

ANÁLISE DO EFEITO DO EXCESSO DE CARGA DE VEÍCULOS COMERCIAIS NOS FATORES DE EQUIVALÊNCIA DE CARGA

Flaviane Melo Lopes Vallejo

Liedi Légi Bariani Bernucci

Universidade de São Paulo

RESUMO

O tráfego é o elemento de maior relevância no dimensionamento dos pavimentos, ou seja, sua determinação é de vital importância para garantir a vida útil do pavimento. A alteração dos percentuais de tolerância sobre os limites de peso por eixo, em meados de julho de 2014 de 7,5% para 10%, é analisada para verificar o impacto na vida útil do pavimento. A partir de dados reais de pesagem de um posto de fiscalização foi verificado o comportamento do usuário frente a mudança da legislação brasileira. O aumento na quantidade de veículos sobrecarregados é constatado e a tendência identifica que a tolerância está sendo incorporada às cargas úteis dos veículos.

ABSTRACT

Traffic is the most important parameter in the pavement design and its determination is vital in order to guarantee the pavement useful life. The tolerance percentages change on axle weight limits in July of 2014 from 7.5% to 10% is analyzed to check the impact on the pavement useful life. From the actual weighing data of a control station, the behavior of the user due the change of the Brazilian legislation was verified. The increase on the amount of overloaded vehicles is found and the trend identifies that the tolerance is being incorporated into the vehicles payloads.

1. INTRODUÇÃO

Tradicionalmente, o dimensionamento de um pavimento asfáltico é feito em função da capacidade de suporte do subleito e do número equivalente de operações de um eixo padrão para um período de projeto pré-estabelecido. A caracterização do tráfego para determinação do número N é de vital importância para garantir a vida útil do pavimento.

Segundo Huang (2004), o tráfego é o elemento de maior relevância no dimensionamento dos pavimentos. Devendo incluir tanto a magnitude da carga, como a configuração dos tipos de eixos e número de repetições de carga.

O Peso Bruto Total (PBT) de um veículo é considerado, de acordo com DNIT (2006a), aquele proveniente da somatória da tara e da carga deste, sendo o Peso Bruto Total Combinado (PBTC) aquele resultante da soma dos pesos brutos das unidades que compõem o veículo. Seus valores máximos legais são aqueles estabelecidos pelo regulamento do Código Nacional de Trânsito (CTB).

Fernandes Junior (1994) destaca que não existe uma relação exclusivamente direta do PBTC e o desempenho do pavimento, ou seja, a deterioração está ligada à carga por eixo e não por veículos. Mesmo um veículo exageradamente carregado pode não ser o mais danoso ao pavimento, desde que a carga esteja distribuída adequadamente entre os eixos constituintes do veículo.

Hussain e Parker (2006) demonstram que o desempenho está relacionado à distribuição de cargas por eixo, sendo que os veículos com 2 eixos danificam mais que os veículos de 3 a 5 eixos, quando carregados no limite da lei.

A legislação brasileira referente às limitações das cargas rodoviárias no CTB, que entrou em vigor em 22 de janeiro de 1998, estabelece as normas de conduta, infrações e penalidades aos usuários e define as atribuições dos órgãos e autoridades do trânsito. O Artigo nº 99 do CTB estabelece que somente poderá transitar pelas vias terrestres os veículos cujo peso e dimensões atenderem aos limites estabelecidos pelo Conselho Nacional de Trânsito (CONTRAN).

A Resolução nº 489 do CONTRAN, de 05/06/2014, alterou os artigos 5º e 9º da Resolução nº 258, de 30/11/2007 também do CONTRAN, na qual fixa metodologia de aferição de peso de veículos, estabelecendo percentuais de tolerância e dá outras providências. O artigo 5º passou a admitir a tolerância de 5% ao PBT e de 10% sobre os limites de pesos regulamentares por eixo, no qual era de 7,5%.

A Resolução nº 526 do CONTRAN, de 29/04/2015, altera novamente o artigo 5º que passa a vigorar com a redação: “Na fiscalização de peso dos veículos por balança rodoviária serão admitidas as seguintes tolerâncias:

I – 5% (cinco por cento) sobre os limites de pesos regulamentares para o peso bruto total (PBT) e peso bruto total combinado (PBTC);

II – 10% (dez por cento) sobre os limites de peso regulamentares por eixo de veículos transmitidos à superfície das vias públicas.

Parágrafo Único. No carregamento dos veículos, a tolerância máxima prevista neste artigo não pode ser incorporada aos limites de peso previstos em regulamentação fixada pelo CONTRAN.”

Diante da alteração dos percentuais de tolerância sobre os limites de peso por eixo em meados de julho de 2014 de 7,5% para 10% e do conhecimento da influência do carregamento no desempenho da estrutura de pavimento, este trabalho apresenta uma análise de dados reais de pesagem de um posto de fiscalização para verificar o comportamento do usuário frente a mudança da legislação brasileira e verificar o impacto desse aumento de tolerância na vida útil do pavimento.

2. CÁLCULO DO FATOR DE EQUIVALÊNCIA DE CARGA

Definiu-se, a partir dos estudos desenvolvidos pela *AASHO Road Test* (Pistas de Testes da *American Association of State Highway Officials*) nos Estados Unidos, no final dos anos 1950, como eixo padrão um eixo simples de rodas duplas com carga de 80 kN (8,2 tf) e 552 kPa (80 psi) de pressão de inflação dos pneus.

A AASHO avaliou o dano aos pavimentos nas pistas de teste que ela monitorou modificando a carga sobre os eixos dos caminhões e também as configurações de eixos. Os caminhões passavam n vezes sobre o pavimento e após várias solicitações foram sendo determinados os tipos e severidade dos danos causados. Assim, a razão entre peso dos eixos dos veículos comerciais e seu dano aos pavimentos foi estabelecida. Nestes experimentos da AASHO o dano ao pavimento segue a lei da potência 4, resultante de uma alteração da carga em relação ao padrão, ou seja, concluiu que o aumento do dano causado por um aumento de carga não é linear, mas sim exponencial.

Os efeitos destrutivos de cargas quaisquer por eixo sobre pavimentos podem ser referidos, comparativamente, ao provocado por um determinado número de passagens do eixo padrão.

Pode-se relacionar cada tipo de eixo ou conjunto de eixos ao eixo padrão através do Fator de Equivalência de Cargas (FEC). O FEC é um número que expressa a “destruição” que um eixo com uma determinada carga causa em um pavimento em comparação com o eixo padrão (8,2 tf), que por sua vez é definido como causador de um dano unitário. Ou seja, um eixo simples de rodas duplas (ESRD) carregado cujo FEC é 1,2 causa um dano 20% superior, em relação ao dano causado pela passagem de um eixo padrão.

Como foi citado anteriormente, os estudos desenvolvidos pela AASHTO (*American Association of State Highway and Transportation Officials*, antiga AASHO) indicam que o FEC varia entre outros fatores, em função da carga por eixo, segundo uma relação elevada a expoentes próximos de 4 (quatro). Outras organizações, como o USACE (*United States Army Corps of Engineers*), adotam expoentes ainda maiores. A expressão a seguir mostra a relação entre as cargas nos eixos e os danos (ou FEC) causados:

$$FEC_i = \left(\frac{W_i}{W_p} \right)^b = \left(\frac{N_0}{N_i} \right) \quad (1)$$

em que

W_i : carga por eixo genérica;

W_p : carga por eixo tomada como padrão 80 kN;

b : expoente, definido pela AASHTO como próximo de 4,0 e pelo USACE como próximo de 6,0;

N_0 : número de repetições do eixo simples com carga padrão;

N_i : número de repetições do eixo e carga qualquer.

Caso queira se comparar o eixo carregado com a carga máxima legal de 10 tf com os eixos sobrecarregados, ou seja, com excesso de carga de 7,5%, verifica-se um dano ao pavimento 34% maior que o dano do eixo com a carga máxima legal considerando o expoente 4.

As instituições norte-americanas que estudaram os efeitos das cargas dos eixos nos pavimentos fizeram pesquisas para entenderem os efeitos dos eixos com diferentes configurações. Além do ESRD (Eixo Simples de Roda Dupla), trafega no Brasil, veículos também com outros três grupos de eixos: dianteiro ESRD (Eixo Simples de Roda Simples) e traseiros ETD (Eixo Tandem Duplo) e ETT (Eixo Tandem Triplo). A carga máxima legal no país para ETD é 17 tf e para os ETT é 25,5 tf, conforme empregado pelos projetistas no Brasil.

Na Figura 1 mostra-se os efeitos do excesso de carga em vários tipos de eixos de veículos que trafegam em uma via, tomando-se por base a vida útil de projeto de 10 anos considerada pelo projetista. Ou seja, se todos os veículos trafegassem com carga em seus eixos até a máxima legal, a vida útil do pavimento seria de 10 anos. O pavimento dura menos quando as cargas dos eixos que trafegam na via são maiores que as máximas legais consideradas normalmente pelos projetos. Observa-se por esta simulação de projeto que caso haja aumento de 10% de excesso de carga para os ETD ou para o ETT, a vida útil cai de 10 para menos de 6,75 anos.

O tráfego previsto para um pavimento é definido em função do número equivalente de operações do eixo padrão, durante o período de projeto. Esta quantidade ou repetições de passagens do eixo padrão é o chamado número N .

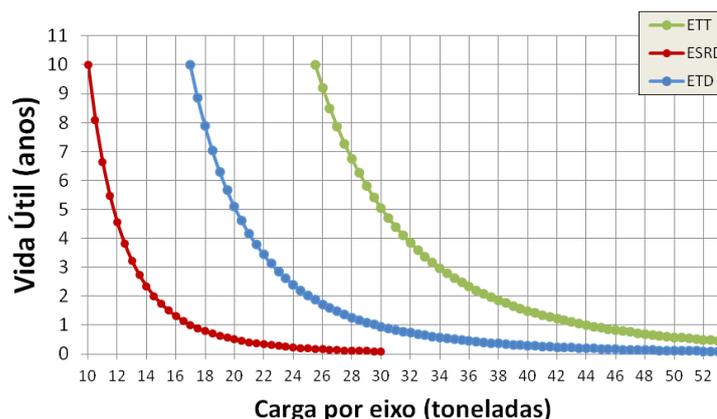


Figura 1: Redução de vida útil do pavimento inicial de 10 anos em projeto por causa do aumento de carga nos eixos dos veículos

No Brasil comumente são utilizados dois grupos de FEC para calcular o número N, as equações do USACE que levam em conta os efeitos do carregamento associados a deformação permanente nas trilhas de roda e as equações da AASHTO relacionadas à perda de serventia do pavimento.

Os adotados pelo DNIT, segundo o USACE, são os fatores do CE (Corpo dos Engenheiros), com origem no trabalho de Turnbull et al. (1962) para eixo simples e duplo. A referência do dano no pavimento é o afundamento plástico no subleito, considerado a 70 cm de profundidade (Pereira, 1985), tendo como limite o padrão de uma polegada de afundamento. Atualmente, os valores são fornecidos em forma de equações no manual de reabilitação de pavimentos asfálticos (DNIT, 2006b) e também em Pinto e Preussler (2002), conforme pode ser observado na Tabela 1.

Tabela 1: Valores do FEC adotados pelo DNIT (DNIT, 2006b)

| Tipo de Eixos | FEC - USACE | | FEC - AASHTO |
|---------------|-------------|---|---|
| | Cargas (tf) | Equações (P em tf) | Equações (P em tf) |
| ESRS | 0 – 8,0 | $FEC = 2,0782 \times 10^{-4} \times P^{4,0175}$ | $FEC = \left(\frac{P}{7,77}\right)^{4,32}$ |
| | $\geq 8,0$ | $FEC = 1,8320 \times 10^{-6} \times P^{6,2542}$ | |
| ESRD | | | $FEC = \left(\frac{P}{8,17}\right)^{4,32}$ |
| ETD | 0 – 11,0 | $FEC = 1,5920 \times 10^{-4} \times P^{3,4720}$ | $FEC = \left(\frac{P}{15,08}\right)^{4,14}$ |
| | $\geq 11,0$ | $FEC = 1,5280 \times 10^{-6} \times P^{5,4840}$ | |
| ETT | 0 – 18,0 | $FEC = 8,0359 \times 10^{-5} \times P^{3,3549}$ | $FEC = \left(\frac{P}{22,95}\right)^{4,22}$ |
| | $\geq 18,0$ | $FEC = 1,3229 \times 10^{-7} \times P^{5,5789}$ | |

Os FEC que compõem o método de projeto DNER PRO 159/85 (1985), que quase sempre são chamados como da AASHTO, cujas expressões têm origens distintas são apresentados na Tabela 1. Os FEC da AASHTO baseiam-se na variação da perda de serventia (conforto ao rolamento), e também dependem do tipo de pavimento e do número estrutural (SN), que engloba o suporte do subleito. Na sua determinação foi adotado valor de SN igual a 5,0 e um

valor de serventia final igual a 2,5.

Em ambas as metodologias verifica-se que a relação entre a carga do eixo e o dano causado por este eixo é exponencial, ou seja, pequenos acréscimos de carga acarretam grandes aumentos nos FEC, tornando o eixo potencialmente mais destrutivo com excesso de carga. O FEC tem sido largamente utilizado como medida de desempenho estrutural de pavimentos porque, comparativamente, mede os efeitos que os excessos de carga por eixo provocam nos pavimentos.

Com o objetivo de ilustrar a diferença entre o cálculo dos FEC pelas duas metodologias, a Tabela 2 apresenta o cálculo dos FEC para três situações de carregamento de cada tipo de eixo, a saber: carga máxima legal (CML), CML mais 7,5% e CML mais 10%. Verifica-se que um aumento de 7,5% no valor da CML pode gerar um aumento no FEC variando entre 34% e 57% dependendo do eixo. E o aumento de 10% na CML conforme a lei da balança em vigor, pode gerar um aumento entre 47% e 82%.

Tabela 2: FEC para diferentes situações de carregamento

| Tipo de Eixo | Cargas (tf) | | | FEC USACE | | | FEC AASHTO | | |
|--------------|-------------|------------|-----------|-----------|---------------|---------------|------------|--------------|--------------|
| | CML | CML + 7,5% | CML + 10% | CML | CML + 7,5% | CML + 10% | CML | CML + 7,5% | CML + 10% |
| ESRS | 6,00 | 6,45 | 6,60 | 0,278 | 0,372 34% | 0,408 47% | 0,327 | 0,447 37% | 0,494 51% |
| ESRD | 10,00 | 10,75 | 11,00 | 3,289 | 5,171 57% | 5,970 82% | 2,394 | 3,273 37% | 3,614 51% |
| ETD | 17,00 | 18,28 | 18,70 | 8,549 | 12,710 49% | 14,418 69% | 1,642 | 2,216 35% | 2,437 48% |
| ETT | 25,50 | 27,41 | 28,05 | 9,300 | 13,922 50% | 15,827 70% | 1,560 | 2,117 36% | 2,332 50% |

As maiores críticas ao cálculo do N ocorrem devido aos procedimentos altamente empíricos sobre os quais está fundamentada a determinação do FEC expresso em dano relativo à configuração de um eixo padrão de 80 kN. De acordo com Timm e Newcomb (2002) pesquisas desenvolvidas em numerosas pistas experimentais indicam que o FEC também é dependente do tipo de pavimento (flexível ou rígido), espessura, tipo do conjunto de eixos e do valor da carga por eixo, pressão de inflação e condições ambientais. Todos estes aspectos fazem variar o expoente na equação do FEC, mas o efeito ou dano dos excessos de carga nos eixos ao pavimento continua sendo exponencial.

O fator de veículo (FV) da frota é definido como a somatória dos fatores de cada veículo que corresponde ao produto do número de eixos pelos respectivos FEC. Assim, com essa somatória dos fatores de veículos se determina o número N diário, mensal ou anual. Para ilustrar a ordem de grandeza dos fatores de veículos USACE e AASHTO são apresentados na Tabela 3 os fatores por tipo de veículo na carga máxima legal, conforme a classificação vigente do DNIT (2006a). O tipo de veículo com o maior fator de veículo USACE é o 3R6 com 34,47, ou seja, o dano causado por uma passada deste veículo equivale aproximadamente a 34 vezes o dano gerado pelo eixo padrão.

Tabela 3: Valores dos fatores de veículos para diferentes veículos

| TIPO DE VEÍCULO | PBT (tf) | TIPO DE EIXOS - CARGAS (tf) | | | | FV _{USACE} | FV _{AASHTO} |
|-----------------|----------|-----------------------------|------|-----|------|---------------------|----------------------|
| | | ESRS | ESRD | ETD | ETT | | |
| | | 6 | 10 | 17 | 25,5 | | |
| 2C | 16,0 | 1 | 1 | | | 3,57 | 2,72 |
| 2C2 | 36,0 | 1 | 3 | | | 10,15 | 7,51 |
| 2C3 | 43,0 | 1 | 2 | 1 | | 15,41 | 6,76 |
| 2CC | 12,0 | 2 | | | | 0,56 | 0,65 |
| 2D4 | 50,0 | 1 | 1 | 2 | | 20,66 | 6,01 |
| 2I3 | 46,0 | 1 | 4 | | | 13,44 | 9,91 |
| 2J4 | 53,0 | 1 | 3 | 1 | | 18,70 | 9,15 |
| 2L4 | 53,0 | 1 | 3 | 1 | | 18,70 | 9,15 |
| 2LD | 43,0 | 1 | 2 | 1 | | 15,41 | 6,76 |
| 2N4 | 53,0 | 1 | 3 | 1 | | 18,70 | 9,15 |
| 2S1 | 26,0 | 1 | 2 | | | 6,86 | 5,12 |
| 2S2 | 33,0 | 1 | 1 | 1 | | 12,12 | 4,36 |
| 2S3 | 41,5 | 1 | 1 | | 1 | 12,87 | 4,28 |
| 35D | 67,0 | 1 | 1 | 3 | | 29,21 | 7,65 |
| 3C | 23,0 | 1 | | 1 | | 8,83 | 1,97 |
| 3C2 | 43,0 | 1 | 2 | 1 | | 15,41 | 6,76 |
| 3C3 | 50,0 | 1 | 1 | 2 | | 20,66 | 6,01 |
| 3D4 | 57,0 | 1 | | 3 | | 25,92 | 5,25 |
| 3D5 | 67,0 | 1 | 1 | 3 | | 29,21 | 7,65 |
| 3DQ | 60,0 | 1 | 2 | 2 | | 23,95 | 8,40 |
| 3DS | 67,0 | 1 | 1 | 3 | | 29,21 | 7,65 |
| 3I3 | 53,0 | 1 | 3 | 1 | | 18,70 | 9,15 |
| 3LD | 50,0 | 1 | 1 | 2 | | 20,66 | 6,01 |
| 3M5 | 70,0 | 1 | 3 | 2 | | 27,24 | 10,80 |
| 3M6 | 74,0 | 1 | | 1 | 2 | 27,43 | 5,09 |
| 3N4 | 60,0 | 1 | 2 | 2 | | 23,95 | 8,40 |
| 3P5 | 65,5 | 1 | | 2 | 1 | 26,68 | 5,17 |
| 3Q4 | 63,0 | 1 | 4 | 1 | | 21,98 | 11,55 |
| 3R6 | 74,0 | 1 | | 4 | | 34,47 | 6,90 |
| 3S1 | 33,0 | 1 | 1 | 1 | | 12,12 | 4,36 |
| 3S2 | 40,0 | 1 | | 2 | | 17,38 | 3,61 |
| 3S3 | 48,5 | 1 | | 1 | 1 | 18,13 | 3,53 |
| 3SD | 60,0 | 1 | 2 | 2 | | 23,95 | 8,40 |
| 3V5 | 65,5 | 1 | | 2 | 1 | 26,68 | 5,17 |
| 4C | 31,5 | 1 | | | 1 | 9,58 | 1,89 |

3. ESTUDO DE CASO

Para evidenciar a influência do carregamento no cálculo do FEC, são utilizados dados de pesagem de um posto de fiscalização com operação de 24 horas por dia de uma rodovia brasileira de elevado volume de tráfego e de grande importância no transporte de carga no país. Apenas os dados da balança seletiva foram incluídos, pois diferentemente do que ocorre na balança lenta, todos os veículos têm suas cargas por eixo aferidas uma única vez.

Os dados de análise são do mês de dezembro de 2013 (antes da alteração da lei da balança) e do mês de dezembro de 2014 (após a alteração da lei da balança). Portanto, busca-se identificar as mudanças de comportamento no transporte de cargas com aumento na tolerância nas cargas aferidas na balança de acordo com as alterações na “Lei da Balança”. Vale ressaltar que os veículos para o transporte de cargas líquidas e gasosas estão dispensados, pela legislação vigente, desta fiscalização. Os dados foram agrupados de modo a caracterizar a frota de veículos pesados. Na análise buscou-se identificar a quantidade para cada tipo de veículos. A quantidade total de cada tipo de veículo pesado em cada mês é apresentada na Tabela 4.

Todos os veículos aferidos nas balanças foram agrupados conforme a classificação vigente do DNIT (2006a), onde cada composição é identificada por uma combinação alfanumérica. Observou-se que na balança mais de 85% dos veículos aferidos na balança seletiva pertencem somente a 6 classes de veículos, bastante comuns em rodovias brasileiras. Estes veículos são: 3C, 2S2, 2S3, 2C, 2CC e 3S3.

Tabela 4: Quantidade por tipo de veículos pesados para cada mês

| Tipo de Veículo | dez/13 | % | Somatório | Tipo de Veículo | dez/14 | % | Somatório |
|-----------------|---------|---------|-----------|-----------------|--------|---------|-----------|
| 3C | 38.580 | 28,095% | 86,8% | 3C | 34.046 | 28,504% | 87,5% |
| 2S2 | 20.594 | 14,997% | | 2S2 | 17.926 | 15,008% | |
| 2S3 | 16.980 | 12,365% | | 2C | 15.089 | 12,633% | |
| 2CC | 16.963 | 12,353% | | 2CC | 15.000 | 12,558% | |
| 2C | 16.431 | 11,966% | | 2S3 | 13.720 | 11,487% | |
| 3S3 | 9.580 | 6,977% | | 3S3 | 8.682 | 7,269% | |
| 2S1 | 4.304 | 3,134% | 3I3 | 3.821 | 3,199% | | |
| 3I3 | 3.814 | 2,777% | 2S1 | 2.368 | 1,983% | | |
| 2C2 | 2.616 | 1,905% | 2C2 | 2.367 | 1,982% | | |
| 3S2 | 2.325 | 1,693% | 3S2 | 2.179 | 1,824% | | |
| 3D4 | 1.438 | 1,047% | 3D4 | 1.146 | 0,959% | | |
| 3C2 | 961 | 0,700% | 3C2 | 998 | 0,836% | | |
| 2I3 | 664 | 0,484% | 3M6 | 517 | 0,433% | | |
| 3M6 | 565 | 0,411% | 2I3 | 497 | 0,416% | | |
| 3C3 | 319 | 0,232% | 3C3 | 206 | 0,172% | | |
| 2C3 | 231 | 0,168% | 2C3 | 190 | 0,159% | | |
| 4C | 190 | 0,138% | 3S1 | 126 | 0,105% | | |
| 3S1 | 184 | 0,134% | 2D4 | 124 | 0,104% | | |
| 3R6 | 154 | 0,112% | 2LD | 122 | 0,102% | | |
| 2D4 | 124 | 0,090% | 3R6 | 106 | 0,089% | | |
| 2LD | 86 | 0,063% | 4C | 103 | 0,086% | | |
| 3LD | 58 | 0,042% | 3LD | 31 | 0,026% | | |
| 2N4 | 44 | 0,032% | 3V5 | 25 | 0,021% | | |
| 3P5 | 34 | 0,025% | 2N4 | 13 | 0,011% | | |
| 3V5 | 27 | 0,020% | 3P5 | 12 | 0,010% | | |
| 2J4 | 24 | 0,017% | 2I4 | 7 | 0,006% | | |
| 3SD | 8 | 0,006% | 3SD | 7 | 0,006% | | |
| 3Q4 | 7 | 0,005% | 3N4 | 6 | 0,005% | | |
| 3N4 | 5 | 0,004% | 3Q4 | 2 | 0,002% | | |
| 3DQ | 3 | 0,002% | 3DQ | 2 | 0,002% | | |
| 35D | 2 | 0,001% | 35D | 2 | 0,002% | | |
| 3D5 | 2 | 0,001% | 3DS | 2 | 0,002% | | |
| 3DS | 1 | 0,001% | 3M5 | 1 | 0,001% | | |
| 3M5 | 0 | 0,000% | 3D5 | 0 | 0,000% | | |
| | 137.318 | 100,0% | | 119.443 | 100,0% | | |

Dentre os tipos de veículos pesquisados observa-se que a classe 3C representa aproximadamente 30%, e os outros 5 primeiros veículos da lista possuem participação na frota entre 7% e 15%. Apesar de uma redução no volume total, observa-se que o perfil da frota é praticamente o mesmo, com o predomínio de 6 classes de veículos já citados que correspondem a 86,8% e 87,5% do total em dez/2013 e dez/2014, respectivamente.

3.1. Avaliação do excesso de carga por tipo de eixo

Na balança seletiva é possível a aferição das cargas dos veículos separadas por cada tipo de eixo. São analisados quatro grupos de eixos, a saber: ESRS (Eixo Simples de Rodas Simples), ESRD (Eixo Simples de Rodas Duplas), ETD (Eixo Tandem Duplo) e ETT (Eixo Tandem Triplo).

Apesar das várias resoluções ao longo dos anos, somente as questões ligadas a tolerância são revistas, a Carga Máxima Legal (CML) vem sendo mantida desde seu estabelecimento. A carga máxima legal para cada grupo de eixos deve ser igual a 6 tf, 10 tf, 17 tf e 25,5 tf, respectivamente para os eixos do tipo ESRS, ESRD, ETD e ETT.

Em relação ao PBT, a grande maioria da frota trafega abaixo do limite legal, porém a fração de veículos transitando acima do limite legal aumentou no mês de dezembro de 2014. Observando eixos em separado, verifica-se que o ETD é o grande responsável pelo aumento do PBT. O aumento na quantidade de eixos com cargas acima do limite da tolerância da lei da balança é mais expressivo no caso do eixo, tipo ETD.

As cargas por eixo foram separadas de acordo com o nível de carregamento, sempre com o objetivo de identificar os eixos sobrecarregados e as tendências de comportamento em relação à alteração dos limites de tolerância de carga por tipo de eixo.

A Tabela 5 apresenta as porcentagens de cada tipo de eixo para diferentes condições de carregamento, onde é possível observar para todos os tipos que a condição de carregamento com mais eixos é a situações dos que estão com menos que a CML. Contudo, observa-se que em dezembro de 2014 essas porcentagens diminuíram para todos os tipos, ou seja, aumentaram os eixos com mais carregamento.

Tabela 5: Porcentagem de eixos em função da condição do carregamento

| Tipo de Eixo | ESRS | | ESRD | | ETD | | ETT | |
|--------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | dez/13 | dez/14 | dez/13 | dez/14 | dez/13 | dez/14 | dez/13 | dez/14 |
| Condição do Carregamento | | | | | | | | |
| <= CML | 86,1% | 83,1% | 93,3% | 90,8% | 89,1% | 84,3% | 79,0% | 67,9% |
| > CML e <= CML+7,5% | 9,8% | 10,8% | 5,0% | 6,5% | 9,0% | 11,3% | 17,9% | 23,3% |
| > CML+7,5% e <= CML+10% | 1,8% | 2,6% | 0,6% | 1,1% | 0,8% | 2,1% | 1,6% | 4,8% |
| > CML+10% | 2,3% | 3,5% | 1,1% | 1,6% | 1,1% | 2,3% | 1,5% | 4,0% |

No grupo de eixos ETD e ETT, após a entrada em vigência da resolução nº 489 (jul/2014), ocorreu um aumento maior que o dobro da quantidade de eixos com carga máxima legal mais 7,5% até 10% ou ainda superior a 10%.

Os eixos ETD com carga maior que CML+10% representavam 1,1% e os eixos ETT representavam 1,5% em dezembro de 2013. Estas taxas subiram para 2,3% e 4,0%, respectivamente, em dezembro de 2014.

3.2 Cálculo do FEC real e para limitações no valor da CML

Buscando identificar a representatividade dos eixos sobrecarregados através do cálculo dos FEC, foram calculados os valores de número N mensais (somatório dos FEC) para os meses de dez/2013 e dez/2014 para os dados reais e também limitando os eixos sobrecarregados pela metodologia USACE. Foram calculados para 4 situações:

- Todos os eixos utilizando os dados reais do carregamento;
- Todos os eixos carregados acima da CML foram limitados no valor da CML;
- Todos os eixos carregados acima da CML foram limitados no valor da CML+7,5%;
- Todos os eixos carregados acima da CML foram limitados no valor da CML+10%.

A Tabela 6 apresenta esta análise. Caso todos os veículos sobrecarregados trafegassem com cargas exatamente iguais a CML (sem sobrecarga) a deterioração do pavimento, seria aproximadamente 13% inferior a situação real. Ainda, caso todos os veículos sobrecarregados além da tolerância de 7,5% e 10%, não ultrapassassem este limite, a deterioração seria aproximadamente 5% menor. A sobrecarga dos eixos acarreta pior desempenho ao pavimento,

acelerando sua deterioração e gerando a necessidade de intervenções cada vez mais precoces e pesadas. Observa-se ainda que a redução do volume de veículos pesados entre o mês de 2013 e o mês de 2014 não acarretou redução proporcional no número N mensal, denotando o aumento das cargas.

Tabela 6: Cálculo do Número N mensal para diferentes situações

| Situação | Número N - Dez/2013 | Redução | Número N - Dez/2014 | Redução |
|-----------------------|---------------------|---------|---------------------|---------|
| FEC Real | 5,13E+05 | - | 5,11E+05 | - |
| FEC limitado CML | 4,45E+05 | 13% | 4,19E+05 | 18% |
| FEC limitado CML+7,5% | 4,84E+05 | 5% | 4,81E+05 | 6% |
| FEC limitado CML+10% | 4,89E+05 | 5% | 4,89E+05 | 4% |

3.3 Porcentagem por faixa do valor do FV USACE no FEC

Para ilustrar como as diferentes cargas dos eixos dos veículos comerciais, causam deterioração dos pavimentos, foram comparados os dados de pesagem dos meses de dezembro de 2013 e dezembro de 2014. Todos os eixos (descarregados e carregados, foram computados) foram transformados em eixo padrão. É importante relembrar que um eixo padrão trafegando sobre um pavimento causa, por princípio, um dano unitário. Um eixo com carga abaixo do padrão causa danos menores que o unitário, e por sua vez, eixos com carga acima do padrão causam danos maiores que o unitário, sempre exponencialmente.

Analisando os dados resumidos referentes ao período anterior (Dezembro/13) e posterior (Dezembro/14) conforme mostrados na Figura 2, verificou-se que a alteração das tolerâncias de carga para a pesagem por eixo, poderá proporcionar o aumento no dano causado pela frota.

Em dezembro de 2013 os veículos com maiores cargas, que resultaram em FV superior a 20 eram 2,5% do total de eixos e geravam 20,3% do dano total da frota. Já no ano seguinte, observou-se, em relação à 2013, uma redução do valor do FEC de aproximadamente 0,39%. Os veículos com FV acima de 20 representaram 4,7% do total, quase duas vezes o valor de 2013. O dano causado por esses eixos, que em 2013 eram de 20,3% do total, passou para 30,8%. Soma-se mais uma evidência para a confirmação da alteração de comportamento do transporte de cargas na rodovia. Cada vez mais veículos trafegam com cargas próximas ou acima da tolerância definida pela lei da balança.

3.4 Análise do veículo tipo 3S3 em relação ao PBT

Os veículos 3S3 que representam aproximadamente 7% da frota nos dois meses analisados, representam 22% no valor do número N em dezembro de 2013 e 24% no mês de dezembro de 2014. A Tabela 7 apresenta a porcentagem dos 6 veículos que mais circularam nos meses estudados em relação as 3 faixas em função do PBT dos veículos, destacando a porcentagem de veículos 3S3 em relação ao PBT. A divisão foi a porcentagem de veículos com peso menor ou igual ao PBT, com valor de peso entre PBT e PBT+5% permitido pela lei e veículos com peso maior do que o PBT+5%. Comparando os dois meses analisados, observa-se um aumento de 14,41% para 16,88% para veículos com peso entre o PBT e PBT+5% e um aumento de 1,52% para 3,03% para veículos com PBT maior que PBT+5%.

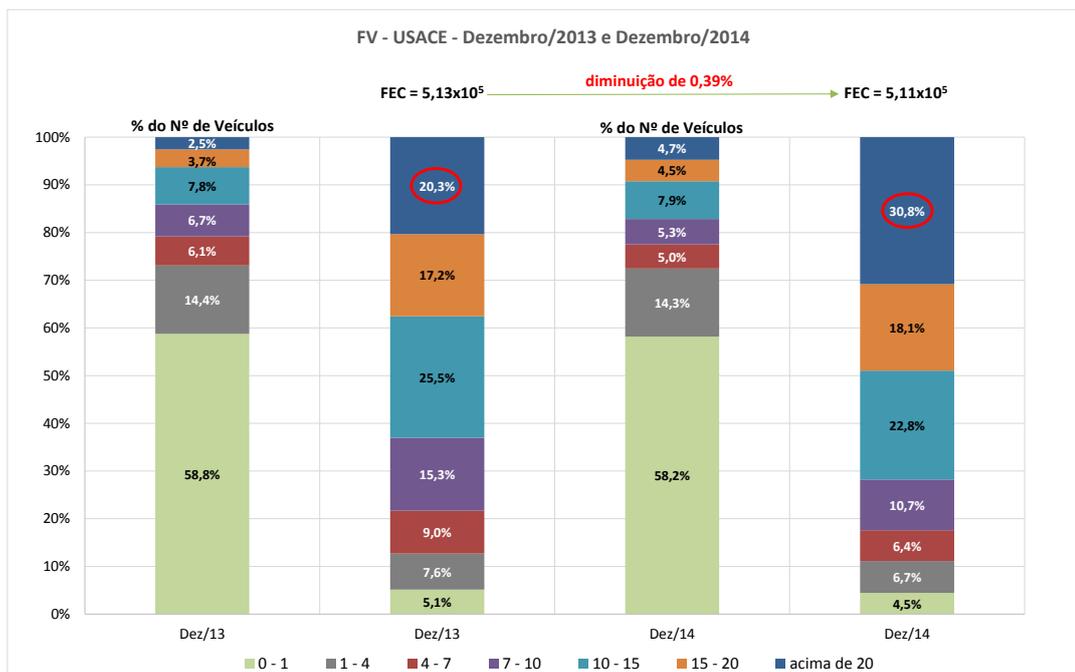


Figura 2: Comparação da % de veículos com a faixa de FV e % da faixa de FV na composição do FEC

Tabela 7: Porcentagem de veículos em função das faixas de valor de PBT

| Tipo de Veículo | dez/13 | | | dez/14 | | |
|-----------------|------------------|-------------------------------|---------------------|------------------|-------------------------------|---------------------|
| | % com Peso <=PBT | % com Peso entre PBT e PBT+5% | % com Peso > PBT+5% | % com Peso <=PBT | % com Peso entre PBT e PBT+5% | % com Peso > PBT+5% |
| 2C | 98,99% | 0,48% | 0,53% | 98,97% | 0,53% | 0,51% |
| 2CC | 99,35% | 0,14% | 0,52% | 99,31% | 0,20% | 0,50% |
| 2S2 | 99,33% | 0,53% | 0,14% | 99,27% | 0,53% | 0,20% |
| 2S3 | 88,72% | 9,90% | 1,38% | 86,72% | 11,04% | 2,24% |
| 3C | 92,90% | 5,60% | 1,50% | 91,97% | 6,21% | 1,82% |
| 3S3 | 84,07% | 14,41% | 1,52% | 80,09% | 16,88% | 3,03% |

Primeiramente, os dados apresentados na Tabela 7 indicam que em um curto período de tempo após a alteração da lei da balança, os veículos já estão circulando com sobrecarga, ou seja, o caminhoneiro já está incorporando a tolerância na CML. Além dessa percepção em porcentagem, foi realizada a distribuição do FEC para os veículos com valor de PBT entre PBT e PBT+5%, para identificar que mesmo atendendo a lei em relação ao PBT, existem veículos que podem gerar mais dano do que os valores estimados em projeto.

O valor do FV pela metodologia USACE para um veículo do tipo 3S3 considerando todos os eixos com carga máxima legal é igual a 18,13 e o valor de FV máximo atendendo a carga mais 10% permitida por eixo e o PBT+5% é igual a 30,31.

Considerando o intervalo de FV_{USACE} entre 18,13 e 30,31, somente para os veículos que atendem ao intervalo de PBT e PBT+5% (14,41% dos veículos 3S3), verificou-se que no mês de dezembro de 2013 que 81,7% destes veículos possuem o FV aumentado em até 32% (FV_{USACE} entre 18,13 e 24) e 5,7% com valor de FV aumentado em até 67% (FV_{USACE} entre 24 e 30,31), conforme Figura 3. Na mesma figura também é apresentada a análise para o mês de dezembro de 2014. Neste mês, 78,5% dos veículos 3S3 com valor de PBT entre PBT e PBT+5% podem aumentar o valor de FV em até 32% (FV_{USACE} entre 18,13 e 24) e 12,7% dos

veículos neste intervalo podem aumentar o FV em até 67% (FV_{USACE} entre 24 e 30,31).

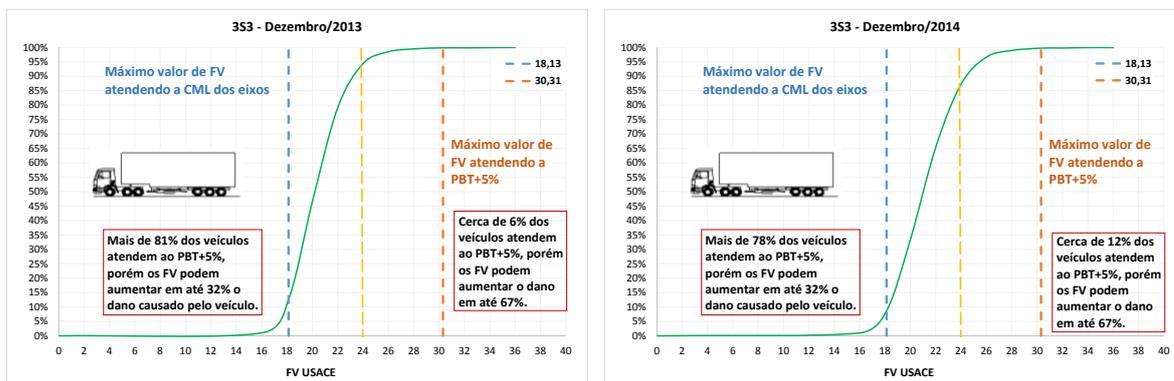


Figura 3: Distribuição dos veículos 3S3 para valor de PBT na faixa de PBT até PBT+5% em dezembro de 2013 e dezembro de 2014

Desta forma, verifica-se que os veículos que atendem aos limites da lei da balança (5% PBT), podem gerar um dano maior do que previsto no dimensionamento convencional do projeto e que esse dano foi aumentado após a mudança da lei, conforme os meses analisados.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

No estudo, analisando dados acumulados de dois meses de pesagem de um posto de fiscalização, verificou-se aumento no carregamento dos veículos comerciais que circulam em rodovias brasileiras decorrentes das alterações ocorridas na “Lei da Balança”. Constatou-se pelos registros de pesagens que houve aumento na quantidade de veículos sobrecarregados.

Ficou clara a mudança de comportamento no transporte de cargas pesadas a partir da mudança pelo CONTRAN em julho de 2014, que aumentou a tolerância na pesagem dos eixos de 7,5% para 10%, ou seja, a quantidade de veículos trafegando próximo ao limite da tolerância da CML mais a tolerância, ou acima, aumentou no mês analisado após a mudança.

Devem ser feitos estudos complementares para que se verifique a manutenção deste crescimento, uma vez que se verificou uma tendência crescente significativa em dezembro/2014. No período analisado constatou-se uma redução no volume de caminhões na rodovia, reflexo da condição econômica do país. Mesmo com a redução na quantidade de caminhões a frota está mais agressiva, com veículos mais sobrecarregados.

As cargas rodoviárias continuam exercendo papel de destaque no difícil equacionamento do plano de investimentos de uma concessão rodoviária. Eixos cada vez mais pesados podem resultar em pavimentos com elevados índices de patologias surgindo precocemente e a necessidade de intervenções de recapeamento e restauração antes do previsto.

A tendência identificada nas amostras deste trabalho indica que esta fração de carga (10% acima da CML) está sendo incorporada às cargas úteis dos veículos, indicando um problema que deve ser agravado com o tempo e a recessão, mesmo que temporária, tornando mais atrativa para o transportador fazer uso da lei, explorando ao limite a eficiência da carga total movimentada. Infelizmente, em vários casos, conforme a distribuição em cada veículo, as cargas por eixo passam do limite acrescido da tolerância.

Ressalta-se que apesar de este primeiro momento após a alteração da lei o número N ainda não tenha sofrido grandes variações (devido à queda do VDM), o fator mais preocupante é a mudança de comportamento dos transportadores, incorporando a tolerância na Carga Máxima Legal.

A fiscalização de cargas pode exercer função importantíssima no equacionamento para o planejamento de investimentos na recuperação da rodovia. Deve ser destacado que o aumento das cargas detectado numa rodovia fiscalizada, pode não representar o que ocorre em outras rodovias, sem controle de pesagem de cargas, e nestes casos o problema pode ser ainda maior.

Agradecimentos

Os autores agradecem as sugestões recebidas do Prof. Dr. Carlos Suzuki, Prof. Dr. Caio Rubens Santos e Prof^ª. MSc. Angela Azevedo, que permitiram aprimorar o texto e eliminar eventuais inconsistências.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bernucci, L. L. B.; Motta, L. M. G.; Ceratti, J. A. P.; Soares, J. B. *Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros*. Rio de Janeiro: Petrobras - Abeda, 2008. ISBN 85-85227-84-2.
- CONTRAN - CONSELHO NACIONAL DE TRÂNSITO. *Resolução nº 489/14 de 05/06/2014*. Altera os artigos 5º e 9º da Resolução nº 258, de 30 de novembro de 2007, do Conselho Nacional de Trânsito, que regulamenta os artigos 231 e 323 do Código de Trânsito Brasileiro, fixa metodologia de aferição de peso de veículos, estabelece percentuais de tolerância e dá outras providências. Brasília, 2014.
- CONTRAN - CONSELHO NACIONAL DE TRÂNSITO. *Resolução nº 526/15 de 29/04/2015*. Referenda a Deliberação nº 142 de 17 de abril de 2015 que dispõe sobre a alteração da Resolução CONTRAN nº 211, de 13 de novembro de 2006, e da Resolução CONTRAN nº 258, de 30 de novembro de 2007 e revoga a Resolução CONTRAN nº 489 de 05 de junho de 2014. Brasília, 2015.
- DNER PRO 159/85 - DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. Projeto de restauração de pavimentos flexíveis e semi-rígidos. Rio de Janeiro, 1985.
- DNIT - DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE RODAGEM. Manual de estudos de tráfego. Publ. IPR-723. Rio de Janeiro, 2006a.
- DNIT - DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE RODAGEM. Manual de restauração de pavimentos asfálticos. IPR-720. Rio de Janeiro, 2006b.
- Fernandes Junior, J. L. Investigações dos efeitos das solicitações do tráfego sobre o desempenho de pavimentos. 1994. Tese (Doutor em Transportes) - Pós-Graduação em Engenharia de Transportes da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1994.
- Huang, Y. H. Pavements analysis and design. 2. ed. Upper Saddle River: Pearson Prentice Hall, 2004. ISBN 0-13-142473-4.
- Hussain, S., Parker, N. A. Pavement damage and road pricing. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. TRB 2006 Annual Meeting CD-ROM. Washington, D. C., 2006.
- Pereira, A. M. Análise crítica dos fatores de equivalência adotados pelo DNER e sua adequação às rodovias de tráfego pesado. 1985. Tese – Concurso de Professor Titular do Departamento de Transportes, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1985.
- Pinto, S.; Preussler, E. S. Pavimentação rodoviária: conceitos fundamentais sobre pavimentos flexíveis. Rio de Janeiro: Copiarte, 2002. ISBN 85-902537-1-6.
- Timm, D. H.; Newcomb, D. E. Lies, damned lies and traffic forecasting, hot mix asphalt technology. Washington: Edition of National Asphalt Pavement Association, 2002. p.14-21.
- Turnbull, W. J.; Foster, C. R.; Ahlvin, R. G. Design of flexible pavements considering mixed loads and traffic volume. In: International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavement, 1., 1962, Ann Arbor. Proceedings... Ann Arbor: University of Michigan, 1962. p. 130-134.

Flaviane Melo Lopes Vallejo (flaviane@usp.br)

Liedi Légi Bariani Bernucci (liedi@usp.br)

Departamento de Engenharia de Transportes, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo

Av. Prof. Almeida Prado, Travessa do Biênio, nº. 83, Edifício Engenharia Civil, Cidade Universitária – São Paulo, SP, Brasil