



19 a 22 de Setembro de 2023  
Foz do Iguaçu - PR

[www.rapvenacor.com.br](http://www.rapvenacor.com.br)



## 25º Encontro Nacional de Conservação Rodoviária (ENACOR) 48ª Reunião Anual de Pavimentação (RAPv)

### CONSIDERAÇÕES SOBRE A VARIAÇÃO DA PRESSÃO DE ENCHIMENTO DOS PNEUS NA CONFIABILIDADE DOS PROJETOS DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS RODOVIÁRIOS

DOI: (a ser preenchido após o envio do código DOI da publicação)

*Felipe H. Cava<sup>1</sup>; Carlos Y. Suzuki<sup>2</sup>; Caio R.G. Santos<sup>3</sup>; Flaviane M.L. Vallejo<sup>3</sup> & Angela M. Azevedo<sup>4</sup>*

#### RESUMO

Os métodos tradicionais de dimensionamento de pavimentos consistem em análises determinísticas, de tal modo que o cálculo do número “N” de repetições equivalentes do eixo padrão representa um valor médio de solicitações. No entanto, os parâmetros utilizados em projetos de pavimento possuem incertezas e riscos associados que podem influenciar no desempenho do pavimento, ou seja, são regidos por uma natureza probabilística. Diversos são as variáveis aleatórias presentes no dimensionamento de pavimentos, como a composição do tráfego; os tipos e cargas por eixo; a interação pneu-pavimento; a condição de aderência entre camadas; a pressão de enchimento dos pneus, entre outros. Diante do exposto, este trabalho analisou as variações das pressões de enchimento de pneus e seus impactos na confiabilidade de estruturas de pavimentos. Para isso, foi utilizada a distribuição de pressões de pneus de uma rodovia de tráfego pesado concessionada no estado de São Paulo, na qual foi possível constatar que apenas 1,35% dos pneus aferidos trafegam com a pressão padrão de 560kPa, adotada como referência no dimensionamento dos pavimentos asfálticos rodoviários no Brasil. Assim, para contemplar as variações reais e atuais de enchimento de pressão observadas em campo, os autores recomendam adotar a pressão de inflação de 840kPa como nova pressão de referência para dimensionamento de pavimentos asfálticos e verificações mecânicas no Brasil.

**PALAVRAS-CHAVE:** Pressão de pneus; confiabilidade de pavimentos; dimensionamento de pavimentos.

#### ABSTRACT

Traditional pavement design methods that are used in Brazil consider a deterministic model, so that the calculation of the ESALs (equivalent single axle load) represents an average value. However, the parameters used in pavement designs have uncertainties and associated risks that can influence the pavement performance, in other words, they are governed by a probabilistic nature. There are several random variables in pavement design, as axle types and loads; the tire-pavement interaction; the condition of adhesion between layers; tire inflation pressure, traffic and axle load, growth rate, among others. Given the above, this paper analyzed the variations in tire inflation pressures and their impacts on the reliability of pavement structures. For this, the tire pressure distribution of a heavy traffic highway in the State of São Paulo was used, from which it was possible to verify that only 1,35% of the measured tires travel with the standard pressure of 560kPa, that is adopted as a reference value in asphalt pavement design in Brazil. Thus, to contemplate the actual and current variations in tire pressures observed in the field, it is recommended to adopt an inflation pressure of 840kPa as a new reference value for pavement design and mechanistic analysis in Brazil.

**KEY WORDS:** Tire pressure; pavement reliability; pavement design.

<sup>1</sup> Centro Universitário da FEI, Departamento de Engenharia de Civil, e-mail: [cava@fei.edu.br](mailto:cava@fei.edu.br)

<sup>2</sup> Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia de Transportes, e-mail: [carlos.suzuki@planservi.com.br](mailto:carlos.suzuki@planservi.com.br)

<sup>3</sup> Instituto Mauá de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil, e-mail: [caiorubens@maua.br](mailto:caiorubens@maua.br); [flaviane.vallejo@maua.br](mailto:flaviane.vallejo@maua.br)

<sup>4</sup> Planservi Engenharia Ltda, e-mail: [angela.martins@planservi.com.br](mailto:angela.martins@planservi.com.br)



19 a 22 de Setembro de 2023  
Foz do Iguaçu - PR

[www.rapvenacor.com.br](http://www.rapvenacor.com.br)



## INTRODUÇÃO

Em todos os métodos de dimensionamento de pavimentos asfálticos, o conceito de ruptura é considerado como um fator essencial para o projeto. A ruptura em um pavimento pode estar relacionada com a sobrecarga na estrutura, com o número elevado de repetições de carga, excesso de pressão de enchimento dos pneus dos veículos pesados, condições ambientais e com o envelhecimento dos materiais de revestimento (FRANCO, 2007).

As abordagens tradicionais de dimensionamento de pavimentos consistem em métodos determinísticos, isto é, os modelos utilizam parâmetros médios para a previsão de desempenho da estrutura perante um certo critério de ruptura. Embora as abordagens determinísticas considerem valores fixos, os parâmetros de projeto apresentam uma distribuição probabilística que influencia no desempenho do pavimento. O projeto de pavimentação envolve uma série de variáveis aleatórias que se distribuem em uma natureza probabilística, no qual o tratamento estatístico não pode ser dispensado (MOTTA, 1991).

Para Brown (1994), o conhecimento das incertezas relacionadas às diferentes variáveis permite a análise da contribuição de cada parâmetro e o efeito na redução de desempenho da estrutura. Suzuki *et al.* (2001; 2004) mencionam a necessidade de incorporar o conceito de confiabilidade nos métodos brasileiros de dimensionamento de pavimentos.

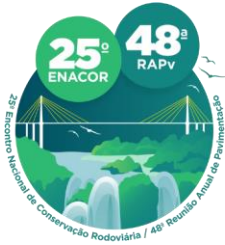
Segundo Beck (2019), a confiabilidade de uma estrutura é obtida partindo da equação de estado limite que descreve o modelo de falha. O autor descreve que o dano por fadiga pode ser contabilizado em termos do número de ciclos solicitantes aos quais o elemento estrutural está submetido. A equação de estado limite à fadiga para pavimentos asfálticos rodoviários pode ser descrita como a diferença entre o número de repetições admissíveis resistentes da estrutura ( $N_R$ ) e o número de repetições solicitantes do eixo rodoviário padrão ( $N_S$ ), conforme Equação 1.

$$g(R, S) = N_R - N_S \quad (1)$$

Como a distribuição de probabilidades do número de repetições de ciclos que levam a estrutura à fadiga possui natureza log-normal (HUANG, 2004), a confiabilidade do pavimento é obtida por meio de uma função de dano. Segundo Thongram e Rajbongshi (2016), neste caso a confiabilidade estrutural pode ser obtida pela Equação 2, em que  $f_D(x)$  expressa a função de densidades de probabilidade do fator de dano  $D$  e  $x$  é a variável de integração.

$$\text{Confiabilidade} = \int f_D(x) dx \quad (2)$$

Para o dimensionamento dos pavimentos asfálticos rodoviários e o cálculo da confiabilidade, o tráfego rodoviário é um dos parâmetros mais importantes, sendo descrito pelo número de repetições solicitantes do eixo rodoviário padrão (Número  $N_S$ ). O Número  $N_S$  é calculado em função do volume diário de veículos que trafegam por uma rodovia, da carga por eixo, da pressão de enchimento dos pneus etc. Diversos autores mostraram a distribuição de sobrecargas em rodovias brasileiras e os efeitos na vida útil dos pavimentos rodoviários (ALBANO, 2005; FONTENELE, 2011; BOSSO, 2018; VALLEJO, 2021).



19 a 22 de Setembro de 2023  
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



Além da sobrecarga dos eixos de veículos rodoviários, a pressão de enchimento dos pneus é uma das variáveis aleatórias que contribuem para a redução de vida útil da estrutura, como observado por autores como Fernandes Jr (1994) e De Beer (2006). O método de dimensionamento de pavimentos em vigor no Brasil pelo DNIT (2006) e o método MeDiNa (FRANCO e MOTTA, 2020) utilizam a pressão de enchimento dos pneus de 560kPa para cálculo do número de repetições do eixo rodoviário padrão e verificações mecânicas do pavimento.

Os dois métodos utilizam como referência as contribuições de Turnbull, Foster e Alvin (1962), as quais ocorreram quando os pneus eram predominantemente de construção diagonal e com pressões de inflação da ordem de 560kPa. Ou seja, os métodos de dimensionamento de pavimentos utilizados até hoje no Brasil consideram pneus com tecnologia de 60 anos atrás.

Autores como Chowdhury e Rallings (1994), Motaleb (2007) e Theyse et al. (2011) citam mudanças na pressão de enchimento dos pneus de referência para dimensionamento de pavimentos em função de pesquisas realizadas em rodovias. Na Austrália e Estados Unidos da América são utilizadas pressões de pneus variando de 700kPa a 840kPa nos métodos de dimensionamento de pavimentos rodoviários (AASHTO, 2008; AUSTRROADS, 2017).

No Brasil, Cava (2021) investigou na Rodovia Regis Bittencourt, uma rodovia de elevado volume de tráfego, a distribuição da pressão de enchimento dos pneus de veículos comerciais em uma amostra de 1860 pneus. O autor observou que 98,65% dos pneus solicitam a estrutura em níveis de tensão e deformação superiores àqueles considerados no dimensionamento de pavimentos rodoviários, conforme Figura 1.

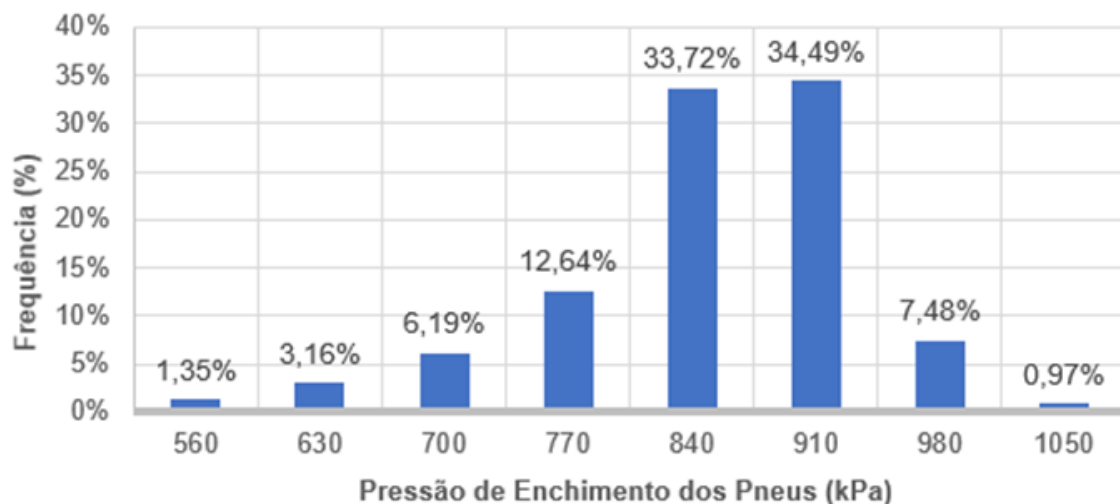
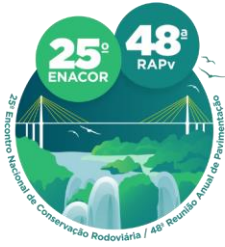


Figura 1. Distribuição da pressão de enchimento dos pneus na Rodovia Regis Bittencourt (CAVA, 2021)

Cava (2021) realizou ainda um estudo paramétrico da influência da pressão de enchimento dos pneus nas respostas estruturais dos pavimentos asfálticos flexíveis. O autor observou que a variação da pressão de pneus de campo pode reduzir a vida útil dos pavimentos de 40 a 80%, de modo que esta variação é influenciada principalmente pela espessura do revestimento asfáltico.

Análises da probabilidade de falha de pavimentos asfálticos levando em consideração a sobrecarga de veículos e a interação pneu-pavimento foram conduzidas por Sánchez (2021). A autora observou que modelos de primeira ordem para estimativa da confiabilidade podem auxiliar na tomada de



19 a 22 de Setembro de 2023  
Foz do Iguaçu - PR

[www.rapvenacor.com.br](http://www.rapvenacor.com.br)



decisões na prática rodoviária. Contudo, as análises desenvolvidas por Sánchez (2021) não levaram em consideração as incertezas envolvidas na previsão do tráfego rodoviário ou a distribuição de campo das pressões de enchimento dos pneus.

Nos últimos anos, os órgãos rodoviários brasileiros têm investido no novo método de dimensionamento nacional (MeDiNa). Este método apresenta contribuições relevantes para melhorar o desempenho dos pavimentos rodoviários, como a consideração da fadiga nos revestimentos asfálticos e os critérios de confiabilidade em função dos tipos de via. Embora as melhorias citadas do MeDiNa, o tráfego rodoviário ainda é calculado considerando tecnologias ultrapassadas e que influenciam na vida útil dos pavimentos, como mostrado mais recente por Cava (2021).

Diante deste contexto, o presente trabalho objetiva a análise da variação da pressão de enchimento dos pneus e sua influência na confiabilidade dos pavimentos asfálticos rodoviários, utilizando os levantamentos de campo obtidos por Cava (2021), assim como sugerir uma nova pressão de pneus de referência para dimensionamento de pavimentos rodoviários.

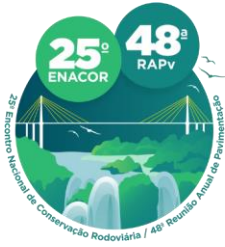
## MÉTODO

Para análise da confiabilidade em função da pressão de enchimento dos pneus, foram analisadas três estruturas de pavimentos rodoviários variando a espessura de revestimento asfáltico, conforme Tabela 1. Nestas estruturas, as análises foram realizadas considerando o comportamento elástico-linear dos materiais por meio do software mePADS, simulando o semieixo do eixo rodoviário padrão, ou seja, duas cargas de 20kN uniformemente distribuídas em áreas circulares. A pressão de enchimento dos pneus foi simulada variando de 560kPa a 1050kPa, em acréscimos de 70kPa.

**Tabela 1 - Estruturas Analisadas (AUTORES, 2023)**

Estruturas	Camada	Espessura (mm)	MR (MPa)	Coef. Poisson
1	Revestimento	50	4000	0,30
	Base	150	250	0,35
	Sub-base	150	150	0,35
	Subleito	∞	80	0,45
2	Revestimento	100	4000	0,30
	Base	150	250	0,35
	Sub-base	150	150	0,35
	Subleito	∞	80	0,45
3	Revestimento	150	4000	0,30
	Base	150	250	0,35
	Sub-base	150	150	0,35
	Subleito	∞	80	0,45

A equação de estado limite utilizada neste trabalho é linear, definida por duas variáveis aleatórias com distribuição log-normal (HUANG, 2004). Assim, o problema de confiabilidade estrutural pode ser resolvido conhecendo o valor esperado das variáveis aleatórias de resistência  $E(N_r)$  e de solicitação  $E(N_s)$ , com seus respectivos coeficientes de variação  $(\delta)$  (BECK, 2019).



19 a 22 de Setembro de 2023  
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



Em análises estruturais de pavimentos, o valor esperado do número  $N$  admissível de repetições do eixo rodoviário padrão pode ser obtido utilizando equações de fadiga. Neste trabalho, para as verificações mecânicas, foi utilizada a equação da FHWA sugerida pelo DER/SP (2006). O valor esperado da resistência  $E(N_r)$  para um eixo com características específicas pode ser obtido pela Equação 3. Por meio desta equação, para cada pressão de pneus analisada foi obtido o número de repetições admissível ( $N$  admissível).

$$E(N_R) = \mu_R = 1,092 \cdot 10^{-6} \cdot \left(\frac{1}{\epsilon t}\right)^{3,512} \quad (3)$$

Como os pavimentos são comumente dimensionados para a pressão de pneus de 560kPa, o valor obtido para esta pressão de pneus foi inicialmente definido como número  $N$  de projeto para a estrutura em questão. O número  $N$  de projeto coincide com o valor esperado da resistência para cálculo da confiabilidade estrutural nesta pressão de pneus.

A solicitação do tráfego rodoviário é obtida nos métodos de dimensionamento de pavimentos pelo produto do volume de projeto e do fator de veículo (FV). Para analisar a influência da pressão de pneus, a hipótese de Miner (1945) foi utilizada para calcular o tráfego solicitante em função das diferentes pressões de enchimento dos pneus.

Utilizando as frequências de distribuição das pressões obtidas por Cava (2021) na Rodovia Regis Bittencourt (Figura 1), o número  $N$  de projeto foi multiplicado pela porcentagem da distribuição para obter o número de solicitações atuantes de determinada pressão de pneus ( $N$  atuante), conforme Equação 4.

$$N \text{ atuante (Pressão } i) = N_{\text{projeto}} \cdot \% \text{ Pressão } i \quad (4)$$

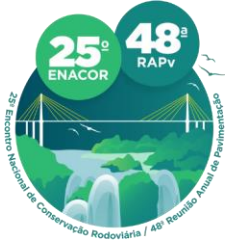
Em seguida, por meio da hipótese de Miner (1945), o fator de dano ( $D$ ) foi calculado pela somatória do quociente entre número de repetições atuantes (Equação 4) e do número de repetições admissíveis (Equação 3) de cada nível de pressão de pneus analisada, conforme Equação 5.

$$D = \sum \frac{N \text{ atuante}}{N \text{ admissível}} \quad (5)$$

O valor esperado de solicitação  $E(N_s)$  pode ser obtido pelo produto do número de repetições do eixo de projeto ( $N_{\text{projeto}}$ ) e do fator  $D$ , conforme Equação 6 (THONGRAM e RAJBONGSHI, 2016).

$$E(N_S) = \mu_S = N_s = N_{\text{projeto}} \cdot \sum \frac{N \text{ atuante}}{N \text{ admissível}} \quad (6)$$

Com as estatísticas de resistência e solicitação nos pavimentos, o índice de confiabilidade, o qual é a medida geométrica do centro da distribuição margem de segurança até a equação de estado limite, pode ser obtido pela Equação 7. Segundo Huang (2004), os coeficientes de variação da previsão de desempenho do pavimento (resistência) e previsão do tráfego (solicitação) são de aproximadamente 37,5% e 42%, respectivamente.



19 a 22 de Setembro de 2023  
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



$$\beta = \frac{\ln \left( \frac{\mu_R}{\mu_S} \cdot \sqrt{\frac{1 + \delta_R^2}{1 + \delta_S^2}} \right)}{\sqrt{\ln \left( (1 + \delta_R^2) \cdot (1 + \delta_S^2) \right)}} \quad (7)$$

No espaço normal padrão, por meio da transformação de Hasofer-Lind, a probabilidade de falha ( $pf$ ) da estrutura é obtida pela Equação 8 (BECK, 2019), onde  $\Phi()$  é a função de distribuição acumulada da normal padrão. A Figura 2 ilustra a interpretação do índice de confiabilidade  $\beta$  e da probabilidade de falha da estrutura.

$$pf = \Phi(-\beta) \quad (8)$$

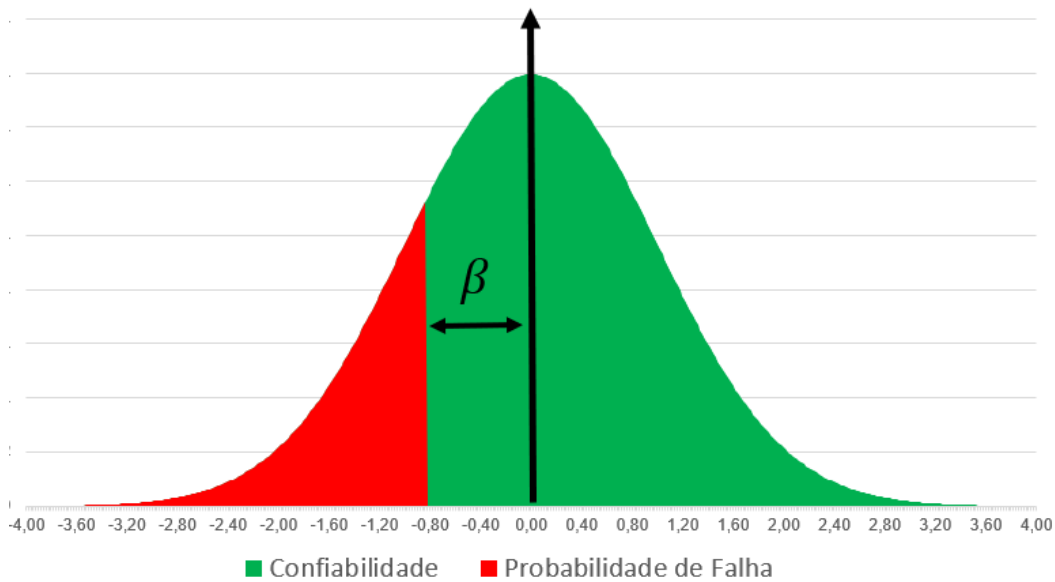
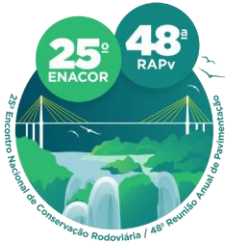


Figura 2. Interpretação do índice de confiabilidade (AUTORES, 2023)

## DESENVOLVIMENTO E RESULTADOS

### Confiabilidade estrutural de pavimentos considerando a pressão do eixo rodoviário padrão

A Tabela 2 apresenta os resultados das análises elástico-lineares para as estruturas com espessuras de 50, 100 e 150mm de revestimento asfáltico, respectivamente. As análises apresentadas reforçam que o aumento da pressão de enchimento dos pneus reduz a vida útil da estrutura do pavimento. Para a Estrutura 1, por exemplo, a sollicitação de uma pressão de 910kPa reduz em 70% a vida útil do pavimento.



19 a 22 de Setembro de 2023  
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



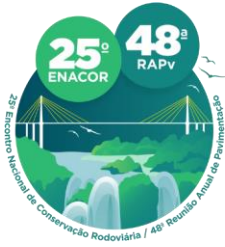
**Tabela 2 - Resultados das análises estruturais (AUTORES, 2023)**

Estrutura	Pressão de pneus (kPa)	% Pressão	$\epsilon t$ ( $10^{-6}$ )	N atuante	N admissível	D (%)
1	560	1,35	301,1	3,43E+04	2,54E+06	1,35
	630	3,16	329,6	8,03E+04	1,85E+06	4,34
	700	6,19	356,3	1,57E+05	1,41E+06	11,18
	770	12,64	381,5	3,21E+05	1,11E+06	29,02
	840	33,72	405,3	8,57E+05	8,95E+05	95,76
	910	34,49	428	8,76E+05	7,39E+05	118,60
	980	7,48	449,6	1,90E+05	6,22E+05	30,58
	1050	0,97	470,1	2,46E+04	5,31E+05	4,64
	<b>Total</b>	<b>100</b>			$\Sigma$	
2	560	1,35	227,6	9,17E+04	6,79E+06	1,35
	630	3,16	238,4	2,15E+05	5,77E+06	3,72
	700	6,19	248	4,20E+05	5,02E+06	8,37
	770	12,64	256,8	8,58E+05	4,44E+06	19,31
	840	33,72	264,8	2,29E+06	3,99E+06	57,38
	910	34,49	272,1	2,34E+06	3,63E+06	64,58
	980	7,48	278,8	5,08E+05	3,33E+06	15,25
	1050	0,97	285	6,59E+04	3,08E+06	2,14
	<b>Total</b>	<b>100</b>			$\Sigma$	
3	560	1,35	159,8	3,17E+05	2,35E+07	1,35
	630	3,16	164,3	7,43E+05	2,13E+07	3,48
	700	6,19	168,2	1,46E+06	1,96E+07	7,41
	770	12,64	171,6	2,97E+06	1,83E+07	16,23
	840	33,72	174,6	7,93E+06	1,72E+07	46,02
	910	34,49	177,3	8,11E+06	1,63E+07	49,68
	980	7,48	179,7	1,76E+06	1,56E+07	11,30
	1050	0,97	181,8	2,28E+05	1,49E+07	1,53
	<b>Total</b>	<b>100</b>			$\Sigma$	

Observa-se pelas análises realizadas que o aumento da espessura do revestimento asfáltico reduz as deformações horizontais de tração na fibra inferior desta camada. Além disso, o aumento da espessura diminui a variação das deformações de tração em função da pressão de enchimento dos pneus. Para espessuras de revestimento asfáltico de 50mm, por exemplo, ocorre uma variação de 42% nas deformações de tração entre a pressão de pneus de 910kPa e 560kPa. Por outro lado, para estruturas de pavimento com revestimento asfáltico de 150mm ocorre uma variação inferior a 11% entre essas pressões. Quanto menor a espessura do revestimento asfáltico, mais sensível a estrutura será à pressão de pneus.

É notório que o fator D, que expressa o dano total resultante da distribuição de pressões de pneus de campo em função da pressão do eixo rodoviário padrão, diminui à medida que a espessura do revestimento asfáltico aumenta. Isso ocorre devido ao aumento da rigidez à flexão das camadas asfálticas, o que reduz a deformação de tração na fibra inferior da camada de revestimento.

No Brasil, os pavimentos rodoviários são dimensionados considerando as solicitações de um eixo rodoviário padrão de 80kN e pressão de enchimento dos pneus de 560kPa. Para a análise da



19 a 22 de Setembro de 2023  
Foz do Iguaçu - PR

[www.rapvenacor.com.br](http://www.rapvenacor.com.br)



confiabilidade nesta pressão de pneus, o valor esperado da resistência e o número N de projeto são coincidentes, conforme descrito por Huang (2004). A Tabela 3 apresenta os valores esperados de resistência e solicitação para cada estrutura analisada neste trabalho. Observa-se que o valor esperado de solicitação é maior do que o valor esperado da resistência, devido à magnitude das pressões de pneus em campo em comparação com a pressão considerada no dimensionamento.

**Tabela 3 - Valor esperado de resistência e solicitação para cada estrutura (AUTORES, 2023)**

Estrutura	E(Nr)	N	D	E(Ns)
1	2,54E+06	2,54E+06	2,95	7,51E+06
2	6,79E+06	6,79E+06	1,72	1,17E+07
3	2,35E+07	2,35E+07	1,37	3,22E+07

Com base nos coeficientes de variação sugeridos por Huang (2004), a Tabela 4 apresenta o índice de confiabilidade e a probabilidade de falha de cada estrutura dimensionada com a pressão de enchimento dos pneus de 560kPa. Os índices de confiabilidade calculados são negativos porque o número de repetições solicitantes é maior do que a quantidade de repetições resistentes, o que implica em uma confiabilidade inferior a 50%.

A análise demonstra que a probabilidade de falha das estruturas dimensionadas com pressão de pneus de 560kPa é superior a 70%, dado que os pneus sofreram avanços tecnológicos e as pressões de inflação aumentaram (FERNANDES JR, 1994). Como o aumento da espessura do revestimento asfáltico ocorre a redução da influência da pressão de pneus nas respostas estruturais, a probabilidade de falha da estrutura diminui gradativamente com o acréscimo de rigidez à flexão da camada asfáltica.

**Tabela 4 - Cálculos do índice de confiabilidade e probabilidade de falha por estrutura (AUTORES, 2023)**

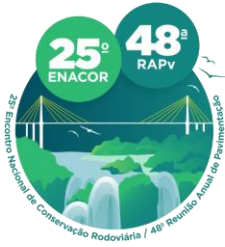
Pressão de Pneus (kPa)	Estrutura	$\beta$	Pf (%)
560	1	-1,97	97,56
	2	-0,97	83,40
	3	-0,55	70,88

### Sugestão de nova pressão de pneus para dimensionamento de pavimentos

Com base na pesquisa de campo realizada por Cava (2021) e nas análises de confiabilidade desenvolvidas neste trabalho, o mesmo procedimento pode ser realizado variando a pressão de referência para o dimensionamento de pavimentos rodoviários.

A Tabela 5 apresenta os cálculos de confiabilidade para as três estruturas, variando a pressão de pneus de 630 a 1050kPa. Observa-se para todas as estruturas que o aumento da pressão de enchimento dos pneus para dimensionamento dos pavimentos reduz a probabilidade de falha, quando comparada com o eixo rodoviário padrão de 560kPa. Para estruturas com revestimento asfáltico de 50mm ocorrem as maiores reduções de probabilidade de falha dos pavimentos, devido a menor rigidez à flexão destas estruturas e a maior influência da pressão de pneus utilizada no dimensionamento.





19 a 22 de Setembro de 2023  
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



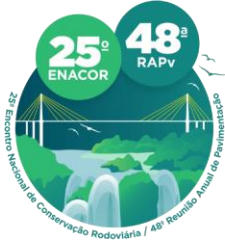
**Tabela 5 – Probabilidade de falha em função das pressões de pneus (AUTORES, 2023)**

Pressão de pneus (kPa)	Estrutura	E(Nr)	D	E(Ns)	$\beta$	Pf (%)
630	1	1,85E+06	2,15	3,98E+06	-1,38	91,32
	2	5,77E+06	1,46	8,44E+06	-0,67	74,86
	3	2,13E+07	1,24	2,65E+07	-0,37	64,43
700	1	1,41E+06	1,64	2,30E+06	-0,88	81,06
	2	5,02E+06	1,27	6,39E+06	-0,42	66,28
	3	1,96E+07	1,14	2,25E+07	-0,22	58,71
770	1	1,11E+06	1,29	1,42E+06	-0,44	67,00
	2	4,44E+06	1,13	5,00E+06	-0,19	57,53
	3	1,83E+07	1,07	1,95E+07	-0,09	53,59
840	1	8,95E+05	1,04	9,31E+06	-0,04	51,60
	2	3,99E+06	1,01	4,03E+06	0,01	49,60
	3	1,72E+07	1,00	1,73E+07	0,02	49,20
910	1	7,39E+05	0,86	6,35E+06	0,31	37,83
	2	3,63E+06	0,92	3,33E+06	0,18	42,86
	3	1,63E+07	0,95	1,55E+07	0,12	45,22
980	1	6,22E+05	0,72	4,49E+05	0,63	26,43
	2	3,33E+06	0,84	2,81E+06	0,41	34,09
	3	1,56E+07	0,91	1,41E+07	0,21	41,68
1050	1	5,31E+05	0,62	3,28E+05	0,92	17,88
	2	3,08E+06	0,78	2,41E+06	0,59	27,76
	3	1,47E+07	0,87	1,30E+07	0,28	38,97

A Figura 3 ilustra a variação da probabilidade de falha em função da pressão de pneus, na qual observa-se uma convergência da probabilidade de falha em 50% dado o aumento de espessura da camada asfáltica. A variação de probabilidade de falha deve-se ao comportamento dos pavimentos asfálticos, em especial quanto à deformação horizontal de tração, em função do aumento da pressão de enchimento dos pneus.

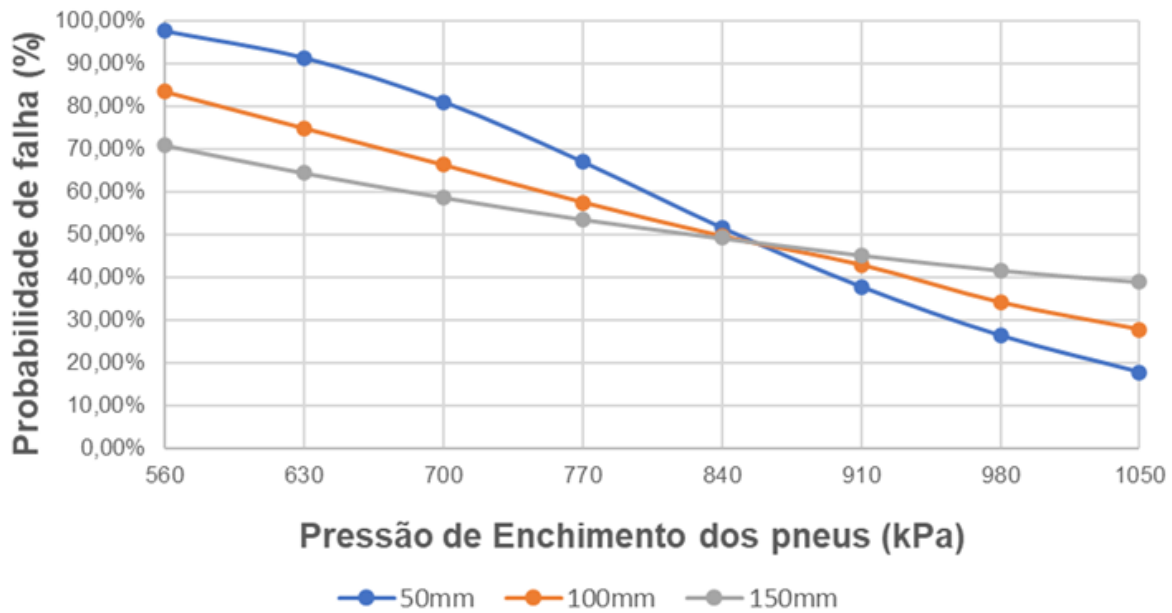
Os pavimentos com menores espessuras de revestimento asfáltico apresentam grandes variações de deformação horizontal de tração na fibra inferior da camada em flexão devido à pressão de pneus. Nestas estruturas, o uso de pressões de pneus elevadas para dimensionamento proporcionaria maior confiabilidade em virtude da influência desta pressão na resposta estrutural analisada.

Por outro lado, o aumento da espessura do revestimento asfáltico reduz a diferença entre deformações de tração causadas por solicitações de 560kPa e 1050kPa, tendendo a zero para grandes espessuras. Nestas condições, os pavimentos com as maiores espessuras de revestimento asfáltico não teriam ruptura caracterizada pela pressão de enchimento dos pneus e a probabilidade de falha converge para o valor em que a resistência é igual a solicitação, ou seja 50%.



19 a 22 de Setembro de 2023  
Foz do Iguaçu - PR

[www.rapvenacor.com.br](http://www.rapvenacor.com.br)



**Figura 3. Probabilidade de falha em função da espessura do revestimento asfáltico e da pressão de enchimento dos pneus considerada no dimensionamento do pavimento (AUTORES, 2023).**

Nas análises de confiabilidade desenvolvidas, observa-se a convergência das probabilidades de falha entre as pressões de pneus de 840kPa e 910kPa. O dimensionamento com pressões de pneus maiores do que estas poderia elevar a confiabilidade, mas estaria condicionada à espessura de revestimento asfáltico da estrutura.

Para o objeto de estudo deste trabalho, entende-se que a pressão de pneus não deve ser utilizada como fator de segurança para os projetos de pavimentos rodoviários, mas sim calibrada para as solicitações de campo. Isto é, a pressão utilizada no dimensionamento deve ser representativa do tráfego rodoviário brasileiro.

Por meio destas análises, considera-se que o dimensionamento de pavimentos asfálticos rodoviários deve ser realizado utilizando a pressão de pneus de 840kPa, a qual é representativa para rodovias de elevado volume de tráfego.

Observa-se intuitivamente que a mudança da pressão de pneus de 560kPa para 840kPa traria benefícios para pavimentos asfálticos de rodovias por meio da calibração da probabilidade de falha, reduzindo uma das incertezas presentes no dimensionamento de pavimentos. Além disso, os resultados obtidos neste trabalho estão de acordo com as recomendações da AASHTO (2008), a qual sugere o dimensionamento de pavimentos com a pressão de pneus de 840kPa.

## CONCLUSÕES

Devido aos avanços tecnológicos da indústria automobilística, os pneus de veículos rodoviários sofreram mudanças no seu processo de construção, de forma que a pressão de enchimento dos pneus de 560kPa não é mais representativa dos pneus que solicitam as estruturas de pavimentos rodoviários no Brasil e no exterior.

Diante disso, este trabalho teve como objetivo avaliar a confiabilidade em projetos de estrutura de pavimento variando-se a pressão de enchimento dos pneus. As análises de confiabilidade estrutural



19 a 22 de Setembro de 2023  
Foz do Iguaçu - PR

[www.rapvenacor.com.br](http://www.rapvenacor.com.br)



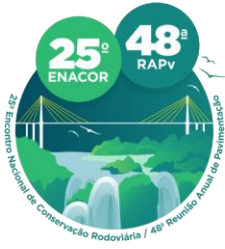
evidenciaram os problemas de manter o dimensionamento de pavimentos com a pressão de pneus de referência de 560kPa de forma determinística, já que os pavimentos analisados com esta pressão apresentaram probabilidade de falha superior a 70% em comparação com as solicitações efetivas de campo.

As mudanças nos métodos de dimensionamento de pavimentos rodoviários, incluindo critérios de confiabilidade em função do tipo de via projetada, mas mantendo a pressão de pneus em 560kPa, resultam em uma falsa segurança para o engenheiro projetista.

Entende-se que as pressões de enchimento dos pneus não devem ser utilizadas para majorar excessivamente a confiabilidade dos projetos de pavimentos. Contudo, este trabalho mostrou que a pressão de inflação utilizada atualmente está distante das pressões de pneus reais que atuam em rodovias brasileiras, reduzindo a confiabilidade projetada e a qualidade dos pavimentos em campo. Assim, os autores sugerem que projetos de pavimentos rodoviários sejam desenvolvidos utilizando a pressão de pneus de 840kPa como referência, obtida em função da distribuição de frequências de campo encontrada por Cava (2021) e das análises de confiabilidade estrutural desenvolvidas neste trabalho. Ressalta-se que o valor sugerido pelos autores está de acordo com as recomendações da AASHTO (2008).

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AASHTO. *Mechanistic-empirical pavement design guide: a manual of practice*. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC, 2008.
- Albano, J.F. *Efeitos dos excessos de carga sobre a durabilidade de pavimentos*. Tese de Doutorado: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2005.
- Austroroads. *Guide to pavement technology part 2: pavement structural design*. Sidney, 2017.
- Beck, A.T. *Confiabilidade e Segurança das Estruturas*. 1ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2019.
- Bosso, M. *Uso da tecnologia Weight-in-Motion para a caracterização do tráfego rodoviário e do excesso de carga em veículos comerciais*. Dissertação de Mestrado: Escola Politécnica da USP, São Paulo, 2018.
- Brown, J. L. *Reliability in pavement design? Who's kidding whom?* Transportation Research Record 1449, Transportation Research Board, Washington, DC, 1994.
- Chowdhury, F; Rallings, R. *A survey of truck tyre pressures in Tasmania*. Road & Transport Research, vol, 3, No. 3, pp. 80-90. September 1994.
- 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 de Mestrado: Escola Politécnica da USP, São Paulo, 2021.
- De Beer, M. *Reconsideration of Tyre-pavement input parameters for the structural design of flexible pavements*. South África, Pretoria, 2006.
- Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo (DER/SP). *IP-DE-P00/001 Projeto de Pavimentação*. São Paulo, Janeiro, 2006.
- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT). *Manual de Pavimentação*. Publicação IPR 719. 3ª Edição. Rio De Janeiro, 2006.
- Fernandes JR., J.L. *Investigação dos Efeitos das Solicitações do Tráfego sobre o Desempenho de Pavimentos*. Tese de Doutorado: Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 1994.
- Fontenele, H.B. *Representação do Tráfego de Veículos Rodoviários de Carga através de Espectros de Carga por Eixo e seu Efeito no Desempenho dos Pavimentos*. Tese de Doutorado: Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2011.



19 a 22 de Setembro de 2023  
Foz do Iguaçu - PR

[www.rapvenacor.com.br](http://www.rapvenacor.com.br)



Franco, F.A.C.P. *Método de Dimensionamento Mecanístico-Empírico de Pavimentos Asfálticos-SISPAV*. Tese de Doutorado: Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

Franco, F.A.C.P; Motta, L.M.G. *Execução de estudos e pesquisa para elaboração de método de análise mecanístico - empírico de dimensionamento de pavimentos asfálticos – manual de utilização do programa Medina*. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Rio de Janeiro, 2020.

Huang, Y.H. *Pavement Analysis and Design*. Upper Saddle River, N.J.: Prentice Hall, 2004.

Miner, M.A (1945). *Cumulative damage in fatigue*. Trans. ASME, v.67, 1945, pp. 159-164.

Motaleb, A. *Impact of high-pressure truck tires on pavement design in Egypt*. Emirates Journal for Engineering Research, 12 (2), 65-73, 2007.

Motta, L.M.G. *Método de Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis; Critério de Confiabilidade e Ensaio de Carga Repetidas*. Rio de Janeiro: Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1991.

Sanchez, L.H. *Análise da probabilidade de falha em pavimentos flexíveis através do conceito de confiabilidade*. Tese de Doutorado: Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2021.

Suzuki, C., Kabbach Junior, F., & Azevedo, A. *Introdução do conceito de confiabilidade nos métodos de dimensionamento de pavimentos flexíveis utilizados no Brasil*. RAPv Reunião Anual de Pavimentação. Rio de Janeiro, 2004.

Suzuki, C., Nagao, E., Osório, C., & Azevedo, A. *Considerações sobre o conceito de confiabilidade na análise mecânica de estruturas de pavimentos flexíveis*. RAPv Reunião Anual de Pavimentação, (pp. 695-705). Florianópolis, 2001.

Theyse, H.L; De Beer, M., Maina, J.W., Kannemeyer, L. *Interim revision of the South African mechanistic empirical pavement design method for flexible pavements*. Proceedings of the 10th International Conference on Asphalt Pavements for Southern Africa (Capsa), South Africa, 2011.

Thongram, S e Rajbongshi, P. *Reliability based deterministic design approach in asphalt pavements*. International Journal of Innovative Research in Science Engineering and Technology. Vol 5, Issue 3, 2016. DOI: 10.15680/IJRSET.2016.0503058

Turnbull, W.J; Foster, C.R; and Ahlvin, R.G. *Design of flexible pavements considering mixed loads and traffic volumes*. Proceeding International Conference on The Structural Design of Asphalt Pavements, August 1962, pp. 821-825.

Vallejo, F.M.L. *Impactos do excesso de carga nos pavimentos rodoviários: uma abordagem probabilística na determinação do fator de veículo*. Tese de Doutorado: Escola Politécnica da USP, São Paulo, 2021.