

Análise do excesso de carga de veículos comerciais e seu efeito no dimensionamento de estruturas de pavimentos asfálticos

The effect of overloaded vehicles on the asphalt pavement design

Flaviane Melo Lopes Vallejo¹, Caio Rubens Santos², Liedi Legi Bariani Bernucci³,
Carlos Yukio Suzuki⁴, Kamilla Vasconcelos Savasini⁵, Linda Lee Ho⁶

¹Universidade de São Paulo, São Paulo – Brasil, flavianevallejo@gmail.com

²Instituto Mauá Tecnologia, São Paulo – Brasil, caiorubens@maua.br

³Universidade de São Paulo, São Paulo – Brasil, liedi@usp.br

⁴Universidade de São Paulo, São Paulo – Brasil, suzuki@planservi.com.br

⁵Universidade de São Paulo, São Paulo – Brasil, kamilla.vasconcelos@usp.br

⁶Universidade de São Paulo, São Paulo – Brasil, lindalee@usp.br

Recebido:

21 de junho de 2021

Aceito para publicação:

21 de março de 2022

Publicado:

27 de outubro de 2022

Editor de área:

Jorge Barbosa Soares

Palavras-chave:

Veículos comerciais.
Excesso de carga.
Deterioração de pavimentos.
Pesagem.

Keywords:

Trucks weight.
Axle overloading.
Pavement damage.
Weigh station.

DOI:10.14295/transportes.v30i3.2643

RESUMO

A magnitude de carga permitida para o transporte rodoviário no Brasil é regida pela “lei da balança”, que permite uma tolerância, na pesagem dos veículos comerciais em seu peso bruto total e em cada eixo. Essas tolerâncias vêm sendo justificadas por possíveis desvios inerentes nos equipamentos de pesagem e pela movimentação da carga dentro do veículo. As tolerâncias de 5% no PBT e de 5% nos eixos, introduzidas na década de 80, foram modificadas para 7,5% nos eixos na década de 90 e, em julho de 2014, com base na Resolução do CONTRAN n°. 489, foram estendidas mais uma vez para 10% nos eixos. Este trabalho apresenta os resultados de uma análise de dados referentes a um período de 6 anos de pesagem de caminhões em uma balança de uma rodovia brasileira de elevado volume de tráfego, que opera 24 horas por dia, 7 dias por semana, e aponta as alterações do transporte de carga, fruto da alteração de julho de 2014. Os resultados mostram que há aumento da sobrecarga, o que evidencia o uso da tolerância pelo transportador de carga e consequências das sobrecargas no dimensionamento dos pavimentos asfálticos, ou na redução de sua vida útil.

ABSTRACT

The truck load allowed for freight transport in Brazil is established by the "truck weigh station law", which allows for an excess, or a tolerance, in the weighing, in their gross weight and in the weights of each axle. These tolerances have been justified by deviations inherent to the weighing systems, and by the eventual movement of the goods inside the truck. Tolerances of 5% on PBT and 5% on axles were introduced in the 1980s, and modified to 7.5% on axles in the late 1990s. In July 2014, based on the CONTRAN Resolution n°. 489, the tolerance was extended to 10% on the axles. This paper presents data analysis over a 6-year period of weighing trucks on a weigh station of a Brazilian heavy-duty highway, which operates 24 hours a day, 7 days a week, showing changes in the profile of freight transport due to the law revision in July 2014. The results reveal that there is an increase in overloading, indicating the use of the tolerance by the freight transporters, and consequences of trucks overloading in the asphalt pavements design, and reduction of their design life.



1. INTRODUÇÃO

O dimensionamento de um pavimento asfáltico busca uma estrutura para suportar as solicitações de carga dos veículos, expressas em função de um número equivalente de operações de um eixo simples padrão de 80 kN, denominado número N, para um período de projeto pré-estabelecido. O número N é, portanto, um artifício matemático que transforma estas solicitações reais em solicitações equivalentes, todas de mesma magnitude (80 kN) e configuração de eixo (eixo simples de rodas duplas, ESRD). A correta previsão do tráfego solicitante no período de projeto para determinação do número N é de vital importância para garantir a vida útil esperada da estrutura do pavimento.

Segundo Huang (2004), o tráfego é o elemento de maior relevância no dimensionamento dos projetos de pavimentação de rodovias, e sua consideração deve incluir tanto a magnitude da carga, como a configuração dos eixos e número de repetições de carga. Hussain e Parker (2006) demonstram que o desempenho dos pavimentos está relacionado à carga por eixo, sendo que os veículos com 2 eixos o danificam mais que os veículos de 3 a 5 eixos, quando carregados no limite da lei. Fernandes Jr. (1994) destaca que não existe uma relação direta do Peso Bruto Total Combinado (PBTC) e o desempenho do pavimento, ou seja, a deterioração está ligada à carga por eixo e não por veículo. Um veículo carregado pode não ser o mais danoso ao pavimento, desde que a carga esteja distribuída adequadamente entre os eixos do veículo. O Peso Bruto Total (PBT) de um veículo é considerado, de acordo com DNIT (2006a), aquele proveniente do somatório da tara (peso do veículo vazio) e da carga (lotação) deste, sendo o PBTC aquele resultante da soma dos pesos brutos das unidades que compõem o veículo (combinação de um veículo de tração ou de carga, mais seu(s) semirreboque(s) ou reboque(s)). Os valores máximos legais são aqueles estabelecidos pelo Regulamento do Código de Trânsito Brasileiro (CTB), seguindo as resoluções do Conselho Nacional de Trânsito (CONTRAN), que disciplina a inscrição de pesos e capacidades em veículos de tração, de carga e de transporte coletivo de passageiros. O Artigo nº. 99 do CTB estabelece que somente poderão transitar pelas vias terrestres os veículos cujo peso e dimensões atenderem aos limites estabelecidos pelo CONTRAN.

O excesso de peso por eixo aumenta a produtividade e os lucros da indústria do transporte, mas por outro lado gera ônus para a sociedade, com a rápida deterioração dos pavimentos, o aumento de gastos na manutenção viária, além da insegurança nas viagens, causada pelo aumento no índice de acidentes (Ghisolfi *et al.*, 2018). Pais *et al.* (2019) apontam que os veículos sobrecarregados aumentam os danos ao pavimento e os custos da vida útil em cerca de 30% em comparação com os mesmos veículos trafegando com cargas máximas legais. O tráfego pesado é o principal responsável pelas falhas no pavimento, produzindo deformações e trincas por fadiga, que levam à necessidade de restauração precoce (Pais e Pereira, 2016). Bock (2016) afirma que o controle de carga não é o único caminho a ser percorrido, o aumento dos níveis de carga praticados precisa ser incorporado no dimensionamento dos pavimentos.

Nos Estados Unidos, os departamentos rodoviários estaduais tentam controlar os excessos de carga nos caminhões para minimizar a deterioração da infraestrutura por meio da cobrança de taxas, porém o acúmulo das mesmas não é suficiente para mitigar o dano causado (Dunning, Dey e Chowdhury, 2016). Os autores ainda citam que alguns Estados norte-americanos permitem uma tolerância nos limites de peso do eixo, sendo para eixos simples (rodas simples e dupla) valores até aproximadamente 20,4 tf (200 kN) e para eixos tandem valores até 29,4 tf (289 kN). De acordo com Prozzi *et al.* (2012), no Estado do Texas, a licença de tolerância autoriza os caminhões a trafegarem em rodovias estaduais com até 5% no peso bruto total e

uma tolerância de até 10% nos eixos simples e tandem, desde que a tolerância do peso bruto não seja excedida. As autorizações para os caminhões trafegarem com excesso de carga são controladas por cada Estado e para determinadas rodovias, o que caracteriza uma forma mais segura de planejar a gestão da malha rodoviária em países de grandes extensões. As leis que estabelecem peso máximo legal por eixo remontam aos anos 60, como a Lei n.º. 8.408 da Assembleia Legislativa do Estado de São Paulo, de 13/11/1964, que regulamentava o tráfego de veículos pesados nas rodovias do Estado de São Paulo (Medina e Motta, 2015). Desde então, a indústria de produção de veículos evoluiu, e a capacidade tecnológica do setor de fabricar caminhões com elevada estabilidade e segurança para cargas é superior à estabelecida em 1964. Em meados de 1985, permitiu-se a tolerância de 5% no processo de pesagem de carga em veículos de transporte sobre os limites do PBT e sobre os limites do eixo. No ano de 1999 uma resolução do CONTRAN alterou a tolerância para 7,5% sobre o limite de peso bruto transmitido por eixo.

A Resolução n.º. 489 do CONTRAN, de 05/06/2014, alterou a resolução em vigor estabelecendo novos percentuais de tolerância na fiscalização de peso dos veículos por balança rodoviária. Foram admitidas a partir de 1º de julho de 2014, as seguintes tolerâncias: 5% sobre os limites de pesos regulamentares para o PBT, PBTC e capacidade máxima de tração (CMT); 7,5% sobre os limites de pesos regulamentares por eixo para aqueles veículos que excederem os limites estabelecidos de 5% no PBT, PBTC ou CMT; e 10% sobre os limites de pesos regulamentares por eixo para aqueles veículos que não excederem os limites de 5% no PBT, PBTC ou CMT.

A Deliberação n.º. 526, de 29 de abril de 2015 foi promulgada no sentido de aclarar as dúvidas geradas pela Resolução anterior, simplificando o texto e admitindo as seguintes tolerâncias: 5% sobre os limites de pesos regulamentares para o PBT e PBTC e 10% sobre os limites de peso regulamentares por eixo de veículos transmitidos à superfície das vias públicas. No carregamento dos veículos, a tolerância máxima prevista neste artigo não pode ser incorporada aos limites de peso previstos em regulamentação fixada pelo CONTRAN. Contudo, fica permitido que o veículo pode prosseguir viagem sem o remanejamento ou transbordo da carga, desde que sejam os excessos aferidos em cada eixo inferiores a 12,5% do menor valor entre os pesos estabelecidos pelo CONTRAN e pelos indicados pelo fabricante.

Em 2021, a lei 14.229 alterou novamente, com o aumento da tolerância para 12,5% sobre os limites de peso bruto transmitido por eixo de veículos à superfície das vias públicas e mantendo os 5% sobre os limites de pesos regulamentares para o PBT e PBTC. Esta última lei também incluiu que os veículos ou a combinação de veículos com PBT regulamentar igual ou inferior a 50 tf deverão ser fiscalizados apenas quanto aos limites de PBT ou PBTC, exceto em casos específicos estabelecidos pelo CONTRAN.

Diante das últimas alterações dos percentuais de tolerância sobre os limites de peso por eixo e do conhecimento da influência do carregamento no desempenho da estrutura de pavimento, buscou-se analisar dados reais de pesagem de um posto de fiscalização, com funcionamento por 24 horas diárias e 7 dias por semana, de uma rodovia federal de tráfego pesado e avaliar as consequências destas alterações de legislação no perfil de transporte de carga e na vida útil dos pavimentos. Segundo Romeiro Júnior *et al.* (2020), há veículos sobrecarregados nas rodovias brasileiras que podem estar contribuindo para a deterioração precoce dos pavimentos, e a falta de dados de tráfego e suposições que não correspondem à realidade pode ter impacto na vida útil dos pavimentos e na previsão dos custos de manutenção dos mesmos.

2. ESTUDO DE CASO E CÁLCULO DA SOLICITAÇÃO DE TRÁFEGO

O estudo de caso foi realizado a partir de dados reais de pesagem dos veículos comerciais de um posto de fiscalização com operação por 24 horas por dia e 7 dias por semana, de uma rodovia brasileira de elevado volume de tráfego e de grande importância no transporte de carga no país. Foram analisados os dados da balança seletiva, utilizada na fiscalização de todos os veículos de carga. Na balança seletiva, o veículo passa com uma velocidade entre 10 e 100 km/h e os veículos que possivelmente tenham excesso de carga, identificados na balança seletiva, seguem para uma via exclusiva de pesagem, denominada balança lenta. Os dados da balança seletiva, como abrangem toda a frota de veículos pesados, oferecem uma completa caracterização do peso dos veículos e de seus eixos, e apresentam um erro máximo de 5%. Ressalta-se que os veículos para o transporte de cargas líquidas e gasosas estão dispensados por lei desta fiscalização.

O período analisado consistiu em seis anos (entre julho de 2011 e junho de 2017), exatamente para estudo do impacto da alteração gerada pela mudança autorizada pela Resolução n.º 489 do CONTRAN de junho de 2014, valendo como regra a partir de 1º de julho de 2014, onde ficou estabelecida uma maior tolerância (de 7,5% para 10% no eixo) para os veículos comerciais. Portanto, buscou-se identificar as mudanças de comportamento no transporte de cargas com o aumento na tolerância dos pesos aferidos na balança seletiva. Inicialmente, os dados de peso dos veículos comerciais foram agrupados de modo a caracterizar a frota de veículos pesados. Na análise dos dados, buscou-se identificar a quantidade de veículos comerciais de carga e de eixos, a periodicidade (hora e dia), os tipos de veículos, e a distribuição do carregamento por tipo de eixo.

A análise dos dados de pesagem contemplou levantamento diário de todos os veículos e as proporções de cada tipo de classe mostraram-se similares nos dois períodos, antes e depois da alteração da lei, destacando-se a predominância de 8 tipos de veículos. Os dados de pesagem de aproximadamente 2% do total de veículos foram desconsiderados das análises devido a erro na aferição da pesagem, que foram observados quando os dados apresentavam carga pesada igual a zero, ou quando no lugar do tipo de classe de veículo foi indicado "ERR". Apesar dos dados terem sido gerados por balança com funcionamento 24 horas, foram identificados dois meses em que as balanças estavam inoperantes. Apesar dos erros mencionados, pode-se ainda concluir que a massa de dados reunida no período possui grande representatividade, com lacunas consideradas mínimas.

A tendência de variação dos volumes de veículos ao longo dos seis anos não foi claramente identificada, porém, verificou-se certa variação ao longo da semana e das horas do dia. Para a análise da periodicidade da amostra, foi analisada a quantidade de veículos pesados a cada hora do dia e em cada dia da semana. Os volumes de veículos pesados por hora foram levantados para 4 períodos do dia, entre 0:00 e 6:00, 6:00 e 12:00, 12:00 e 18:00 e 18:00 e 24:00 horas. Na Figura 1, apresenta-se um dia típico de pesagem antes e depois da Resolução n.º 489, com o período de maior frequência de veículos ocorrendo entre 18:00 e 24:00, com pico entre 18:00 e 19:00 horas, representado por 5,1% da frota. Nos dois períodos de análise, antes e depois da alteração da lei, as quantidades de veículos pesados a cada hora do dia foram semelhantes quando analisada a frequência de veículos em cada um dos 4 períodos do dia. Também foram analisados os dias da semana com o maior número de veículos pesados, e a maior frequência ocorreu às quintas-feiras com aproximadamente 17,5%, seguida pelas quartas-feiras com 17% para os dois períodos de análise.

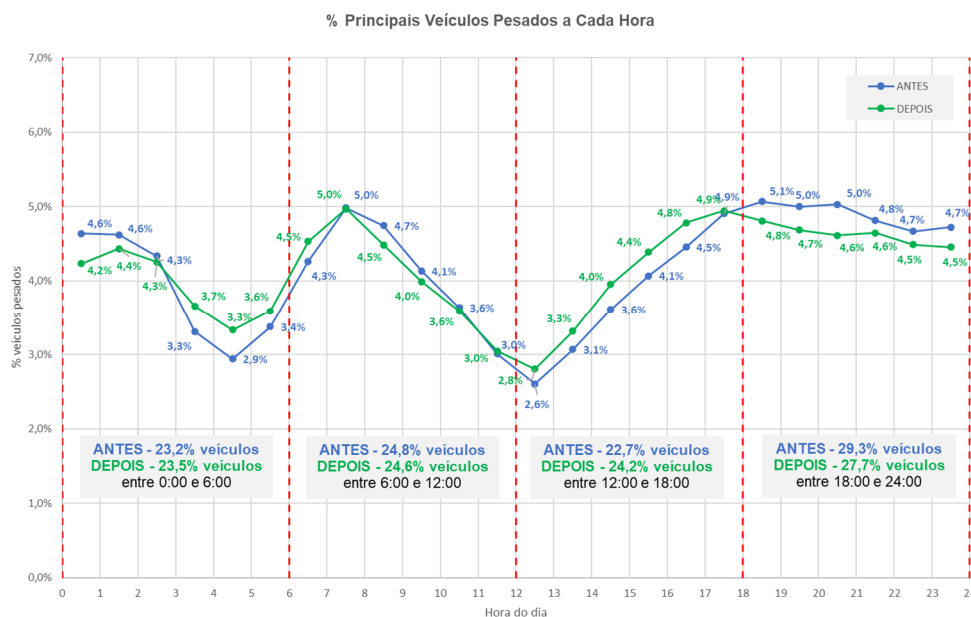


Figura 1. Porcentagem de veículos pesados a cada hora antes e depois da promulgação da Resolução nº. 489 do CONTRAN com alteração de tolerância de 7,5% para 10% na pesagem dos eixos dos veículos comerciais

2.1. Tipo de veículo e distribuição do carregamento por tipo de eixo

A Carga Máxima Legal (CML) vem sendo mantida desde seu estabelecimento em 1964, com pequena modificação apenas nos Eixos Simples de Rodas Simples (ESRS), no geral dianteiros, que era de 5 tf (49 kN) originalmente e depois foi alterado para 6 tf (59 kN). A CML para cada grupo de eixos fiscalizados deve ser igual a 6 tf (59 kN), 10 tf (98 kN), 17 tf (167 kN) e 25,5 tf (250 kN), respectivamente para os eixos do tipo ESRS, Eixo Simples de Rodas Duplas (ESRD), Eixo Tandem Duplo (ETD) e Eixo Tandem Triplo (ETT).

Todos os veículos de carga aferidos nas balanças são identificados conforme a classificação vigente do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT, 2006a), onde cada composição é identificada por uma combinação alfanumérica. Observou-se a partir dos dados que mais de 90% dos veículos aferidos na balança seletiva pertencem a 8 classes, bastante comuns em rodovias brasileiras: 3C, 2S3, 2S2, 2C, 3S3, 3I3, 3D4 e 2C2, sendo o restante da frota composta por diversas classes de veículos. Na Tabela 1, a proporção de cada tipo dos principais veículos é apresentada para os dois períodos analisados, antes e após a promulgação da Resolução nº. 489 do CONTRAN. As outras classes de veículos, com fração individual menor que 2,0%, complementam os 100%. A Figura 2 apresenta a composição dos eixos de cada um dos principais veículos.

Tabela 1 – Frequência dos principais veículos comerciais pesados nos períodos antes e depois da promulgação da Resolução nº. 489 que altera a tolerância de 7,5% para 10% nos pesos dos eixos dos veículos comerciais

Tipo de Veículo	Antes da alteração da tolerância	Depois da alteração da tolerância
	%	%
3C	26,64	26,65
2S3	19,29	14,27
2S2	12,92	13,06
2C	11,52	13,81
3S3	11,76	13,11
3I3	3,87	5,74
3D4	2,60	2,48
2C2	2,12	2,11

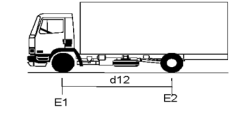
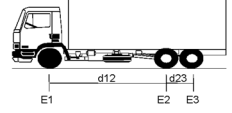
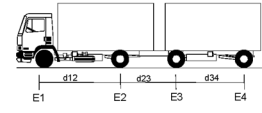
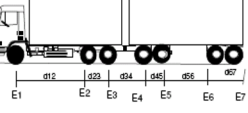
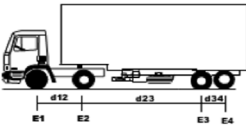
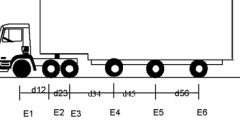
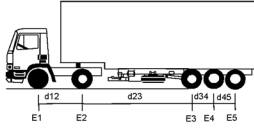
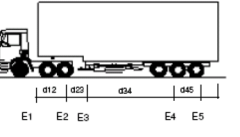
	Tipo de Classe de Veículo	Tipos de Eixo	Tipo de Classe de Veículo	Tipos de Eixo	
2C		E1 = ESRS E2 = ESRD	3C		E1 = ESRS E2E3 = ETD
2C2		E1 = ESRS E2 = ESRD E3 = ESRD E4 = ESRD	3D4		E1 = ESRS E2E3 = ETD E4E5 = ETD E6E7 = ETD
2S2		E1 = ESRS E2 = ESRD E3 = ETD	3I3		E1 = ESRS E2E3 = ETD E4 = ESRD E5 = ESRD E6 = ESRD
2S3		E1 = ESRS E2 = ESRD E3E4E5 = ETT	3S3		E1 = ESRS E2E3 = ETD E4E5E6 = ETT

Figura 2. Tipos de veículos identificados com maior frequência nas pesagens da balança seletiva

Dentre estes tipos de veículos comerciais, observa-se que a classe 3C (ESRS dianteiro e ETD traseiro) representa aproximadamente 26%, e os demais possuem participação na frota entre 2% e 20%. Bosso *et al.* (2020) analisaram os dados de pesagem de uma balança de pesagem em movimento (*Weigh in motion, WIM*) localizada em outra importante rodovia federal, com grande extensão dentro do Estado de São Paulo, e também indicou que o veículo com maior frequência (25,14%) possui PBT igual a 23 tf, igual ao veículo 3C.

Inicialmente, foi analisada a variação da frequência dos veículos sobrecarregados em relação ao PBT. Na Tabela 2, verifica-se que para os 8 principais veículos identificados na frota houve aumento na frequência de veículos com PBT além da tolerância de 5%. O percentual de veículos com o PBT maior que o limite de PBT+5% passou de 1,7% para 5,6% considerando os períodos antes e depois da alteração da tolerância de 7,5% para 10% nos eixos. O veículo tipo 3D4 apresentou a maior variação, tendo aumentado de 2,6% para 16%, um aumento de aproximadamente 500%. Dessa forma, o PBT, apesar de não ter sofrido alteração na tolerância até então estabelecida, apresentou um aumento considerável, provocado pelo aumento permitido nos eixos.

Tabela 2 – Porcentagem de veículos com PBT > PBT+5% nos dois períodos antes e depois da alteração da tolerância de 7,5% para 10% nos eixos dos veículos comerciais

Tipo de Veículo	% de Veículos com PBT > PBT+5%	
	Antes da alteração da tolerância	Depois da alteração da tolerância
2C	1,4	2,5
3C	2,8	8,3
2S2	0,7	1,8
2S3	1,0	3,5
3S3	1,7	9,3
2C2	0,8	2,1
3D4	2,6	16,0
3I3	1,1	3,4
% em Relação a Frota	1,7	5,6

Na Figura 3 apresentam-se os gráficos de frequência acumulada para cada tipo de eixo (ESRS, ESRD, ETD e ETT), onde se observa um aumento de carga transportada para todos os eixos no período depois da promulgação da Resolução que altera a tolerância de 7,5% para 10%. Neste estudo, foi observado que o aumento na quantidade de eixos com cargas acima do limite da tolerância da lei da balança é mais expressivo no caso dos eixos de carga tipo ETD e ETT.

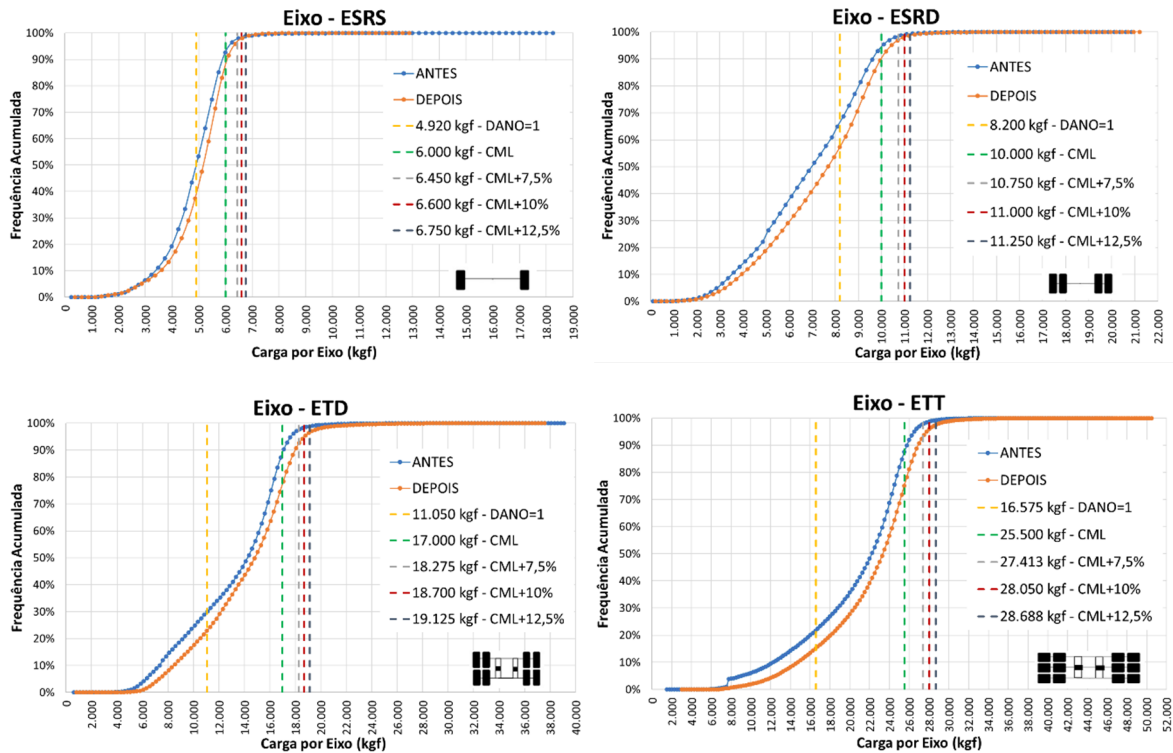


Figura 3. Frequência acumulada para cada tipo de eixo para as situações antes e depois da alteração da tolerância de 7,5 para 10% nos eixos

A carga por tipo de eixo foi classificada 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. Considerou-se como Dano = 1, ou dano unitário, a carga correspondente ao Fator de Equivalência de Operações igual a 1 para cada tipo de eixo. A Figura 3 apresenta a frequência de cada tipo de eixo para diferentes faixas de carregamento acima da CML, onde se observa, para todos os grupos de eixo, que os sobrecarregados até 5% além da CML representam a maior fração. No grupo de eixos ETD e ETT, após a entrada em vigência da Resolução n.º 489 (2014), ocorreu um aumento visível da quantidade de eixos com CML+5%, com CML+7,5%, com CML+10% e ainda os infratores com carga superior a CML+10%. Atribui-se que a alteração de tolerância na pesagem levou ao maior uso de carga, empregando a tolerância para transportar mais carga. Ressalta-se novamente que a tolerância deveria ser do equipamento (balança) e da eventual movimentação de carga, e não do veículo. Os veículos incorporaram a tolerância estabelecida nas Resoluções como uma autorização para aumento de carga transportada por eixo. Para ilustrar os infratores, os eixos com cargas acima da CML+10% representavam 2,22%, imediatamente antes de 1º de julho de 2014, sendo que esta taxa subiu para 4,39%, no período após a alteração da tolerância promulgada pela Resolução n.º 489 do CONTRAN.

Adicionalmente, para verificar a influência do carregamento para cada um dos 4 tipos de eixos na composição do número N, foram agrupados os eixos segundo a porcentagem de participação de cada um dos tipos em relação à quantidade total dos eixos por faixas de carregamento relacionadas à CML. A Figura 4 apresenta a frequência de cada eixo na respectiva faixa de carregamento para o período em estudo da balança. Observou-se que 12,7% dos eixos eram carregados acima da CML (incluindo aqueles dentro da tolerância e os infratores) até julho de 2014; depois da Resolução que alterou a tolerância de 7,5% para 10% nos eixos, 21,05% dos eixos estão carregados acima da CML.

Faixa de Carregamento	Tipo de Eixo	Antes	Depois	Total de Eixos	
				Antes	Depois
Quantidade de eixos com carga até 50% da CML	ESRS	1,98%	1,74%	87,30%	↓ 78,95%
	ESRD	6,27%	4,93%		
	ETD	4,17%	2,63%		
	ETT	1,21%	0,52%		
Quantidade de eixos com carga entre 50% da CML até CML	ESRS	28,78%	26,14%	7,49%	↑ 10,66%
	ESRD	18,53%	18,74%		
	ETD	17,63%	17,19%		
	ETT	8,72%	7,06%		
Quantidade de eixos com carga entre CML até CML+5%	ESRS	2,95%	4,18%	1,88%	↑ 3,57%
	ESRD	1,15%	1,71%		
	ETD	2,18%	3,13%		
	ETT	1,21%	1,64%		
Quantidade de eixos com carga entre CML+5% até CML+7,5%	ESRS	0,77%	1,30%	1,10%	↑ 2,43%
	ESRD	0,32%	0,55%		
	ETD	0,53%	1,17%		
	ETT	0,27%	0,56%		
Quantidade de eixos com carga entre CML+7,5% até CML+10%	ESRS	0,46%	0,85%	0,64%	↑ 1,53%
	ESRD	0,20%	0,37%		
	ETD	0,30%	0,85%		
	ETT	0,14%	0,36%		
Quantidade de eixos com carga entre CML+10% até CML+12,5%	ESRS	0,27%	0,53%	1,58%	↑ 2,87%
	ESRD	0,13%	0,25%		
	ETD	0,17%	0,54%		
	ETT	0,07%	0,20%		
Quantidade de eixos com carga maior que CML+12,5%	ESRS	0,81%	0,93%	0,11%	0,31%
	ESRD	0,28%	0,51%		
	ETD	0,39%	1,12%		
	ETT	0,11%	0,31%		

Figura 4. Porcentagem por faixa de carregamento por tipo de eixo com relação à CML

Com o objetivo de evidenciar a mudança no comportamento do transporte de cargas na rodovia devido à alteração da tolerância de peso nos eixos de 7,5% para 10% de excesso em relação à CML, as taxas de eixos trafegando acima da legal, ora dentro da legalidade, ora infratores, foram calculadas e colocadas na Tabela 3. Ainda na Tabela 3 estão apresentados os percentuais de veículos trafegando acima da CML (PBT e eixos) no período antes (36 meses anteriores à Resolução), e depois (36 meses após a publicação da Resolução). A Resolução e, possivelmente, a crise econômica promoveu um maior uso das tolerâncias de balança para aumentar a carga transportada. A concepção da tolerância de carga da Resolução parece ter sido distorcida em relação à ideia original dos anos 80, que consta na Resolução, baseada na tecnologia de pesagem e nos erros dos sistemas de pesagem, e está sendo usada para permitir o aumento da carga transportada. Os eixos sobrecarregados (acima da CML) sofreram aumentos expressivos, em torno de 80% para os eixos tandem. Desta maneira, por coerência, a lei deveria alterar as cargas máximas legais por eixo.

Tabela 3 – Fração de veículos que trafegam acima do PBT e eixos de veículos comerciais que trafegam com carga superior à CML antes e após a Resolução n°. 489/2014

	Antes da alteração da tolerância	Depois da alteração da tolerância	Varição
Veículos trafegando acima do PBT	1,7%	5,6%	229,4%
Eixos trafegando acima da CML			
ESRS	14,6%	21,8%	49,7%
ESRD	7,7%	12,5%	62,2%
ETD	14,1%	25,6%	81,5%
ETT	15,3%	28,8%	88,1%

2.2. Cálculo do fator de equivalência de carga (FEC) e do fator de veículo (FV)

O número N representa as solicitações de carga dos veículos comerciais esperadas, convertidos em eixo-padrão, em um determinado período. Na elaboração de projetos de pavimentação, o número N é calculado a partir da ponderação da frequência dos tipos de veículos e de seus carregamentos para a determinação do fator de veículo.

Para o cálculo de cada fator de veículo (FV) são somados os fatores de equivalência de carga (FECs) dos eixos, definidos a partir de estudos de danos causados aos pavimentos pelas diferentes magnitudes de carga e configuração de eixos em relação ao dano unitário correspondente ao eixo simples de rodas duplas padrão de 8,2 tf (80 kN). A partir do somatório de todos os FV, determina-se o número N de solicitações do eixo padrão (diário, mensal ou anual), no período de projeto em anos, levando em consideração o crescimento provável de tráfego ao longo deste período. Para o cálculo do FV, foi utilizada a metodologia da USACE (DNIT, 2006a), cujas equações definem os FECs de cada tipo de eixo, a depender de sua magnitude de carga e configuração. Os FECs para calcular o número N pela metodologia USACE, adotados no Brasil pelo DNIT, com origem no trabalho de Turnbull, Foster e Ahlvin (1962), onde para eixos simples e duplos são considerados os fatores do Corpo dos Engenheiros (CE). A referência do dano ao 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, 2006c) e em Pinto e Preussler (2002), conforme constam da Tabela 4.

Tabela 4 – Valores do FEC pelo DNIT (USACE)

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

2.3. Cálculo do número N e limitações no valor da CML

Foram calculados para os 8 principais veículos comerciais os respectivos fatores de veículos pela metodologia USACE. A Tabela 5 apresenta o número N para cada período de 3 anos analisado (antes e depois da alteração da tolerância de 7,5% para 10% nos eixos).

Verifica-se que, apesar da redução da quantidade de caminhões na rodovia, explicada pela crise econômica, o número N calculado aumentou, o que demonstra o aumento de carga transportada.

Tabela 5 – Valores de número N Acumulado a cada período de 3 anos

Período	N _{USACE} Acumulado (x10 ⁷)
Jul/11 a Jun/14 – Antes da Alteração da Tolerância	2,67
Jul/14 a Jun/17 – Depois da Alteração da Tolerância	3,43

Na busca por identificar o impacto dos eixos sobrecarregados na composição do número N acumulado para os períodos antes (julho/2011 a junho/2014) e depois da alteração da tolerância (julho/2014 a junho/2017), estes valores foram calculados limitando os eixos sobrecarregados pela metodologia USACE. Foram simuladas três situações descritas a seguir:

- Cenário 1: situação Real, considerando todos os eixos, incluindo aqueles acima da CML+10%;
- Cenário 2: limitação na CML + tolerância vigente no período - todos os eixos carregados acima da CML foram limitados no valor da CML+ % da tolerância; e
- Cenário 3: exclusão dos veículos com carga maior que a CML + tolerância vigente - todos os veículos com eixos carregados acima da CML + tolerância foram excluídos.

A Tabela 6 apresenta os valores do número N para as 3 situações propostas. Observa-se que, caso todos os veículos sobrecarregados além da tolerância de 10% não ultrapassassem este limite, o número N seria aproximadamente 5% menor ao número N da situação real antes e 10% depois. É importante ressaltar que o número N foi calculado para um período de 6 anos para evidenciar o impacto da alteração da tolerância nas cargas por eixo, ou seja, não foram feitas projeções futuras de tráfego, utilizando apenas os dados de balança. Observou-se número N para o período de 6 anos igual a $6,10 \times 10^7$ solicitações do eixo padrão para o cenário 1. Para os cenários 2 e 3, limitando e excluindo os eixos infratores, os valores de número N resultaram $5,62 \times 10^7$ e $4,47 \times 10^7$, respectivamente. A redução de solicitações para os cenários 2 e 3, em relação ao cenário 1, foi de 7,85% e 26,79% respectivamente. Uma vez que o dano na estrutura de pavimento possui relação exponencial com as cargas, eixos sobrecarregados produzem danos significativamente maiores que os considerados em projeto, acelerando sua deterioração e gerando a necessidade de intervenções cada vez mais precoces e robustas. Assim sendo, a alteração do número N mostra as consequências das alterações das Resoluções sobre as tolerâncias em pesagens.

Tabela 6 – Cálculo do número N acumulado para os 3 cenários de perfil de carga dos veículos

Período	Situação Real (Cenário 1) (x10 ⁷)	Limitação na CML+ % tolerância (infratores igualados à tolerância) (Cenário 2) (x10 ⁷)	Exclusão de valores maiores CML + % tolerância (exclusão de infratores) (Cenário 3) (x10 ⁷)
Jul/11 a Jun/14 – Antes da Alteração da Lei	2,67	2,53	2,10
Jul/14 a Jun/17 – Depois da Alteração da Lei	3,43	3,09	2,36
N acumulado (6 anos)	6,10	5,62	4,47
Comparação (%)	-	- 7,85%	- 26,79%

3. ESTIMATIVA DE ESPESSURA DE REVESTIMENTO ASFÁLTICO EM TRÊS CENÁRIOS DE SOLICITAÇÃO DO TRÁFEGO

A alteração da tolerância de cargas causou, no período analisado, uma clara e preocupante mudança no padrão de transporte de carga, com eixos mais carregados e maior número inclusive de infratores apesar da tolerância maior admitida. Uma quantidade crescente de veículos tem incorporado a tolerância da lei da balança como carga útil.

A fiscalização de cargas exerce uma função importantíssima no equacionamento para o planejamento de investimentos na recuperação da rodovia. O que deve ser observado é que o aumento das cargas detectado numa rodovia fiscalizada, pode não representar o que ocorre em outras rodovias, sem fiscalização de cargas, e nestes casos o problema pode ser ainda maior (Vallejo e Bernucci, 2019). Segundo Albano (2005), o estudo de rodovias federais no Estado do Rio Grande do Sul para a inexistência de controle de pesagem indicou uma redução média da durabilidade da vida dos pavimentos de 23%. Rys, Judycki e Jaskula (2016) afirmam que rodovias na Polônia possuíam porcentagem de veículos sobrecarregados na faixa de 6% a 16,5%, baseando-se em dados de balança WIM. A menor porcentagem ocorreu quando a rodovia era monitorada continuamente.

3.1. Cenários de frota empregados na análise

Com base nos dados da balança, cálculos dos FVs e determinação do número N do período estudado, foi estimada a espessura de revestimento asfáltico para os três cenários previamente apresentados, considerando um pavimento asfáltico flexível.

Normalmente, o número de solicitações do eixo padrão é determinado a partir da caracterização da frota e estimativas de crescimento ao longo de um período futuro. Porém, neste estudo o número N foi calculado adotando-se apenas o somatório de todos os FV no período de 3 anos antes e 3 anos depois da alteração da tolerância de pesagem nos eixos. Para os principais veículos destacados, a partir da determinação do número N para o *cenário 1*, admitindo-se o valor da carga real, o pavimento deve ser dimensionado para um número N igual a $6,10 \times 10^7$ repetições de carga equivalentes ao eixo padrão de 80 kN (considerando os excessos de carga). Para o *cenário 2*, onde vigora a tolerância de cargas por eixo de 7,5% no período antes e de 10% no período depois, verifica-se que limitando as cargas na tolerância vigente, o número N resulta igual a $5,62 \times 10^7$. A exclusão dos veículos infratores, ou seja, com eixos carregados acima da tolerância vigente no período, representado no *cenário 3*, resulta em número N igual a $4,47 \times 10^7$ (Tabela 6).

Desta maneira, a liberação de veículos com eixos sobrecarregados com tolerância de 7,5% e posteriormente de 10% da CML deteriora o pavimento sobremaneira. Esta redução para o tráfego aferido pela exclusão dos veículos acima da CML com tolerância pode chegar a 20%, o que indica que o pavimento necessitará de intervenções de manutenção antes do previsto, devido à redução de vida útil. Estas alterações levam a um ambiente de grandes incertezas e por consequência uma baixa confiabilidade nos orçamentos para os serviços de manutenção ao longo da vida útil dos pavimentos.

3.2. Espessuras decorrentes de diferentes cenários de frota

Para estimar a espessura necessária de revestimento asfáltico de um pavimento novo, foi adotada uma estrutura sobre o subleito com CBR igual a 5%, com uma camada de sub-base em

rachão (macadame seco) de 25 cm, base granular (brita graduada simples) de 15 cm de espessura e revestimento em concreto asfáltico usinado a quente (Figura 5a). Foram determinadas as espessuras mínimas necessárias de revestimento asfáltico para as situações simuladas nos 3 cenários descritos anteriormente. A espessura mínima de revestimento foi baseada no método tradicional do CBR, preconizado no Manual de Pavimentação do DNIT (DNIT, 2006b) e em seguida realizada a análise mecanicista que utiliza os modelos apresentados pelo DER-SP (DER/SP, 2006). Adicionalmente, o cálculo da espessura também foi realizada com o uso do Método de Dimensionamento Nacional (MeDiNa), que se encontra em fase de normalização pelo Instituto de Pesquisas Rodoviárias do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes - IPR/DNIT (Souza Júnior, Motta e Silva, 2019; DNIT, 2021). Os materiais adotados estão apresentados na Figura 5b, destacando o emprego do revestimento em concreto asfáltico usinado a quente de classe de fadiga 4, que é a mistura asfáltica com maior resistência à fadiga apresentada na biblioteca do método e materiais granulares nas camadas de base e sub-base. A análise mecanicista da estrutura dimensionada a partir do método DNIT foi conduzida utilizando-se os modelos de fadiga do Asphalt Institute (1976) para a deformações de tração na fibra inferior da camada asfáltica e Dormon e Metcalf (1962) para deformações verticais de compressão no subleito e os valores admissíveis e atuantes são apresentados para cada cenário na Tabela 7.

(a) Estrutura de Pavimento Asfáltico - DNIT / DER/SP			(b) Estrutura de Pavimento Asfáltico - MeDiNa		
Camada	Espessura (cm)	Módulo (MPa)	Camada	Espessura (cm)	Módulo (MPa)
Concreto Asfáltico Usinado a Quente	Var.	3000	Concreto Asfáltico Usinado a Quente - Classe 4	Var.	10492
Brita Graduada Simples	15	200	Brita Graduada Simples	15	381
Sub-base Granular	25	150	Sub-base Granular	25	250
Subleito	-	50	Subleito	-	189

Figura 5. Estruturas de pavimento asfáltico flexível hipotético

A partir do método empírico do DNIT combinado com análise mecanicista (DER/SP), o pavimento a ser implantado para suportar o tráfego do *cenário 1*, assumindo o tráfego com os excessos de carga, deve possuir 21,5 cm de espessura de revestimento asfáltico. As limitações de carga consideradas nos *cenários 2 e 3*, podem indicar que pavimento suporte o tráfego com uma redução de 1,0 cm para o *cenário 2* e 1,5 cm para o *cenário 3*. Os resultados estão apresentados na Tabela 7, onde reúnem-se os dados comparativos dos 3 cenários considerados. Para o método MeDiNa, a espessura para o *cenário 1* deve possuir 22,5 cm, e resultou para os cenários com limitações de carga uma redução de 1,0 cm e 2,5 cm, respectivamente, para os *cenários 2 e 3*.

A adoção deste cenário tradicionalista de bases e sub-bases granulares é reflexo do histórico dos pavimentos mais antigos, das décadas de 50 a 70, e que com o passar dos anos sofreram recapamentos sucessivos para corresponder ao aumento de tráfego. Atualmente, este padrão de estrutura provavelmente não seria empregado, uma vez que para os níveis de tráfego considerados o método indicou a necessidade de grandes espessuras de revestimento asfáltico. De acordo com Santos, Bastos e Barbosa (2018), a análise de deformação permanente de cada

camada individualmente mostrou que a parcela de maior contribuição no afundamento é atribuída ao subleito, indicando uma maior sensibilidade para situações de sobrecarga nos eixos do tipo ESRD quando aplicadas as camadas granulares.

Tabela 7 – Estimativa das espessuras de revestimento asfáltico nos 3 cenários de tráfego

Situação	N USACE (x10 ⁷)	Deformações de tração na fibra inferior da camada ϵ_t (10 ⁻⁴ cm/cm)		Deformações verticais de compressão no subleito ϵ_v (10 ⁻⁴ cm/cm)		Espessura de CBUQ (cm) pelo método DNIT e DER/SP	Redução da Espessura de CBUQ (%)	Espessura de CBUQ (cm) pelo método do MeDiNa	Redução da Espessura de CBUQ (%)
		Admissível	Atuante	Admissível	Atuante				
Cenário 1	6,10	2,581	1,457	2,688	2,621	21,5	-	22,5	-
Cenário 2	5,26	2,700	1,544	2,775	2,774	20,5	5%	21,5	4%
Cenário 3	4,47	2,837	1,590	2,871	2,855	20,0	7%	20,0	11%

A utilização de bases ou sub-bases cimentadas, ou mesmo bases asfálticas, poderia resultar em estruturas de pavimento com revestimentos mais delgados. Porém, buscou-se com o pavimento flexível evidenciar as consequências das alterações das tolerâncias de balança de 7,5% para 10% que vieram sendo adotadas ao longo dos tempos para grande parte da malha rodoviária brasileira.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O aumento no carregamento usual dos veículos comerciais que circulam em rodovias brasileiras decorrentes das alterações na “Lei da Balança” promulgada em 2014, onde se aumentou de 7,5% para 10% a tolerância nos pesos dos eixos, foi observado pelo estudo realizado. Constatou-se pelos registros de pesagens de uma balança operante por 24 horas diárias e 7 dias por semana que houve um aumento de eixos sobrecarregados entre a CML e a tolerância. Antes da alteração da tolerância esses eixos representavam 12,7% do total de pesagens, e após a alteração aumentou para 21,05%. É importante realçar que as amostras estudadas são representativas uma vez que contemplaram 6 anos de dados de pesagem, totalizando 8.845.761 veículos pesados no período. Estes dados evidenciam que a tolerância de balança está sendo empregada para transportar mais carga, o que contraria as Resoluções no sentido que a tolerância foi inserida para compensar erros inerentes dos equipamentos de pesagem (ressaltando-se que os equipamentos estão cada vez mais precisos) e a movimentação de carga dentro dos próprios veículos. O aumento histórico de tolerância de 5%, para 7,5%, 10% e mais recentemente para 12,5% contraria a razão que fundamenta as alterações destas Resoluções. Além disso, evidencia-se que houve um aumento também da quantidade dos veículos infratores em relação ao PBT, ou seja, o aumento foi de 1,7% no período antes para 5,6% no período depois. Os resultados apontam, portanto, que o dano gerado pela mudança no perfil do transportador de carga gera um maior dano aos pavimentos, ou seja, os eixos sobrecarregados geram aumento no número N.

As cargas rodoviárias continuam exercendo um papel de destaque no difícil equacionamento do plano de investimentos de uma concessão rodoviária. A tendência identificada nas amostras deste trabalho indica um problema que deve ser agravado com o tempo e a recessão econômica, mesmo que temporária, o que torna mais atrativo para o transportador fazer uso da lei ao limite possível. Em vários casos, passa do limite acrescido da tolerância, mesmo em um trecho rodoviário onde há controle por balança que opera durante as 24 horas de todos os dias da semana (caso observado na rodovia do presente estudo). O aumento do transporte de carga

com excesso tende a ser maior em rodovias não fiscalizadas. O fator mais preocupante é a mudança de comportamento dos transportadores, que incorpora a tolerância na carga máxima legal e, conseqüentemente, aumenta o dano no pavimento.

Estudos complementares devem ser conduzidos para que se verifique a manutenção deste crescimento, uma vez que se observou uma tendência crescente significativa nos três anos após a alteração da lei. No caso de novas alterações dos limites de tolerância da pesagem por eixo, devem ser realizados novos estudos para caracterização do comportamento do usuário frente ao transporte de carga.

REFERÊNCIAS

- AASHTO (1993) *AASHTO Guide for Design of Pavement Structures*. Washington, D.C.: American Association of State Highway and Transportation Officials.
- Albano, J. F. (2005) *Efeitos dos excessos de carga sobre a durabilidade de pavimentos*. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/4498/000457228.pdf?sequence=1>>.
- Bock, A. L. (2016) *Pesagem em movimento de cargas atuantes em rodovias e seu impacto no desempenho de pavimentos da rede temática de asfalto, Tese de Doutorado*. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Disponível em: <<https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/156809>>.
- Bosso, M. et al. (2020) Use of regression trees to predict overweight trucks from historical weigh-in-motion data, *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*. Elsevier Ltd, 7(6), p. 843–859. DOI: 10.1016/j.jtte.2018.07.004.
- DER/SP (2006) *Projeto de pavimentação IP-DE-P00/001*. São Paulo, SP. Disponível em: <http://www.der.sp.gov.br/WebSite/Arquivos/normas/IP-DE-P00-001_A.pdf>.
- DNIT (2006a) *Manual de estudos de tráfego*. Brasília, Brasil.
- DNIT (2006b) *Manual de Pavimentação*. Brasília, Brasil.
- DNIT (2006c) *Manual de restauração de pavimentos asfálticos*. Brasília, Brasil. Disponível em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-manuais/vigentes/720_manual_restauracao_pavimentos_afalticos.pdf>
- DNIT (2021) *Instrução de Serviço -IS-247: Estudos para Elaboração de Projetos de Implantação usando o Método de Dimensanamento Nacional-MeDiNa*. Brasil.
- Dunning, A., Dey, K. C. e Chowdhury, M. (2016) Review of State DOTs Policies for Overweight Truck Fees and Relevant Stakeholders' Perspectives, *Journal of Infrastructure Systems*, 22(3), p. 05016002. DOI: 10.1061/(asce)is.1943-555x.0000295.
- Fernandes Jr., J. L. (1994) *Investigação dos efeitos das solicitações do tráfego sobre o desempenho de pavimentos*. Universidade de São Paulo.
- Ghisolfi, V. et al. (2018) Avaliação de impactos do excesso de peso no transporte rodoviário de cargas, in *32º Congresso de pesquisa e Ensino em Transportes da ANPET*. Gramado - RS, p. 576–587.
- Huang, Y. H. (2004) *Pavement Analysis and Design*. Second, Pearson. Second. New Jersey: Pearson.
- Hussain, S. e Parker, N. A. (2006) Pavement damage and road pricing, in *Annual Meeting of the Transportation Research Board*, 85. Washington, D. C.
- Medina, J. e Motta, L. M. G. (2015) *Mecânica dos Pavimentos*. 3a ed. Rio de Janeiro: UFRJ.
- Pais, J. C. et al. (2019) The pavements cost due to traffic overloads, *International Journal of Pavement Engineering*. Taylor & Francis, 20(12), p. 1463–1473. DOI: 10.1080/10298436.2018.1435876.
- Pais, J. e Pereira, P. (2016) The effect of traffic overloads on road pavements, in *8th International Conference on Maintenance and Rehabilitation of Pavements, MAIREPAV 2016*, p. 309–318. DOI: 10.3850/978-981-11-0449-7-046-cd.
- Pereira, A. M. (1985) *Análise crítica dos fatores de equivalência adotados pelo DNER e sua adequação às rodovias de tráfego pesado*. Universidade Federal do Paraná.
- Pinto, S. e Preussler, E. S. (2002) *Pavimentação rodoviária: conceitos fundamentais sobre pavimentos flexíveis*. Organizado por Copiarte. Rio de Janeiro.
- Prozzi, J. et al. (2012) *Oversize/Overweight Vehicle Permit Fee Study*. Austin, Texas.
- Romeiro Júnior, C. L. S. et al. (2020) Impact on pavement deterioration due to overload vehicle regulation in Brazil, *Transportation Research Procedia*. Elsevier B.V., 45(2020), p. 842–849. DOI: 10.1016/j.trpro.2020.02.085.
- Rys, D., Judycki, J. e Jaskula, P. (2016) Analysis of effect of overloaded vehicles on fatigue life of flexible pavements based on weigh in motion (WIM) data, *International Journal of Pavement Engineering*, 17(8), p. 716–726. DOI: 10.1080/10298436.2015.1019493.
- Santos, A. B. V., Bastos, J. B. S. e Barbosa, J. B. (2018) Influência de sobrecargas na análise e na previsão de desempenho quanto à deformação permanente em pavimentos asfálticos, in *32º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes da ANPET*. Gramado, p. 1309–1320.
- Souza Júnior, J. G. de, Motta, L. M. G. da e Silva, R. C. (2019) Dimensionamento De Pavimentos Asfálticos Pelo Novo Método Normalizado No Brasil (Medina), in *LNEC (org.) 9º Congresso Rodoviário Português*. Lisboa.

- Turnbull, W. J., Foster, C. R. e Ahlvin, R. G. (1962) Design of flexible pavements considering mixed loads and traffic volume, in University of Michigan (org.) *International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavement*. Ann Arbor, p. 130–134.
- Vallejo, F. M. L. e Bernucci, L. L. B. (2019) Análise do efeito do excesso de carga em veículos comerciais nos fatores de equivalência de carga, in *33º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes da ANPET*. Balneario Camboriu, p. 1210–1221.