



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

INCORPORAÇÃO DE CRITÉRIO DE CONFIABILIDADE NO CÁLCULO DO NÚMERO DE SOLICITAÇÕES AO EIXO-PADRÃO PARA APLICAÇÃO EM PROJETOS DE PAVIMENTAÇÃO

Mônica Sayoco Nishibe Moraes¹; Yuri Paladino Silva¹; Carlos Yukio Suzuki²; Caio Rubens Gonçalves Santos³ & Flaviane Melo Lopes Vallejo³

RESUMO

Busca-se a aproximação máxima da realidade, apesar das incertezas que o processo possui, com a incorporação dos critérios de confiabilidade. Neste trabalho, apresentam-se avaliações e ponderações sobre o critério de confiabilidade que está proposto na nova instrução de projeto do DER/SP, onde se introduz um parâmetro multiplicador na equação que determina o número de solicitações ao eixo padrão. Este elemento visa reduzir possíveis diferenças entre o valor resultante da frota real às hipóteses de cálculo que são admitidas no processo de estudo de tráfego para fins de aplicação em projetos de pavimentação. O parâmetro, levado a efeito de confiabilidade variando-se de 50% a 99,9%, resulta em valores de 1 a 24,58. Estes acréscimos pela presença do valor de confiabilidade incorporado são confrontados neste trabalho aos acréscimos de valores de fatores de veículos calculados pela metodologia USACE, para algumas hipóteses de carregamentos comumente utilizadas em estudos de tráfego quando não se dispõe de dados de pesagens de veículos comerciais. Estes valores podem variar entre 60% e 100% de acréscimo nos cálculos de solicitações, ou até mais, dependendo da hipótese de carregamento adotada. Apenas este acréscimo de 60% a 100% seria equivalente à aplicação de confiabilidades entre 60% e 75%, demonstrando-se que o cálculo de solicitações é bastante sensível aos seus componentes e que a variabilidade pode trazer imprecisões que resultem em subdimensionamentos dos pavimentos para o período de projeto previsto.

PALAVRAS-CHAVE: Tráfego; Solicitações; Confiabilidade; Cargas.

ABSTRACT

The search for maximum approximation to reality, despite the uncertainties that the process possesses, is the purpose in utilizing reliability criterion. Evaluations and considerations about the reliability criterion proposed in the new DER/SP project instruction, where is introduced a multiplier parameter in the equation that determines the number of requests to the standard axis are presented in this paper. This element seeks to reduce possible differences between the resultant value of the real fleet and the hypothesis calculation that are admitted in the process of traffic studies for usage in pavement design projects. The parameter, taken to the effect of reliability, varying between 50% and 99,9%, results in values between 1 and 24,58. These increases caused by the presence of the reliability value incorporated are confronted in this paper to the increase of vehicle factor values calculated by the USACE methodology, for some of the comonly utilized load hypotheses in traffic studies when there is no data available from commercial vehicle weighings. These values could vary between 60% and 75% of increase in load calculations, or even more, depending on the adopted loading hypothesis. Just the increase of 60% to 100% would be the equivalent to reliabilities between 60% and 75%, demonstrating that the load calculation is highly sensitive to its components and that variability can lead to inaccuracies resulting in pavement underdesign for the planned design period.

KEY WORDS: Traffic, Reliability, Load.

¹ Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo – DER/SP, msnmoraes@der.sp.gov.br; ysilva@sp.gov.br

² Universidade de São Paulo, e-mail: carlos.suzuki@planservi.com.br

³ Instituto Mauá de Tecnologia, e-mail: caiorubens@maua.br; flaviane.vallejo@maua.br



INCORPORAÇÃO DE CRITÉRIO DE CONFIABILIDADE NO CÁLCULO DO NÚMERO DE SOLICITAÇÕES AO EIXO-PADRÃO PARA APLICAÇÃO EM PROJETOS DE PAVIMENTAÇÃO

INTRODUÇÃO

Este trabalho apresenta análises e ponderações efetuadas por efeito da inclusão do critério de confiabilidade aos cálculos dos estudos de tráfego para fins de aplicação em projetos de pavimentação. O critério, baseado em premissas de distribuição normal, está sendo incluído aos cálculos de tráfego das Instruções de Projeto do Departamento de Estradas de Rodagem de São Paulo – DER/SP, publicados em condição de minuta e foi disponibilizado para consulta pública nos meses de dezembro de 2023 e janeiro de 2024.

Os métodos de dimensionamento de pavimentos estimam as espessuras das camadas necessárias para suportar as cargas dos veículos e as condições climáticas durante sua vida útil. Os métodos de dimensionamento de pavimentos são classificados em mecanísticos, baseados na mecânica dos materiais (TIGHE et al., 2007); empírico, baseado em ensaios de laboratório ou de campo (CARVALHO e SCHWARTZ, 2006); e mecanístico-empírico, onde a estrutura do pavimento é dimensionada por meio de uma análise mecanística, e seu desempenho é avaliado através de modelos de deterioração para ajustar o projeto da estrutura (CARVALHO e SCHWARTZ, 2006). Qualquer que seja o tipo de método utilizado, a confiabilidade está sempre envolvida como forma de se levar em conta a incerteza de variáveis como o crescimento do tráfego, cargas de tráfego, condições ambientais, danos progressão, propriedades mecânicas e desempenho estrutural dos materiais, bem como da qualidade dos processos construtivos (AASHTO 1993; SÁNCHEZ-SILVA et al., 2005; SANTOS, 2011).

A necessidade da consideração de um fator de confiabilidade se deve a busca de um parâmetro que possa representar mais fidedignamente ao valor real de solicitações a ser considerado no projeto. De maneira geral os estudos de tráfego para o DER/SP consideram contagens de veículos comerciais classificadas, realizadas nas rodovias que serão intervistas ou contagens que representem uma frota futura, no caso de vias a serem implantadas. Entretanto, os valores são levados a efeitos de fatores de veículos, geralmente calculados pelas considerações de hipóteses de carregamentos, uma vez que não dispõe de informações de cargas classificadas por eixos medidas em balanças (VALLEJO, 2021). Mesmo em concessionárias de rodovias, muitas vezes se lançam mão dessas hipóteses de carregamento em volumes anuais fornecidos pela contagem em praças de pedágio, onde a frota frequentemente é classificada por número de eixos, considerando configurações de veículos mais encontrados em cada região. Salieta-se que os fatores de veículos são definidos considerando-se as pressões de inflação que remontam os estudos realizados para a concepção dos modelos que são aplicados até os dias de hoje.

Segundo Moreno, Navarro & Zeballos (2017) em vários países da América Latina, como Chile (MOP, 2015) e Colômbia (INVIAS, 2012), o projeto de pavimentos é realizado utilizando adaptações do método de projeto empírico da AASHTO de 1993. Este método estima a confiabilidade do projeto estabelecendo um nível de confiança (R) que define o nível de variância adotado no projeto (Z_r) e a variância estimada a partir de cada um dos fatores utilizados na previsão do modelo (S_0). O nível de



confiança é estimado com base nas recomendações gerais fornecidas pelo Guia para Projeto de Estruturas de Pavimentos da AASHTO (1993) e eventualmente de acordo com a experiência e critério do projetista.

Aos volumes de veículos comerciais associados aos fatores de veículos, que são calculados pelas hipóteses de carregamento, ainda são aplicadas as taxas de crescimento anual da frota, que representam uma estimativa, já que o crescimento se vincula principalmente a geração de comércio, bem representada pelo produto interno bruto – PIB.

CARACTERÍSTICAS DO TRÁFEGO E FATORES DO CÁLCULO DO NÚMERO N

O dimensionamento de um pavimento é feito em função do número equivalente de operações de um eixo padrão para um período de projeto pré-estabelecido. O conhecimento do tráfego para determinação do número N é de vital importância para garantir a vida útil do pavimento. No dimensionamento dos projetos de pavimentação de rodovias, segundo Huang (2004), o tráfego é o elemento de maior relevância. A consideração do tráfego deve incluir tanto a magnitude da carga, como a configuração e número de repetições de carga.

Conforme Yoder e Witczak (1975), os fatores a serem avaliados nos projetos são o efeito do tipo de veículo, o volume de tráfego e o modo de operação de cada veículo. Para o efeito do tipo do veículo deve-se levar em consideração a sua configuração, o espaçamento entre rodas e eixos, a carga, tipo de pneu e a pressão de enchimento e de contato dos pneus. Na avaliação do volume do tráfego deve-se analisar os diferentes tipos de veículos, o número de passagens de cada tipo, o efeito do desvio lateral (transversal ao pavimento) e a variação longitudinal da carga. O modo de operação do veículo refere-se à velocidade de operação do veículo. A variação da velocidade pode afetar a deflexão e o estado de tensão e deformação em função dos materiais constituintes do pavimento e ainda cada veículo pode responder de forma diferente em relação a carga dinâmica devido às oscilações oriundas das irregularidades do pavimento.

A previsão, a caracterização e o comportamento do tráfego ao longo do período de serviço são um desafio para o meio técnico, uma vez que o comportamento do usuário frente ao transporte de carga está intimamente ligado às questões políticas, econômicas e ainda existe uma grande variedade de tipos de veículos e magnitude de cargas que circulam nas rodovias.

No Brasil, a determinação do volume de tráfego é realizada com base em dados de contagens realizadas em períodos pré-estabelecidos. Essa determinação tende a não representar fielmente as condições reais da carga transportada, pois adotam-se limites de carga regulamentados e o conhecimento de dados reais de pesagem são restritos devido à ausência ou a inoperância dos postos de pesagem.

O fator de equivalência de carga (FEO) ou dano relativo original definido pela AASHTO (1993), baseado na avaliação da pista experimental, diferente do procedimento do DER/SP, leva em consideração o tipo de pavimento flexível ou rígido, a capacidade estrutural representada pelo SN no caso de pavimento flexível, os tipos de eixos, as cargas aplicadas e o nível de serventia final.



A análise da interação veículo-pneu-pavimento é complexa porque os caminhões e ônibus pesados não acarretam danos iguais a cada passagem em virtude da heterogeneidade do volume e composição do fluxo de tráfego. Ocorrem ainda incertezas no tipo de tendência e nas taxas de crescimento do tráfego, bem como nas distribuições especiais dos volumes (direcional por faixa e dispersão transversal).

A deterioração analisada também é influenciada pelas características dos materiais constituintes das diversas camadas (propriedades, estados e espessuras) e pelas ações das intempéries (gradiente térmico, insolação e precipitação pluviométrica).

Os fatores de tráfego atualmente considerados nas análises das estruturas não levam em conta as inovações tecnológicas que ocorreram em termos de pressão de enchimento dos pneus, tipos de pneus (radial/diagonal) e tipo de suspensão.

Tendo em vista as variabilidades nos dados de entrada para cálculo do número N e as incertezas do modelo empírico de equivalência adotado é fundamental que se considere a introdução de um fator de ajuste de confiabilidade no parâmetro de dimensionamento, para cobrir todos os fatores citados.

CRITÉRIO DE CONFIABILIDADE INDICADO NA IP-DE-P00/001 E 002 DO DER/SP

Para o cálculo do número de solicitações ao eixo-padrão, a equação (1) apresentada incorpora um elemento de confiabilidade baseada em critérios da curva normal.

$$N = 365 \times VDM_T \times FV \times FR \times Fp \times D \times 10^{Z_C \times S_0} \quad (1)$$

Onde:

N : número equivalente de operações de eixo simples padrão de rodas duplas de 80 kN acumulado para o período de projeto;

VDM_T : volume diário médio de veículos comerciais total acumulado no período de projeto nos dois sentidos de tráfego;

FV : fator de veículo;

FR : fator climático regional;

Fp : porcentagem de veículos comerciais na faixa de projeto (%);

D : distribuição direcional (%);

Z_C : desvio normal padrão associado a um nível de confiabilidade;

S_0 : desvio padrão da previsão do tráfego

A Tabela 1 mostra os valores a serem aplicados de desvio padrão em função da classe da rodovia.



Tabela 1. Nível de Confiabilidade e Desvio Padrão por Classe de Via (DER/SP/2024)

Classe da Via	Nível Recomendado de Confiabilidade (%)	Desvio padrão - S_0	
		Pav. Flexível	Pav. Rígido
Autoestrada	95 - 97,5	0,45	0,35
Rodovia: VDM > 2000	90 - 97,5	0,45	0,35
Rodovia: VDM ≤ 2000	85 - 95	0,45	0,35
Arteriais: VDM > 500	85 - 95	0,40	0,35
Outras: VDM ≤ 500	80 - 90	0,40	0,35

A Tabela 2 permite identificar o valor de Z_c a ser aplicado nos cálculos.

Tabela 2. Valores de Z_c (DER/SP/2024)

Confiabilidade	Z_c	Confiabilidade	Z_c
50%	0,000	80%	0,842
55%	0,126	85%	1,037
60%	0,266	90%	1,282
65%	0,384	95%	1,645
70%	0,524	99%	2,326
75%	0,674	99,9%	3,090

A aplicação dos valores apresentados nas tabelas 1 e 2 resultaram nos valores de $10^{Z_c S_0}$ apresentados na Tabela 3. Os cálculos foram feitos para pavimentos asfálticos.

Tabela 3. Valores de $10^{Z_c S_0}$ (pavimentos asfálticos)

Confiabilidade	Z_c	$10^{Z_c S_0}$				
		Autoestradas	Rodovias		Arteriais	Outras
		VDM > 2000	VDM > 2000	VDM ≤ 2000	VDM > 500	VDM ≤ 500
		0,45	0,45	0,45	0,40	0,40
50%	0,000	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
55%	0,126	1,14	1,14	1,14	1,12	1,12
60%	0,266	1,32	1,32	1,32	1,28	1,28
65%	0,384	1,49	1,49	1,49	1,42	1,42
70%	0,524	1,72	1,72	1,72	1,62	1,62
75%	0,674	2,01	2,01	2,01	1,86	1,86
80%	0,842	2,39	2,39	2,39	2,17	2,17
85%	1,037	2,93	2,93	2,93	2,60	2,60
90%	1,282	3,77	3,77	3,77	3,26	3,26
95%	1,645	5,50	5,50	5,50	4,55	4,55
99%	2,326	11,14	11,14	11,14	8,52	8,52
99,90%	3,090	24,58	24,58	24,58	17,22	17,22

Para as categorias de Autoestradas e Rodovias observa-se que a confiabilidade de 50% resulta na equação original de cálculo do número de solicitações do eixo-padrão. É expectável que a medida



que se busca percentuais maiores de confiabilidade os valores de $10^{Z_{cs0}}$ aumentam. Assim, a adoção de confiabilidade de 60% acresce aproximadamente 30% ao valor de N, assim como para 75% seria de 100%. Aos projetos que necessitem de confiabilidade acima de 85% se poderia buscar valores mais acurados, principalmente no que se refere às pesagens dos veículos comerciais para que seja possível a adoção de confiabilidades mais baixas.

HIPÓTESES DE CARREGAMENTO

Os estudos de tráfego em que não se dispõe de dados de pesagens dos veículos comerciais apresentam hipóteses de carregamento para que seja possível a determinação dos fatores de veículos. As hipóteses são admitidas em função da análise do comportamento da frota e geralmente são composições percentuais entre veículos carregados e vazios. Apesar de guardar imprecisão por se admitir apenas valores fixos e não a variabilidade natural de cargas que são transportadas, busca-se assim uma forma de se representar o carregamento dos veículos comerciais circulantes.

Atualmente os veículos comerciais trafegam legalmente com limitação de cargas com tolerâncias de 12,5% nos eixos de veículos acima do PBT de 50tf, de acordo com a Lei 14.229 de 2021.

A disponibilidade de dados de pesagens em balanças permite conhecer todos os carregamentos de todos os veículos por determinado período de avaliação, resultando em um cálculo de fator de veículos mais próximo ao real naquela via. Sabe-se que dados de pesagem no Brasil ainda continuam escassos devido ao número reduzidos de postos de pesagem em operação.

A Figura 1 mostra que para a ocasião em que foram feitas as pesagens na balança de Queluz na Rodovia Presidente Dutra nos meses de outubro a dezembro de 2009, estes veículos apresentavam-se carregados.

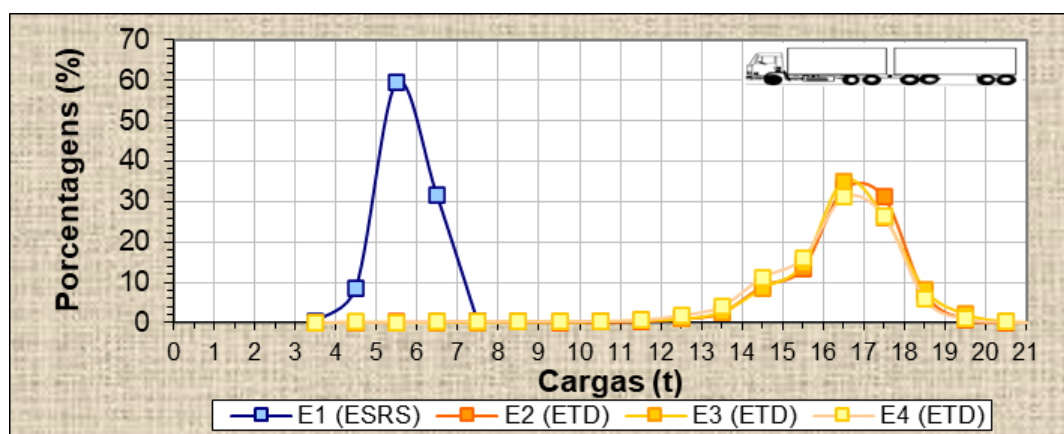


Figura 1. Percentuais de Cargas para Veículos 3D4 (MORAES/2011)

Os eixos dianteiros simples de rodas simples, ESRS, passaram pela balança com cargas de 5 a 7 toneladas para aproximadamente 90% das ocorrências. Para cada grupo dos eixos tandem duplo, ETD, foram medidas de 16 a 18 toneladas para aproximadamente 70% dos eixos. Observou-se eixos tandem com cargas acima de 20 toneladas.



Os percentuais de cargas para os veículos 2C estão indicados na Figura 2.

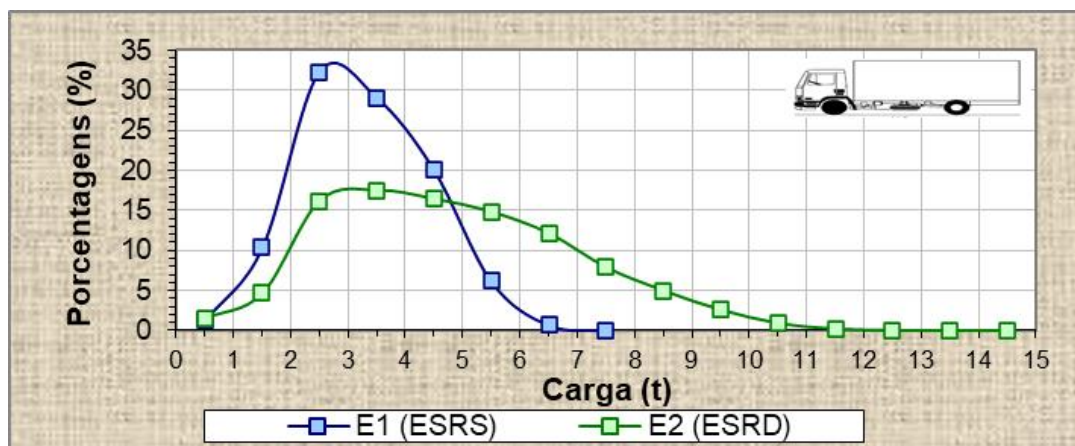


Figura 2. Percentuais de Cargas para Veículos 2C (MORAES/2011)

Para esta categoria de veículos o eixo dianteiro soma 80% de ocorrências para cargas de 2 a 5 toneladas e o eixo traseiro apresentou distribuição de 2 a 6 toneladas somando aproximadamente 60% das ocorrências. Os valores sugerem que os caminhões em sua maioria trafegaram vazios ou com pouca carga, entretanto, há registro de carregamento acima de 14 toneladas no eixo traseiro em época em que o limite máximo, incluindo a tolerância seria de 10,75 toneladas.

O estudo de Vallejo (2021) avaliou 6 anos de dados de pesagem de um posto de fiscalização da ANTT de uma rodovia federal brasileira que opera durante 24 horas do dia para elaboração de uma metodologia com abordagem probabilística para o cálculo do FV diante das mudanças da lei da balança. No estudo, foi identificado que as 8 principais classes de veículos da frota são 3C, 2S3, 2S2, 2C, 3S3, 3I3, 3D4 e 2C2 e elas representavam mais de 90% da frota.

Para os veículos tipo 3C, 2S3, 2S2, 3S3, 3I3, 3D4 e 2C2, o eixo dianteiro indicou menos de 5% na condição vazio. No segundo e terceiro eixos dos veículos tipo 2S3, 3D4, 3I3 e 3S3 menos de 10% estão na condição de vazios e nos demais eixos dos veículos 3D4 e 3I3 menos de 5%. Para o veículo 3D4 pelo menos 40% dos eixos tandem estão acima da CML depois do aumento da tolerância de 10% vigente na época, como pode ser verificado na Figura 3.

O que é evidente no estudo de Vallejo (2021) é que a sensibilidade do FV médio da frota determinado pela modelagem estatística em comparação com o método utilizado usualmente nos projetos é maior, o que poderia indicar uma maior chance de falha, em torno de 90%. A análise dos dados de pesagem evidenciou que, devido as diversas combinações de tipos e números de eixo por veículo, a hipótese simplista de considerar parte da frota totalmente vazia e o restante plenamente carregado até a CML não foi representativa da realidade da balança estudada. Em rodovias sem fiscalização de pesagem é possível que esta diferença seja maior.

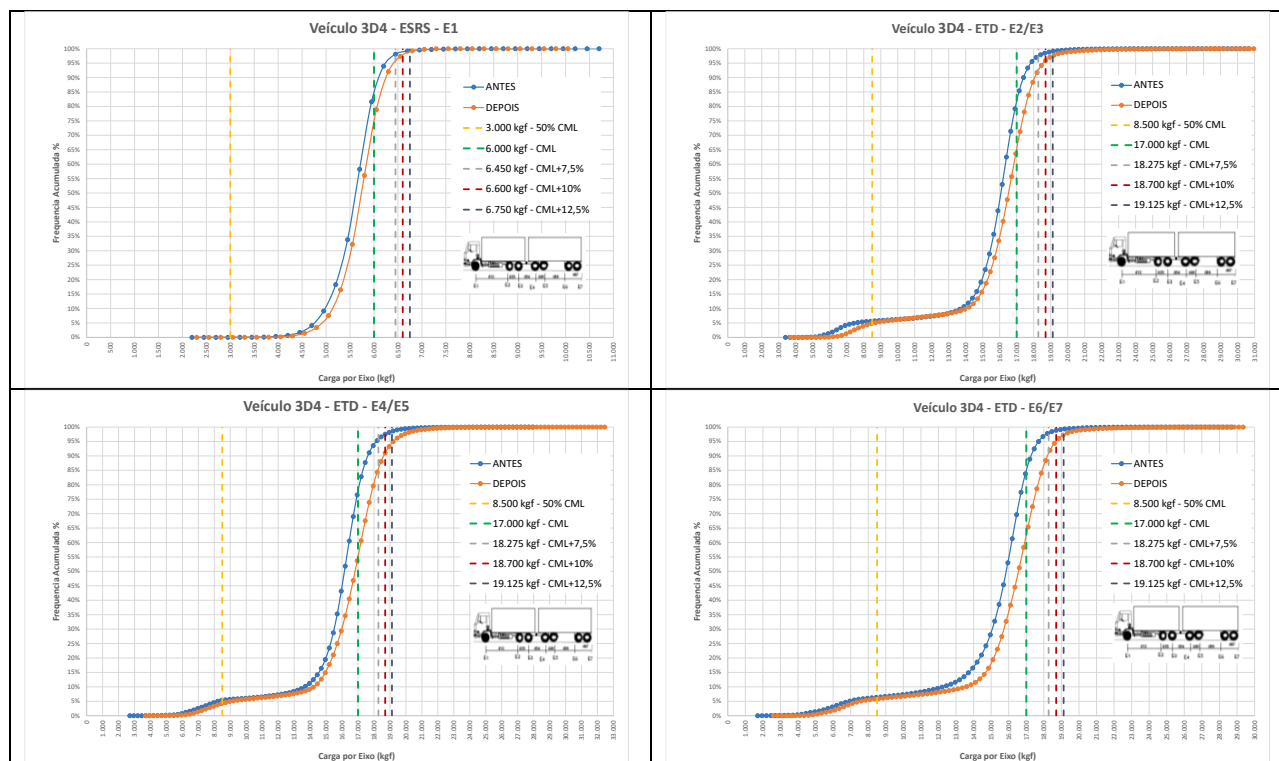


Figura 3. Frequência Acumulada para os 4 conjuntos de eixos do veículo 3D4 (VALLEJO, 2021)

Os percentuais mostram a variabilidade que se pode encontrar nos valores de cargas transportados nos diversos veículos, sendo dificilmente representados por um valor médio de referência. Mesmo assim, dada a frequente indisponibilidade de dados de pesagens dos veículos, lançam-se mão de hipóteses de carregamento, considerando cargas pré-definidas para específicas situações. A Tabela 4 mostra as hipóteses de composições de cargas mais comumente aplicadas para as determinações dos fatores de veículos nos projetos. Ressalta-se que a adoção da hipótese é efetuada pela avaliação das condições inerentes a cada projeto. Para o presente trabalho foram utilizadas todas as hipóteses apresentadas na tabela, com o propósito de observar as variações que ocorrem pela adoção de uma ou outra hipótese.

Tabela 4. Hipóteses de Carregamentos

Ordem	Descrição
1	Vazio
2	50% CML (Carga Máxima Legal) + 50% vazio
3	70% CML (Carga Máxima Legal) + 30% vazio
4	80% CML (Carga Máxima Legal) + 20% vazio
5	10% CML (Carga Máxima Legal) + Tolerância de 12,5% + 60% CML + 30% vazio
6	30% CML (Carga Máxima Legal) + Tolerância de 12,5% + 60% CML + 10% vazio
7	40% CML (Carga Máxima Legal) + Tolerância de 12,5% + 50% CML + 10% vazio
8	40% CML (Carga Máxima Legal) + Tolerância de 15% + 50% CML + 10% vazio
9	100% CML (Carga Máxima Legal)
10	100% CML (Carga Máxima Legal) + Tolerância de 12,5%
11	100% CML (Carga Máxima Legal) + Tolerância de 15%



A Tolerância de 15% não é regulamentada e está apresentada apenas para avaliar o impacto de acréscimo de mais 2,5% à tolerância em vigor. As composições (3) a (6) são as mais usualmente encontradas nos projetos, entretanto, outras variações podem ser aplicadas dependendo de cada caso.

CÁLCULO DOS FATORES DE VEÍCULOS

Os fatores de veículos são calculados através das formulações estabelecidas pelas metodologias *United States Army Corps of Engineers – USACE*, e da *American Association of State Highway and Transportation Officials – AASHTO*. Para este trabalho, serão realizados os cálculos para a metodologia USACE. São compostos pelas determinações dos fatores de equivalência de operação, onde se aplicam as cargas para cada conjunto de eixos integrante do veículo. A Tabela 5 apresenta as equações para Determinação dos Fatores de Equivalência de Operação – FEO pela metodologia USACE.

Tabela 5. Equações para Determinação dos Fatores de Equivalência de Operação

Tipos de Eixo	Faixas de Cargas (tf)	Equações (P em tf)
Eixo simples (ESRS / ESRD)	0 – 8	$FEO = 2,0782 \times 10^{-4} \times P^{4,0175}$
	≥ 8	$FEO = 1,8320 \times 10^{-6} \times P^{6,2542}$
Eixo tandem duplo (ETD)	0 – 11	$FEO = 1,5920 \times 10^{-4} \times P^{3,4720}$
	≥ 11	$FEO = 1,5280 \times 10^{-6} \times P^{5,4840}$
Eixo tandem triplo (ETT)	0 – 18	$FEO = 8,0359 \times 10^{-5} \times P^{3,3549}$
	≥ 18	$FEO = 1,3229 \times 10^{-7} \times P^{5,5789}$
P = Peso bruto total sobre o eixo		

A aplicação das cargas por conjunto de eixos às equações para determinação dos FEOs resultou nos valores de Fatores de Veículos – FV apresentados na Tabela 6.

Tabela 6. Fatores de Veículos

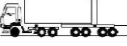
Configuração	Classe	Eixos	Carga por Grupo de Eixos					Tipo de Eixo					Fatores de Equivalência de Operação					FVi
			G1	G2	G3	G4	G5	G1	G2	G3	G4	G5	G1	G2	G3	G4	G5	
Vazio	2C	2	3.000	5.000				ESRS	ESRD				0,017	0,134				0,151
CML	2C	2	6.000	10.000				ESRS	ESRD				0,278	3,289				3,567
CML + tol 12,5%	2C	2	6.750	11.250				ESRS	ESRD				0,446	6,871				7,317
CML + tol 15%	2C	3	6.900	11.500				ESRS	ESRD				0,487	7,884				8,371
Vazio	3C	2	3.000	8.000				ESRS	ETD				0,017	0,218				0,235
CML	3C	2	6.000	17.000				ESRS	ETD				0,278	8,549				8,827
CML + tol 12,5%	3C	2	6.750	19.125				ESRS	ETD				0,446	16,309				16,76
CML + tol 15%	3C	3	6.900	19.550				ESRS	ETD				0,487	18,398				18,89
Vazio	2S3	2	3.000	5.000	12.750			ESRS	ESRD	ETT			0,017	0,134	0,411			0,562
CML	2S3	2	6.000	10.000	25.500			ESRS	ESRD	ETT			0,278	3,289	9,300			12,87
CML + tol 12,5%	2S3	2	6.750	11.250	28.688			ESRS	ESRD	ETT			0,446	6,871	17,941			25,26
CML + tol 15%	2S3	2	6.900	11.500	29.325			ESRS	ESRD	ETT			0,487	7,884	20,282			28,65
Vazio	3D4	2	3.000	8.000	8.000	8.000		ESRS	ETD	ETD	ETD		0,017	0,218	0,218	0,218		0,67
CML	3D4	2	6.000	17.000	17.000	17.000		ESRS	ETD	ETD	ETD		0,278	8,549	8,549	8,549		25,92
CML + tol 12,5%	3D4	2	6.750	19.125	19.125	19.125		ESRS	ETD	ETD	ETD		0,446	16,309	16,309	16,309		49,44
CML + tol 15%	3D4	2	6.900	19.550	19.550	19.550		ESRS	ETD	ETD	ETD		0,487	18,398	18,398	18,398		55,68
Vazio	3T6	2	3.000	4.510	8.000	8.000	8.000	ESRS	ETD	ETD	ETD	ETD	0,017	0,030	0,218	0,218	0,218	0,699
CML	3T6	2	6.000	6.100	17.000	17.000	17.000	ESRS	ETD	ETD	ETD	ETD	0,278	0,085	8,549	8,549	8,549	26,01
CML + tol 12,5%	3T6	2	6.750	5.680	19.125	19.125	19.125	ESRS	ETD	ETD	ETD	ETD	0,446	0,066	16,309	16,309	16,309	49,44
CML + tol 15%	3T6	2	6.900	7.015	19.550	19.550	19.550	ESRS	ETD	ETD	ETD	ETD	0,487	0,138	18,398	18,398	18,398	55,82
Vazio	3M6	2	3.000	8.000	12.750	12.750		ESRS	ETD	ETT	ETT		0,017	0,218	0,411	0,411		1,057
CML	3M6	2	6.000	17.000	25.500	25.500		ESRS	ETD	ETT	ETT		0,278	8,549	9,300	9,300		27,43
CML + tol 12,5%	3M6	2	6.750	19.125	28.688	28.688		ESRS	ETD	ETT	ETT		0,446	16,309	17,941	17,941		52,64
CML + tol 15%	3M6	2	6.900	19.550	29.325	29.325		ESRS	ETD	ETT	ETT		0,487	18,398	20,282	20,282		59,45

Dispondo dos valores calculados e apresentados na tabela anterior é possível obter os FVs para composições de frota a serem utilizadas como hipótese de carregamento, conforme apresentados na



Tabela 4. A Tabela 7 mostra os valores determinados para cada uma das hipóteses de carregamento, para veículos que, de maneira geral, são composições que frequentemente são encontradas nas vias brasileiras.

Tabela 7 – Fatores de Veículos

Veículo	Hipótese de Carregamento	FV	Proporção ref 70/30	Veículo	Hipótese de Carregamento	FV	Proporção ref 70/30
	Vazio	0,15	0,06		Vazio	0,67	0,04
	50% CML + 50% vazio	1,86	0,73		50% CML + 50% vazio	13,30	0,72
	70% CML + 30% vazio	2,54	1,00		70% CML + 30% vazio	18,35	1,00
	80% CML + 20% vazio	2,88	1,13		80% CML + 20% vazio	20,87	1,14
	10% CMLc/tol + 60% CML + 30% vazio	2,92	1,15		10% CMLc/tol + 60% CML + 30% vazio	20,69	1,13
	30% CMLc/tol + 60% CML + 10% vazio	4,35	1,71		30% CMLc/tol + 60% CML + 10% vazio	30,43	1,66
	40% CMLc/tol + 50% CML + 10% vazio	4,73	1,86		40% CMLc/tol + 50% CML + 10% vazio	32,78	1,79
	40% CMLc/tol15 + 50% CML + 10% vazio	5,15	2,02		40% CMLc/tol15 + 50% CML + 10% vazio	35,30	1,92
	CML	3,57	1,40		CML	25,92	1,41
	CML+Tol 12,5%	7,32	2,88		CML+Tol 12,5%	49,37	2,69
	CML+Tol 15%	8,37	3,29		CML+Tol 15%	55,68	3,03
	Vazio	0,23	0,04		Vazio	0,70	0,04
	50% CML + 50% vazio	4,53	0,73		50% CML + 50% vazio	13,35	0,73
	70% CML + 30% vazio	6,25	1,00		70% CML + 30% vazio	18,42	1,00
	80% CML + 20% vazio	7,11	1,14		80% CML + 20% vazio	20,95	1,14
	10% CMLc/tol + 60% CML + 30% vazio	7,04	1,13		10% CMLc/tol + 60% CML + 30% vazio	20,76	1,13
	30% CMLc/tol + 60% CML + 10% vazio	10,35	1,66		30% CMLc/tol + 60% CML + 10% vazio	30,51	1,66
	40% CMLc/tol + 50% CML + 10% vazio	11,14	1,78		40% CMLc/tol + 50% CML + 10% vazio	32,85	1,78
	40% CMLc/tol15 + 50% CML + 10% vazio	11,99	1,92		40% CMLc/tol15 + 50% CML + 10% vazio	35,40	1,92
	CML	8,83	1,41		CML	26,01	1,41
	CML+Tol 12,5%	16,76	2,68		CML+Tol 12,5%	49,44	2,68
	CML+Tol 15%	18,89	3,02		CML+Tol 15%	55,82	3,03
	Vazio	0,56	0,06		Vazio	1,06	0,05
	50% CML + 50% vazio	6,71	0,73		50% CML + 50% vazio	14,24	0,73
	70% CML + 30% vazio	9,18	1,00		70% CML + 30% vazio	19,52	1,00
	80% CML + 20% vazio	10,41	1,13		80% CML + 20% vazio	22,15	1,14
	10% CMLc/tol + 60% CML + 30% vazio	10,41	1,14		10% CMLc/tol + 60% CML + 30% vazio	22,04	1,13
	30% CMLc/tol + 60% CML + 10% vazio	15,35	1,67		30% CMLc/tol + 60% CML + 10% vazio	32,35	1,66
	40% CMLc/tol + 50% CML + 10% vazio	16,59	1,81		40% CMLc/tol + 50% CML + 10% vazio	34,87	1,79
	40% CMLc/tol15 + 50% CML + 10% vazio	17,95	1,96		40% CMLc/tol15 + 50% CML + 10% vazio	37,60	1,93
	CML	12,87	1,40		CML	27,43	1,41
	CML+Tol 12,5%	25,26	2,75		CML+Tol 12,5%	52,64	2,70
	CML+Tol 15%	28,65	3,12		CML+Tol 15%	59,45	3,05

A coluna Proporção ref 70/30 apresenta valores de proporções do fator de veículo da hipótese em relação ao fator de veículos para a hipótese de 70% dos veículos carregados na CML e 30% de veículos vazios, que é a hipótese mais modesta daquelas que são mais aplicadas em projetos. Nota-se que a hipótese de 30% de veículos na CML acrescida de 12,5% da tolerância, 60% de veículos carregados na CML e 10% vazios, que é aplicada em projetos principalmente onde encontram-se tráfego de caminhões que servem madeireiras e usinas onde se servem de produção canavieira, o acréscimo de FV é no entorno de 66 a 71% para os veículos ora apresentados.

A hipótese de carregamento que simula a composição pesada e tolerância de 15%, criada neste trabalho apenas para avaliação de efeitos, indica acréscimos acima de 90%, ou seja, praticamente dobram os valores dos fatores de veículos.

A variação apresentada mostra que os cálculos são muito influenciados pela hipótese de carregamento adotada. A Figura 4 mostra os valores de FV calculados para cada configuração.

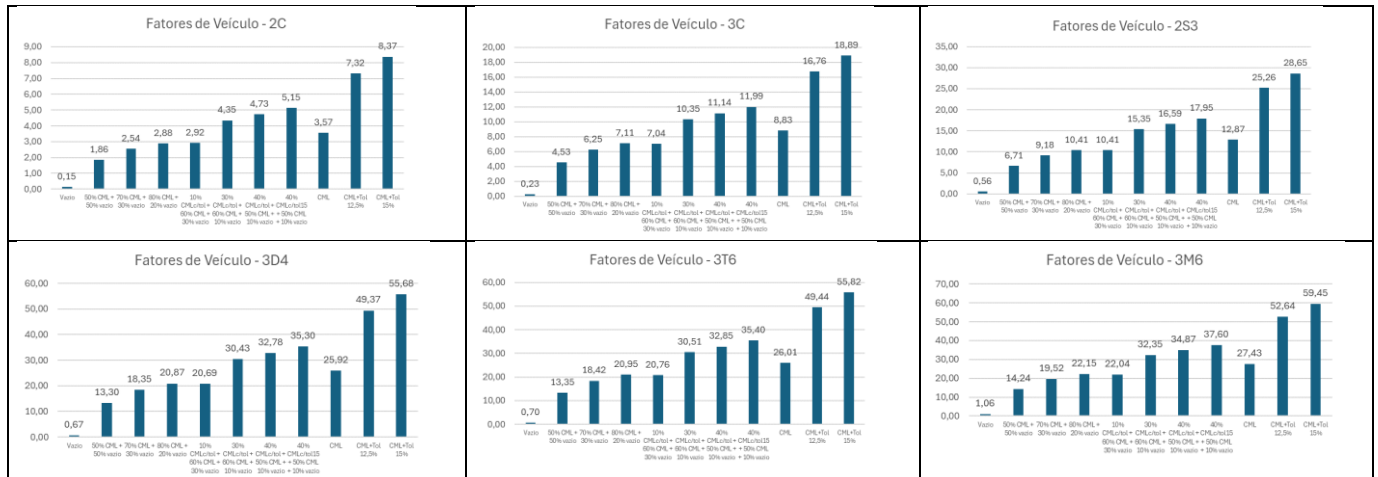


Figura 4. Variações de Fatores de Veículos

COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES

O critério de confiabilidade que está proposto na nova instrução de projeto do DER/SP (2024) introduz o multiplicador na equação que determina o número de solicitações ao eixo padrão, $10^{Z_{CSO}}$. Este elemento visa reduzir possíveis diferenças entre o valor resultante da frota real às hipóteses de cálculo que são admitidas no processo de estudo de tráfego para fins de aplicação em projetos de pavimentação. O parâmetro, levado a efeito de confiabilidade variando de 50% a 99,9%, resulta em valores de 1 a 24,58.

Os cálculos realizados neste trabalho, com o intuito de comparação entre valores, mostram que para fatores de veículos calculados pela metodologia USACE e para as hipóteses de carregamentos descritos, o valor do fator de veículo a ser aplicado pode variar entre 60% e 100% de acréscimo nos cálculos de solicitações. Este acréscimo seria equivalente a aplicação de confiabilidades entre 60% e 75%. As condições de contorno deste trabalho consideram os impactos nos cálculos que ocorrem pela variação das hipóteses de carregamento que podem ser admitidas nos projetos, quando não se dispõe dos dados de pesagens dos veículos da frota circulante na via considerada para projeto. Aproximações com valores de fatores de veículos pré-definidos que são importados de outras rodovias, ainda que nas proximidades, podem carregar graus de incerteza significativos.

As equações de equivalência tanto pela AASHTO, quanto pela USACE foram definidas para as condições daquela época. Considerações quanto à pressão de inflação dos pneus devem ser ponderadas uma vez que atualmente os pneus dos veículos não são calibrados com aquelas pressões, modificando as áreas de contato das cargas. Questões referentes ao comportamento de circulação da frota também podem interferir nas considerações de danos a serem computados, como canalização de passagem dos pneus e os tempos de aplicação das cargas e tempo de repetição das solicitações, que podem solicitar o pavimento em um momento em que o pavimento ainda não se recuperou da solicitação anterior.

Desta forma, a adoção dos valores de confiabilidade deve ser tomada de maneira cautelosa pelo projetista que deve considerar todas as incertezas que cercam especificamente o projeto que está sendo elaborado, porque condições distintas podem ser encontradas em projetos diferentes até de uma mesma rodovia. Os valores de desvio padrão que são admitidos *a priori* podem ser modificados para casos específicos futuramente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). Guide for design of pavement structures. Washington, D.C, 1993.



Carvalho, R. and Schwartz, C. Comparisons of flexible pavement design AASHTO empirical versus NCHRP Project 1-37A mechanistic empirical. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1947, 167 – 174, 2006.

Departamento de Estradas e Rodagem de São Paulo (DER/SP) IP-DE-P00/001. Projeto de Pavimentação. São Paulo, 2024.

Departamento Nacional de Infraestrutura Terrestre (DNIT). Manual de estudos de tráfego. Brasília, Brasil, 2006.

HUANG, Y. H. Pavements analysis and design. 2. ed. Upper Saddle River: Pearson Prentice Hall, 2004. ISBN 0-13-142473-4.

Instituto Nacional de Vías (INVIAS). Manual de diseño de pavimentos. Colombia: Ministerio de Transporte, 2012.

Ministerio de Obras Públicas (MOP). Instrucciones y criterios de diseño. Volumen 3. Manual de Carreteras. Santiago: Ministerio de Obras Públicas de Chile, 2015.

Moraes, M. S. N. Caracterização de frota de veículos comerciais circulante em rodovia de tráfego elevado como parâmetro de análise de pavimentos. 2011. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, Florianópolis/SC, 2011.

Moreno, M. A. R., Navarro, T. E., Zeballos, G.T. Including reliability in the AASHTO-93 flexible pavement design method integrating pavement deterioration models. *Revista de la Construcción*, 16(2), 284-294, 2017.

Sánchez-Silva, M., Arroyo, O., Junca, M., Caro, S. and Caicedo, B. Reliability based design optimization of asphalt pavements. *International Journal of Pavement Engineering*, 6(4), 281 – 294, 2005.

Santos, C.R.G. Dimensionamento e análise do ciclo de vida de pavimentos rodoviários: uma abordagem probabilística. 2011. Tese (Doutor em Engenharia) – Departamento de Engenharia de Transportes da Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

Tighe, S., Huen, K. and Haas, R. Environmental and traffic deterioration with mechanistic empirical pavement design model. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1989(2), 336-343, 2007.

Vallejo, F.M.L. Impactos do excesso de carga nos pavimentos rodoviários: uma abordagem probabilística na determinação do fator de veículo. 2021. Tese (Doutor em Engenharia) – Departamento de Engenharia de Transportes da Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2021.

YODER, E.; WITCZAK, M. Principles of pavement design. New York: John Wiley & Sons, 1975. ISBN 0-471-97780-2.