

IMPACTO DAS SOBRECARGAS DO TRÁFEGO NO DESEMPENHO DOS PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS

Jorge Pais¹, Paulo Pereira²

¹ Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil, 4800-058 Guimarães, Tel: + 351 253 510 200, e-mail: jpais@civil.uminho.pt

² Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil, 4800-058 Guimarães, Tel: + 351 253 510 200, e-mail: ppereira@civil.uminho.pt

Sumário

O tráfego rodoviário é caracterizado por um grande número de diferentes tipos de veículos os quais estão associadas cargas máximas por eixo, sendo o dimensionamento realizado função destas cargas ou para espectros obtidos de pesagens de tráfego. No entanto, há também um número considerável de veículos que circulam com excesso de carga, os quais causam danos significativos para os pavimentos, aumentando o custo do ciclo de vida do pavimento. O presente trabalho investiga o impacto das sobrecargas do tráfego nos pavimentos rodoviários. O estudo revelou que a presença de veículos sobrecarregados pode aumentar os custos de pavimento em mais de 100% em comparação com o custo dos mesmos veículos com cargas legais.

Palavras-chave: Dimensionamento de pavimentos; Tráfego; Sobrecargas.

1 INTRODUÇÃO

A reabilitação dos sistemas rodoviários é responsável pelo dispêndio de avultadas quantias de dinheiro dos contribuintes ou dos utilizadores do sistema de modo a dota-lo de uma vida útil compatível com a procura. Nos sistemas rodoviários, os pavimentos são projetados para durar um determinado período de vida, mas muitas vezes não tem o desempenho esperado e, depois de um período relativamente curto de tempo, precisam ser reabilitados. O principal problema que aparece nos pavimentos tem a ver com o fendilhamento à superfície devido a flexão a que o pavimento está sujeito com a passagem do tráfego, com a retração térmica devido às variações de temperatura, com o fendilhamento com origem à superfície devido à concentração de tensões na superfície do pavimento, e com a reflexão de fendas devido à concentração de tensões junto às fendas das camadas existentes de pavimento. Outros problemas nos pavimentos são de menor importância e são geralmente eliminados durante a reabilitação dos pavimentos devido ao fendilhamento.

O comportamento de um pavimento depende das características da sua estrutura (materiais utilizados e espessura de cada camada de pavimento), da qualidade da construção, das condições climáticas e da capacidade de suporte da fundação. No entanto, é o tráfego (isto é, a intensidade das cargas, a sua frequência, e a configuração dos eixos e tipo de pneu que é primariamente responsável pelos problemas dos pavimentos). O tráfego pesado causa as degradações mais importantes nos pavimentos produzindo principalmente fendas por fadiga que requerem a reabilitação do pavimento.

O tráfego nos pavimentos rodoviários é caracterizado por um grande número de diferentes tipos de veículos com variações na magnitude da carga, no número de eixos, e no agrupamento dos seus eixos individuais (por exemplo, eixos simples quando a distância entre eixos é grande, eixos duplos quando dois eixos estão muito próximos e muito longe dos outros eixos ou eixos triplos quando três eixos estão muito próximos e muito longe dos outros eixos). Os veículos pesados podem ter todo o tipo de eixos ou algumas combinações dos vários tipos. Os diferentes tipos de eixos têm influências diferentes sobre o desempenho dos pavimentos.

A regulamentação existente para as cargas dos veículos, além de outros fatores, é usada para controlar o dano dos pavimentos. Permitindo cargas mais elevadas, estas podem aumentar o dano acumulado nos pavimentos, aumentando assim o custo de manutenção de modo a obter boas condições de circulação e comodidade. Elevadas cargas por veículo, configurações da carga e número de veículos pesados também leva à degradação acelerada do pavimento, necessitando de reabilitações precoces (Zaghloul e White, 1994).

O conhecimento das cargas reais, principalmente sobrecargas aplicadas ao pavimento, é importante para prever a vida útil do pavimento e definição do fator de agressividade do tráfego a ser usado no dimensionamento dos pavimentos. Assim, este trabalho estuda os efeitos de sobrecargas do tráfego nos pavimentos em termos de vida útil do pavimento através da análise de uma base de dados de tráfego com registros de 2006 a 2010 para uma autoestrada, divididos em 15 classes de veículos. Este trabalho analisa os dados de tráfego em termos de:

- Carga média por eixo para cada tipo de veículo;
- Percentagem de veículos em sobrecarga;
- Percentagem de veículos em cada classe de tráfego;
- Frequência de passagem.

A análise do impacto das sobrecargas no desempenho dos pavimentos foi realizada estudando:

- O fator camião para veículos sobrecarregados;
- O fator camião para veículos com carga legal;
- O fator camião para todos os veículos (sobrecarregados e com cargas legais);
- A influência da espessura da camada betuminosa e rigidez da fundação no fator camião.

Este trabalho será relevante para os projetistas de pavimentos, agências rodoviárias e outros profissionais envolvidos com o projeto de pavimentos porque permitirá um estudo rigoroso do tráfego, principalmente em termos de definição da equivalência de carga a ser utilizada no dimensionamento de pavimentos rodoviários.

2 DADOS DE TRÁFEGO

Devido a fatores técnicos, económicos e competitivos, os veículos têm um limite máximo de peso que é função do número de eixos e da configuração dos eixos, ou seja, simples, duplo e triplo. Para eixos simples, o limite máximo de peso depende se o eixo é um eixo de direção ou de um eixo com ou sem tração. Para os eixos duplos, o limite de peso depende da distância entre os dois eixos do eixo duplo. Para eixos triplos, o limite de peso depende da distância total entre os eixos externos.

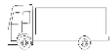
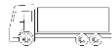
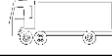
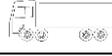
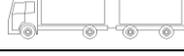
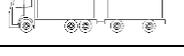
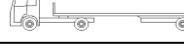
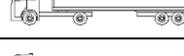
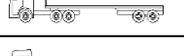
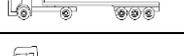
Devido às diferentes configurações dos veículos, em Portugal os veículos são classificados em diferentes classes com base no número de eixos, conforme representado no Quadro 1. A classe F inclui os camiões. A classe G inclui os camiões com atrelado. A classe H inclui os semirreboques. A classe I inclui os autocarros. O quadro também inclui a carga máxima para cada eixo. O limite de carga total do veículo é a soma da carga máxima para cada eixo. Os limites apresentados vão ser utilizados para definir as sobrecargas para o tráfego em análise neste trabalho, sendo que um veículo em sobrecarga tem pelo menos um eixo com carga superior ao limite máximo permitido por lei para esse eixo.

O desenvolvimento deste trabalho foi realizado considerando uma base de dados com registros de tráfego para cinco anos, a partir de um sistema de pesagem em movimento, que forneceu dados de pesagens por hora para todos os eixos de veículos pesados de mercadorias em ambas as direções em uma autoestrada com sistemas de pesagem em movimento. Os registros também incluem informação sobre a quantidade de veículos pesados em excesso de carga. A precisão dos dados extraídos a partir deste sistema não é conhecida. No entanto, para o estudo efetuado neste trabalho, foi realizada uma análise detalhada para remover todos os dados incompatíveis com as características de tráfego.

A primeira análise dos registos de tráfego mostrou que a carga média é função do tipo de veículo, variando entre 20% e 90% da carga máxima permitida por lei (Figura 1). Para a maioria dos tipos de veículos, a carga média é quase constante entre eixos (por exemplo, classes F1, F3, H2, e I1). No entanto, para algumas classes (F4, G1,

G2, G3, H3, e I2) há uma diferença significativa entre as cargas por eixo para os diferentes eixos em relação à carga máxima definida por lei. Por exemplo, na classe G1, há eixos que têm uma carga média de aproximadamente 20% e outros 50%. Em termos do número de eixo, é o primeiro eixo que tem a carga máxima relativa com exceção das classes F3 e F4.

Quadro 1. Classes dos veículos e peso máximo por eixo

Classes dos veículos		Peso máximo por eixo (kN)					
		1º eixo	2º eixo	3º eixo	4º eixo	5º eixo	6º eixo
F1		75	120				
F2		75	100	100			
F3		100	100	120			
F4		100	100	100	100		
G1		75	120	80	80		
G2		75	120	80	80	80	
G3		75	100	100	80	80	
H1		75	120	100			
H2		75	100	100	100		
H3		75	120	100	100		
H4		75	100	100	100	100	
H5		75	120	80	80	80	
H6		75	100	100	80	80	80
I1		75	120				
I2		75	100	100			

Apesar da existência de limites máximos para as cargas por eixo, os veículos pesados normalmente circulam com cargas médias muito inferiores aos limites. Este facto pode contribuir positivamente para a definição dos fatores de equivalência de cargas, principalmente em termos de fator camião. Quando o espectro de cargas é desconhecido, a utilização de cargas máximas legais sugere uma margem de segurança considerável. No entanto, existem alguns eixos (por exemplo: 3º eixo de F4) que apresentam um peso superior a 80% do limite legal, o que pode indicar a existência de sobrecargas consideráveis para esses eixos.

Embora as cargas médias do tráfego sejam consideravelmente menores que o limite máximo legal, o número de veículos sobrecarregados pode ser muito grande. A sobrecarga ocorre quando pelo menos um eixo tem uma carga que é maior do que o máximo permitido para esse eixo. A percentagem de veículos sobrecarregados pode

ser observada na Figura 2. Estes veículos sobrecarregados são mais evidentes para as classes F4, H4, H5 e H6. Estes dados reportam a um dos sentidos da autoestrada, sendo que para o outro sentido, os veículos sobrecarregados são mais evidentes para as classes F4, G2, G3, e H6.

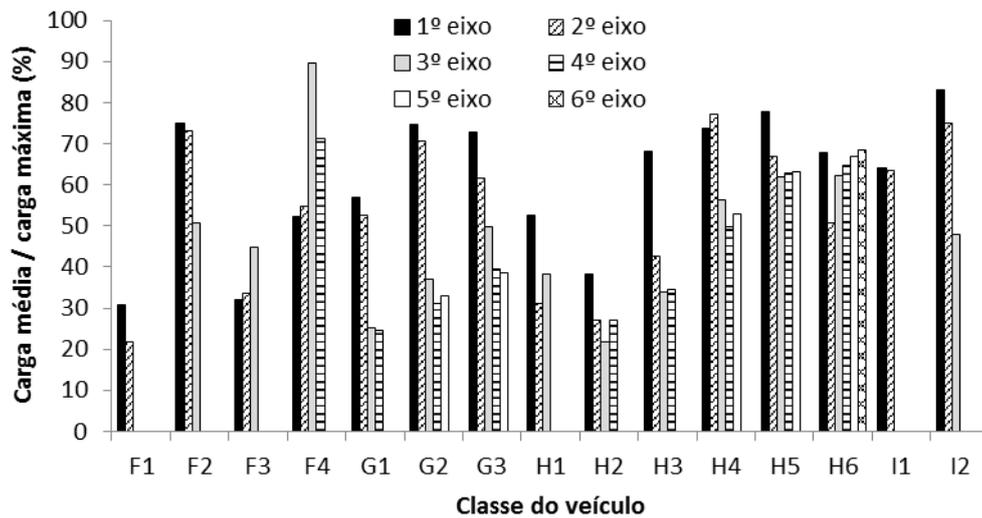


Figura 1. Carga média relativa para os vários eixos dos veículos pesados

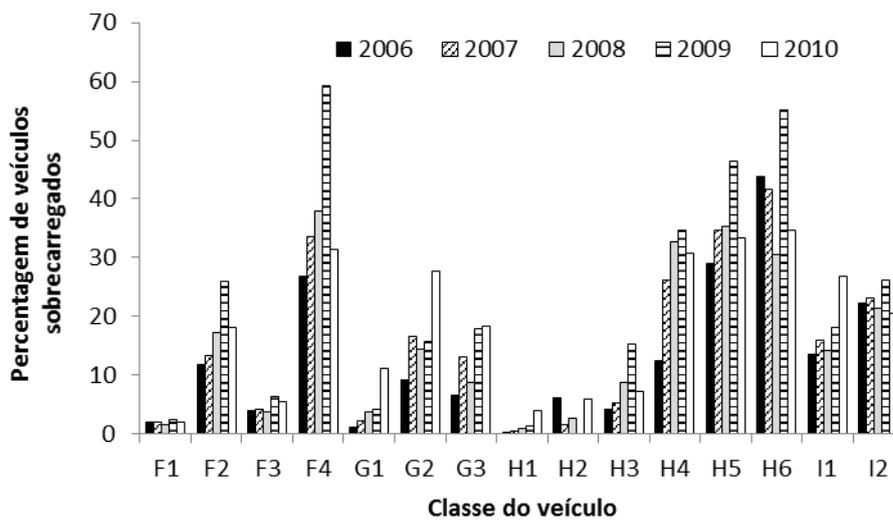


Figura 2. Percentagem de veículos em excesso de carga

Os resultados apresentados na Figura 2 mostram que 2009 apresenta o maior número de veículos sobrecarregados e para as classes F4 e H6, quase 60% do tráfego apresentava excesso de carga. Nos outros anos, o número de veículos em excesso de carga foi no máximo 40%, o que é um valor extremamente alto e pode ter levado a sérias consequências para o desempenho do pavimento. Para o outro sentido, o número de veículos em sobrecarga foi substancialmente inferior. No entanto, para algumas classes atingiu cerca de 40%. As classes com um elevado número de veículos sobrecarregados não são as mesmas para ambos os sentidos. Apenas a classe F4 apresenta uma elevada percentagem de veículos sobrecarregados em ambos os sentidos. As outras classes com

alta percentagem de veículos sobrecarregados incluem H4 e H5 no sentido 1 e G2, G3 e H6 no sentido 2. Não há diferenças substanciais ao longo dos 5 anos de dados de tráfego.

Como se apresenta na Figura 3, o número de veículos sobrecarregados pode estar relacionado com o nível de carga. Se a média de carga por eixo aumenta, a percentagem de veículos sobrecarregados também aumenta. Esta tendência é válida até uma carga média de aproximadamente 50%. Depois deste ponto, a percentagem de veículos sobrecarregados aumenta substancialmente. Esta análise foi efetuada para o segundo eixo dos veículos, que é o eixo mais representativo para transportes de cargas. Este número pode ser utilizado para avaliar a quantidade de sobrecargas com base nas cargas de tráfego real.

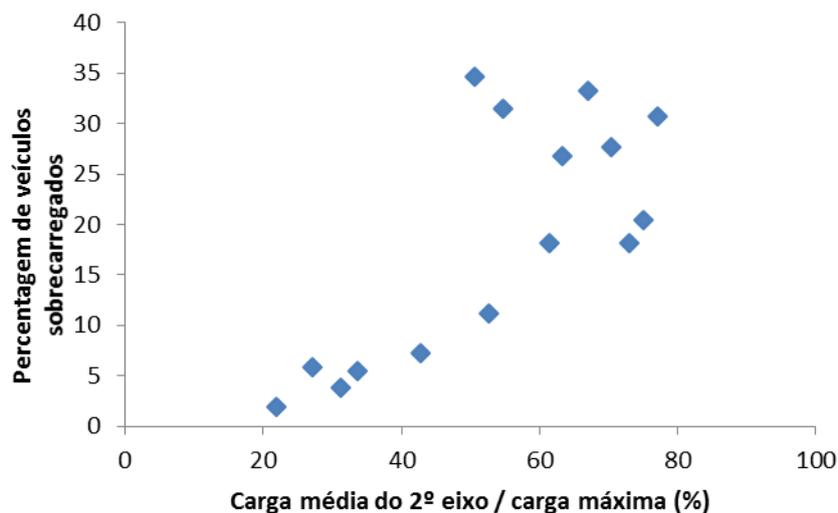


Figura 3. Comparação entre carga média e número de veículos em excesso de carga

Embora o tráfego esteja dividido em várias classes, apenas a classe F1, H3 e H5 têm volumes de tráfego consideráveis. Em todas estas classes, a percentagem de tráfego é superior a 10% (Figura 4). Além destas três classes, existem também as classes H1 e I1 que, apesar de terem menos do que 10% do tráfego pesado, são significativas em termos de peso, quando comparadas com as outras classes. Em relação às variações anuais, é de notar que a percentagem de veículos pesados não mudou ao longo dos anos considerados neste estudo, com exceção de 2010. Neste ano, F1 apresentou um aumento significativo de veículos que reduziu o tráfego nas classes de H3 e H5.

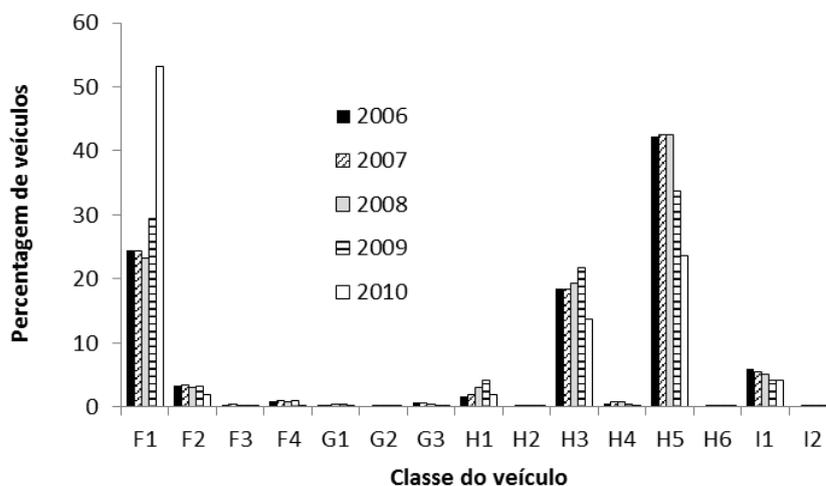


Figura 4. Percentagem de veículos em cada classe

3 MODELOS UTILIZADOS

O impacto das sobrecargas do tráfego no desempenho dos pavimentos foi estudada por meio do cálculo do efeito dos veículos no desempenho do pavimento. O efeito de diferentes tipos de veículos com diferentes cargas pode ser representado através da conversão de todos os veículos em um veículo representativo (mais precisamente, recorrendo a um eixo representativo), que no dimensionamento de pavimentos é referido como um eixo-padrão. A conversão dos eixos dos veículos em eixos-padrão permite considerar um veículo, como um certo número de cargas de eixo simples. Esta conversão faz-se recorrendo a fatores de agressividade, resultando no fator camião, o que indica a equivalência, em termos de desempenho do pavimento, entre um veículo e a carga por eixo simples de referência.

Por definição, o fator de agressividade (F) é a relação entre o dano da passagem de um eixo num pavimento e o dano de um eixo-padrão, usualmente de 80 kN de carga, que passa no mesmo pavimento, como se indica na Equação 1, onde N_{80} é a vida útil do pavimento para a carga do eixo-padrão, e N_x é a vida útil do pavimento para a carga real do eixo.

$$F = \frac{N_{80}}{N_x} \quad (1)$$

O fator de agressividade é geralmente expresso como a relação entre a carga real do eixo (P_x) e a carga do eixo-padrão (P_{80}), como indicado na Equação 2 (LCPC, 1994), onde k é um coeficiente função do tipo de eixo (simples, duplo ou triplo) e α é um coeficiente função do tipo de pavimento.

$$F = k \left(\frac{P_x}{P_{80}} \right)^\alpha \quad (2)$$

Para o cálculo do coeficiente k , os autores desenvolveram o modelo apresentado na Equação 3, o qual considera qualquer combinação de espessura da camada betuminosa, e rigidez da fundação, bem como do tipo de eixo.

$$k = 254.03 \times (E_{fund})^{0.03339} \times (H_{bet})^{-1.0426} \times e^{(-1.2928 \times PE)} \quad (3)$$

Este modelo é válido para pavimentos com uma camada granular de 20 cm de espessura e a camada betuminosa com 5000 MPa de módulo de rigidez. E_{fund} é a rigidez da fundação (MPa); H_{bet} é a espessura da camada de betuminosa (cm); e PE é o parâmetro do eixo, tal como definido no Quadro 2.

Quadro 2. Parâmetro do eixo - PE

Eixo simples	Eixo duplo	Eixo triplo
1	2	3
4	4.5	5.5

Em alguns métodos de dimensionamento de pavimentos, em que o valor de k da Equação 2 é usado, o modelo desenvolvido no presente trabalho, através da equação 3, pode ser utilizado para considerar um pavimento específico, definindo a espessura da camada betuminosa, a rigidez da fundação e o tipo de roda (ou seja, roda simples ou roda dupla).

Neste estudo foi utilizado um valor de 4 para o parâmetro c (Equação 2), valor representativo da fadiga das misturas betuminosas portuguesas para camadas de base de acordo com os resultados obtidos Pais et al. (2009). A principal limitação do modelo proposto para calcular o fator de agressividade do tráfego está relacionado com o parâmetro c que foi escolhido para ter em conta apenas o fendilhamento do pavimento. Para pavimentos com outras degradações, deve ser utilizado outro valor para o parâmetro c .

4 RESULTADOS

A análise do efeito dos veículos sobrecarregados foi realizada através do estudo do efeito do tráfego em diferentes pavimentos e diferentes situações. Em termos de estruturas de pavimento, foram consideradas 5 espessuras da camada betuminosa (10, 15, 20, 25 e 30 cm) e 5 módulos de rigidez da fundação (40, 60, 80, 100 e 120 MPa). A camada betuminosa foi considerada com um módulo de rigidez de 5000 MPa, resultando do modelo de cálculo da agressividade (Equação 3). A análise do fator caminhão foi efetuada para quatro situações:

- O veículo com a carga legal máxima permitida por eixo;
- O veículo com o fator caminhão máximo;
- O fator caminhão médio observado;
- Um veículo com a carga média de cada eixo.

O efeito dos veículos sobrecarregados no desempenho dos pavimentos foi determinado através da avaliação do fator caminhão para os quatro casos acima identificados, separando os veículos sobrecarregados dos veículos com peso legal.

Os resultados para o fator caminhão de todos os veículos sobrecarregados para um pavimento com uma camada betuminosa com 10 cm de espessura e 80 MPa de rigidez da fundação são apresentados na Figura 5. A análise desta figura permite concluir que o fator caminhão é aproximadamente idêntico, pelo menos numa análise em base logarítmica, para todas as classes de veículos e poucas diferenças significativas podem ser encontradas no fator caminhão para o veículo com a carga máxima legal por eixo, e um veículo com a carga média em cada eixo. No entanto, existem veículos com cargas muito elevadas, que levam a fator caminhão muito elevados.

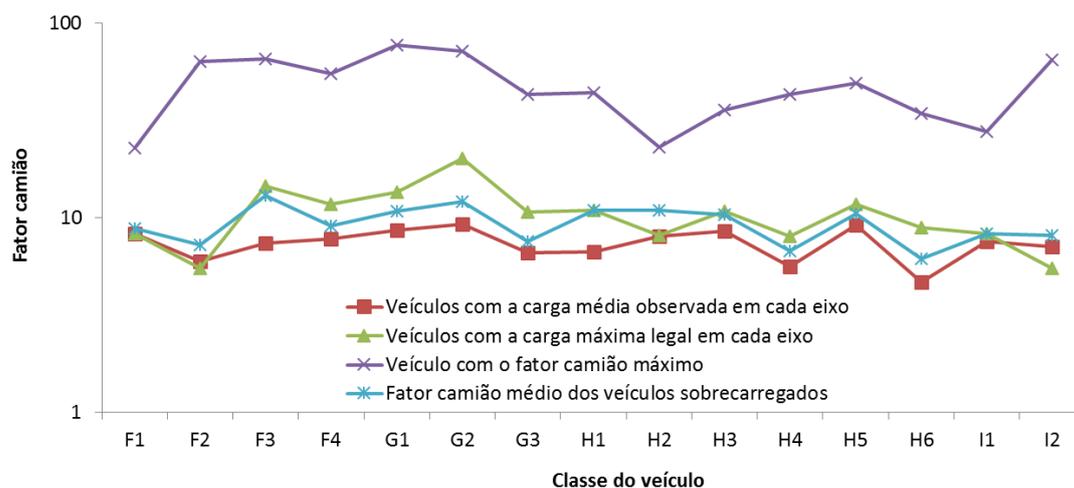


Figura 5. Fator caminhão para os veículos sobrecarregados para um pavimento com 10 cm de camada betuminosa e fundação com 80 MPa de rigidez

Para o mesmo pavimento, os resultados para os veículos com cargas legais estão indicados na Figura 6. O fator caminhão é relativamente idêntico para todas as classes de veículos com exceção da classe F1 porque esta classe inclui todos os pequenos veículos pesados com peso a partir de aproximadamente 35 kN, os quais muitas vezes circulam sem carga. No entanto, quando vazio, os veículos da classe F1 podem apresentar um peso de aproximadamente 15 a 20 kN, a que corresponde a um fator caminhão muito pequeno. Nesta figura pode ser observada uma diferença significativa entre o fator caminhão para os veículos com a carga máxima e os veículos com a carga média e o fator caminhão médio. Isso acontece porque os veículos vazios têm um fator caminhão reduzido.

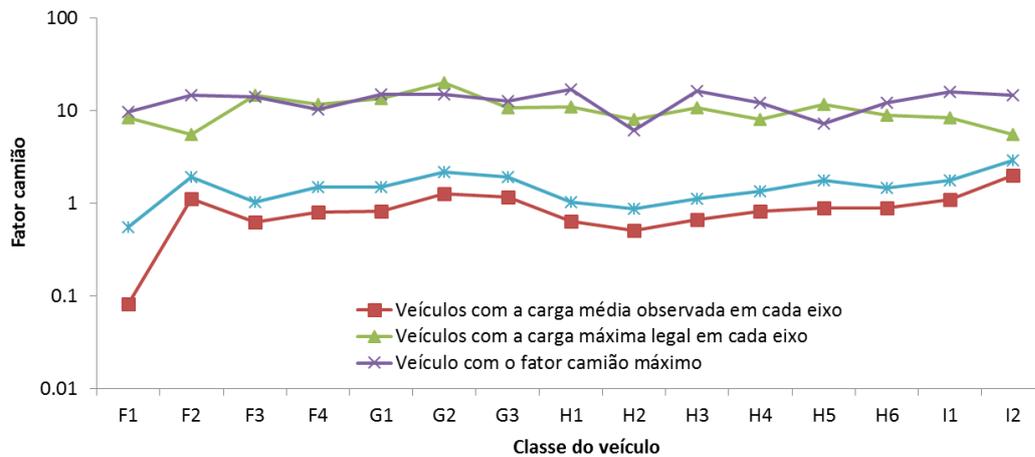


Figura 6. Fator camião para os veículos com carga legal para um pavimento com 10 cm de camada betuminosa e fundação com 80 MPa de rigidez

A influência do comportamento veículos para outros pavimentos é apresentada na Figura 7a e 7b em que se calcula o fator camião para diferentes espessuras betuminosas e para diferentes módulos de rigidez da fundação, verificando-se que o fator camião diminui à medida que a espessura da camada betuminosa aumenta enquanto que se mantém com a variação do módulo de rigidez da fundação. A análise apresentada refere-se a um pavimento um módulo de rigidez da fundação de 80 MPa (Figura 7a), enquanto que a Figura 7b é relativa a um pavimento com uma camada betuminosa com 20 cm de espessura.

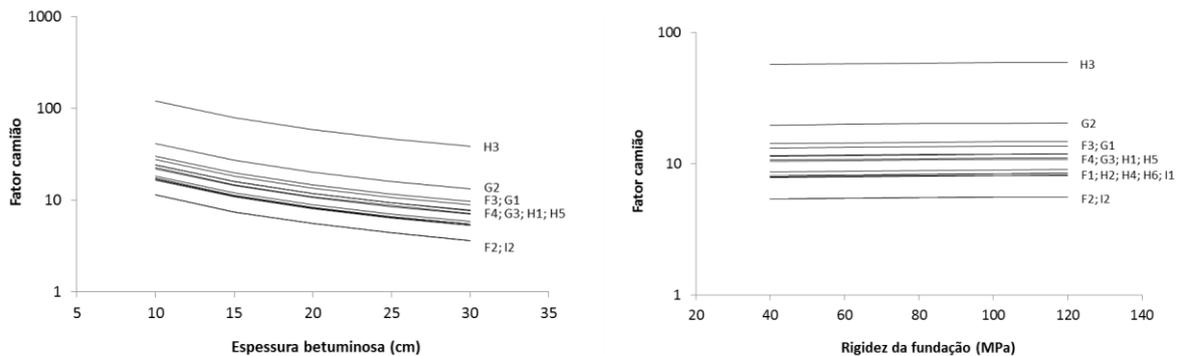


Figura 7. Esquerda: a) Influência da espessura betuminosa no fator camião. Direita: b) Influência da rigidez da fundação no fator camião

A influência de veículos sobrecarregados no desempenho do pavimento é apresentada na Figura 8, onde o fator camião para veículos com a carga máxima legal por eixo é comparado com os fatores camião médios observados para os veículos sobrecarregados e para os veículos com carga legal. Os resultados mostram que o fator camião para os veículos sobrecarregados é quase idêntico ao fator camião para as cargas máximas legais. Para os veículos com cargas legais, o fator camião é consideravelmente reduzido quando comparado com as cargas máximas legais.

Estes factos indicam que o efeito dos veículos sobrecarregados não é significativo quando comparado com os veículos com as cargas máximas legais, mas é extremamente significativo quando comparado com os veículos de tráfego real. Em média, os veículos sobrecarregados não causam mais danos ao pavimento do que os veículos com a carga máxima legal em todos os eixos. Isso acontece porque um significativo número de veículos sobrecarregados têm excesso de carga em apenas um ou mais eixos, não excedendo a carga total do veículo.

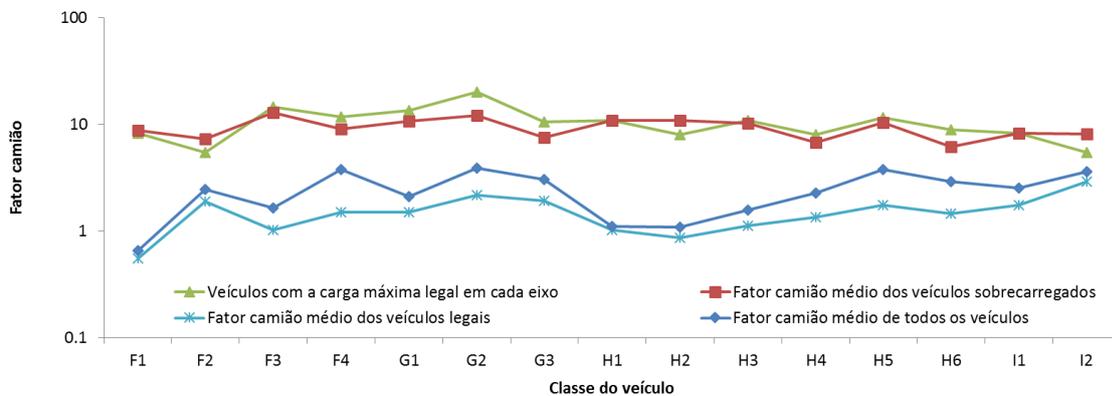


Figura 8. Influência dos veículos sobrecarregados no fator camião para um pavimento com 20 cm de camada betuminosa e fundação com 80 MPa de rigidez

Com base nos resultados obtidos neste trabalho, algumas recomendações úteis podem ser sugeridas para os gestores de infraestruturas rodoviárias, bem como para as autoridades de controlo de tráfego. Estas recomendações estão relacionadas com o custo de veículos sobrecarregados em comparação com os veículos com carga legal. Este custo pode ser estimado através do cálculo da diferença entre dois casos: veículos i) sobrecarregados e ii) veículos sobrecarregados limitados à carga legal por eixo (veículos sobrecarregado onde todos os eixos sobrecarregados foram reduzidas à carga legal máxima para esses eixos). A diferença entre estes dois casos dá o aumento do custo devido à sobrecarga e é proporcional à diferença entre os fatores camião para os dois casos.

A simulação considerada para analisar o efeito dos veículos sobrecarregados foi realizada para um pavimento com 20 cm de espessura betuminosa e uma rigidez da fundação de 80 MPa. Os resultados são expressos através do aumento do custo do pavimento devido aos veículos sobrecarregados em comparação com os mesmos veículos limitados à carga legal. Esta análise pode ser observada na Figura 9, onde se verifica que o custo médio de um veículo sobrecarregado pode ser mais do que 100% do custo de um veículo com carga legal.

Para as principais classes de tráfego (F1, H3, H5 e I1, ver Figura 4), o custo dos veículos sobrecarregados pode ser 30% maior que o custo dos veículos com carga legal. Em termos de vida útil do pavimento, estes resultados mostram que o pavimento terá apenas aproximadamente 70% da vida útil do pavimento.

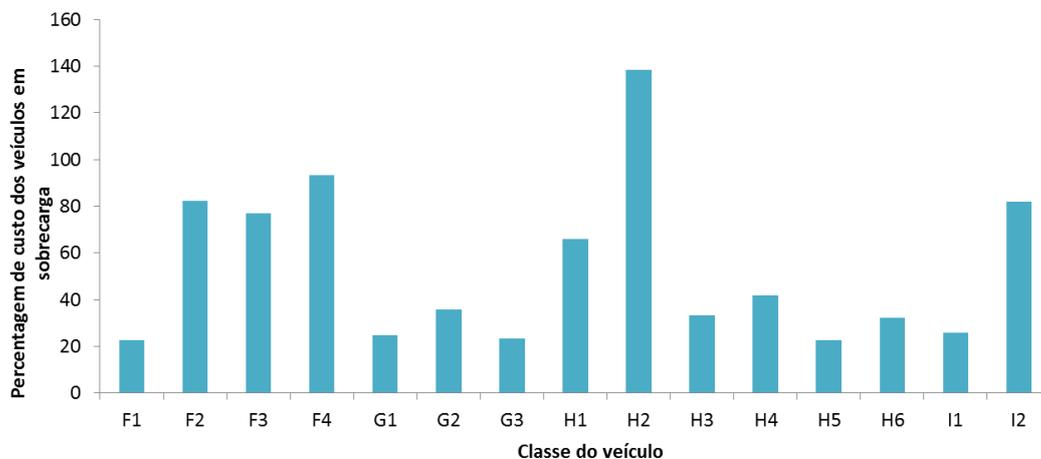


Figura 9. Aumento do custo dos veículos sobrecarregados para um pavimento com 20 cm de camada betuminosa e fundação com 80 MPa de rigidez

5 CONCLUSÕES

Este trabalho apresenta um estudo sobre o impacto dos veículos sobrecarregados no desempenho dos pavimentos rodoviários através do estudo do fator caminhão para diferentes tipos de veículos, quando aplicado a um conjunto de pavimentos definidos por 5 diferentes espessuras de camada betuminosa e 5 diferentes módulos de rigidez da fundação. O estudo inclui uma análise de uma base de dados de tráfego que consiste em informação de tráfego de 5 anos para uma autoestrada.

O estudo das informações do tráfego permitiu concluir que os veículos pesados não circulam com a carga máxima definida por lei. Em média, e, dependendo da posição do eixo, a carga varia de 20% a 90% da carga máxima legal do eixo. No entanto, há um número importante de veículos sobrecarregados. Para classe F4 e H6 o número de veículos sobrecarregados foi de aproximadamente 60%, enquanto que para algumas classes o número de veículos sobrecarregados foi de aproximadamente 40%.

O estudo realizado no presente trabalho concluiu que o efeito de cargas de veículos é diminuída quando se aumenta a espessura da camada betuminosa. A influência da rigidez da fundação do pavimento no efeito das cargas de veículos é muito baixa quando é considerado o fendilhamento por fadiga como a principal degradação dos pavimentos.

O estudo revelou ainda que, para consideração no projeto de pavimentos, se os veículos são considerados pelas suas cargas máximas legais, o efeito de veículos sobrecarregados no desempenho do pavimento é claramente reduzido. No entanto, a presença de veículos sobrecarregados pode aumentar os custos em mais de 100% em comparação com o custo dos mesmos veículos com cargas legais.

As conclusões obtidas neste trabalho são baseados em algumas suposições, principalmente o expoente c do fator de agressividade e mecanismo de ruína considerado. No entanto, a consideração de diferentes hipóteses para estes fatores leva a conclusões diferentes. Finalmente, é de realçar que o efeito de veículos sobrecarregados no desempenho dos pavimentos é evidente.

6 REFERÊNCIAS

1. LCPC, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, *French design method for flexible pavements*, 1994.
2. Pais, J.C., Pereira, P.A.A., Minhoto, M.J.C., Fontes, L., Kumar, D.S.N.V.A., Silva, B.T.A., *The prediction of fatigue life using the k_1 - k_2 relationship*, Second Workshop on Four-point Bending, Guimarães, Portugal, 24-25 September, 2009.
3. Zaghoul, S., White, T.D., *Guidelines for permitting overloads – Part I. Effect of overloaded vehicles on the Indiana highway network*, Purdue University, West Lafayette, USA, 1994.