

ANALISE MECANICISTA DE PAVIMENTOS PARA VERIFICAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA E DA VELOCIDADE DE TRÁFEGO NA VIDA DE ÚTIL DE UM PAVIMENTO ASFÁLTICO

Bianca Morgado Merighi (IC) e Patricia Barboza da Silva (Orientadora)

PIBIC: CNPq

RESUMO

Este trabalho apresenta uma avaliação, por meio de análise mecanicista, para verificação da influência da variação de temperatura e velocidade na vida útil do pavimento flexível. Para tanto, foi dimensionada uma estrutura de pavimento asfáltico considerando uma via urbana com volume de tráfego pesado, utilizando o método de dimensionamento da prefeitura de São Paulo. Com a estrutura obtida foram efetuadas simulações em software de análise mecanicista, para determinação dos parâmetros de tensões e deformações admissíveis para a estrutura estudada, considerando as variações do módulo de resiliência com as variações de temperatura e frequência de carregamentos, utilizando temperaturas do ar em três diferentes municípios situados no Estado de São Paulo. Com as tensões e deformações admissíveis obtidas por meio das análises mecanicistas da estrutura de pavimentos, foram utilizadas equações de desempenho obtidas por meio de pesquisa bibliográfica que possibilitaram determinar a vida útil, ou vida de fadiga, da estrutura dimensionada considerando que esta estrutura foi aplicada em pavimentos nos três diferentes municípios nos quais considerou-se as variações de temperatura e de frequência de carregamento. A partir destes resultados foi realizada análise comparativa entre a vida útil prevista no dimensionamento, por meio dos métodos correntes, e aquela calculada utilizando as equações de desempenho encontradas na literatura pesquisada quando se consideram as variações de temperatura e carregamento aos quais o pavimento pode estar submetido. Dessa forma foi possível avaliar de que modo estas variáveis interferiram para reduzir o período de vida útil do pavimento dimensionado.

Palavras-chave: Pavimento flexível. Análise mecanicista. Vida de fadiga.

ABSTRACT

This work presents an evaluation, through mechanistic analysis, to verify the influence of temperature and velocity variation on the useful life of the flexible pavement. For that, an asphalt pavement structure was considered considering an urban road with heavy traffic volume, using the sizing method of the city of São Paulo. With the structure obtained, simulations were performed in mechanical analysis software to determine the parameters

of stresses and deformations admissible for the studied structure, considering the variations of the resilience module with the variations of temperature and frequency of loads, using air temperatures in three Different municipalities located in the State of São Paulo. With the tensions and permissible deformations obtained through mechanistic analyzes of the pavement structure, performance equations obtained through bibliographic research were used to determine the useful life, or fatigue life, of the dimensioned structure considering that this structure was applied in Pavements in the three different municipalities in which the variations of temperature and frequency of loading were considered. From these results a comparative analysis was carried out between the useful life foreseen in the design, by means of the current methods, and the one calculated using the performance equations found in the researched literature when considering the variations of temperature and loading to which the pavement can be submitted . In this way it was possible to evaluate how these variables interfered to reduce the useful life of the dimensioned pavement.

Keywords: Flexible pavement. Mechanistic analysis. Fatigue life

1. INTRODUÇÃO

Segundo Bernucci et al. (2007), pavimento é uma estrutura de múltiplas camadas construídas sobre superfície de terraplenagem, destinada a resistir aos esforços do tráfego e

a proporcionar aos usuários condições confortáveis e seguras ao rolamento.

Considerando a rigidez do conjunto de camadas que os compõem, os pavimentos podem ser rígidos ou flexíveis, sendo o rígido o pavimento composto por um revestimento em concreto asfáltico e camada de base granular; e o flexível tem em seu revestimento placas de concreto de cimento Portland.

Quanto ao modo de ruptura, os pavimentos rígidos podem apresentar ruptura por tração na flexão, gerando o trincamento da placa de revestimento. Já os pavimentos flexíveis podem apresentar ruptura por tração na flexão, evidenciado pelo trincamento por fadiga do revestimento; e ruptura por compressão que pode ocorrer em seu subleito e nas outras camadas granulares, evidenciada pela ocorrência de deformações plásticas em trilhas de roda ou localizada (BALBO, 2007).

De acordo com Suzuki e Daibert (2015) os pavimentos asfálticos empregados nos corredores de ônibus das grandes cidades, mesmo dimensionados e executados de maneira adequada, têm apresentado, frequentemente, ocorrências de anomalias do tipo afundamentos plásticos em trilhas de roda e trincamentos por fadiga, indicando um desempenho insatisfatório e, conseqüentemente, a necessidade de manutenções e restaurações precoces.

Estas ocorrências também são observadas em vias expressas, nas quais há a circulação de veículos comerciais rodoviários (caminhões e ônibus), que apresentam cargas elevadas em seus eixos e, em geral, trafegam em velocidades mais baixas se considerarmos as velocidades de operação das referidas vias.

Sabe-se que os concretos asfálticos utilizados como camada de revestimento de pavimentos, apresentam comportamento termoviscoelástico influenciado principalmente pelos cimentos asfálticos empregados em sua composição.

Dessa forma, o concreto asfáltico tem seu desempenho quanto à fadiga e às deformações permanentes afetados diretamente pela temperatura e pela frequência de carregamento que estiver submetido (SUZUKI E DAIBERT, 2015).

O comportamento termoviscoelástico dos ligantes asfálticos pode ser explicado através do modelo estrutural que este material apresenta, como uma dispersão de moléculas polares em meio não-polar ajudando a entender o efeito da temperatura. Em

temperaturas baixas as moléculas não têm condições de se mover umas em relação às outras e a viscosidade se eleva, dessa forma o ligante se comporta quase como um sólido. À medida que a temperatura aumenta, algumas moléculas começam a se mover podendo ocorrer um fluxo entre as mesmas, esse movimento faz baixar a viscosidade e, em temperaturas elevadas, o ligante se comporta como um líquido. Essa transição é reversível (BERNUCCI et al., 2007).

Para o dimensionamento de pavimentos flexíveis no Brasil utilizam-se, de uma forma geral, métodos que consideram as condições estruturais dos diversos materiais empregados nas camadas do pavimento de maneira fixa para cada tipo de material.

Para as verificações mecanicistas das estruturas de pavimentos são utilizados, entre outros parâmetros, o módulo de resiliência dos materiais empregados nas mais diversas camadas, que, para concretos asfálticos, é realizado à temperatura de 25°C, com frequência de carregamento de 1Hz, com tempo de aplicação de carga de 0,1s e tempo de repouso de 0,9s (SUZUKI E DAIBERT, 2015).

Para as misturas asfálticas, é importante considerar o efeito do tempo de aplicação da carga (variação na frequência de carregamento) e da variação de temperatura, o que não é feito quando da realização dos ensaios de módulo de resiliência utilizando os procedimentos normalmente utilizados no Brasil.

Por este motivo tem-se utilizado, de maneira corrente no exterior, o módulo complexo (E^*) das misturas asfálticas empregadas em pavimentos, como dado de entrada no processo de análise estrutural, pois esse é representativo das propriedades elásticas deste material que apresenta viscoelasticidade linear sob ação de um carregamento senoidal, além de permitir analisar a influência da variação de temperatura e da frequência do carregamento (BERNUCCI et al., 2007).

2. REVISÃO BIBLIOGRAFIA ESTRUTURAS DE PAVIMENTO

Com a evolução dos meios de transporte veio a necessidade de melhorias das vias, e para isso foi indispensável a busca por materiais que revestissem o solo e possibilitassem maior conforto durante o transporte de cargas e pessoas. A partir disso as vias começaram a ser pavimentadas com diferentes estruturas, diferenciando-as em relação aos materiais e espessuras (BERNUCCI, 2007).

Segundo Balbo (2007), pavimento é uma estrutura construída sobre a terraplenagem e tem o objetivo de resistir e distribuir ao subleito os esforços verticais produzidos pelo tráfego, resistir aos esforços horizontais transformando a superfície de rolamento em uma

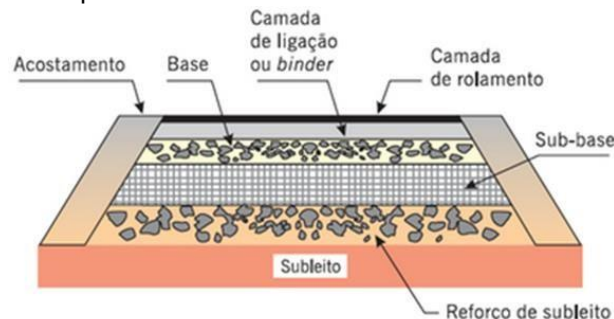
camada mais durável e melhorar as condições de conforto e segurança da via. É um sistema de várias camadas de espessuras finitas construídas sobre um semi-espaço infinito que exerce a função de fundação da estrutura, chamado de subleito.

Com uma pavimentação de qualidade, o tráfego tem uma grande melhoria e, como consequência, evita gastos com manutenções, gerando um crescimento na economia (BALBO, 2007).

Segundo DNIT (2006), os pavimentos podem ser classificados em três tipos: rígidos, semirrígidos e flexíveis.

O pavimento flexível, tipo de estrutura que será analisada neste trabalho, possui em seu revestimento uma mistura constituída basicamente de agregados e materiais betuminosos (concretos asfálticos ou por penetração). Apresentam quatro camadas principais: revestimento, base, sub-base e reforço do subleito, todas sofrem deformação elástica significativa sob o carregamento aplicado e, portanto, a carga se distribui em parcelas aproximadamente equivalentes entre as camadas. Dependendo do tráfego disponível e dos materiais, pode ocorrer a ausência de uma dessas camadas (BERNUCCI, 2007). A Figura 1 representa uma seção típica de um pavimento flexível.

Figura 1: Seção típica de um pavimento flexível



Fonte: Bernucci et. al (2007)

A seguir são descritas, segundo Senço (1997), de maneira sucinta, as diversas camadas que podem compor uma estrutura de pavimento, bem como suas respectivas funções:

- a) Subleito é o terreno de fundação do pavimento, construída com o objetivo de corrigir as falhas da camada final de terraplanagem ou de um leito antigo, apenas os últimos 40 cm da cota final de terraplanagem são considerados subleito, pois, quando começa a se aproximar do maciço as pressões são reduzidas, sendo consideradas desprezíveis.

- b) Reforço do subleito é uma camada de espessura constante e construída, se necessário, acima da regularização. O reforço do subleito também resiste e distribui os esforços verticais. É considerado um complemento do subleito.
- c) Sub-base é usada quando não for aconselhável se construir diretamente na camada de regularização ou no reforço do subleito. Possui material de melhor qualidade que o de reforço do subleito.
- d) Base é a camada localizada abaixo do revestimento, e sua rigidez ajuda a dissipar os esforços recebidos pelo revestimento, distribuindo-as para camadas inferiores.
- e) Revestimento, que também pode ser chamado de capa ou camada de rolamento, é a camada que tem como objetivo resistir diretamente aos esforços do tráfego aos quais é submetida e transmiti-los, de forma reduzida, as camadas inferiores, também tem a função de impermeabilizar a estrutura do pavimento e oferecer maior conforto e segurança. Essa é considerada a camada mais nobre.

2.1 PROPRIEDADES MECÂNICAS DE MATERIAIS GRANULARES UTILIZADOS EM PAVIMENTOS FLEXÍVEIS

Os principais parâmetros referentes as propriedades mecânicas de materiais granulares para uso em camadas de pavimentos são: o Índice de Suporte Califórnia (ISC), em inglês, *California Bearing Ratio* (CBR) e o módulo de resiliência (MR), cujas descrições são apresentadas sucintamente, a seguir.

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

Utilizado como parâmetro de resistência de materiais granulares, este ensaio foi desenvolvido na Califórnia, na década de 1920, com o objetivo de avaliar o potencial de ruptura do subleito, uma vez que esse era um problema frequente nas rodovias da Califórnia (BERNUCCI, 2007).

Para seu desenvolvimento foram selecionados materiais granulares, que eram usados como bases, com bom desempenho e com uma média de resistência à penetração de 100%, assim foi estabelecido um valor padrão (Balbo, 2007).

O ensaio ISC é uma relação entre a pressão necessária para produzir uma penetração de um pistão num corpo-de-prova de solo ou material granular e a pressão necessária para produzir a mesma penetração no material padrão referencial.

Dessa forma o resultado do ISC representa o quão melhor ou pior é o material ensaiado em relação ao material padrão de referência e, por isso, são encontrados materiais granulares com índice de suporte Califórnia (ISC) acima ou abaixo de 100%.

Este ensaio está relacionado ao desempenho das estruturas, levando a diferentes dimensionamentos de espessuras, evitando rupturas do subleito (BALBO, 2007).

b) Módulo de resiliência (MR)

O estudo da resiliência, permite avaliar o comportamento estrutural de cada material (DNIT, 2006), pois leva em conta o efeito da ação de cargas repetidas, essa atuação mostra que cada material pode se comportar de diferentes maneiras pela força de cargas repetitivas, mostrando sua capacidade de recuperação.

O MR serve como parâmetro indicativo das propriedades básicas do material, além disso pode ser feito através de testes rápidos e não destrutivos, tornando-o um método internacionalmente aceito (BERNUCCI, 2007).

Experimentalmente o módulo de resiliência é determinado pela relação entre a tensão aplicada e a sua deformação sofrida. Geralmente os materiais apresentam comportamento elástico não linear (BALBO, 2007).

Os materiais granulares apresentam um MR variável de ponto a ponto em sua espessura, sendo que o parâmetro de cálculo é dependente da magnitude da tensão (BALBO, 2007).

2.2 MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS

São utilizados diversos métodos para o dimensionamento de um pavimento, alguns deles serão apresentados posteriormente.

2.2.1 MÉTODO DE DIMENSIONAMENTO DA PREFEITURA DE SÃO PAULO

Para que seja feito o correto dimensionamento do pavimento pelo método da Prefeitura de São Paulo (PMSP), é necessário um estudo criterioso do subleito e dos materiais integrantes da sua estrutura. O método de dimensionamento adotado pela PMSP tem por base o estabelecimento da espessura suficiente à proteção do subleito quanto as deformações plásticas excessivas ou até a ruptura. O procedimento para o dimensionamento de pavimentos flexíveis de vias urbanas do Município de São Paulo, é dado da seguinte forma.

Primeiramente deve ser feita a caracterização das vias de acordo com o seu volume de tráfego, por meio da Tabela 1.

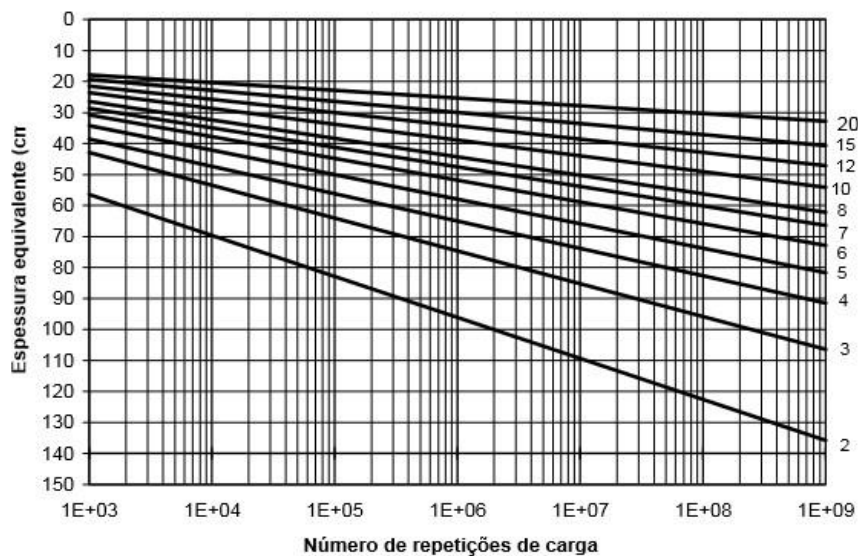
Tabela 1: Classificação das vias

Função Predominante	Tráfego Previsto	Vida de Projeto (ANOS)	Volume inicial da Faixa mais carregada		Equivalente por Veículo Comercial	N	N característico
			Veículo leve	Caminhões e Ônibus			
Vias Coletoras e Estruturais	Meio pesado	10	1501 A 5000	101 A 300	2.30	1,4 x 10 ⁶ A 3,1 x 10 ⁶	2 x 10 ⁶
	Pesado	12	5001 A 10000	301 A 1000	5.90	1,0 x 10 ⁷ A 1,4 x 10 ⁶	2 x 10 ⁷
	Muito pesado	12	>10000	1001 A 2000	5.90	3,3 x 10 ⁷ A 1,4 x 10 ⁶	5 x 10 ⁷
Faixa Exclusiva de Ônibus	Volume médio	12	-	< 500	-	3 x 10 ⁶	10 ⁷
	Volume elevado	12	-	> 500	-	5x10 ⁷	5 x 10 ⁷

Fonte: PMSP, (2004)

Após a definição do volume de tráfego a que será submetido o pavimento, e determinada a capacidade de suporte representativo do subleito, a espessura total básica do pavimento (HSL), em termos de material granular, que será fixada de acordo com a Figura 3.

Figura 3: Espessura total básica do pavimento



Fonte: PMSP, (2004)

Para evitar a ruptura por fadiga do revestimento por esforços repetidos de tração na flexão, são recomendadas as espessuras mínimas para o revestimento, expressas na Tabela 2, visando, especialmente, proteger as bases de comportamento puramente granular, com base em um período de projeto P = 10 anos.

Tabela 2: Espessuras mínimas do revestimento

N	TRÁFEGO	ESPESSURA MÍNIMA DE REVESTIMENTO ASFÁLTICO
$2 \times 10^6 \leq N \leq 5 \times 10^6$	Meio Pesado	Concreto asfáltico com 5,0 cm de espessura
$5 \times 10^6 \leq N \leq 10^7$	---	Concreto asfáltico com 7,5 cm de espessura
$10^7 \leq N \leq 5 \times 10^7$	Pesado	Concreto asfáltico com 10,0 cm de espessura
$N \leq 5 \times 10^7$	Muito Pesado	Concreto asfáltico com 12,5 cm de espessura
(*)	Faixa exclusiva de ônibus	Adotar no mínimo 10,0 cm

Fonte: PMSP, (2004)

Uma vez determinada a espessura total do pavimento (H_{SL}), em termos de material granular, e fixada a do revestimento (R), procede-se ao dimensionamento das espessuras das demais camadas, ou seja, da base e sub-base, levando em conta os materiais disponíveis para cada uma delas, seus coeficientes de equivalência estrutural (Tabela 3) e suas capacidades de suporte, traduzidas pelos respectivos CBR. As espessuras da base (B), subbase (h_{SB}) e do reforço do subleito (h_{REF}) são obtidas pela resolução das inequações (2), (3) e

(4):

$$RK_R + BK_B \geq H_{SB} \quad (2)$$

$$RK_R + BK_B + h_{SB}K_{SB} \geq H_{REF} \quad (3)$$

$$RK_R + BK_B + h_{SB}K_{SB} + h_{REF}K_{REF} \geq H_{SL} \quad (4)$$

Em que:

 K_R – Coeficiente de revestimento; K_B – Coeficiente da base; K_{SB} – Coeficiente da sub-base; K_{REF} – Coeficiente de reforço; B - Espessura da base; H_{SB} – Espessura da sub-base; H_{REF} - Espessura do reforço do subleito;

Tabela 3: Coeficientes estruturais (PMSP)

Componentes do pavimento	Coeficiente de equivalência estrutural K
Base ou revestimento em concreto asfáltico	2,00
Base de Solo-Cimento ou BGTC, com resistência à compressão aos 7 dias, superior a 4,5 MPa	1,70
Base ou Revestimento de Pré-Misturado a Frio, de Graduação Densa	1,40
Base ou Revestimento Asfáltico por Penetração	1,20
Camadas granulares	1,00
Base ou Revestimento de Pré-Misturado a Quente, de Graduação Densa / BINDER	1,80
Solo cimento com resistência a compressão a 7 dias, entre 45 kg/cm e 28 kg/cm	1,40
Solo cimento com resistência a compressão a 7 dias, entre 28 kg/cm e 21 kg/cm	1,20

Fonte: PMSP, (2004)

A Tabela 4 indica as espessuras mínimas e o tipo de material que deverão ser adotados nas camadas de base e sub-base.

Tabela 4: Espessuras recomendadas e tipo de material

Tráfego	N	Base		Sub-Base	
		Material	Espessura Mínima (cm)	Material	Espessura Mínima (cm)
Meio Pesado	2 x 10 ⁶	Granular	15,0	Granular	10,0
		Granular Tratado com cimento	15,0		
Pesado	2 x 10 ⁷	Granular Tratado com cimento	15,0	Granular	10,0
Muito Pesado	5 x 10 ⁷	Granular Tratado com cimento	20,0	Granular	10,0
Faixa Exclusiva de ônibus Volume Médio	10 ⁷	Granular	15,0	Granular	10,0
		Granular Tratado com cimento	15,0		
Faixa Exclusiva de ônibus Volume Pesado	5 x 10 ⁷	Granular Tratado com cimento	20,0	Granular	10,0

Fonte: PMSP, (2004)

2.3 MÉTODO SHELL

Para o dimensionamento pelo método Shell é necessário primeiramente obter a temperatura de serviço das camadas betuminosas, estas temperaturas são obtidas, segundo Shell (1977, apud LOPES, 2009), por meio do ábaco da Figura 4, que está em função das espessuras das camadas e da temperatura média mensal do ar ponderada (T_{mmap}).

A T_{mmap} pode ser obtida pela equação 5.

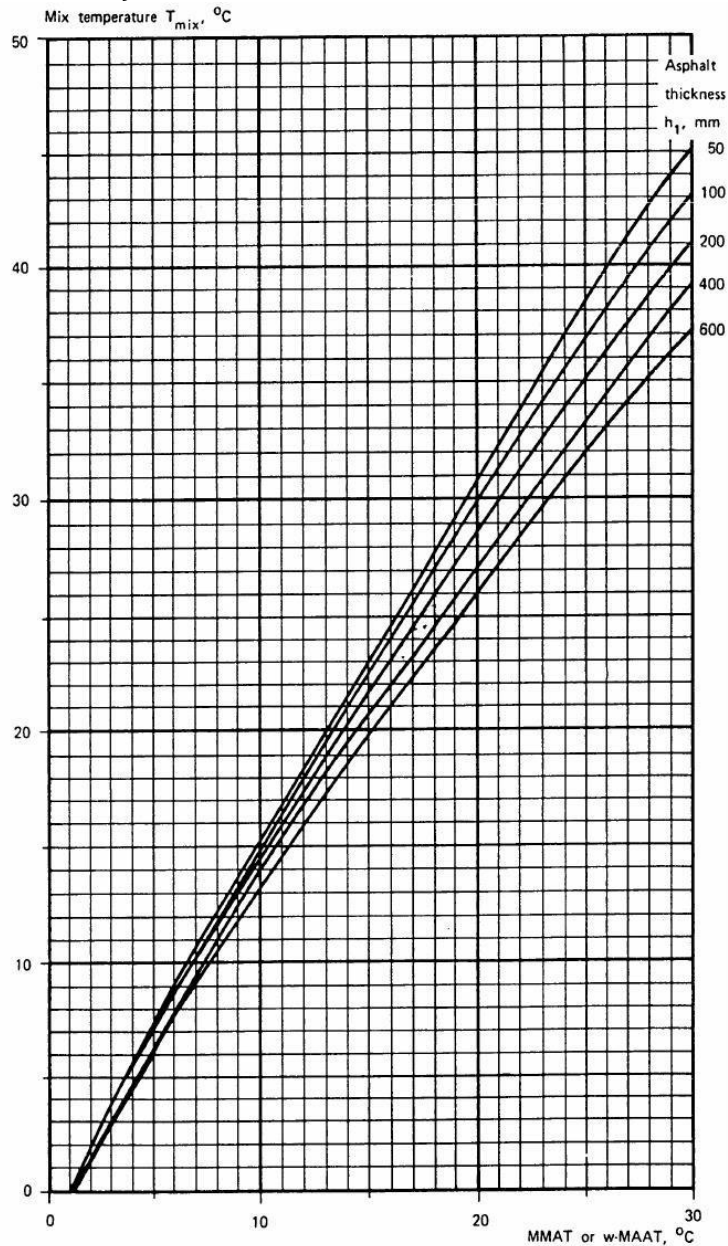
$$T_{mmap} = 7,7068 \times \ln(W_{\text{médio}}) + 20,257 \quad (5)$$

Em que: $W_{\text{médio}}$ é o fator de correção mensal médio dos meses do ano, os fatores de correção de cada mês devem ser obtidos através da equação 6.

$$W_{\text{médio}} = 0,0723 \times e^{0,1296 \times T_{mma}} \quad (6)$$

Em que: T_{mma} é a temperatura média de cada mês para um período mínimo de vinte anos.

Figura 4: Temperatura de serviço das camadas betuminosas



Fonte: Lopes, (2009)

3. DIMENSIONAMENTO DO PAVIMENTO FLEXÍVEL PARA A PESQUISA

O objetivo deste trabalho é avaliar o quanto a variação de temperatura que ocorre no revestimento pode diminuir a vida útil do pavimento, e para fazer essa avaliação foi realizado o dimensionamento de uma estrutura de pavimento flexível utilizando o método IP - 05 da Prefeitura de São Paulo (PMSP, 2004).

Para o dimensionamento adotou-se um tráfego pesado que, conforme Tabela 2, apresenta número característico de repetições do eixo padrão (N característico) = 2×10^7 , para as camadas granulares adotaram-se, também, os seguintes parâmetros:

- ISC do subleito = 10%.
- Material da base = brita graduada simples com ISC = 80%
- Material da sub-base = bica corrida com ISC = 20%

Os coeficientes de equivalência estrutural foram obtidos através da Tabela 3. Os valores foram:

- $K_R=2,0$ $K_B=1,0$
- $K_S=1,0$

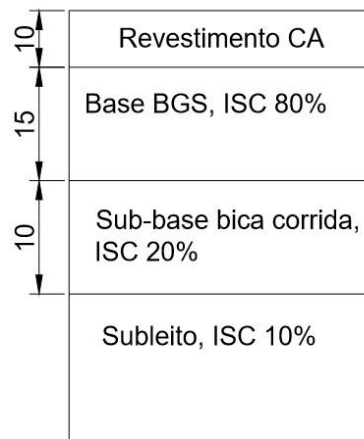
A espessura da camada de revestimento foi obtida por meio da Tabela 4, resultando em 7,5cm.

As espessuras totais do pavimento foram obtidas por meio da Figura 3, e resultaram em:

- $H_{20}=27\text{cm}$
- $H_n=45\text{cm}$

As espessuras das camadas do pavimento foram calculadas utilizando-se das inequações 2 e 3. O dimensionamento resultou na estrutura de pavimento apresentada na Figura 5:

Figura 5: Estrutura do pavimento obtida pelo método da PMSP



Medidas em cm

4 ANÁLISE DA INFLUENCIA DA TEMPERATURA E DA VELOCIDADE NA VIDA ÚTIL DO PAVIMENTO DIMENSIONADO

Foram selecionadas três cidades do estado de São Paulo: Campos do Jordão, São José do Rio Preto e São Paulo (capital) pois as temperaturas de serviço são extremas em cada lugar, que foram obtidas por meio de consulta ao site do Centro Integrado de Informações Agrometeorológicas (CIIAGRO) (2017).

Na Tabela 5 são apresentadas as temperaturas médias, máximas e mínimas mensais para o período de 1996 a 2016 nas cidades selecionadas, obtidas em consulta ao site do Centro Integrado de Informações Agrometeorológicas (CIIAGRO) (ano). Além das temperaturas apresentam-se, ainda, na Tabela 5 os respectivos fatores de correção ($W_{\text{médio}}$), obtidos por meio da equação 6, utilizando a temperatura do ar de cada cidade e suas temperaturas respectivas médias mensais do ar ponderada (TMMAP), calculada pela equação 5, utilizando o $W_{\text{médio}}$.

A partir da equação 6, foi calculado o $W_{\text{médio}}$ e então feita sua média. Posteriormente calculou-se a Tmmap por meio da equação 5. As temperaturas de serviço das camadas asfálticas foram obtidas no ábaco da Figura 4 utilizando como dados de entrada a Tmmap e as espessuras das camadas (LOPES, 2009) que podem ser observadas na Tabela 5.

Tabela 5: Temperaturas médias e seus fatores de correção

	São Paulo			Campos do Jordão			São José dos Campos		
	Máxima	Mínima	Média	Máxima	Mínima	Média	Máxima	Mínima	Média
Temperatura (°C)	28,1	12,9	21,4	21,5	6,8	15,1	30,4	15,9	24,9
TMMAP (°C)	28,4	13,8	21,7	21,7	8,2	15,6	30,7	16,6	25,2
$W_{\text{médio}}$	2,88	0,43	1,20	1,20	0,21	0,54	3,88	0,62	1,89

O manual técnico da AUSTROADS (2012), apresenta a equação 7 que combina os efeitos da temperatura e velocidade de operação no cálculo do módulo de resiliência das misturas asfálticas convencionais, por meio da qual foram geradas as curvas apresentadas na Figura 6.

$$E = 10^{5,7591} \times T^{-2,0154} \times v^{0,3059} \quad (7)$$

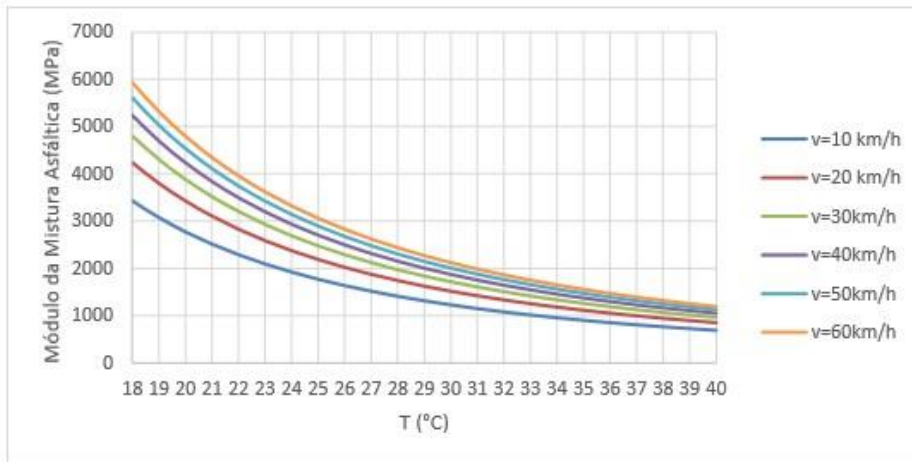
Em que:

E = módulo de resiliência da mistura, MPa;

T = Temperatura de serviço, °C;

V = velocidade de operação, km/h.

Figura 6: Variação do módulo de misturas asfálticas densas em função da temperatura e velocidade de operação



Fonte: AUSTROADS, (2012) (adaptado)

Para realização da análise da influência da temperatura e da velocidade na vida útil do pavimento dimensionado neste trabalho, foram calculados, utilizando a equação 7, diferentes módulos de resiliência para a mistura asfáltica empregada como revestimento, variando a velocidade e a temperatura de serviço (TMMAP) da mesma.

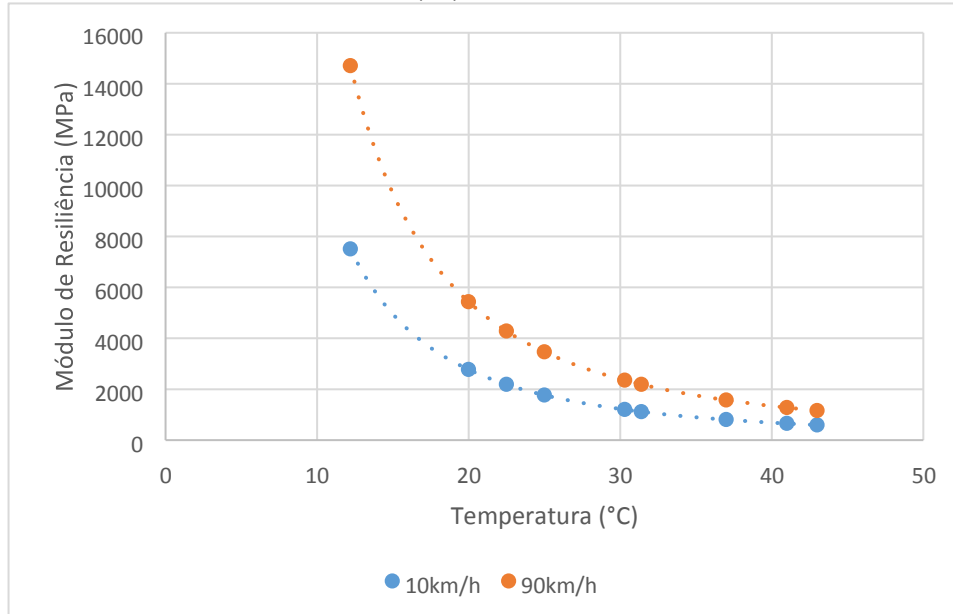
As temperaturas e velocidades consideradas para os cálculos são apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6: Módulos de resiliência (MPa)

	Cidades	Temp. (°C)	Módulos de resiliência (MPa)	
			10km/h	90km/h
Temperatura média (°C)	Campos do Jordão	22,5	2187	4283
	São Paulo	31,4	1117	2188
	São José do Rio Preto	37	803	1572
Temperatura mínima (°C)	Campos do Jordão	12,2	7508	14704
	São Paulo	20	2773	5430
	São José do Rio Preto	25	1768	3463
Temperatura máxima (°C)	Campos do Jordão	30,3	1200	2351
	São Paulo	41	652	1278
	São José do Rio Preto	43	593	1161

Para facilitar a análise de dados apresenta-se o gráfico da Figura 7, com os valores do módulo de resiliência em função da temperatura de serviço (TMAP) e da velocidade do tráfego.

Figura 7: Gráfico do Módulo de resiliência x T(°C)



A Figura 7 permite verificar que com o aumento da temperatura de serviço o módulo de resiliência diminui.

No caso da velocidade é possível verificar que o aumento deste parâmetro promove o aumento do módulo de resiliência, pois os resultados obtidos para a velocidade de 90km/h são maiores do que os obtidos para 10km/h, quando se considera a mesma temperatura de serviço em ambas as velocidades.

3.1 SIMULAÇÃO DAS ESTRUTURAS DE PAVIMENTO

Para verificar as deformações de tração nas fibras inferiores das camadas asfálticas, e as deformações de compressão vertical no topo dos subleitos foi utilizado o programa Elsym5. Com os resultados obtidos nas simulações realizadas no Elsym 5 foram construídas três tabelas, Tabela 7 na qual foram utilizadas as temperaturas intermediária das três cidades, a Tabela 8 na qual foram utilizadas as temperaturas mínimas e a Tabela 9 para as temperaturas máximas.

Tabela 7: Deformações no pavimento dimensionado pelo método PMSP considerando temperatura do ar médias nas cidades consideradas

Camadas	Velocidade (km/h)	Temperaturas (°C)	Deformação de tração (μdef)	Deformação vertical (μdef)	Deflexão
Revestimento	10	22,5	0.710×10^{-3}	-	0.550×10^{-1}
		31,4	0.184×10^{-2}		0.584×10^{-1}
		37	0.149×10^{-2}		0.605×10^{-1}
	90	22,5	0.259×10^{-3}	-	0.522×10^{-1}
		31,4	0.534×10^{-3}		0.550×10^{-1}
		37	0.751×10^{-3}		0.565×10^{-1}
Subleito	10	22,5	-	0.147×10^{-3}	-
		31,4		0.147×10^{-3}	
		37		0.323×10^{-3}	
	90	22,5	-	0.128×10^{-3}	-
		31,4		0.934×10^{-4}	
		37		0.122×10^{-3}	

Tabela 8: Deformações no pavimento dimensionado pelo método PMSP considerando temperatura do ar mínimas nas cidades consideradas

Camadas	Velocidade (km/h)	Temperatura (°C)	Deformação de tração (μdef)	Deformação vertical (μdef)	Deflexão
Revestimento	10	12,2	0.128×10^{-3}	-	0.499×10^{-1}
		20	0.416×10^{-3}		0.539×10^{-1}
		25	0.666×10^{-3}		0.560×10^{-1}
	90	12,2	0.327×10^{-4}	-	0.417×10^{-1}
		20	0.196×10^{-3}		0.512×10^{-1}
		25	0.328×10^{-3}		0.530×10^{-1}
Subleito	10	12,2	-	0.117×10^{-3}	-
		20		0.873×10^{-4}	
		25		0.260×10^{-4}	
	90	12,2	-	0.630×10^{-4}	-
		20		0.505×10^{-4}	
		25		0.512×10^{-5}	

Tabela 9: Deformações no pavimento dimensionado pelo método PMSP considerando temperatura do ar máximas nas cidades consideradas

Camadas	Velocidade (km/h)	Temperatura (°C)	Deformação de tração (μdef)	Deformação vertical (μdef)	Deflexão
Revestimento	10	30,3	0.991×10^{-3}	-	0.580×10^{-1}
		41	0.107×10^{-2}		0.733×10^{-1}
		43	0.203×10^{-2}		0.628×10^{-1}
	90	30,3	0.496×10^{-3}	-	0.547×10^{-1}
		41	0.929×10^{-3}		0.576×10^{-1}
		43	0.102×10^{-2}		0.582×10^{-1}
Subleito	10	30,3	-	0.504×10^{-3}	-
		41		0.470×10^{-3}	
		43		0.522×10^{-3}	
	90	30,3	-	0.145×10^{-3}	-
		41		0.139×10^{-3}	
		43		0.131×10^{-3}	

3.3 PREVISÃO DA VIDA ÚTIL DO PAVIMENTO

Para prever a vida de útil (vida de fadiga) da estrutura dimensionada, considerando os diferentes locais de aplicação do pavimento (São Paulo, Campos do Jordão, São José do Rio Preto) e suas respectivas temperaturas de serviço, , foram utilizados modelos de fadiga pesquisados na literatura, que são equações que possibilitam calcular o número N admissível (número de repetições de carregamento do eixo padrão admissível) durante o período de projeto, por meio das tensões e deformações obtidas nas simulações realizadas com o programa Elsym5.

Modelo de fadiga da PMSP

$$N = 6,64 \times 10^{-7} \times (1)^{2,93} \epsilon t$$

Em que:

N é o número de repetições do eixo padrão de 80kN; ϵt é a deformação de tração na mistura.

Modelo do Asphalt Institute (EUA)

$$N = 1,365 \times 10^{-9} \times \epsilon v^{-4,477}$$

Em que:

N = número de repetições admissíveis para fadiga da camada estabilizada; ϵv = Deformação vertical atuante no subleito.

Para que seja calculado o número N admissível, foram utilizados os modelos da PMSP e do *Asphalt Institute*, para isso as análises foram realizadas considerando os dois critérios de ruptura que podem ocorrer em um pavimento flexível: tração na fibra inferior do revestimento e deformação de compressão vertical no subleito, os resultados estão representados na Tabela 7.

Tabela 10: Número de repetições máximas previstas

Temperatura	Temperatura	Velocidade	ϵt	N	ϵv	N
Campos do Jordão	12,2	10	0.128×10^{-3}	$1,69 \times 10^5$	0.117×10^{-3}	$5,47 \times 10^8$
	22,5		0.710×10^{-3}	$1,12 \times 10^3$	0.147×10^{-3}	$1,97 \times 10^8$
	30,3		0.991×10^{-3}	$4,2 \times 10^2$	0.504×10^{-3}	$7,91 \times 10^5$
	12,2	90	0.327×10^{-4}	$9,22 \times 10^6$	0.630×10^{-4}	$8,74 \times 10^9$
	22,5		0.259×10^{-3}	$2,14 \times 10^4$	0.128×10^{-3}	$3,66 \times 10^8$
	30,3		0.496×10^{-3}	$3,19 \times 10^3$	0.145×10^{-3}	$2,09 \times 10^8$
São Paulo	20	10	0.416×10^{-3}	$5,35 \times 10^3$	0.873×10^{-4}	$2,03 \times 10^9$
	31,4		0.184×10^{-2}	$6,8 \times 10^2$	0.147×10^{-3}	$1,97 \times 10^8$
	41		0.107×10^{-2}	$3,35 \times 10^2$	0.470×10^{-3}	$1,08 \times 10^6$
	20	90	0.196×10^{-3}	$4,85 \times 10^4$	0.505×10^{-4}	$2,35 \times 10^{10}$
	31,4		0.534×10^{-3}	$2,57 \times 10^3$	0.934×10^{-4}	$1,50 \times 10^9$
	41		0.929×10^{-3}	$5,08 \times 10^2$	0.139×10^{-3}	$2,53 \times 10^8$
São José do Rio Preto	25	10	0.666×10^{-3}	$1,35 \times 10^3$	0.260×10^{-4}	$4,59 \times 10^{11}$
	37		0.149×10^{-2}	$1,27 \times 10^2$	0.323×10^{-3}	$5,80 \times 10^6$
	43		0.203×10^{-2}	$5,14 \times 10^1$	0.522×10^{-3}	$6,76 \times 10^5$
	25	90	0.328×10^{-3}	$1,07 \times 10^4$	0.512×10^{-5}	$6,63 \times 10^{14}$
	37		0.751×10^{-3}	$9,47 \times 10^2$	0.122×10^{-3}	$4,53 \times 10^8$
	43		0.102×10^{-2}	$3,86 \times 10^2$	0.131×10^{-3}	$3,30 \times 10^8$

Como pode-se observar na Tabela 10, quando ocorre o aumento de temperatura, o número N diminui, ou seja, a resistência diminui e quando se aumenta a velocidade o

mesmo aumenta, indicando uma resistência maior. Onde o número N for menor que 2×10^7 significa que haverá ruptura, já que o valor para N_{adotado} foi 2×10^7 .

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho identifica que os dois fatores analisados, temperatura e velocidade, influem na vida útil do pavimento. Segunda a análise realizada quanto mais elevada a temperatura das camadas, menor o módulo de resiliência, e quanto menor a velocidade de operação dos veículos passantes na via maior será a carga sobre o pavimento, portanto os termos analisados podem levar a estrutura à diversas formas de ruptura, como por tração no revestimento e deformação de compressão vertical no subleito.

Por fim chegamos a conclusão que é necessário um método de dimensionamento que leve em conta o fator temperatura e velocidade, para que o pavimento seja dimensionado adequadamente, evitando fissuras e rompimentos, gerando economia em restaurações e maior segurança aos usuários.

5. REFERÊNCIAS

AUSTROADS. Guide to Pavement Technology Part 2: Pavement Structural Design. AGPT02-12. Sidney, 2012.

BERNUCCI, L.B. et al. **Pavimentação asfáltica**: formação básica para engenheiros. Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA, 2007. 501p.

BALBO, J.T. **Pavimentação asfáltica**: materiais, projeto e restauração. São Paulo: Oficina de Textos, 2007. 558p.

DAIBERT, R.F. Influencia da temperatura e velocidade de operação no dimensionamento de pavimentos asfálticos de corredores de ônibus. 2014. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2014.

SUZUKI, C.Y.; DAIBERT, R.F. Análise paramétrica da influência da temperatura e velocidade de operação no dimensionamento de pavimentos asfálticos para tráfego pesado.

In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 44; ENACOR, 18, Foz do Iguaçu, 2015. **Anais**. Paraná: ABPv, 2015. 1 CD-ROM.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. **Norma DNIT 031/2006 – ES: Pavimentos Flexíveis – Concreto Asfáltico – Especificação de Serviço**. Rio de Janeiro, 2006.

DE SENÇO, W. et al. **Manual de técnicas de pavimentação – volume I**. São Paulo, 1997. 746p

SUZUKI, C.Y. Contribuição ao estudo de pavimentos rodoviários com estrutura invertida (sub-base cimentada). 1992. 436 f. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1992.

IP-05/2004 DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS TRÁFEGO MEIO PESADO. PEADO, MUITO PESADO E FAIXA EXCLUSIVA DE ÔNIBUS.

CIIAGRO – Centro integrado de informações agrometeorológicas. Disponível em: <<http://www.ciiagro.sp.gov.br/ciiagroonline/Quadros/QTmedPeriodo.asp>>. Acesso em: 10 fev.2017.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Universidade Presbiteriana Mackenzie (UPM), a Diretoria de Engenharia da UPM, ao Departamento de Engenharia Civil da UPM, ao Raphael Daibert.

CONTATOS: biancammerighi@outlook.com, patricia.silva1@mackenzie.com