimento em blocos de concreto.

O dimensionamento da superestrutura com revestimento CAUQ atingiu resultados satisfatórios em relação a proteção das camadas inferiores contra a ruptura por cisalhamento. Conforme esperado, o revestimento sofre o processo de ruína precoce, tendo em vista que durante o dimensionamento esse critério não é considerado. A ruína por fadiga do revestimento

implica na sobrecarga das camadas inferiores, as quais podem sofrer com a ruptura por cisalhamento em decorrência disso.

Uma alternativa para melhorar a vida de fadiga do CAUQ seria a utilização de camadas inferiores mais rígidas, tendo em vista que aliviaria os esforços de tração na fibra inferior do revestimento. Então, observa-se que o método de dimensionamento adotado para pavimentos asfálticos necessita de uma verificação complementar da vida de fadiga do revestimento.

O dimensionamento da superestrutura dos pavimentos com PCC resulta na fadiga precoce do revestimento, apesar do estudo simplificado do estado de tensões atuantes sobre as camadas pavimento. A desconsideração do efeito do empenamento térmico das placas ocasiona o dano precoce. Assim, conclui-se sobre a importância de considerar no momento do dimensionamento as tensões incitadas pelo empenamento térmico das placas. O método de dimensionamento utilizado necessita dessa verificação complementar para atingir melhores resultados.

Diante do exposto, verifica-se a importância da utilização de critérios mecanicistas-empíricos para o dimensionamento dos pavimentos, pois permite uma análise detalhada de como as tensões atuam e se distribuem na superestrutura, correlacionando-se com cada modo de ruína do pavimento. Além disso, a utilização de uma análise mecanicista-empírica permite um melhor aproveitamento das propriedades elásticas dos materiais, pois consegue-se identificar como os carregamentos interagirão com os materiais adotados.

Como sugestão para trabalhos futuros, tem-se a indicação de uma análise de custos da implantação dos pavimentos dimensionados com a realização de manutenções durante a vida de serviço para que o pavimento possua condições para suportar o tráfego adequadas até o fim da vida útil e realizar uma comparação com os custos uma estrutura dimensionada com critérios mecanicistas-empíricos. Dessa forma, permite realizar uma análise completa a respeito do processo de tomada de decisão no momento de dimensionamento e conservação do pavimento.

## REFERÊNCIAS

- ABNT. **NBR 15953**: Pavimento intertravado com peças de concreto: execução. Rio de Janeiro: ABNT, 2011.
- BALBO, J. T. **Pavimentos de concreto**. São Paulo: Oficina de Textos, 2009.
- BALBO, J. T. **Pavimentação asfáltica**: materiais, projeto e restauração. São Paulo: Oficina de Textos, 2011.
- BALBO, J. T.; SEVERI, A. A. Thermal Gradients in Concrete Pavements in Tropical Environment. **Transportation Research Record**, Washington, v. 1809, n. 1, p. 12-22, 2002.
- BEZERRA, F. S. C.; GONZAGA, C. M. G.; OLIVEIRA, F. H. L. de. Influência da resistência à compressão e da espessura dos blocos de concreto e as espessuras das juntas na deformação permanente dos pavimentos em blocos intertravados. In: Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes da ANPET, 34., 2020, 100% digital. **Anais**. 100% digital: ANPET, 2020. p. 1-11.
- CARDOSO, S. H.; WITCZAK, M. W. Permanent deformation for flexible airfield pavement design. **Transportation Research Record**, Washington, v. 1307, n. 1, p. 111-121, 1991.
- CARVALHO, M. D. de. **Pavimentação com peças pré-moldadas de concreto**. 4.ed. São Paulo: ABCP, 1998. 32p.
- CERVO, T. C. **Estudo da Resistência à Fadiga de Concretos de Cimento Portland para Pavimentação**. 2004. 220 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.
- CHIROLLI, M.; SOARES, L.; THIVES, L. P.; ROHDE, L. Desenvolvimento de aplicativo *android* para estimativa de dimensionamento de pavimentos de concreto simples pelo método PCA/1984. In: Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes da ANPET, 33., 2019, Balneário Camboriú. **Anais**. Balneário Camboriú: ANPET, 2019. p. 1121-1132.
- CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTES. **Anuário CNT do Transporte**. 2019. Disponível em: <<https://anuariodotransporte.cnt.org.br/2019/Rodoviario/1-2-1-/Empresas>>. Acesso em: 13 nov. 2021.
- COUTINHO, J. C. P. **Dimensionamento de pavimento asfáltico**: comparação do método do DNER com um método mecanístico - empírico aplicada a um trecho. 2011. 184 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Geotecnia, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2011.
- CRUZ, L. O. M. **Pavimento intertravado de concreto**: estudo dos elementos e métodos de dimensionamento. 2003. 281 f. Tese (Doutorado) – Curso de Ciências em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.

DNIT. **Manual de pavimentos rígidos**. Publicação IPR – 714. 234 f. 2. ed. Rio de Janeiro: IPR, 2005.

DNIT. **Manual de pavimentação**. Publicação IPR – 719. 274 f. 3. ed. Rio de Janeiro: Ipr, 2006.

FERNANDES, P. G. P. S.; VALOURA, L. R.; ESPÍNDOLA, A. C.; CIRÍACO, T. G. M. Estudo comparativo dos métodos empírico do DNER e mecanístico-empírico pelo SISPAV aplicado a rodovia BR-316. In: Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes da ANPET, 31., 2017, Recife. **Anais**. Recife: ANPET, 2017. p. 1217-1226.

FERREIRA, F. A. **Análise do dimensionamento de pavimentos asfálticos utilizando o programa SISPAVBR**. 2013. 110 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

FRANCO, F. A. C. P.; MOTTA, L. M. G. da. **Guia para utilização de Método Mecanístico-Empírico**: apresentação dos programas desenvolvidos. Rio de Janeiro: IPR, 2018. 70 p.

GUIMARÃES, A. C. R. **Um método mecanístico empírico para a previsão da deformação permanente em solos tropicais constituintes de pavimentos**. 2009. 352 f. Tese (Doutorado) – Curso de Ciências em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

HUANG, Y. H. **Pavement Analysis and Design**. 2. ed. New Jersey: Pearson Education, 2004. 20 p.

MOGHADAS NEJAD, F.; SHADRAVAN, M. R. A study on behavior of block pavement using 3D finite element method. **Computational Methods in Civil Engineering**, Guilan, v. 1, n. 1, pp. 65-71, 2010.

MORGADO, P. R. S. **Concepção e Dimensionamento de Pavimentos em Blocos**. 2008. 79 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Civil, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2008.

MOTA, R. V.; BOSSO, M.; BESSA, I. S.; VASCONCELOS, K.; BERNUCCI, L. L. B. Efeito do tráfego no dimensionamento de pavimentos asfálticos utilizando dados de pedágio. In: Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes da ANPET, 32., 2018, Gramado. **Anais**. Gramado: ANPET, 2018. p. 1230-1241.

MOTTA, L. M. G. da. **Método de dimensionamento de pavimentos flexíveis**: critérios de confiabilidade e ensaios de cargas repetidas. 1991. 366 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciências em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1991.

OLIVEIRA, P. L. de. **Projeto estrutural de pavimentos rodoviários e de pisos industriais de concreto**. 2000. 218 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Estruturas, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.

PCA. **Thickness design for concrete highway and street pavements**. Ottawa: Transport Research Laboratory, 1984.

PINTO, S. **Estudo do comportamento à fadiga de misturas betuminosas e aplicação na avaliação estrutural de pavimentos**. 1991. 478 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciências em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1991.

PMSP. **IP – 06/2004: DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS COM BLOCOS INTERTRAVADOS DE CONCRETO**. São Paulo, 2004a.

PMSP. **IP – 02/2004: CLASSIFICAÇÃO DAS VIAS**. São Paulo, 2004b.

PMSP. **IP – 07/2004: DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS DE CONCRETO**. São Paulo, 2004c.

PITTA, M. R. **Dimensionamento de pavimentos rodoviários e urbanos de concreto pelo método PCA/84**. São Paulo: ABCP, 1996.

RODOLFO, M. P.; BALBO, J. T. Stresses in concrete pavements: models to compute stresses considering tropical climate thermal gradients and wheel loads. In: Congrès Annuel de La Scgc, 2008, Québec. **Proceedings**. Québec: Csce, 2008. p. 1-10.

RODRIGUES, J. L. A. **Conceção de pavimentos rígidos**. 2011. 51 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Civil, Universidade do Porto, Porto, 2011.

SHACKEL, B. **Computer based procedures for the design and specification of concrete block pavements**. Small Element Pavement Technologists, p. 79-87, 1992.

SHACKEL, B.; LIM, D. O. O. Mechanisms of paver interlock. In: H International Conference on Concrete Block Paving, 7., 2003, Sun City. **Proceedings**. Sun City: Document Transformation Technologies, 2003. p. 1-10.

SILVA, E. R. da. **Análise do comportamento estrutural e funcional de um pavimento experimental com blocos pré-moldados de concreto**. 2016. 234 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Ciências em Engenharia de Transportes, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.

SOARES, J. B.; MOTTA, L. M. G. da. Considerações sobre a determinação do fator de veículo no cálculo do número N. In: Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes da ANPET, 15., 2001, Campinas. **Anais**. Campinas: ANPET, 2001. p. 1-13.

SOUZA, M. L. de. **Método de projeto de pavimentos flexíveis**. 3 ed. Rio de Janeiro: IPR, 1981.

TRICHES, G. **Concreto compactado a rolo para aplicação em pavimentação: estudo do comportamento na fadiga e proposição de metodologia de dimensionamento**. 1993. 365 f.

Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Infraestrutura Aeronáutica, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 1993.

TURNBULL, W. J.; FOSTER, C. R.; AHLVIN, R. G. Design of flexible pavement considering mixed loads and traffic volume. In: Intl Conf Struct Design Asphalt Pvmnts, 1962. **Proceedings**. TRB, 1962.