



## 26° Encontro Nacional de Conservação Rodoviária (ENACOR) 49ª Reunião Anual de Pavimentação (RAPv)

### EFEITO DO EXCESSO DE CARGA NO DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS: ESTUDO DE CASO EM MINAS GERAIS

*Ana Carolina Felício Bicalho<sup>1</sup>; Thais Berger Barbosa da Silva<sup>2</sup>; Bruna Cristina Beltrão Silva  
Beleigoli<sup>2</sup> & José Maria dos Santos<sup>2</sup>*

#### RESUMO

A presença de veículos comerciais trafegando com excesso de carga é comumente observada em rodovias brasileiras. Contudo, tais excessos de carga não são considerados nos métodos de dimensionamento de pavimentos e podem reduzir o ciclo de vida da estrutura. A deterioração mais rápida do pavimento ocasiona a redução da vida útil e aumenta o número e frequência de manutenções, causando prejuízos aos veículos e usuários, elevando o risco de acidentes e danos ambientais. Dessa forma, o presente estudo relaciona o excesso de carga e o dimensionamento de pavimentos, com o objetivo de identificar os impactos ao longo do ciclo de vida de uma estrutura genérica. Para tanto, foram determinados os fatores de equivalência de carga (FEC) obtidos pela resposta da estrutura ao incremento de cargas por eixo através de um programa computacional de análise elástico linear, levando em conta a amplitude de sobrecargas observadas na rodovia MGC-354, no estado de Minas Gerais. Os principais resultados mostraram a redução no ciclo de vida do pavimento ao se avaliar o excesso médio em relação à carga máxima permitida pela legislação. Contudo, vale ressaltar que os resultados foram obtidos para um local onde já existe fiscalização e, dessa forma, outros trechos rodoviários podem apresentar excessos de carga que impactem ainda mais no dimensionamento do pavimento.

**PALAVRAS-CHAVE:** dimensionamento de pavimento; excesso de carga; pesagem de veículos; ELSYM5; fator de equivalência de carga.

#### ABSTRACT

The presence of commercial vehicles traveling with overloaded cargo is commonly observed on Brazilian highways. However, such cargo overloads are not considered in pavement design methods and can reduce the pavement's life cycle. The faster deterioration of the pavement leads to a reduced useful life and increases the number and frequency of maintenance activities, potentially causing damage to user vehicles, elevating the risk of accidents, and environmental damages. Therefore, this study relates cargo overload to pavement design, aiming to identify the impacts throughout the life cycle of a generic structure. For this purpose, the Load Equivalency Factors (LEF) were determined based on the structure's response to load increments per axle using a linear elastic computational analysis program, considering the amplitude of overloads observed on the MGC-354 highway, in the state of Minas Gerais. The main results showed a reduction in the pavement's life cycle when considering the typical excess compared to the maximum load permitted by legislation. However, it is worth mentioning that the results were obtained for a location where supervision already exists; therefore, other road sections may present excess loads that have an even greater impact on the pavement design.

**KEY WORDS:** pavement design; excess load; vehicle weighing; ELSYM; load equivalency factor.

<sup>1</sup> Agência de Transporte do Estado de São Paulo – ARTESP; e-mail: [anacarolinabicalho@gmail.com](mailto:anacarolinabicalho@gmail.com).

<sup>2</sup> Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de Minas Gerais- DER-MG; e-mail: [thais.berger@der.mg.gov.br](mailto:thais.berger@der.mg.gov.br); [bruna.beleigoli@der.mg.gov.br](mailto:bruna.beleigoli@der.mg.gov.br) & [jose.santos@der.mg.gov.br](mailto:jose.santos@der.mg.gov.br).



## INTRODUÇÃO

No Brasil, segundo Medina e Motta (2015), os métodos predominantes para o dimensionamento de pavimentos baseiam-se no número "N" de repetições de um eixo simples com rodas duplas, com 8,2 t e 80 psi (552 kPa) de pressão de enchimento nos pneus. Segundo Franco (2007), a tendência mundial é dimensionar o pavimento asfáltico considerando o tráfego explicitamente pela ação de diferentes cargas de eixo. Hussain e Parker (2006) e Fernandes Junior (1994) reforçam que o desempenho do pavimento está associado à carga por eixo e ao peso bruto total, verificando inclusive que veículos com dois eixos danificam mais do que veículos com três a cinco eixos, quando carregados no limite permitido. Atualmente, a legislação brasileira impõe limites de carga por eixo. No entanto, de acordo com a Confederação Nacional do Transporte (CNT, 2019), alguns caminhoneiros e transportadoras, com o objetivo de realizar menos viagens e otimizar o lucro, transportam cargas maiores do que o permitido pela Lei da Balança. Como consequência, além de danificar os veículos, essa decisão aumenta o consumo de combustível e o risco de acidentes, interfere na qualidade das rodovias, gera problemas ambientais e ainda prejudica o mercado transportador. Apesar disso, no Brasil, embora sejam fixados os limites legais para as cargas transportadas nos veículos rodoviários, ainda são permitidas tolerâncias percentuais sobre a Carga Máxima Legal (CML) e sobre os limites legais de carga por eixo (INOUE, 2023). Os limites previstos pela legislação brasileira consideram as tolerâncias de 5% do Peso Bruto Total (PBT) e de 12,5% do peso por eixo (BRASIL, 2021). Diante das limitações para uma fiscalização efetiva e das penalidades amenas quando aplicadas, este estudo tem como objetivo avaliar o impacto do excesso de carga e sua influência na redução da vida útil de pavimentos flexíveis. Para isso, foram analisados dados de tráfego coletados em um posto de pesagem de uma rodovia localizada no estado de Minas Gerais, obtidos com o apoio da Gerência de Ativos Rodoviários (GAR) da Diretoria de Planejamento, Engenharia e Inovação (DPEI) do DER-MG e em seguida, foram avaliados os impactos dos excessos de carga identificados através dos fatores de equivalência de carga.

## LEI DA BALANÇA

Um breve histórico da legislação brasileira referente às limitações das cargas rodoviárias é encontrado no estudo de Bernucci e Vallejo (2019). Os autores afirmam que a Resolução nº 489 do CONTRAN, de 05/06/2014, modificou os artigos 5º e 9º da Resolução nº 258, de 30/11/2007, também do CONTRAN, na qual é estabelecida uma metodologia de aferição de peso de veículos, fixando percentuais de tolerância e outras providências. O artigo 5º passou a permitir a tolerância de 5% ao PBT e de 10% sobre os limites de pesos regulamentares por eixo, anteriormente fixada em 7,5%. Contudo, a legislação sofreu uma atualização adicional em 21 de outubro de 2021, quando a Medida Provisória nº 1050 modificou a Lei nº 7.408 (25 de novembro de 1958) e a Lei nº 9.503 (23 de setembro de 1997) do CONTRAN, resultando na Lei nº 14.229. Através do Artigo 1º, esta lei ampliou mais uma vez o Inciso II do Artigo 5º da Resolução 526, aumentando a tolerância para 12,5% sobre os limites de peso bruto transmitido por eixo de veículos às superfícies das vias públicas. No dimensionamento do pavimento, é importante atentar para as tolerâncias percentuais estabelecidas na legislação sobre o Peso Bruto Total (PBT), o Peso Bruto Total Combinado (PBTC) e a Carga por Eixo, e não apenas ao limite da Carga Máxima Legal (CML). A não consideração das tolerâncias é um indício de que o pavimento está subdimensionado, porém sabe-se que não é uma tarefa fácil



prever a ocupação do carregamento dos caminhões, uma vez que isso também pode variar com a época do ano e outros fatores.

## FATOR DE EQUIVALÊNCIA DE CARGA

De acordo com Fernandes Junior (1994), compreender os impactos do tráfego sobre a durabilidade dos pavimentos é uma tarefa complexa, dada a considerável variação no volume de tráfego e nas cargas veiculares ao longo do tempo e do espaço durante a vida útil de um pavimento. Além disso, a capacidade estrutural dos pavimentos é influenciada pelo envelhecimento dos materiais, sendo também afetada pelas condições ambientais, como temperatura, que afeta o módulo de rigidez do revestimento asfáltico, e o teor de umidade do subleito. É essencial compreender os efeitos cumulativos das solicitações de tráfego para o desenvolvimento de métodos de dimensionamento e sistemas de gerenciamento de pavimentos.

Devido à vasta gama de condições de tráfego, os danos ao pavimento causados por qualquer eixo são expressos através dos Fatores de Equivalência de Cargas (FEC). Fernandes Junior (1994) destaca que os FEC permitem a conversão de diferentes tipos de solicitações de tráfego em um valor equivalente de uma solicitação-padrão, facilitando o dimensionamento e a previsão do desempenho dos pavimentos para tráfego variado. Além disso, o conceito de equivalência de cargas é crucial para a distribuição de responsabilidades em relação aos custos de manutenção e restauração de rodovias, permitindo a comparação dos danos causados por diferentes tipos de solicitações.

É importante ressaltar que a deterioração dos pavimentos está diretamente relacionada à carga por eixo, não ao peso bruto total combinado (PBTC). Esta relação foi estabelecida com base nos estudos realizados pela AASHO Road Test nos Estados Unidos, no final da década de 1950 (HRB, 1962). Nesses estudos, definiu-se um eixo padrão como sendo um eixo simples de rodas duplas com carga de 18,000 lbs (8,2 tf) e 80 psi (552 kPa) de pressão de enchimento dos pneus. Conforme mencionado por Fernandes Junior (1994), os engenheiros da pesquisa denominada AASHO Road Test observaram uma relação exponencial entre as cargas por eixo e a deterioração dos pavimentos, sendo que o expoente dessa relação geralmente se aproxima de 4. Esta relação é comumente tratada através da "*lei de quarta potência*" (FERNANDES Jr., 1994).

A Lei da Quarta Potência, apesar de ser uma simplificação, oferece uma vantagem significativa ao considerar a estrutura específica do pavimento avaliado. Isso significa que diferentes tipos de pavimento podem reagir de maneiras distintas sob as mesmas cargas, o que não é contemplado no método puramente empírico. Enquanto este último presume que o dano é uniforme, independentemente da estrutura do pavimento, a Lei da Quarta Potência reconhece a diversidade das estruturas de pavimento e sua influência sob cargas equivalentes.

### Fator de Equivalência de Carga Empírico

No Brasil, os Fatores de Equivalência de Cargas empregados nos métodos de dimensionamento de pavimentos novos e no reforço de pavimentos existentes são predominantemente empíricos. Segundo Fernandes Junior (1994), os FEC do Método da AASHTO, modificados por Treybig e Von Quintus (1976), são utilizados pelo Método de Projeto de Restauração DNER-PRO 159-85 (DNIT, 2006a). Já os FEC do Método do Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos (USACE) (TURNBULL; FOSTER; AHLVIN, 1962) estão presentes no Método de Projeto de Pavimentos



Flexíveis do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), de autoria do Engenheiro Murillo Lopes de Souza (SOUZA, 1981).

Embora os FEC da AASHTO sejam os únicos baseados em observações de campo sistematizadas, sua aplicabilidade é limitada por diversas razões mencionadas por Fernandes Junior (1994):

- Dispersão dos resultados: As previsões de desempenho variam consideravelmente, gerando incertezas, mesmo nos EUA;
- Evolução tecnológica: As condições atuais diferem do período do teste original, com novos tipos de veículos, pneus e sistemas de suspensão;
- Forma de deterioração: Os FEC da AASHTO são mais alinhados com a perda de serventia funcional, enquanto as trincas por fadiga do asfalto são mais relevantes no Brasil;
- Tipo de solo: Os solos usados no teste original diferem dos solos brasileiros, possivelmente piores mecanicamente;
- Clima: As condições climáticas do teste original diferem das do Brasil;
- Limitações do Conceito de Número Estrutural: Este conceito destaca camadas intercambiáveis, mas ignora a interação entre os componentes do pavimento;
- Simplificações indevidas: A análise combinada dos eixos dianteiros e traseiros merece atenção, pois pode levar a disparidades nas avaliações de desempenho dos pavimentos.

Já o Método do Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos (USACE), incorporado pelo DNIT (SOUZA, 1981) para o dimensionamento de pavimentos flexíveis, combina elementos dos métodos do exército americano e da AASHTO. O método utiliza gráficos e FEC do USACE e coeficientes de equivalência estrutural adaptados da AASHTO para as camadas dos pavimentos.

Os Fatores de Equivalência de Cargas são obtidos a partir de uma equação de dimensionamento do exército americano, desenvolvida em 1961. Este método pressupõe várias hipóteses, incluindo a máxima deflexão no topo do subleito, um subleito como um semiespaço único e uma pressão de contato pneu-pavimento uniforme e fixa. No entanto, com o avanço tecnológico, essas premissas se tornaram obsoletas. Por exemplo, os níveis de pressão dos pneus aumentaram e novos modelos consideram pavimentos em camadas, considerando os tipos de materiais e o comportamento elástico linear (CAVA, 2021). Além disso, o método não aborda a principal forma de deterioração dos pavimentos brasileiros, as trincas por fadiga nos revestimentos asfálticos, conforme destacado por Fernandes Junior (1994). Na Tabela 1 são apresentados os FEC adotados pelo DNIT.

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

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



## Fator de Equivalência de Carga Empírico-Mecanístico

Segundo Fernandes Junior (1994), os modelos empíricos-mecanísticos têm como base o desenvolvimento de relações de causa e efeito entre os resultados computacionais (respostas estruturais) e as medidas experimentais (obtidas no campo/laboratório). A aplicação de carga induz uma alteração no estado de tensão da estrutura do pavimento, refletida nas suas respostas estruturais. Estudos teóricos, como os de Fernandes Junior (1994) e Cava (2021), têm demonstrado que algumas dessas respostas estruturais podem ser usadas para prever a progressão de diferentes formas de deterioração, como trincas por fadiga no revestimento asfáltico e deformação permanente nas trilhas das rodas, e, por conseguinte, o desempenho dos pavimentos. Assumindo que os Fatores de Equivalência de Cargas podem ser definidos como a relação entre os danos unitários causados pela carga em análise e pela carga de referência, conforme expresso por:

$$\text{Equação 1: } FEC_i = \frac{N_{8,2}}{N_i}$$

Em que  $FEC_i$  é o fator de Equivalência de Cargas para a Solicitação  $i$ ,  $N_{8,2}$  é o número de ciclos de carga considerada padrão e  $N_i$  é o número de ciclos de carga prevista de solicitação  $i$ . Para o desenvolvimento de Fatores de Equivalência de Cargas empírico-mecanísticos, é necessário conhecer, além da hipótese de Miner, a equação (ou modelo) para previsão de desempenho dos pavimentos, que relaciona um determinado nível de deterioração com o número de repetições de uma dada resposta estrutural. Normalmente, o nível de deterioração adotado é aquele que corresponde ao fim da vida útil em serviço (número de repetições admissíveis,  $N$ ). Os modelos empírico-mecanísticos utilizados para previsão da vida útil de um pavimento consideram, geralmente, apenas uma resposta estrutural. Ou seja, procuram prever a evolução de um único tipo de deterioração. Esses modelos apresentam a seguinte forma geral, de acordo com Fernandes Junior (1994):

$$\text{Equação 2: } N_i = K \left( \frac{1}{\varepsilon_i} \right)^b$$

Em que  $N$  é o número admissível de aplicações de carga,  $k$  e  $b$  são o coeficiente e o expoente associados à forma de deterioração, à resposta estrutural considerada, ao tipo de ensaio e à estrutura analisada, e  $\varepsilon$  é a resposta estrutural genérica. Fica evidenciada, assim, a possibilidade de se expressar os Fatores de Equivalência de Cargas como uma potência da razão entre as respostas estruturais correspondentes à solicitação em análise ( $\varepsilon_i$ ) e à solicitação-padrão ( $\varepsilon_{8,2}$ ).

$$\text{Equação 3: } FEC = \left( \frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_{8,2}} \right)^b$$

Conforme a “lei de quarta potência” já mencionada anteriormente, a equação pode ser escrita como:

$$\text{Equação 4: } FEC = \left( \frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_{8,2}} \right)^4$$

## ESTUDO DE CASO: RODOVIA EM MINAS GERAIS

Conforme mencionado anteriormente, os FEC utilizados no Brasil para o cálculo do Número “ $N$ ” são aqueles descritos como métodos empíricos (AASHTO e da USACE). No entanto, ambos apresentam limitações consideráveis que afetam significativamente o dimensionamento. Com o intuito de verificar o impacto da sobrecarga dos veículos, foram obtidos valores de FEC através da metodologia empírico-mecanística, utilizando uma estrutura genérica que representa as estruturas comuns no



estado de Minas Gerais. Destaca-se que, embora a metodologia empírico-mecanística também apresente limitações, considera-se que ela é mais adequada para avaliar o impacto no pavimento, pois leva em consideração a estrutura específica do pavimento em estudo. Isso contrasta com o método puramente empírico, que assume que qualquer estrutura de pavimento responde da mesma forma quando submetida à mesma carga.

Em relação ao tráfego, primeiramente foram estudados os dados de pesagem estática, oriundos do Posto de Pesagem localizado na rodovia MGC-354 (km 171 em Patos de Minas/MG). De maneira complementar, foram também empregados dados de outro Posto de Pesagem localizado na MG-050 (km 400 em São Sebastião do Paraíso/MG). As duas rodovias se assemelham quanto ao tráfego dos veículos de carga, principalmente no que concerne à sazonalidade imposta pela safra. Os dados utilizados são do mês de outubro de 2019, considerado um período típico sob o ponto de vista do tráfego, com poucos feriados e sem interferência da pandemia de Covid-19.

### Dados de Tráfego

Com base na amostra de aproximadamente 20.000 veículos pesados coletados durante o mês de outubro, foram conduzidas as análises sobre o tráfego. Na rodovia em estudo, registra-se um volume diário de cerca de 760 veículos de carga, cuja distribuição por categoria é detalhada na Figura 1. Destaca-se que os caminhões dos tipos 2C e 3C representam mais da metade (56,3%) do total de veículos comerciais que circulam na área, seguidos pela categoria de veículos do tipo 3S3.

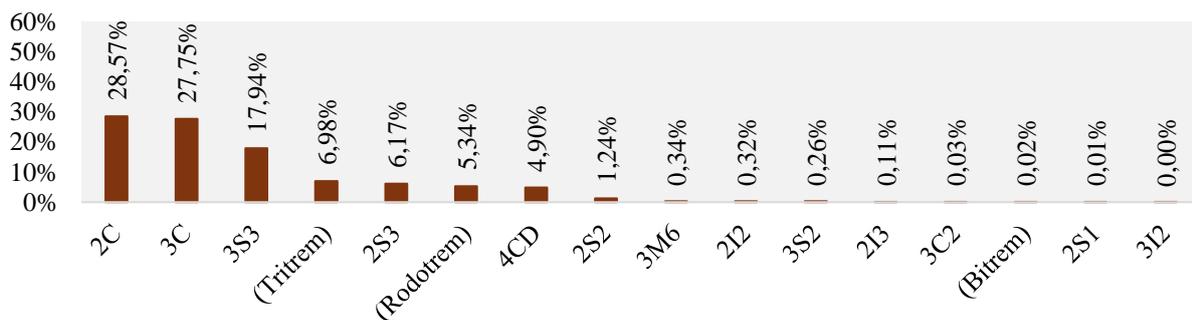


Figura 1. Distribuição de veículos por configuração de eixos (AUTORES, 2024)

Posteriormente, foi analisada a condição de carregamento dos veículos comerciais, subdividindo-os em: carregados abaixo da CML, vazios, excesso entre CML e tolerância, e excesso acima da tolerância (Figura 2).). Para determinar essas condições de carregamento, foram utilizados como referência os valores máximos de carga por eixo fornecidos pelos fabricantes e pelo Manual de Estudos de Tráfego do DNIT (DNIT, 2006b). Os veículos considerados vazios foram aqueles cujo peso medido era inferior ou próximo à tara do caminhão por tipo, dado fornecido pelo DER-MG.

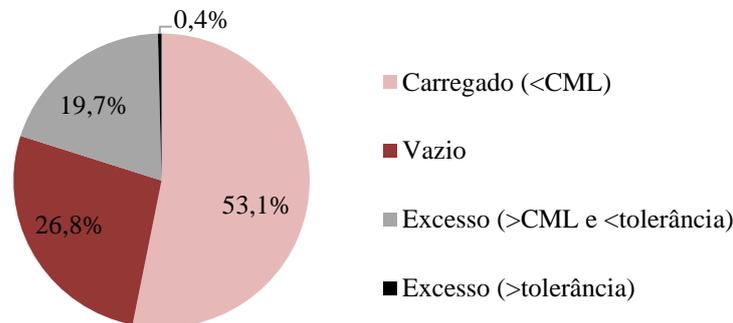


Figura 2. Situação do carregamento do total de veículos (AUTORES, 2024)

Conforme apresentado na Figura 2, mais da metade dos veículos comerciais avaliados trafegam carregados, enquanto um pouco mais de um quarto estão descarregados (vazios). O percentual de veículos dentro da tolerância é alto, cerca de 20%, e 0,4% trafegam acima do que é permitido pela legislação. Entretanto, como destacado por Fernandes Junior (1994), Cava (2021) e Inoue (2023), é importante ressaltar que o excesso de carga, mesmo em baixos percentuais, pode causar danos à infraestrutura viária, uma vez que esse valor não é considerado no dimensionamento do pavimento. Considerando apenas os veículos comerciais que excederam a tolerância, totalizando 85 no período analisado, foi calculado o percentual médio de excesso em relação ao peso bruto total (PBT) e esse é apresentado na Tabela 2.

Tabela 2. Excesso médio em relação ao limite por categoria (AUTORES, 2024)

Categoria	Excesso médio [ton]	Carga em excesso / máxima permitida [%]
2S2	8,782	25%
2C	2,966	18%
3M6	9,950	13%
2I2	4,387	12%
3S3	2,536	5%
3C	1,170	5%
Rod.	1,100	1%
2S3	0,315	1%

Além disso, também foi calculado o excesso médio por grupo de eixos, e os resultados podem ser observados na Tabela 3. É possível notar que o veículo do tipo 2S2 foi o que apresentou maior excesso no período e local analisados, atingindo quase 50% de sobrecarga no segundo grupo de eixos. Por outro lado, o veículo 2I2 registrou uma sobrecarga de mais de 50% no quarto grupo de eixos, enquanto o 2C ultrapassou 30% no eixo traseiro. A distribuição de carga por eixo está diretamente associada ao desempenho do pavimento e, por esse motivo, entender a distribuição das cargas por eixo e seu percentual de sobrecarga é extremamente importante para prever a vida útil e projetar pavimentos mais duráveis.



Tabela 3. Percentual de excesso por grupo de eixos (AUTORES, 2024)

Categoria	Grupo de eixos				
	1	2	3	4	5
2S2		49,0%	37,2%		
2C		30,4%			
3M6	3,2%	2,6%			
2I2	2,7%			50,6%	
3S3	5,4%	7,7%			
3C	1,9%	1,2%			
Rod.	7,5%	4,6%	6,1%		
2S3			3,6%		

### Pavimento com Estrutura Genérica para o Estado de Minas Gerais

Para obter os fatores de equivalência de carga, primeiramente definimos uma estrutura que representa a malha rodoviária de Minas Gerais, com base em dados históricos fornecidos pela Gerência de Ativos Rodoviários (GAR) do DER-MG e apresentada na Tabela 4. De acordo com esses dados, observou-se um CBR de 8% para o subleito nas proximidades dos locais onde foram realizados os estudos de tráfego. Embora esse valor seja considerado relativamente alto, seu desempenho é justificado pela presença de latossolos na região, que podem ter passado pelo processo de laterização. Ressalta-se que a rigidez das camadas e os valores de Poisson, no entanto, foram obtidos por aproximação, utilizando a IP-08/2004 – Análise Mecanicista à Fadiga de Estruturas de Pavimento e a IP-DE-P00/001 – Projeto de Pavimentação.

Tabela 4. Estrutura Genérica do Pavimento (AUTORES, 2024)

Estrutura Dimensionada	Espessura (cm)	Material	Módulo (Mpa)	Poisson
Revestimento	5,0	CBUQ	4.000	0,30
Base	15,00	Material Granular	300	0,35
Sub-base	15,00	Solo	200	0,35
Subleito (8%)	-	Solo	680	0,40

A estrutura definida possibilitou o estudo das variações dos fatores de equivalência de carga, levando em conta os eixos simples de rodagem dupla identificados durante as análises de tráfego, juntamente com os diferentes carregamentos observados na Tabela 3. Além disso, foram avaliados os efeitos da pressão de enchimento dos pneus nos fatores de veículos, com base em pesquisas como as de Cava (2021), que abordam a influência desse parâmetro na deterioração do pavimento.

Para calcular os esforços de tração no revestimento e de compressão no subleito, utilizou-se o programa computacional Elastic Layered System (ELSYM5), desenvolvido nos anos 1980. O ELSYM5 emprega o método das diferenças finitas para analisar tensões, deformações e deslocamentos em sistemas de camadas elásticas. O programa, de acordo com Medina e Motta (2015), considera as propriedades dos materiais e as cargas aplicadas, permitindo até cinco camadas isotrópicas no pavimento. Assim, na Tabela 5 podem ser observados os eixos e as respectivas sobrecargas que foram analisadas, bem como as diferentes pressões de enchimento.



Tabela 5. Carga por eixo e pressão de enchimento avaliadas no ELSYM5 (AUTORES, 2024)

Eixo Simples de Rodagem Duplas					
Carga por Eixo (t)	% Sobrecarga por Eixo	Pressão de Enchimento (psi)			
8	0,00	80			
10	0,00	80	100	120	
10	12,50	80	100	120	
10	20,00	80	100	120	
10	30,00	80	100	120	
10	40,00	80	100	120	
10	50,00	80	100	120	

Os FEC foram calculados utilizando a Equação 4 para as respostas estruturais das tensões de tração na fibra inferior do revestimento e das tensões de compressão vertical no topo do subleito. Com base na estrutura genérica, foram simulados diversos carregamentos, conforme a Tabela 3. Destaca-se que os percentuais de sobrecarga foram definidos com base nas observações de campo, que indicam eixos com considerável variabilidade de excesso de carga. Optou-se por selecionar os eixos simples de rodagem dupla para comparar o aumento da carga e o potencial de deterioração do pavimento. O impacto do aumento da carga e da pressão de enchimento foi comparado tanto para os fatores de fadiga quanto para os fatores de deformação permanente. Tendo em vista a variabilidade de veículos encontrados, os FEC não foram calculados para todos os eixos, portanto, recomenda-se que este estudo seja expandido futuramente.

## RESULTADOS

Primeiramente, vale ressaltar que os fatores de equivalência de carga estão relacionados à resposta estrutural do pavimento à aplicação da carga considerada, portanto, estão associados à sua deterioração. A seguir, são apresentados os gráficos (Figura 3 e Figura 4) que mostram a influência da sobrecarga e da pressão de enchimento nos FEC em relação à fadiga e às deformações permanentes.

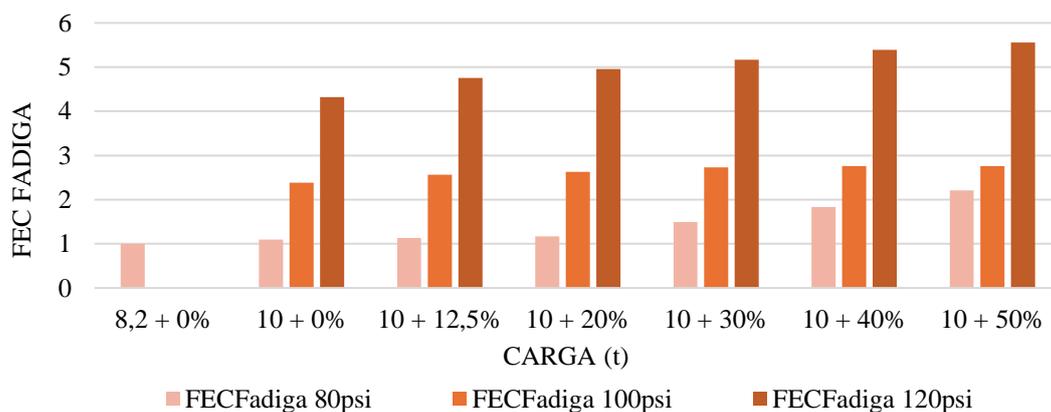


Figura 3. Influência da Pressão de enchimento e da sobrecarga no FEC de Fadiga (AUTORES, 2024)

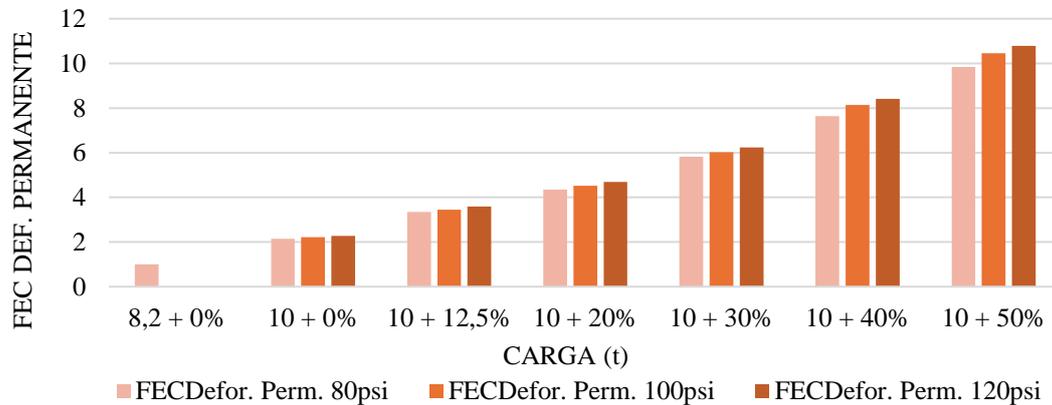


Figura 4. Influência da Pressão de enchimento e sobrecarga no FEC de Deformação Permanente (AUTORES, 2024)

No que diz respeito aos FEC de fadiga, percebe-se uma relação direta com o aumento da carga por eixo, considerando a espessura de 5 cm adotada. Salienta-se a importância da consideração correta da pressão dos pneus, já que um aumento dela resulta no aumento considerável do FEC de fadiga e, conseqüentemente, na redução da vida útil do pavimento. É importante ressaltar, conforme observado por Cava (2021), que a maioria dos veículos comerciais utiliza pressões de pneus muito superiores àquela considerada no eixo-padrão, 80 psi (552 kPa) e este aumento da pressão contribui muito para uma degradação mais rápida do pavimento.

No que se refere aos FEC de deformação permanente, nota-se que a pressão dos pneus não influencia tanto para uma mesma carga aplicada, porém é evidente que um aumento da carga por eixo tem um impacto significativo no pavimento. O Fator de Equivalência de Cargas (FEC) do eixo padrão foi cerca de cinco vezes menor do que o FEC considerando uma sobrecarga de 50% por eixo. De maneira geral, ambos os cenários revelam uma capacidade destrutiva muito superior ao que é normalmente previsto.

Os resultados destacam a importância da consideração da falha por fadiga nos processos de dimensionamento no Brasil – normalmente, ignorada. Essa lacuna contribui para a necessidade frequente de manutenção nas rodovias, logo após sua abertura ao tráfego. Além disso, como mencionado por Inoue (2023), as espessuras de pavimento geralmente adotadas no Brasil, em torno de apenas 5 centímetros, são consideravelmente menores do que em outros países, evidenciando ainda mais a situação precária da pavimentação no país. Segundo Cava (2021), é importante considerar que, devido às espessuras esbeltas, os pavimentos têm sua vida útil drasticamente reduzida, chegando a perder até 90% dela. Portanto, adotar espessuras adequadas ao tráfego local é fundamental. À medida que a espessura do revestimento aumenta, a estrutura torna-se mais resistente à flexão, reduzindo assim a influência da pressão dos pneus nessas estruturas.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo proporcionou uma análise detalhada e quantitativa do impacto dos veículos com excesso de carga no pavimento. Através da avaliação dos fatores de equivalência de carga, foi possível entender como o aumento da carga por eixo e as pressões de enchimento dos pneus influenciam na degradação do pavimento.

Além disso, constatou-se que a adoção de métodos empírico-mecanísticos, que levam em conta as respostas estruturais reais dos pavimentos, pode contribuir significativamente para prolongar a vida



útil dos pavimentos e reduzir os custos de manutenção. Entretanto, é importante destacar que esses métodos também possuem limitações, pois nem sempre consideram fatores externos que podem impactar na vida útil do pavimento, como o envelhecimento, manutenção, variações climáticas e outras condições.

No que diz respeito à "*lei de quarta potência*", uma limitação identificada é a falta de consideração das possíveis variações nas potências em função do tipo de veículo. Isso é relevante, pois determinar essas variações pode ser crucial para calcular com maior precisão o dano causado por diferentes tipos de cargas. Contudo, optou-se por adotar o método empírico mecanístico no estudo, pois representa uma abordagem mais conservadora, já que os FEC empíricos foram calculados em locais com pavimentos estruturalmente superiores aos encontrados no Brasil.

No contexto do dimensionamento do pavimento, embora algumas metodologias não considerem a tolerância prevista na Lei da Balança, alguns órgãos, como o DER-MG, adotam abordagens mais realistas ao levar em conta os percentuais de tolerância estabelecidos na legislação. No entanto, é importante ressaltar que dimensionar o pavimento para usuários que trafegam com excesso de carga é desafiador devido à variação significativa desse fator, influenciada por fatores econômicos, sazonais, tipos de veículos, entre outros. Nesse contexto, considerar a tolerância no cálculo do Número "N" já contribui para prolongar a vida útil, embora não elimine completamente o risco de falha estrutural antes do previsto.

Os resultados foram obtidos em um local com fiscalização vigente e, mesmo com a possibilidade de multas, alguns usuários optaram por trafegar com cargas acima do permitido pela legislação. Portanto, é importante considerar a possibilidade de que em outros trechos rodoviários, sem a presença de equipamentos de fiscalização, o excesso de carga seja ainda maior do que o detectado neste estudo.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bernucci, L. B.; Vallejo, L. **Avaliação do comportamento de pavimentos flexíveis utilizando o conceito de fatores de equivalência de cargas (FEC)**. *Revista de Infraestrutura Rodoviária*, v. 4, n. 2, p. 1-20, 2019. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_Ato2019-2022/2021/Lei/L14229.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2019-2022/2021/Lei/L14229.htm)>. Acesso em: 23 abril 2024.
- BRASIL**. Lei nº 14229, de 21 de outubro de 2021. Brasília, Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_Ato2019-2022/2021/Lei/L14229.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2019-2022/2021/Lei/L14229.htm)>. Acesso em: 08 maio 2023.
- Cava, F. H. **Análise da influência da pressão de enchimento dos pneus e da condição de aderência entre camadas no dimensionamento de pavimentos flexíveis**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2021. 144 f. Disponível em: <<https://doi.org/10.11606/D.3.2021.tde-24112021-141416>>. Acesso em: 28 abril 2024.
- Confederação Nacional do Transporte (CNT)**. *Informe CNT: Excesso de cargas aumenta custo das empresas*. Brasília, DF, 2019. Disponível em: <<https://cnt.org.br/agencia-cnt/informe-cnt-excesso-aumenta-custos-empresas>>. Acesso em: 08 maio 2023.
- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT)**. *Manual de Pavimentação*. Rio de Janeiro: Ministério dos Transportes, Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, 2006. 222 p. Disponível em: <[https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-manuais/vigentes/ipr\\_719\\_manual\\_de\\_pavimentacao\\_versao\\_corrigida\\_errata\\_1.pdf](https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-manuais/vigentes/ipr_719_manual_de_pavimentacao_versao_corrigida_errata_1.pdf)>. Acesso em: 21 abril 2024.
- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT)**. *Manual de Estudos de Tráfego*. Rio de Janeiro: Ministério dos Transportes, Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, 2006. 200 p. Disponível em: <[https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-manuais/vigentes/723\\_manual\\_estudos\\_trafego.pdf](https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-manuais/vigentes/723_manual_estudos_trafego.pdf)>. Acesso em: 21 abril 2024.
- Fernandes Junior, J. L. **Investigação dos Efeitos das Solicitações do Tráfego sobre o Desempenho de Pavimentos**. São Carlos, SP, 1994. 293 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. Acesso em: 23 abril 2024.
- FRANCO, F. A. C. P.** *Método de dimensionamento mecânico-empírico de pavimentos asfálticos – SisPav*. Rio de Janeiro: Coppe/UFRJ, 2007.
- HIGHWAY RESEARCH BOARD**. *Report 7: Summary report – Publication nº 1061*. Washington, DC: National Academy of Sciences – National Research Council, Division of Engineering and Industrial Research, 1962.
- Hussain, S.; Parker, N. A. **Pavement damage and road pricing**. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Washington, D. C., v. TRB 2006 Annual Meeting CD-ROM, 2006.
- Inoue, Danilo Keniti Nais. **Consideração do Efeito do Tráfego para Fins de Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis e de Dosagem de Misturas Asfálticas**. São Carlos, 2023. 124 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade de São Paulo.
- Medina, J.; Motta, L. M. G. *Mecânica dos Pavimentos*. 3. ed. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2015.
- SOUZA, M.L. *Método de Projeto de Pavimentos Flexíveis*. Rio de Janeiro: DNER, 1981.
- TREYBIG, H.G.; VON QUINTUS, A.** *Equivalency Factor Analysis and Prediction for Triple Axles - Report BR-2/1*. Austin: Austin Research Engineers, 1976.
- TURNBULL, W.J.; FOSTER, C.R.; AHLVIN, R.G.** *Design of Flexible Pavements Considering Mixed Loads and Traffic Volume*. In: *International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements*. Ann Arbor: The University of Michigan, 1962.