

METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO DO IMPACTO DO SOBREPESO NOS CUSTOS DA MANUTENÇÃO RODOVIÁRIA

Bernardo Cascão Pires e Albuquerque

Vinícius Quintiliano Pereira

Darym Júnior Ferrari de Campos

Consórcio Accenture-Dynatest

Leonardo Roberto Perim

Ivone Catarina Simões Hoffmann

Carmen Regina Linhares Pereira Resende

Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – DNIT

RESUMO

A discussão em torno do impacto do sobrepeso dos veículos nos custos da manutenção das rodovias é um assunto controverso. Políticas públicas são recorrentemente revisitadas, geralmente resultando em aumento dos limites peso total e peso bruto por eixo dos veículos. Para que se possa tomar a melhor decisão é necessário avaliar os benefícios logísticos decorrentes do uso de veículos mais pesados em comparação ao aumento nos custos de manutenção do pavimento. Este artigo apresenta uma metodologia capaz de determinar consistentemente o aumento nos investimentos em manutenção rodoviária em função do aumento no carregamento imposto à rodovia. Para ilustrar a aplicabilidade da metodologia foi elaborado um estudo hipotético com o auxílio da ferramenta HDM-4, construindo-se uma curva que correlaciona o número de Eixos Padrão Equivalentes com o custo de manutenção de cada km de rodovia, relação que pode ser utilizada para alcançar os objetivos propostos.

ABSTRACT

The discussion about the impact of vehicle overweight on highway maintenance costs is a controversial subject. Public policies are recurrently revisited, generally resulting in increased gross vehicle weight limits and gross vehicle axle weight limits. In order to make the best decision it is necessary to evaluate the logistical benefits of using heavier vehicles in comparison with the increase in pavement maintenance costs. This article presents a methodology capable of consistently determining the investments increase in road maintenance due to the increase in the load imposed on the highway. To illustrate the applicability of the methodology, a hypothetical study was developed with the help of the HDM-4 tool, and a curve was constructed that correlates the number of Equivalent Standard Axes with the maintenance cost of each highway km, which can be used for objectives.

1. INTRODUÇÃO

O transporte rodoviário representa o principal sistema logístico ou meio para o deslocamento de cargas dentro do Brasil, atendendo cerca de 61,1% de todas as cargas movimentadas no país, uma vez que as rodovias respondem de forma acelerada à demanda das empresas, pois evita-se determinadas formalidades necessárias em outros modos (CNT, 2018). Dada a importância do modo rodoviário para o crescimento econômico brasileiro, a construção e as intervenções de manutenção da malha rodoviária tornaram-se primordiais.

A relação entre o transporte e o desenvolvimento econômico engloba a interação entre aspectos distintos, como a produtividade, renda, meio ambiente e qualidade de vida. Dessa forma, as políticas do transporte de cargas impactam as esferas econômica, social e ambiental de um país.

Com o aumento significativo do tráfego no Brasil nos últimos anos, os veículos comerciais começam a apresentar novas configurações, aumentando o número de eixos e a sua capacidade de carga. Um dos fatores responsáveis deve-se à resolução vigente nº. 526, de 29 de abril de 2015, que atualmente tolera uma sobrecarga por eixo de até 10%, quando o veículo está dentro dos 5% de limite para o Peso Bruto Total (PBT). Como consequência direta do

aumento na quantidade de veículos em circulação, aliado ao excesso de peso nos eixos rodoviários, tem-se aumentado consideravelmente a taxa de degradação da malha rodoviária, levando a um aumento nos custos da manutenção rodoviária.

Conforme Albano (2005), a utilização de abordagens para a determinação dos efeitos das cargas do tráfego nas estruturas de pavimentos, registradas em 1960, apresentam sérias limitações, pois os resultados validam-se somente para os mesmos fatores intervenientes que prevaleciam quando de seu desenvolvimento. Os fatores relacionados às solicitações do tráfego e às características dos veículos são bem diferentes da atualidade. Os modelos de desempenho constituem importantes ferramentas dos Sistemas de Gerência de Pavimentos (SGPs) capazes de prever a evolução da condição ao longo do tempo e/ou tráfego acumulado. Para isso, dependem de uma consistente caracterização do tráfego.

Tratando-se da operação dos modelos, a ferramenta que vem sendo utilizado no Brasil e em mais de 100 países para auxiliar os engenheiros na utilização de um sistema de gerência pavimentos rodoviários federais, é o programa computacional *Highway Development and Management Tool* (HDM-4).

Neste âmbito, no presente artigo pretende-se definir uma metodologia que permita analisar ou quantificar o efeito do sobrepeso nos custos de manutenção de rodovias. Para isso, as seções 2 e 3 consistem em um acervo bibliográfico à respeito do tema. Na seção 4 apresenta-se a metodologia proposta e posteriormente, na seção 5, mostra-se a aplicação da metodologia em um caso hipotético. Finalmente, contempla-se na seção 6 as conclusões da pesquisa.

2. CARACTERÍSTICAS DO TRÁFEGO RODOVIÁRIO

O tráfego de veículos abrange um papel essencial no dimensionamento e comportamento das estruturas de pavimentos ao longo do tempo. Nas últimas décadas, estudos e técnicas de análise têm sido desenvolvidos com o interesse de definir a forma mais realista das condições impostas pelo carregamento oriundo dos diferentes tipos de veículos e dos seus reflexos nos pavimentos, como exemplo, os trabalhos de Brito *et al.* (2013), Réus *et al.* (2014) e Ferrari de Campos (2017).

Segundo Fontenele (2011), o volume de tráfego representa o número de veículos que atravessam uma determinada seção transversal de uma via por uma unidade de tempo. Do ponto de vista gerencial, a segmentação possibilita organizar a malha segundo as características rodoviárias, como o volume de tráfego da via. Para o autor, a sua determinação depende do conhecimento da composição do tráfego, ou seja, da proporção do tipo de veículo na corrente de tráfego, uma vez visto a diferença existente entre as configurações dos caminhões e ônibus.

2.1. Tipos de veículos e cargas de eixos

De acordo com DNIT (2006), existem cinco tipos básicos de veículos: veículo de passageiros (VP); veículo comercial rígido (CO); ônibus de longo percurso (O); semirreboques (SR); e reboques (RE). Todos os veículos vinculados possuem características de eixos determinadas, sendo que cada eixo gera um dano diferente ao pavimento devido à carga aplicada. Sendo assim, os veículos podem ser classificados pelos seus eixos de acordo com o peso máximo admissível e número de pneus.

Os tipos de eixos de veículos rodoviários de carga podem ser classificados do tipo isolado ou eixo simples; e do tipo conjunto ou eixos em tandem. Os eixos simples podem ser dotados apenas de uma roda na extremidade (rodagem simples) ou duas rodas (rodagem dupla). Segundo DNIT (2006), destaca-se a existência de quatro tipos de eixos utilizados pelos veículos de carga que trafegam nas rodovias brasileiras, a saber:

- Eixos Simples de Roda Simples (ESRS), com carga legal máxima de 6,0 tf;
- Eixos Simples de Roda Dupla (ESRD), com carga legal máxima de 10,0 tf;
- Eixos Tandem-Duplo (ETD), com carga legal máxima de 17,0 tf;
- Eixos Tandem-Triplo (ETT), com carga legal máxima de 25,5 tf.

2.2. Cargas sobre os pavimentos

As cargas do tráfego sobre os pavimentos provocam deformações recuperáveis e/ou permanentes, sendo as primeiras em função do comportamento elástico da estrutura do pavimento que cessam quando extingue-se o carregamento. Tais deformações dependem não somente da magnitude da carga aplicada, mas também das características dos materiais constituintes das camadas do pavimento, da geometria do carregamento e da pressão de enchimento dos pneus. Ilustra-se na Figura 1 uma estrutura de pavimento e as respectivas solicitações advindas da passagem do tráfego.

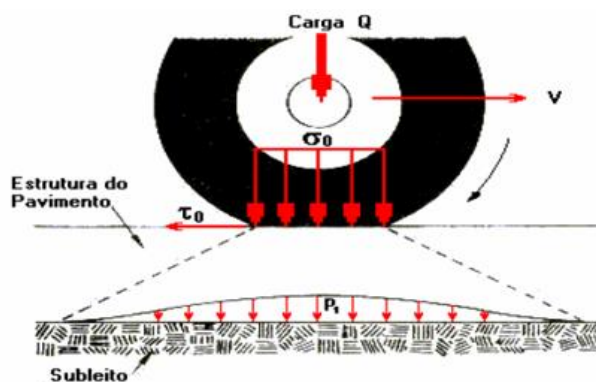


Figura 1: Cargas no Pavimento (Santana, 1993)

Os caminhões representam os principais agentes deterioradores dos pavimentos. Com as inovações tecnológicas da modalidade rodoviária, os efeitos considerados antigamente não são mais os mesmos, já que as novas configurações trazem veículos comerciais com mais eixos e maior capacidade de carga. Albano (2005) conclui que, quanto maior for o nível de carga por eixo, mais pronunciado é o valor da deflexão para cada nível de pressão de inflação considerado, evidenciando assim a potencialidade do surgimento de danos ao pavimento.

3. EFEITOS DO SOBREPESO DO TRÁFEGO RODOVIÁRIO

Muitas vezes os limites legais de cargas não são observados por parte dos transportadores, dos fabricantes de veículos e pelas autoridades responsáveis em aprovar projetos de novos veículos. De forma geral, o excesso de cargas ou sobrepeso aumenta a taxa de desgaste do asfalto, o que leva ao surgimento de panelas e afundamento do asfalto nas rodovias.

3.1. Limites para o transporte de carga

Conforme o Código de Trânsito Brasileiro (CTB), o Conselho Nacional de Trânsito (CONTRAN) constitui o órgão responsável por regulamentar o transporte rodoviário.

Tratando-se do transporte de carga, as resoluções nº 210 (CONTRAN, 2006a) e nº 211 (CONTRAN, 2006b) dispõem das informações necessárias para a pesquisa.

CONTRAN (2015) regulamentou, pela Resolução nº 526, as regras vigentes para os limites de sobrepeso dos veículos comerciais. A tolerância de sobrecarga por eixo é de 10%, desde que o veículo esteja dentro dos 5% de limite para o peso bruto total (PBT). Quando o veículo estiver acima deste limite, a tolerância passa a ser de 7,5% por eixo.

3.2. Controle e fiscalização do sobrepeso

Sem a adoção de um rigoroso controle e fiscalização do sobrepeso, a maioria das cargas transportada passa despercebida. De acordo com o DNIT (2006), existem dois tipos principais de balanças: as fixas e as móveis. O sistema de operação das balanças fixas deve ser realizado 24 horas por dia, sem interrupções, inclusive finais de semana e feriados. Em contrapartida, o funcionamento das balanças móveis deve ser de 8 horas por dia, resultando em 44 horas semanais. Vale ressaltar que as balanças móveis podem ser instaladas aos sábados, domingos e feriados quando for de interesse do DNIT.

De acordo com a autarquia, a pesagem dos veículos divide-se entre o tipo estática e dinâmica. Albano (2005) menciona que no primeiro tipo, havendo sobrepeso durante a passagem do veículo, o mesmo é encaminhado para uma nova pesagem, que é realizada de forma estática e com mais precisão. Já as balanças dinâmicas possibilitam obter dados em função do PBT e da carga por eixo sem que o veículo estacione e, por meio do comprimento total e da separação entre os eixos, define-se a classificação e o controle dos limites.

3.3. Impactos do sobrepeso

A fim de exemplificar evidências e impactos do sobrepeso no tráfego rodoviário, apresenta-se neste tópico algumas pesquisas e informações relacionada ao tema.

3.3.1. Custo e vida útil do pavimento

O sobrepeso pode ser definido pelo excesso no PBT e do peso por eixo. Generalizando, ambos danificam o veículo e reduzem a vida útil do pavimento, no qual o DNIT (2006) constata que um acréscimo de 20% no peso irá duplicar o efeito da carga no pavimento, ou seja, reduzir a vida útil da estrutura em 50%.

Estabelecido no AASHO *Road Test* e reforçado por Chou (1996), a relação entre a carga do tráfego e a deterioração do pavimento obedece a lei da 4ª potência, no qual um eixo de carga duas vezes mais carregado que um outro causará 16 vezes mais danos ao mesmo pavimento. Seguindo o mesmo raciocínio, baseando-se ainda na lei da 4ª potência, Brito *et al.* (2013) afirmou que um pavimento projetado para 15 anos de vida útil, com sobrecargas de 5%, 7,5% e 10% terá sua vida útil reduzida significativamente. Já Albano (2004), mostrou que os 2,5% excedentes sobre a carga por eixo responsabiliza-se pela redução de 10 a 15% da vida prevista do pavimento. Em outro estudo, Réus *et al.* (2014) verificaram a redução de até 73,7% na vida útil do pavimento, quando o mesmo é solicitado por uma carga acima de 20% da carga estabelecida por eixo.

Os excessos de carga aceleram estes processos de deterioração, acarretando em um maior custo de manutenção e conservação. Entretanto, devido à relação do sobrepeso com os custos de manutenção ser um assunto controverso, os instrumentos para a quantificação dos

impactos de externalidades causadas pelo volume de transporte não são satisfatórios, com controvérsias em relação ao transporte e os seus impactos, bem como o cálculo dos custos associados (Castro, 2013).

3.3.2. Fator Equivalente de Cargas e Eixo Padrão Equivalente

Após os estudos desenvolvidos pela AASHTO *Road Test*, no final da década de 50, definiu-se o eixo padrão. Trata-se de um eixo simples, com rodagem dupla e carga de 8,2 tf e 5,6 kg/cm² de pressão de inflação dos pneus. Sendo assim, a previsão de tráfego para um pavimento é definido em função da estimativa de passagens do eixo padrão. Pode-se relacionar cada tipo de eixo ou conjunto de eixos ao eixo padrão através do Fator Equivalente de Cargas (FEC), conforme a Tabela 1. Por fim, o tráfego previsto é definido em função do número equivalente de operações do eixo padrão, durante o período de projeto.

Tabela 1: Fatores de equivalência de carga

Tipo de Eixo	Faixas de Carga (t)	AASHTO	USACE	ESAL
ESRS	0 - 8	$\left(\frac{P}{7,77}\right)^{4,32}$	$2,0782 \times 10^{-4} \times P^{4,0175}$	$ESALF = \left(\frac{P}{6,6}\right)^4$
ESRD	≥ 8	$\left(\frac{P}{8,17}\right)^{4,32}$	$1,8320 \times 10^{-6} \times P^{6,2542}$	$ESALF = \left(\frac{P}{8,16}\right)^4$
ETD	0 - 11 ≥ 11	$\left(\frac{P}{15,08}\right)^{4,14}$	$1,592 \times 10^{-4} \times P^{3,472}$ $1,528 \times 10^{-6} \times P^{5,484}$	$ESALF = 2 \left(\frac{\frac{P}{2}}{7,55}\right)^4$
ETT	0 - 18 ≥ 18	$\left(\frac{P}{22,95}\right)^{4,22}$	$8,0359 \times 10^{-5} \times P^{3,3549}$ $1,3229 \times 10^{-7} \times P^{5,5789}$	$ESALF = 3 \left(\frac{\frac{P}{3}}{7,63}\right)^4$

Na engenharia rodoviária, determina-se a vida útil de um projeto por meio dos cálculos preconizados na norma técnica. No caso de uma mesma carga estabelecida, quanto menor o número de eixos de um veículo, maior o valor equivalente em número de solicitações do eixo padrão em função da maior concentração da carga.

Segundo Motta (1991), mencionado por Franco (2007), devido a grande variabilidade de eixos, de pneus e das pressões, os métodos consagrados de dimensionamento transformam as inúmeras tensões e cargas atuantes em um número equivalente de passagens de um eixo padrão.

3.3.3. Tensões e deformações

A aplicação de carga resulta um estado de tensões na estrutura do pavimento ao longo da sua profundidade. O Manual do DNIT (2006) enfatiza que todas as cargas do tráfego causam deflexões nas camadas do pavimento e alteram o estado de tensões e deformações. Ferrari de Campos (2017) apresentou um estudo das tensões e deformações oriundas do volume de tráfego nas camadas de um pavimento com o aumento do número de eixos e de cargas excedentes, mostrando que tais fatores apresentam impactos negativos e que devem ser considerados. Como resultado, o autor mencionou que deve-se atentar inclusive para o tipo de solo local, pois para alguns solos, como o solo poroso, colapsível e laterizado superficialmente, essas tensões podem ser suficientes para gerar um colapso, caso haja variação de umidade.

4. METODOLOGIA

Determinar os limites de peso por eixo que levam ao cenário mais vantajoso para o país é uma tarefa que deve contemplar três pontos de vista. Em primeiro lugar, reduzir os custos operacionais é um dos interesses das transportadoras. Para que isso ocorra, o cenário mais vantajoso concretiza-se quando se realiza um menor número de viagens em veículos mais carregados, ou seja, ao se aumentar os limites de peso por eixo. Esse cenário também desperta interesse da sociedade, uma vez que ao se reduzir os custos de transporte espera-se uma redução nos preços finais dos produtos.

Por outro lado, um aumento no peso dos veículos leva a um aumento na taxa de deterioração dos pavimentos, o que leva a um aumento nos custos com manutenção. Assim, é de interesse dos órgãos responsáveis pelo gerenciamento da infraestrutura rodoviária a diminuição dos limites de peso por eixo. Por fim, qualquer alteração nos limites de peso mudará o padrão de consumo de combustível, a frequência de troca de pneus, o consumo de lubrificantes, e a taxa de deterioração dos veículos. Mudanças nesses mercados podem gerar impactos diretos na economia, como aumento e/ou redução no desemprego e no montante de impostos recolhidos pelo poder público.

Como comentado anteriormente, o presente trabalho discorre sobre um desses pontos de vista, no caso o impacto do sobrepeso nos custos da manutenção rodoviária. Nesse tocante, sabe-se que cada entidade responsável pela gestão da infraestrutura desse modo de transporte possui suas próprias políticas e modelos de deterioração, portanto propõe-se aqui um método de ampla aplicabilidade, posteriormente ilustrado por um caso hipotético. O cronograma de atividades consiste em um processo de 5 etapas:

1. Definição dos modelos de deterioração e política de intervenções: nessa primeira etapa deve-se desenvolver/levantar os modelos de evolução da condição do pavimento em função das condições de contorno do problema (clima, volume de tráfego, condição atual do pavimento). Muitas vezes os modelos levantados foram elaborados a partir de um cenário diferente do que se tem no local, sendo necessária sua calibração. É necessário também determinar a política de manutenção que será aplicada no pavimento, o que inclui as intervenções que serão utilizadas, seus custos, e o momento de sua aplicação;
2. Geração de uma rede viária artificial, contemplando as condições esperadas para os parâmetros estudados: a segunda etapa do processo consiste em criar, artificialmente, segmentos de rodovia com características diversas, de forma similar ao método de Monte Carlo. Aqui deve-se contemplar todas as características físicas da rodovia que impactam nos custos da manutenção, tais como condições estrutural e superficial do pavimento, larguras de faixa e acostamentos, quantidade de faixas, dentre outras;
3. Simulação da evolução da condição das rodovias para vários casos de carregamento por um período de tempo considerável: de posse dos modelos de deterioração, das políticas de intervenção e das seções homogêneas procede-se à definição de várias configurações de carregamento, em termos de número N ou ESAL. Sendo assim, é possível simular todas as combinações possíveis, avaliando o comportamento do pavimento em diversos casos de carregamento e determinando-se os custos unitários de manutenção para a malha rodoviária. A partir desses resultados pode-se elaborar um gráfico relacionando o investimento esperado em manutenção em função da quantidade de ESALs na rodovia;
4. Determinação do acréscimo no número de eixos padrão: em seguida é necessário determinar, para cada trecho rodoviário, a expectativa de aumento no número de ESALs

caso sejam permitidas maiores cargas por eixo;

5. Cálculo do impacto nos custos de manutenção: por fim, procede-se à determinação do aumento nos custos de manutenção de cada trecho rodoviário. O somatório desses valores representa o impacto global da adoção de uma medida de flexibilização dos PBTs e pesos por eixo.

As etapas supracitadas serão ilustradas e detalhadas na seção subsequente, a partir de um cenário hipotético elaborado pelos autores.

5. APLICAÇÃO PRÁTICA DA METODOLOGIA E DISCUSSÕES

Como mencionado anteriormente, a metodologia proposta na presente pesquisa será ilustrada por meio de um caso hipotético, elaborado a partir das informações e modelos utilizados atualmente pelo DNIT.

Na etapa inicial da metodologia deve-se definir modelos de deterioração do pavimento e políticas de intervenções. Os primeiros geralmente representam o resultado de extensas campanhas de estudos que permitem avaliar o comportamento do pavimento na região. Tais modelos devem possuir a capacidade de atualizar a condição do pavimento com o passar do tempo e dos veículos, indicando a taxa de evolução das principais patologias ao longo dos anos. Para essa publicação, utilizou-se o modelo presente na ferramenta computacional HDM-4 versão 2.10. O DNIT estudou 50 segmentos de 1 km de extensão em diversos pontos da malha rodoviária brasileira, sendo possível calibrar os coeficientes das equações de deterioração implementadas no *software*. Como resultado, obteve-se 20 famílias de calibração, que contemplam os 5 tipos de climas do país (Equatorial, Temperado, Tropical Brasil Central, Tropical Nordeste Oriental e Tropical Zona Equatorial), o tipo de base do pavimento (granular ou cimentada), o material da superfície (CBUQ ou Tratamento Superficial) e o tráfego (baixo, médio ou alto). Todas as 20 famílias de calibração foram utilizadas nessa pesquisa.

No tocante à política de manutenções é importante definir quais soluções serão adotadas, o momento de sua aplicação (gatilhos), os seus custos e os efeitos em termos de melhoria na condição do pavimento. As intervenções e os seus gatilhos adaptaram-se do catálogo de intervenções do DNIT, podendo ser vistas nas Tabelas 2 a 5, a seguir. Seus custos foram elaborados por meio de composições com base no SICRO de maio de 2018 para o estado de Minas Gerais. Por fim, para a condição do pavimento pós obra adotou-se os valores padrão do HDM-4. No caso do HDM-4, é possível fazer a ferramenta testar todos os programas de intervenção, informando aquele que é mais vantajoso ao final da análise, bem como seu cronograma físico-financeiro anual, procedimento adotado nesse artigo.

Tabela 2: Programa de Intervenções mínimo

IRI	Trincamento	VMDc ≤	800	1600	2400	3200
		800	< VMDc ≤ 1600	< VMDc ≤ 2400	< VMDc ≤ 3200	< VMDc
IRI ≤ 6	TR ≤ 25	MR	MR	MR	MR	MR
	TR ≥ 25	REC3	REC3	REC3	REC3	REC3
6 ≤ IRI	TR ≤ 25	REC3	REC3	REC3	REC3	REC3
	TR ≥ 25	REC3	REC3	REC3	REC3	REC3

Tabela 3: Programa de Intervenções 1

IRI	Trincamento	VMDc ≤	800	1600	2400	3200
		800	< VMDc ≤ 1600	< VMDc ≤ 2400	< VMDc ≤ 3200	3200 < VMDc
IRI ≤ 3	TR ≤ 10	MR	MR	MR	MR	MR
	TR ≥ 10	Mi	Mi	Mi	Mi	Mi
3 ≤ IRI ≤ 4.5	TR ≤ 10	H4	H4	H4	H4	Hpol4
	TR ≥ 10	FSp+H4	FSp+H4	FSp+H4	FSp+H4	FSp+Hpol4
	TR ≤ 10	H4	H4	H4	H4	Hpol4
4.5 ≤ IRI ≤ 6	TR ≥ 10	FSp+REP +H4	FSp+TSD +H5	FSp+TSD +H5	FSp+TSD +H5	FSp+TSDpol +Hpol4
	TR ≤ 10	REP+H4	REP+H6	REP+H6	REP+H6	REP+Hpol6
6 ≤ IRI	TR ≤ 10	FSp+TSD +H6	FSp+TSD +H6	FSp+TSDpol +H6	FSp+TSDpol +H6	REC5

Tabela 4: Programa de Intervenções 2

IRI	Trincamento	VMDc ≤	800	1600	2400	3200
		800	< VMDc ≤ 1600	< VMDc ≤ 2400	< VMDc ≤ 3200	3200 < VMDc
IRI ≤ 3	TR ≤ 10	MR	MR	MR	MR	MR
	TR ≥ 10	Mi	Mi	Mi	Mi	Mi
3 ≤ IRI ≤ 4.5	TR ≤ 10	H4	H7	H9	Hpol8	Hpol8
	TR ≥ 10	FSp+H4	FSp+H7	FSp+H9	FSp+Hpol8	FSp+Hpol8
	TR ≤ 10	H4	H7	H9	Hpol8	Hpol8
4.5 ≤ IRI ≤ 6	TR ≥ 10	FSp+REP +H4	FSp+TSD +H7	FSp+TSD +H9	FSp+TSD +Hpol8	FSp+TSDpol +Hpol8
	TR ≤ 10	REP+H4	REP+H8	REP+H10	REC4	REC5
6 ≤ IRI	TR ≥ 10	FSp+TSD +H6	REC3	REC4	REC4	REC5

Tabela 5: Programa de Intervenções 3

IRI	Trincamento	VMDc ≤	800	1600	2400	3200
		800	< VMDc ≤ 1600	< VMDc ≤ 2400	< VMDc ≤ 3200	3200 < VMDc
IRI ≤ 3	TR ≤ 10	MR	MR	MR	MR	MR
	TR ≥ 10	Mi	Mi	Mi	Mi	Mi
3 ≤ IRI ≤ 4.5	TR ≤ 10	H4	H7	H10	Hpol10	Hpol10
	TR ≥ 10	FSp+H4	FSp+H7	FSp+H10	FSp+Hpol10	FSp+Hpol10
	TR ≤ 10	H4	H7	H12	Hpol10	Hpol10
4.5 ≤ IRI ≤ 6	TR ≥ 10	FSp+REP +H4	FSp+TSD +H7	REC4	REC4	REC6
	TR ≤ 10	REP+H4	REP+H8	REC4	REC4	REC6
6 ≤ IRI	TR ≥ 10	FSp+TSD +H6	REC3	REC4	REC4	REC6

Nas tabelas acima, o VMDc consiste no volume médio diário de tráfego comercial, Mi representa um micropavimento de 1,5cm, Hx é a adição de uma capa de 'x' cm de CBUQ, FSp equivale a uma fresagem parcial (até 50% da área), FSx é uma fresagem total de 'x' cm, TSD é o emprego de um tratamento superficial duplo, REP uma reperfilagem e, finalmente, RECx é uma reconstrução. Os custos adotados para cada uma dessas intervenções pode ser visto na Tabela 6.

Tabela 6: Custos das Intervenções

Intervenção	Espessura Adicional (cm)	Custo (RS/m ²)	Intervenção	Espessura Adicional (cm)	Custo (RS/m ²)
MR	-	13,35	FSp+H4	4	69,54
Mi	1,5	20,94	FSp+H7	7	97,73
H4	4	43,76	FSp+H9	9	115,57
H7	7	71,95	FSp+H10	10	124,49
H9	9	89,79	FSp+Hpol4	4	73,43
H10	10	98,70	FSp+Hpol8	8	114,42
H12	12	116,54	FSp+Hpol10	10	134,20
Hpol4	4	47,65	FSp+REP+H4	6	88,82
Hpol8	8	88,64	FSp+TSD+H5	7	94,53
Hpol10	10	108,42	FSp+TSD+H7	9	113,80
REP+H4	6	63,03	FSp+TSD+H9	11	131,63
REP+H6	8	80,87	FSp+TSD+Hpol8	10	130,49
REP+H8	10	100,14	FSp+TSDpol+Hpol4	6	89,49
REP+H10	12	117,98	FSp+TSDpol+Hpol8	10	130,49
REP+Hpol6	8	86,70	REC3 (base granular)	10*	149,98
FS5+TSD+H6	8	128,16	REC4 (base cimentada)	10*	159,90
FS5+TSDpol+H6	8	128,16	REC5 (base granular)	12,5*	213,77
			REC6 (base cimentada)	12,5*	225,91

*A espessura das intervenções de REC é referente à altura da camada de CBUQ após a reconstrução do pavimento.

A segunda etapa do processo consiste em criar, artificialmente, segmentos de rodovia com características diversas, de forma similar ao método de Monte Carlo. Aqui deve-se contemplar todas as características físicas da rodovia que impactam nos custos da manutenção, tais como condições estrutural e superficial do pavimento, larguras de faixa e acostamentos, quantidade de faixas, dentre outras. É importante notar que quanto maior a quantidade de parâmetros, mais assertivos serão os resultados.

Quanto à extensão dos segmentos rodoviários criados artificialmente, sugere-se que todos tenham a mesma dimensão. Isso se mostra benéfico por questões de validade do estudo. Caso adote-se extensões variadas nessa etapa, condizentes com a atual condição da malha gerenciada, a etapa mais demorada do estudo, referente às simulações dos modelos, precisará ser refeita periodicamente. Contudo, adotando-se dimensões constantes essa etapa precisará ser refeita apenas quando da mudança dos modelos e/ou política de intervenções, ações que ocorrem com frequência relativamente baixa.

Para o caso hipotético em questão foram criadas 2.240 seções homogêneas em pista simples com 1 km de extensão, 7,2 m de largura e 2,5 m de acostamento de cada lado a partir de 4 parâmetros, a saber, o IRI, o percentual de trincas estruturais (TR), o número estrutural (SNP) e a família de calibração, conforme a Tabela 7. Ressalta-se a possibilidade do IRI ser superior a 6, do SNP superior a 4,5 e do TR maior que 45, contudo esses valores não contemplaram por serem considerados extremos e pouco frequentes, podendo enviesar os resultados obtidos.

Tabela 7: Parâmetros utilizados para gerar as redes viárias artificiais

Parâmetro	Quantidade de Classes	Valores
IRI	7	1,5; 2,25; 3,0; 3,75; 4,5; 5,25; 6,0
TR	4	0; 15; 30; 45
SNP	4	1,5; 2,5; 3,5; 4,5
Famílias de Calibração	20	Famílias calibradas pelo DNIT

Em seguida é necessário simular, para cada seção homogênea artificial, os custos de manutenção em diversos casos de carregamento. Aqui foram estudadas frotas compostas apenas de veículos de passeio e caminhões pesados. A composição da frota foi tal que 2/3 do volume de tráfego representou-se pelos veículos de passeio, com ESAL igual a 0 e o restante por um caminhão tipo 3S3 com ESAL de 26,18. Elaboraram-se 9 casos de carregamento, apresentados na Tabela 8.

Tabela 8: Cenários de carregamento

Veículos de Passeio	Caminhões	ESAL/dia na faixa mais carregada
0	0	0
40	20	523,6
80	40	1.047,2
160	80	2.094,4
320	160	4.188,8
640	320	8.377,6
1280	640	16.755,2
2560	1280	33.510,4
5120	2560	67.020,8

Após as simulações dos 9 casos de carregamento em todas as seções homogêneas artificiais, tornou-se possível construir um gráfico do custo esperado de manutenção em função da quantidade de ESAL/dia na faixa mais carregada, como mostrado na Figura 2. Nesse caso foram feitas simulações para determinar os custos de manutenção nos 5 primeiros anos da solução com o maior Valor Presente Líquido (VPL), a taxas de desconto e de crescimento de tráfego de 7% e 3% ao ano, respectivamente, e sem restrições no orçamento.

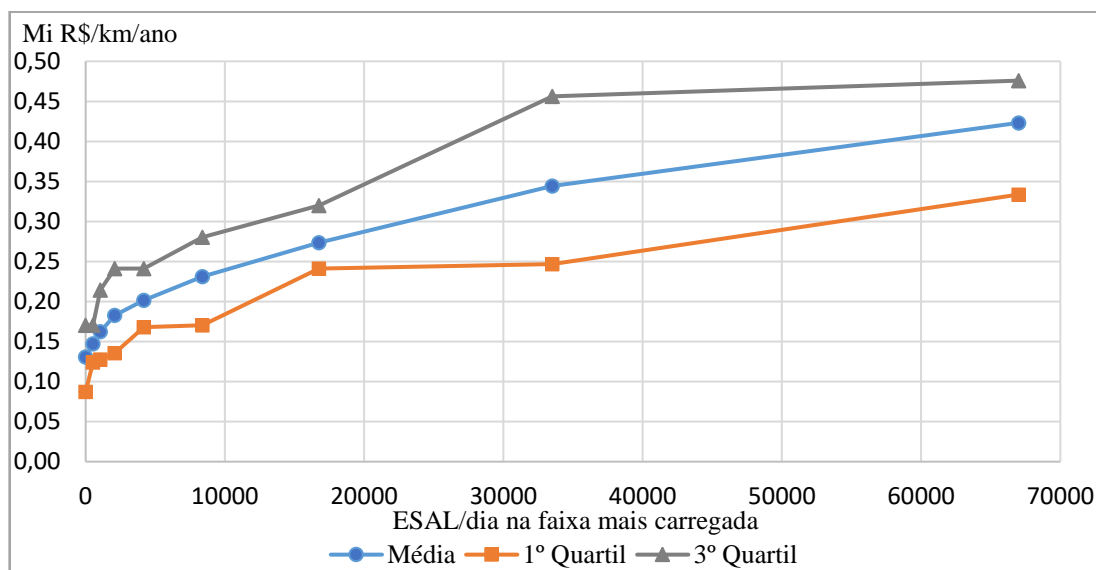


Figura 2: Custos de manutenção *versus* ESAL por dia na faixa mais carregada

Para esse estudo, todas as seções homogêneas tiveram com o mesmo peso nos cálculos da média e quartis, contudo, em um caso real deve-se adotar ponderação condizente com a atual situação da malha rodoviária gerida. Caso as condições de conservação e tráfego mudem ao longo dos anos, basta refazer os cálculos de média e quartis com os novos pesos, não sendo necessário realizar as simulações novamente.

Observa-se que o comportamento da curva obtida assemelha-se a um logaritmo ou a uma função de potência. Isso significa que os aumentos sucessivos no carregamento apresentam impactos cada vez menores nos custos de manutenção. Nota-se ainda que a dispersão nos resultados é relativamente pequena, uma vez que os quartis estão próximos da média.

As etapas subsequentes consistem em determinar o aumento no número de ESAL/dia em caso de flexibilização do PBT e do peso máximo permitido por eixo. Essa etapa demanda extensos estudos econômicos e de tráfego, a fim de determinar o novo peso médio de cada classe de veículos e, enfim, calcular o aumento no número de ESAL/dia em cada trecho da malha. De posse desse dado é possível realizar uma interpolação entre os pontos do gráfico para estimar o aumento nos custos de manutenção.

Vale ressaltar que esse gráfico pode ser utilizado também para outras finalidades, como para prever os custos de manutenção em caso de redução no tráfego, situação frequente quando da construção de novos trechos rodoviários. Também é possível fazer uso dos resultados para estimar os investimentos em manutenção de trechos que ainda não foram construídos, dado importante para estudos de viabilidade técnica do empreendimento.

6. CONCLUSÕES

O sobrepeso nas rodovias federais é um problema ainda muito frequente no Brasil. Sabe-se que veículos que trafegam com cargas superiores às permitidas causam uma grande deterioração no pavimento, impactando negativamente nos custos de manutenção rodoviária. Para sanar esse problema, a coleta contínua e eficiente de dados referentes aos volumes de tráfego e seus respectivos pesos faz-se necessária e tem um papel essencial para a engenharia rodoviária, pois representa o instrumento de apoio para a programação de investimentos e intervenções de manutenção, sejam elas referentes ao planejamento da fiscalização, às ações de adequação da malha rodoviária, à otimização de recursos ou à melhoria da qualidade dos serviços.

Nesse sentido, o presente trabalho objetivou a definição de uma metodologia versátil e de fácil aplicação para determinar o impacto econômico do sobrepeso no pavimento. Os resultados obtidos com essa metodologia permitem avaliar tanto de forma gerencial quanto de forma detalhada o impacto nos custos de manutenção em caso de aumento ou redução no carregamento.

O formato da curva obtida indica que uma relação direta entre a quantidade de eixos padrão equivalentes que trafegam no segmento por dia e os custos de manutenção, contudo essa relação é cada vez menor com o aumento no ESAL/dia. Esse foi um resultado obtido para análises de médio prazo, nos primeiros 5 anos, a partir dos quais se espera que as rodovias tenham passado por manutenções corretivas com o objetivo de reforçar sua estrutura para os novos carregamentos.

Ressalta-se que os resultados aqui obtidos referem-se a uma situação hipotética elaborada pelos autores, não devendo ser extrapolados para casos reais. Mesmo resultados obtidos com dados reais não devem ser utilizados fora da região em estudo, uma vez que o problema é muito sensível às condições de contorno, representadas pelos modelos de deterioração do pavimento, políticas de intervenção, características físicas e geométricas da rede viária, taxas de desconto e de crescimento de tráfego, dentre outros.

Finalmente, os resultados obtidos com essa metodologia devem ser vistos como um dos fatores quando da tomada de decisão por flexibilizar os limites de peso dos veículos. É necessário, ainda, observar os impactos no custo do frete, no consumo de combustível e na deterioração dos veículos para que se possa chegar a valores ótimos de PBT e peso por eixo.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes pelo auxílio e fornecimento de dados referentes aos modelos de calibração do HDM-4.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Albano, J. F. (2004) Excessos de carga e pesagem de veículos rodoviários de carga. Anais da III Semana de Engenharia de Produção e Transportes. Porto Alegre: UFRGS.
- Albano, J. F. (2005) Efeitos dos Excessos de Carga sobre a durabilidade dos pavimentos. Tese de Doutorado em Engenharia de Produção, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 232p.
- Boletim Estatístico – CNT (2018). Confederação Nacional dos Transportes. Publicação em 18 de junho de 2018. Consultado em 19 de Junho de 2019.
- Brito, L., Ceratti, J. A. P., Núñez, W. P., Bock, A., Vitorello, T., Hirsch, F., Cronst, F., Cezimbra, R., Tiefensee, M. D., Matta, H.A.N. (2013) Implantação de um sistema de pesagem em movimento em alta velocidade na rodovia BR-290/RS, FreeWay, para estudo de espectro de cargas comerciais rodantes. Revista Estradas, nº18, p. 22-28
- Castro, N. (2013) Mensuração de externalidades do transporte de carga brasileiro. Journal of Transport Literature, v. 7, n. 1, p. 163-181.
- Chou, C. J. (1996) Effect of overloaded heavy vehicles on pavement and bridge design. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. Washington, D. C., n. 1539, p. 58-65.
- Conselho Nacional De Trânsito – CONTRAN (2006a). Resolução nº 210/06 de 13/11/2006. Estabelece os limites de pesos e dimensões para veículos que transitem por vias terrestres, 7p.
- Conselho Nacional De Trânsito – CONTRAN (2006b). Resolução nº 211/06 de 13/11/2006. Dispõe sobre requisitos de segurança necessários à circulação de Combinações de Veículos de Carga – CVC, 15p.
- Conselho Nacional De Trânsito – CONTRAN (2015). Resolução nº 489/1 de 29/04/2015. Fixa metodologia de aferição de peso de veículos, estabelece percentuais de tolerância e dá outras providências. Brasília, 2015. 2p.
- Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte - DNIT. Manual de Estudos de Tráfego. Pub. IPR-723. Rio de Janeiro, 2006. 384p.
- Ferrari de Campos, D. J.; Nicolato, L.; Camapum, J. C. (2017) Avaliação das Tensões e Deformações nas Camadas de Pavimento Flexível devido ao Aumento do Número de Eixos e da Variação do Módulo de Elasticidade. Anais do Geocentro 2017. Goiânia, GO. ABMS
- Fontenele, H. B. (2011) Representação do tráfego de veículos rodoviários de carga através de espectros de carga por eixo e seu efeito no desempenho de pavimentos. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Escola de Engenharia da Universidade de São Paulo. São Carlos, SP, 287p.
- Franco, F.A.C.P (2007) Método de dimensionamento mecânico-empírico de pavimentos asfálticos – sispav. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 318 p.
- Manual de Reabilitação de Pavimentos Asfálticos - DNER (1998) Diretoria de Desenvolvimento Tecnológico, Divisão de Capacitação Tecnológica, 243p.
- Motta, L.M.G. (1991) Método de Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis; Critério de Confiabilidade e Ensaios de Cargas Repetidas. Tese de doutorado em Ciências e Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 366p.
- Réus, T. F.; Júnior, C. A. P. S.; Fontenele, H. B. (2014) Dano pelo sobrepeso de veículos comerciais ao pavimento flexível. Rev. Tecnol. Fortaleza, v. 35, n. 1 e 2, p. 55-65.

Bernardo Cascão Pires e Albuquerque (bernardo.albuquerque@dynatest.com)
Vinícius Quintiliano Pereira (vinicius.q.pereira@accenture.com)
Darym Júnior Ferrari de Campos (darymjuniorgmail.com)
Leonardo Roberto Perim (leonardo.perim@dnit.gov.br)
Ivone Catarina Simões Hoffmann (ivone.hoffmann@dnit.gov.br)
Carmen Regina Linhares Pereira Resende (carmen.resende@dnit.gov.br)