

EFEITO DO TRÁFEGO NO DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS UTILIZANDO DADOS DE PEDÁGIO

Rafael Vicente Mota

Mariana Bosso

Iuri Sidney Bessa

Kamilla Vasconcelos

Liedi Légi Bariani Bernucci

Universidade de São Paulo

Escola Politécnica

RESUMO

Devido à relevância do tráfego e à complexidade de estudar a interação dos diversos tipos de veículos com o pavimento, este trabalho objetivou avaliar o efeito das diferentes considerações acerca de dados de pedágio na caracterização do tráfego e no dimensionamento de pavimentos asfálticos. Foram estabelecidas para tal quatro combinações de caminhões, seguindo a categorização do pedágio, e calculou-se o número de repetições de solicitações do eixo padrão (número N). Em seguida, as solicitações foram projetadas para um período de 15 anos e comparadas, obtendo-se uma diferença maior que 100%. Por fim, dimensionaram-se diferentes pavimentos para verificar quais estruturas suportam os N obtidos. Como resultado, observou-se que há distinção na espessura na camada de revestimento das estruturas para as diferentes considerações feitas. Concluiu-se que a caracterização do tráfego, utilizando dados de pedágio, pode acarretar em considerações distintas, e que a contagem classificatória de veículos é essencial para a correta categorização.

ABSTRACT

Due to the traffic relevance and the complexity of studying the interaction of different types of vehicles with the pavement, this study aimed to evaluate the effect of different considerations about toll data in the traffic characterization and in the asphalt pavement design. In order to do this, four trucks combinations were established following the toll plaza characterization, and the number of equivalent single axle loads (ESALs) were calculated. Then, the solicitations were projected to a period of 15 years and compared, getting a difference higher than 100%. Then, different pavements were designed to verify which structures sustain the number of ESALs calculated. As a result, a distinction in the asphalt layer thickness were observed for the different considerations made. In conclusion, the traffic characterization using toll data may lead to distinct considerations, and the vehicle classificatory counting is essential to a correct categorization.

1. INTRODUÇÃO

O modo rodoviário é o principal meio de transporte de carga presente no Brasil e está associado à mudança da capital do país para a região Centro-Oeste e à política de expansão da indústria automobilística durante a segunda metade do século XX (Schroeder e Castro, 1996). De acordo com a Confederação Nacional do Transporte (CNT, 2018), 61,1% das cargas transportadas no país ocorrem pelas estradas brasileiras. Dessa forma, é de vital importância que a malha pavimentada apresente desempenho adequado aos seus usuários, fornecendo-os segurança, conforto e minimizando os danos causados aos veículos que por ela transitam.

O processo de deterioração dos pavimentos é função dos materiais que os constituem, das espessuras das camadas e da concepção da estrutura do pavimento, da solicitação do tráfego e dos fatores ambientais. O estudo da interação do veículo com o pavimento é complexo, pois os caminhões não geram os mesmos esforços no pavimento em cada passagem. Isso ocorre em virtude da heterogeneidade dos tipos de veículos, da composição de eixos, das cargas nos eixos, da pressão de contato do pneu com o pavimento, da velocidade do veículo, da frequência de carregamento, etc.

O bom desempenho de um pavimento depende, dentre outros fatores, da metodologia de

dimensionamento aplicada para seu projeto. Nessa etapa, é necessário o conhecimento realista das solicitações atuantes na rodovia, já que a carga aplicada pelo tráfego é, portanto, um dos principais fatores responsáveis pela deterioração dos pavimentos durante sua vida útil (Adlinge e Gupta, 2013). Nesse sentido, busca-se caracterizar corretamente o tráfego para dimensionar um pavimento que resista às solicitações durante sua vida útil e que reduza a necessidade de manutenção e, conseqüentemente, de investimentos.

A consideração equivocada do tráfego pode levar a um projeto de pavimento que não corresponde com a realidade, resultando na capacidade de suporte da estrutura de pavimento ser inferior ou superior ao que foi estipulado em projeto, o que gera redução na vida útil ou aumento no custo da estrutura, respectivamente. O objetivo deste estudo é, portanto, avaliar a consideração do tráfego no dimensionamento de pavimentos asfálticos. Para isso, serão utilizados dados de uma praça de pedágio de uma rodovia concessionada para a determinação da solicitação de tráfego, efetuando diferentes combinações de veículos e, posteriormente, serão dimensionadas estruturas correspondentes a cada uma dessas considerações.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Diversos pesquisadores têm investigado e constatado a influência das considerações do tráfego no dimensionamento e desempenho de pavimentos asfálticos. Cion *et al.* (2016) avaliaram a eficiência do processamento de dados de tráfego no dimensionamento e identificaram 10% de redução na espessura da camada asfáltica usando sistema de pesagem em movimento. Zhang *et al.* (2018) indicaram que o dimensionamento obtido utilizando fórmulas modificadas de equivalência de carga aumentam a espessura e resistência da estrutura de pavimento asfáltico. Ademais, índices de resumo de tráfego podem ser usados para relacionar o carregamento cumulativo de tráfego com o desempenho de pavimentos (Xiao e Wu, 2016).

2.1. Fatores de equivalência de carga e dimensionamento de pavimentos flexíveis

Uma estrutura de pavimento é dimensionada para resistir às solicitações impostas pelo tráfego e pelo meio ambiente ao longo de sua vida útil. O acúmulo das atuações das cargas influencia o processo de deterioração da estrutura. Desse modo, devido à diversidade dos eixos que trafegam no pavimento, o dano causado pelos diferentes tipos de veículos é convertido ao número equivalente de repetições de um eixo padrão com carga de 18.000 lb (80 kN) e 80 psi (552 kPa) de pressão de contato pneu/pavimento definido a partir de estudos pela *AASHTO Road Test*. O dano de um tipo ou de um conjunto de eixos é transformado no dano de um eixo padrão por meio do fator de equivalência de carga (FEC).

Pinto e Preussler (2002) discorrem que os fatores de equivalência de carga estabelecidos pela *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO) levam em consideração o tipo de pavimento (flexível ou rígido), a perda de serventia, o índice de serventia terminal e resistência da estrutura. Já os FECs preconizados pelo *United States Army Corps of Engineers* (USACE) são baseados no afundamento nas trilhas de roda gerado pelos efeitos das cargas na deformação permanente. Em ambos os casos, o FEC é, portanto, um valor utilizado para a determinação do número de repetições de solicitação do eixo-padrão (número N).

O dimensionamento de pavimentos pelo método empírico do DNIT, 2006, que republicou o método do extinto DNER, 1981, baseado no método original do DNER, 1966, faz uso do

número N de repetições do eixo padrão (de 80 kN) e do Índice de Suporte Califórnia (*California Bearing Ratio*, CBR) do subleito para a determinação das espessuras das camadas de pavimento. Este método foi concebido com base nos estudos realizados pelo USACE e pelas conclusões obtidas na *AASHO Road Test* (atual AASHTO).

A influência da AASHO nesta metodologia está presente no fator climático utilizado no cálculo do N e na existência dos coeficientes estruturais nas camadas do pavimento utilizados no dimensionamento. Dessa maneira, pelo método ainda vigente no Brasil, a espessura de cada uma das camadas que compõem um pavimento é dada em função dos seus respectivos valores de CBR e das características do tráfego solicitante, levando em consideração os coeficientes estruturais dos materiais (Carvalho, 1999 e Santos, 2011).

Com o avanço da tecnologia, mudanças significativas vêm sendo verificadas nos veículos rodoviários desde aqueles considerados em 1966 pelo DNER. Segundo Fernandes (1994), novas configurações de veículos de carga (veículos combinados longos), novos tipos de suspensão (suspensão pneumática), novos tipos de pneu e rodagem e o elevado volume de tráfego em contraste com o que vigorava há trinta anos trazem efeitos que não são avaliados por métodos de dimensionamento empíricos. Nesse contexto, os métodos mecanístico-empíricos que consistem em prever a deterioração da estrutura por meio das tensões, deformações e deflexões geradas pelas solicitações do tráfego se adequam melhor a essas mudanças.

Nesta abordagem, o comportamento mecanístico faz referência às respostas estruturais decorrentes das solicitações das cargas e o componente empírico remete às correlações desse efeito com o desempenho e a vida útil do pavimento por meio de modelos empíricos de deterioração (Carvalho e Schwartz, 2006).

2.2. Modelos de previsão de fadiga

O processo de fadiga dos materiais asfálticos consiste no dano gerado pela atuação das repetições do tráfego. Nesse sentido, os modelos de previsão de vida de fadiga determinam o número de repetições de carga até que ocorra o trincamento por fadiga em um nível previamente determinado, que normalmente é medido por meio da evolução da área trincada no pavimento.

Segundo Gonçalves (1999), os modelos mecanístico-empíricos de previsão de desempenho de pavimentos levam em conta a associação de três componentes essenciais: um modelo mecanístico para a determinação das respostas mecânicas da estrutura em termos de tensões e deformações, uma teoria que relaciona esse comportamento mecânico com a deterioração do pavimento e uma calibração que considera os fatores ambientais e as características específicas do tráfego.

Alguns modelos consideram a deformação específica de tração nos pontos críticos das camadas cimentadas e das asfálticas da estrutura de pavimento como critério de ruptura por fadiga, além das características elásticas das camadas que a compõe. Para a determinação destas deformações, estão disponíveis diversos softwares, sendo o Elsym5, concebido no *Institute of Transportation and Traffic Engineering* da *University of California*, um dos mais utilizados no Brasil. O programa possui como dados de entrada o carregamento atuante no pavimento (carga, posicionamento geométrico e pressão de pneus), os valores de espessura, o

módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson das camadas da estrutura. São definidas as coordenadas dos pontos em que se desejam as tensões, deformações e deslocamentos.

Assim sendo, para a previsão de fadiga muitos pesquisadores elaboraram modelos que relacionam a deformação de tração no fundo da camada de revestimento asfáltico com o número de repetições de carga do eixo padrão até trincamento de uma dada área da camada, conforme é mostrado na Equação 1.

$$N = k_1 \times \varepsilon_t^{-k_2} \quad (1)$$

em que N : número de repetições do eixo até a ruptura por fadiga;
 ε_t : deformação específica de tração no fundo da camada de revestimento asfáltico;
 k_1 e k_2 são coeficientes que variam de acordo com o modelo.

3. DADOS COLETADOS E METODOLOGIA

Para o presente trabalho, os dados utilizados para o cálculo do número N foram coletados na praça de pedágio da cidade de Vargem (SP), localizada na rodovia Fernão Dias (BR-381 Sul), no km 7,2. Essa coleta foi realizada por meio da contagem de veículos que passam pelo pedágio, estando eles divididos em categorias, de acordo com seu número de eixos.

A Tabela 1 ilustra a forma de categorização citada anteriormente, adaptada da tabela de tarifas da Autopista Fernão Dias do Grupo Arteris, concessionária responsável pela operação da rodovia. Consideraram-se para o cálculo do número N deste estudo apenas as categorias 2, 4, 6, 7 e 8, onde estão compreendidos os veículos comerciais, sendo esses os mais expressivos para o cálculo do número N .

Tabela 1: Categorização de veículos realizada na praça de pedágio (adaptado do site oficial da Autopista Fernão Dias)

| Categoria | Tipo de veículo | Rodagem |
|-----------|--|---|
| 1 | Automóvel, caminhonete e furgão |  |
| 2 | Caminhão leve, ônibus, caminhão-trator e furgão |  |
| 3 | Automóvel com semirreboque e caminhonete com semirreboque |  |
| 4 | Caminhão, caminhão-trator e caminhão-trator com semirreboque |  |
| 5 | Automóvel com reboque e caminhonete com reboque |  |
| 6 | Caminhão com reboque e caminhão-trator com semirreboque |  |
| 7 | Caminhão com reboque e caminhão-trator com semirreboque |  |
| 8 | Caminhão com reboque e caminhão-trator com semirreboque |  |
| 9 | Motocicletas, motonetas, bicicletas a motor e triciclos |  |

Como se observa na Tabela 1, não é considerado pelo pedágio a forma como os eixos de cada caminhão são agrupados e, além disso, as categorias do pedágio escolhidas fazem referência a caminhões de 2 até 6 eixos apenas. Dessa forma, buscou-se analisar os diferentes cenários resultantes das combinações dessas categorias para a obtenção de diferentes números N utilizando os fatores de equivalência de carga da USACE e da AASHTO. Para a determinação do número N e da sua taxa de crescimento anual foram utilizados os dados do volume diário médio (VDM) de veículos coletados na praça de pedágio mencionada, sentido Sul, durante os anos de 2014 a 2017. Os resultados estão resumidos na Tabela 2.

Tabela 2: Volume diário médio de veículos no sentido Sul, durante os 4 anos de coleta de dados

| Ano | VDM |
|------|--------|
| 2014 | 15.816 |
| 2015 | 15.706 |
| 2016 | 15.467 |
| 2017 | 16.047 |

Sendo assim, o número N de cada mês foi obtido através da seguinte expressão:

$$N = DM \times VDM \times FV \times F_f \times F_d \times F_s \quad (2)$$

em que N: número de repetições de solicitação do eixo padrão de um dado mês;

DM: número de dias no mês de análise;

VDM: volume diário médio de veículos no mês;

FV: fator veicular;

F_f: fator de frota, correspondendo o percentual de veículos comerciais em relação ao total;

F_d: fator de distribuição, em que se considerou que 85% dos veículos comerciais passam pela faixa mais solicitada. Esse valor foi verificado a partir de dados de tráfego do sistema *Weigh-In-Motion* (WIM) instalado próximo ao pedágio;

F_s: fator de sentido, considerado 1, uma vez que foram coletadas as informações somente no sentido de interesse (Sul), ou seja, Belo Horizonte para São Paulo.

Empregaram-se os fatores de equivalência de carga da USACE e da AASHTO para a determinação do fator veicular, pois embora o método da AASHTO seja amplamente utilizado nos projetos de restauração ou cálculo do reforço por alguns métodos nacionais no Brasil, para o emprego do método empírico do DNIT para cálculo de novas estruturas de pavimento utilizam-se os fatores da USACE. Cabe mencionar que os fatores de equivalência de carga consideram premissas de degradação diferentes, sendo a queda de serventia para a AASHTO versus a deformação permanente do subleito e camadas granulares constituintes para a USACE. As tabelas seguintes apresentam as equações estabelecidas por esses órgãos para a determinação do FEC em função da carga P aplicada.

Tabela 3: Equações dos Fatores de Equivalência de Carga do método da USACE (DNIT, 2006)

| Tipo de Eixo | Faixas de Cargas (tf) | Equações (P em tf) |
|--------------------|-----------------------|---------------------------------------|
| Eixo simples | < 8 | $FEC = 2,0782 * 10^{-4} * P^{4,0175}$ |
| | ≥ 8 | $FEC = 1,8320 * 10^{-6} * P^{6,2542}$ |
| Eixo tandem duplo | < 11 | $FEC = 1,5920 * 10^{-4} * P^{3,4720}$ |
| | ≥ 11 | $FEC = 1,5280 * 10^{-6} * P^{5,4840}$ |
| Eixo tandem triplo | < 18 | $FEC = 8,0359 * 10^{-5} * P^{3,3549}$ |
| | ≥ 18 | $FEC = 1,3229 * 10^{-7} * P^{5,5789}$ |

Tabela 4: Equações dos Fatores de Equivalência de Carga do método da AASHTO (DNIT, 2006)

| Tipo de Eixo | Equações (P em tf) |
|-------------------------------|---|
| Eixo simples de rodas simples | $FEC = \left(\frac{P}{7,77}\right)^{4,32}$ |
| Eixo simples de rodas duplas | $FEC = \left(\frac{P}{8,17}\right)^{4,32}$ |
| Eixo tandem duplo | $FEC = \left(\frac{P}{15,08}\right)^{4,14}$ |
| Eixo tandem triplo | $FEC = \left(\frac{P}{22,95}\right)^{4,22}$ |

Neste estudo, para o cálculo e comparação dos diferentes N, considerou-se que 100% dos veículos comerciais estavam com peso igual ao limite legal estabelecido pela resolução nº 210/06 do Conselho Nacional de Trânsito (CONTRAN), obtendo-se os fatores de equivalência de carga da Tabela 5. O número N calculado a partir da coleta de dados por 4 anos foi extrapolado e projetado para 15 anos.

Tabela 5: Fatores de Equivalência de Carga dos eixos no limite legal (a partir dos cálculos de FEC do DNIT, 2006)

| Tipo de Eixo | Carga (tf) | FEC (USACE) | FEC (AASHTO) |
|--------------|------------|-------------|--------------|
| ESRS | 6 | 0,278 | 0,327 |
| ESRD | 10 | 3,289 | 2,394 |
| ETD | 17 | 8,549 | 1,642 |
| ETT | 25,5 | 9,300 | 1,560 |

Com o intuito de determinar qual estrutura de pavimento suporta o N projetado obtido, foram utilizados modelos de previsão de vida de fadiga que relacionam a deformação específica de tração do fundo da camada de revestimento com o número de passagens do eixo padrão até o trincamento da camada por fadiga. Para tal, utilizou-se o software Elsym5 para calcular os valores de deformação horizontal no fundo da camada de revestimento, de acordo com a estrutura ilustrada na Figura 1.

Os valores do módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson de cada material foram retirados do estudo realizado por Andrade (2017) na rodovia Fernão Dias. Este estudo consistiu em um trecho experimental executado na faixa 2 (faixa carregada, utilizada por 85% dos veículos comerciais) do km 948 ao km 949 da rodovia, próximo ao local do pedágio. Escolheu-se analisar a estrutura do segmento 1, de 4 trechos existentes e construídos na mesma época, em que a camada de base era de brita graduada simples (BGS), por ser a única estrutura puramente flexível do estudo. Observa-se que os módulos foram obtidos por retroanálise de bacias de deflexão obtidas a cada 5 metros por emprego de FWD – *Falling Weight Deflectometer*. O módulo de resiliência baixo das bases pode ser explicado pela deficiência de compactação da mesma.

| | | | |
|--------------|--------------|---------------------|-----------------|
| CBUQ | 12 cm | E = 5004 MPa | v = 0,35 |
| BGS | 25 cm | E = 116 MPa | v = 0,45 |
| REMANESCENTE | | E = 147 MPa | v = 0,45 |

Figura 1: Seção de pavimento flexível utilizada no dimensionamento

A partir das saídas do programa, empregaram-se os modelos de previsão de vida de fadiga do *Asphalt Institute* (AI, 1976) e da *Federal Highway Administration* (FHWA, 1976), mais conhecidos e utilizados internacionalmente e que calculam o número de repetições de carga até a fadiga do revestimento segundo a metodologia da AASHTO. Os valores de k_1 e k_2 de cada modelo aplicados na Equação 1 foram retirados da norma do Departamento de Estradas de Rodagem de São Paulo (DER-SP, 2006), que fez algumas simplificações na determinação dos coeficientes. Estão representados na Tabela 6.

Tabela 6: Coeficiente dos modelos de previsão de fadiga para deformação de tração em misturas asfálticas (DER-SP, 2006)

| Autor | Ano | k_1 | k_2 |
|---------------------------------------|------|----------|-------|
| <i>Federal Highway Administration</i> | 1976 | 1,09E-06 | 3,512 |
| <i>Asphalt Institute</i> | 1976 | 2,96E-05 | 3,291 |

4. RESULTADOS

Para a definição dos cenários a serem analisados, listaram-se as possíveis categorias de veículos com até 6 eixos utilizando o Quadro de Fabricante de Veículos do DNIT (2012). Cada uma possui uma composição de eixos (com rodagem simples ou dupla) e uma forma específica de como estes eixos são agrupados (eixo simples, tandem duplo ou tandem triplo). Além disso, para a determinação do N, cada categoria apresenta um FEC diferente correspondente à sua configuração de eixos.

Após a listagem das diversas categorias, escolheram-se quatro diferentes combinações para se calcular o N, sendo duas delas com os maiores FECs para os métodos da AASHTO (Tabela 7) e da USACE (Tabela 8) e as outras duas com os menores FECs para os mesmos métodos (Tabelas 9 e 10, respectivamente). Assim, as tabelas seguintes apresentam as diferentes combinações de eixos, como também as categorias que as compõem e seus respectivos fatores de equivalência de carga.

Tabela 7: Combinação 1 – Maior FEC total pela AASHTO

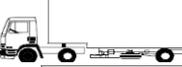
| Nº de Eixos | Categoria do DNIT | Configuração | FEC |
|-------------|-------------------------|--|-------|
| 2 | 2C/2CB |  | 2,722 |
| 3 | 2S1/2B1 |  | 5,116 |
| 4 | 2I2/2C2/2DL/2BI/2RB/2BB |  | 7,511 |
| 5 | 2I3/2N3 |  | 9,905 |
| 6 | 2N4/2J4/2L4/3I3/3N3 |  | 9,153 |

Tabela 8: Combinação 2 – Maior FEC total pela USACE

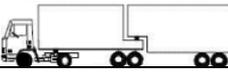
| Nº de Eixos | Categoria do DNIT | Configuração | FEC |
|-------------|-------------------------|--|--------|
| 2 | 2C/2CB |  | 3,567 |
| 3 | 3C/3BC |  | 8,827 |
| 4 | 2S2/3S1/3D1/3B1 |  | 12,116 |
| 5 | 3S2 |  | 17,376 |
| 6 | 2R4/2D4/3I1/3C3/3JD/3LD |  | 20,665 |

Tabela 9: Combinação 3 – Menor FEC total pela AASHTO

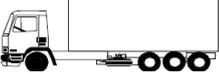
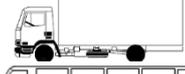
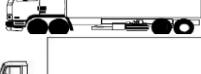
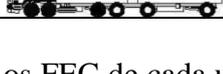
| Nº de Eixos | Categoria do DNIT | Configuração | FEC |
|-------------|-------------------|--|-------|
| 2 | 2CC/2BC |  | 0,655 |
| 3 | 3C/3BC |  | 1,970 |
| 4 | 4C |  | 1,887 |
| 5 | 3S2 |  | 3,612 |
| 6 | 3S3 |  | 3,530 |

Tabela 10: Combinação 4 – Menor FEC total pela USACE

| Nº de Eixos | Categoria do DNIT | Configuração | FEC |
|-------------|-------------------|--|--------|
| 2 | 2CC/2BC |  | 0,556 |
| 3 | 3DB |  | 3,845 |
| 4 | 4DD/4DC/4CB/4BD |  | 4,123 |
| 5 | 4D1 |  | 7,413 |
| 6 | 4ID/42D |  | 10,702 |

Utilizando os dados de pedágio coletados e aplicando os FEC de cada um dos quatro cenários apresentados acima, foram obtidos os números de repetições do eixo padrão para cada mês de análise com início em janeiro de 2014 e término em dezembro de 2017. A Figura 2 ilustra os resultados obtidos com essa análise.

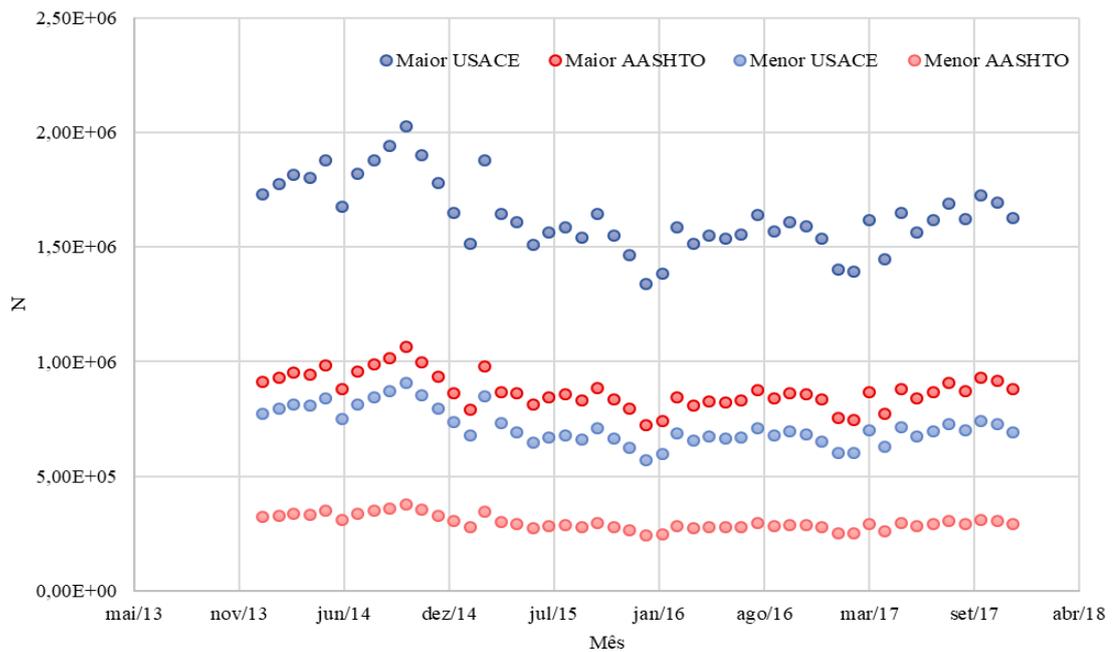


Figura 2: N mensal calculado das diferentes combinações de 2014 a 2017

Analisando a figura, é possível perceber a diferença entre os valores de N que se obtêm apenas fazendo diferentes considerações sobre o tipo de caminhão contabilizado no cálculo, sendo essa diferença presente em ambos os métodos apresentados. Com o objetivo de estabelecer uma taxa de crescimento para o N mensal obtido e, por meio dele, estimar um N projeto de 15 anos, elaborou-se a Figura 3, que apresenta o N mensal acumulado dos 4 anos de análise para cada combinação em função do tempo.

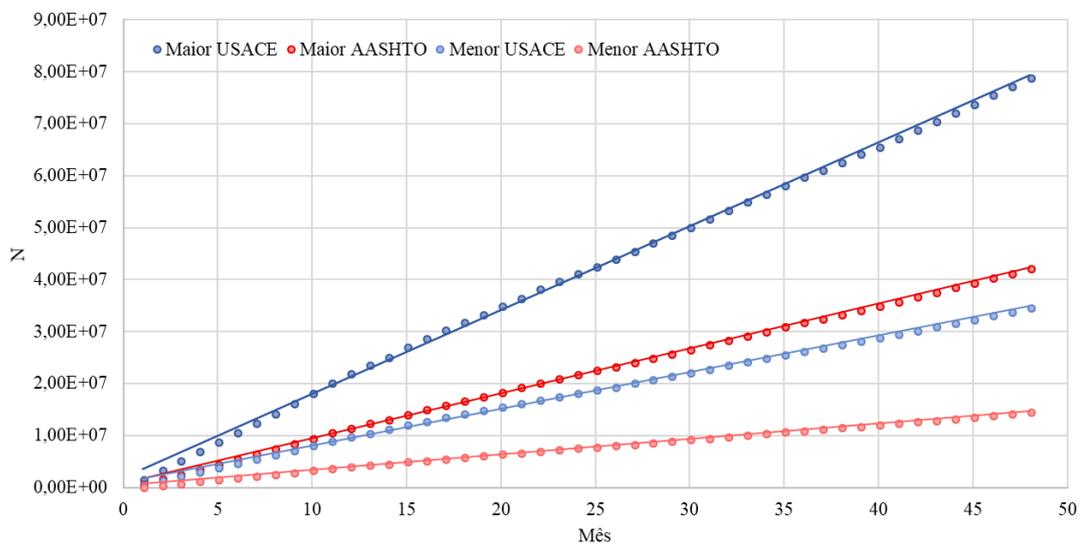


Figura 3: N mensal acumulado das diferentes combinações utilizando os dados registrados de 2014 a 2017

A estimativa para os 15 anos de projeto foi obtida a partir da extrapolação dos dados apresentados na Figura 3, em que foram utilizadas as equações das linhas de tendência

lineares para obtenção dos diferentes N. O resultado disso gerou a Tabela 11 que apresenta os valores projetados para cada uma das combinações.

Tabela 11: N projeto de 15 anos e diferença entre as combinações em ambos os métodos

| Combinação | N_{15} | Diferença | % |
|--------------|----------|-----------|-----|
| Maior USACE | 2,92E+08 | 1,64E+08 | 128 |
| Menor USACE | 1,28E+08 | | |
| Maior AASHTO | 1,56E+08 | 1,02E+08 | 188 |
| Menor AASHTO | 5,43E+07 | | |

Conforme observa-se na Tabela 11, a diferença entre os N projetados para 15 anos é muito alta em ambos os métodos, sendo maior que 100%. Nesse contexto, essa disparidade acarreta em diferentes dimensionamentos de pavimentos e, conseqüentemente, as estruturas responderão de formas distintas quando sujeitas à solicitação das cargas, podendo perder seu desempenho antes do esperado.

Para ilustrar o efeito da consideração do tráfego, compararam-se os valores projetados da AASHTO com os N_f calculados pelo modelo de previsão de fadiga do AI e do FHWA (conforme a norma do DER-SP, 2006). Cada N_f foi obtido através da deformação específica de tração no fundo do revestimento calculada no programa Elsym5. A Tabela 12 apresenta as deformações horizontais de tração obtidas e os N_f calculados pelos dois modelos considerados.

Tabela 22: N_f resultantes das estruturas dimensionadas

| Espessura do revestimento (cm) | ϵ_t (fundo rev.) | N_f (<i>Federal Highway Administration, 1976</i>) | N_f (<i>Asphalt Institute, 1976</i>) |
|--------------------------------|---------------------------|---|--|
| 12 | 1,96E-04 | 1,15E+07 | 4,72E+07 |
| 13 | 1,50E-04 | 2,94E+07 | 1,14E+08 |
| 14 | 1,15E-04 | 7,47E+07 | 2,73E+08 |
| 15 | 8,93E-05 | 1,81E+08 | 6,27E+08 |

Comparando os valores da tabela com os projetados anteriormente, verificou-se que, para o maior N_{15} da AASHTO (1,56E+08), a estrutura que suporta esse tráfego necessita de uma camada de revestimento com 15 e 14 cm de espessura conforme os modelos de previsão do FHWA e do AI, respectivamente. Por outro lado, a estrutura que resiste às solicitações do menor N_{15} projetado pela AASHTO (5,43E+07) carece de uma espessura mínima de revestimento igual a 14 e 13 cm, segundo os mesmos modelos, respectivamente. Desse modo, há uma distinção, em ambos os modelos, de 1 cm de espessura entre as diferentes considerações feitas em relação aos dados do pedágio.

O efeito gerado pelo acréscimo de 1 cm na espessura de um revestimento em CBUQ não se limita ao maior suporte às solicitações de carga. Um outro fator que é influenciado por essa diferença é o custo da obra. Segundo a Tabela de Preços Unitários do DER-SP, uma camada de rolamento em CBUQ (graduação C) custa 927,33 reais por metro cúbico (dados de março de 2018). Considerando 1 km de uma rodovia com largura de faixa de 3,6 metros, a execução de 1 cm de espessura equivale a um preço de R\$ 33.383,88/km.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo buscou avaliar o efeito das diferentes considerações referentes aos dados da praça de pedágio na determinação do tráfego (número N) e no dimensionamento de pavimentos asfálticos. Observou-se que o número N de solicitações de carga projetado para 15 anos diferiu muito nas combinações feitas em ambos os métodos utilizados, USACE e AASHTO, devido às diferentes premissas de deterioração adotado por cada um dos órgãos.

O resultado permitiu verificar que diferentes considerações de tráfego feitas apenas com base nos dados do pedágio acarretam em estruturas distintas de pavimento. Da mesma maneira que uma dada estrutura é projetada para suportar um número de solicitações de cargas, a variação desse número leva a respostas estruturais que podem comprometer o desempenho esperado. Considerações equivocadas do tráfego resultam no sub ou superdimensionamento de um pavimento. No primeiro caso, o processo de deterioração da estrutura será acelerado e, por conseguinte, diminuirá seu desempenho durante a vida útil. Por outro lado, no segundo caso haverá uso de recursos em demasia, aumentando o custo de construção do pavimento sem que haja necessidade para isso.

Por fim, conclui-se que não é possível realizar um dimensionamento apenas com dados de pedágio. A categorização dos veículos a partir de contagens volumétricas e preferencialmente com o conhecimento das cargas nos eixos são essenciais para corretamente determinação do tráfego atuante. Visto que diferentes categorias de veículos degradam o pavimento de maneiras distintas, a informação das categorias para a caracterização do tráfego mais próximo à realidade é crucial para um bom dimensionamento da estrutura do pavimento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adlinge, S. S. e A. K. Gupta (2013) Pavement Deterioration And Its Causes. *International Journal of Innovative Research & Development*, v. 2, p. 437-450.
- Andrade, L. R. (2017) *Comparação do comportamento de pavimentos asfálticos com camadas de base granular, trata com cimento e com estabilizantes asfálticos para tráfego muito pesado*. Universidade de São Paulo. SP, São Paulo.
- Carvalho, M. V. G. S. A. (1999) *Uma análise crítica de alguns processos empíricos de dimensionamento de pavimentos flexíveis*. Universidade Estadual de Campinas. SP, Campinas.
- Carvalho, R. L. e C. W. Schwartz (2006) Comparisons of flexible pavement designs: AASHTO empirical vs. NCHRP 1-37A mechanistic-empirical. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. TRB 2006 Annual Meeting CD-ROM*. Washington, D. C.
- Ciont, N.; M. Iliescu e R. D. Cadar (2016) Employing a Traffic Data Processing Software to Efficiently Design Road Pavements. 10th International Conference Interdisciplinarity in Engineering, INTER-ENG 2016.
- CNT (2018) *Boletim Estatístico*. Confederação Nacional Dos Transportes. DF, Brasília.
- CONTRAN (2006) *Resolução nº 210 de 13 de novembro de 2006*. Conselho Nacional De Trânsito. DF, Brasília
- DER-SP (2006) *IP-DE-P00/001: Projeto de Pavimentação*. Departamento de Estradas de Rodagem de São Paulo. SP, São Paulo.
- DER-SP (2018) *Tabela de Preços Unitários*. Departamento de Estradas de Rodagem de São Paulo. SP, São Paulo.
- DNIT (2006) *Manual de Estudo de Tráfego*. Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR Publ., 723). RJ, Rio de Janeiro.
- DNIT (2012) *Quadro de Fabricante de Veículos*. Diretoria de Infraestrutura Rodoviária. RJ, Rio de Janeiro.
- Fernandes, J. L. J. (1994) *Investigação dos efeitos das solicitações do tráfego sobre o desempenho de pavimentos*. Universidade de São Paulo. SP, São Carlos.
- Gonçalves, F. P. (1999) *O Desempenho dos Pavimentos Flexíveis*. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. RS, Porto Alegre.
- Pinto, S. e E. Preussler (2002) *Pavimentação rodoviária – conceitos fundamentais sobre pavimentos flexíveis*. Copiarte. RJ, Rio de Janeiro.
- Santos, C. R. G. (2011) *Dimensionamento e análise do ciclo de vida de pavimentos rodoviários: uma*

- abordagem probabilística*. Universidade de São Paulo. SP, São Paulo.
- Schroeder, E. M. e J. C. Castro (1996) *Transporte Rodoviário de Carga: Situação Atual e Perspectivas*. Revista do BNDES.
- Xiao, D. X. e Z. Wu (2016) Using systematic indices to relate traffic load spectra to pavement performance. *International Journal of Pavement Research and Technology* 9 (2016) 302–312.
- Zhang, H.; M. Gong e T. Yu (2017) Modification and application of axle load conversion formula to determine traffic volume in pavement design. *International Journal of Pavement Research and Technology*.

Rafael Vicente Mota (rafael.vicente.mota@usp.br)

Mariana Bosso (mariana.bosso@usp.br)

Iuri Sidney Bessa (iuribessa@usp.br)

Kamilla Vasconcelos (kamilla.vasconcelos@usp.br)

Liedi Légi Bariani Bernucci (liedi@usp.br)

Departamento de Engenharia de Transportes, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo
Av. Professor Almeida Prado, Travessa 2, No. 83 – São Paulo, SP, Brasil