



ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE
SÃO PAULO

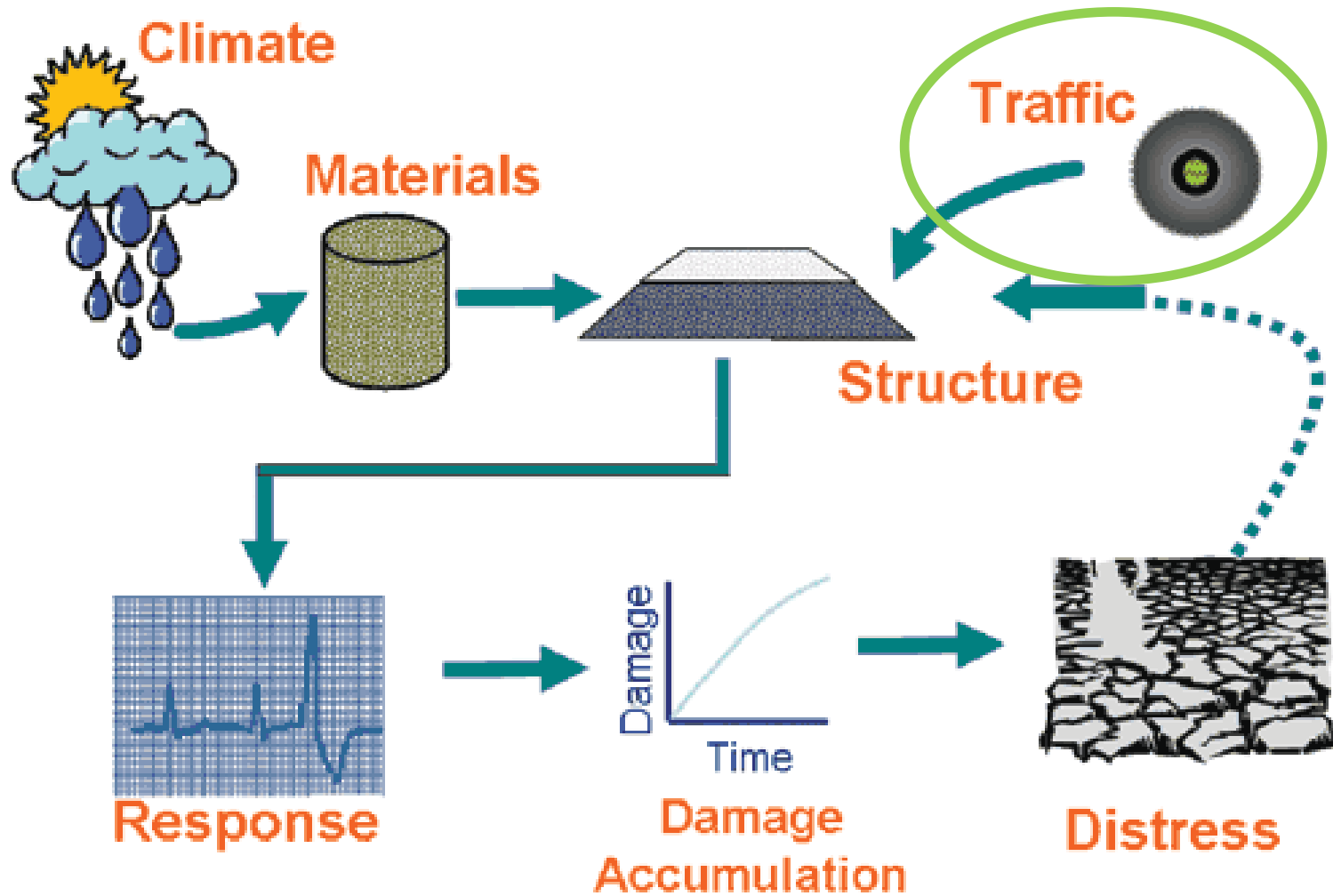
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE
TRANSPORTES



ESTUDOS DE TRÁFEGO: EQUIVALÊNCIA ENTRE CARGAS E O NÚMERO N

Profa. Dra. Liedi Bernucci
Profa. Dra. Kamilla Vasconcelos

- Gestão de Pavimentos: Tráfego***



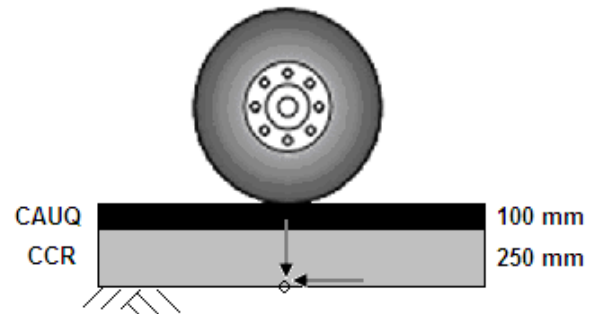


TRÁFEGO RODOVIÁRIO





TRÁFEGO RODOVIÁRIO



Tipo de roda	Carga e pressão	Deformação total (10^{-2} mm)	Tensão de tração na base (MPa)	Tensão de compressão no subleito (MPa)
Caminhão	30 kN e 0,65 MPa	9,7	0,41	-0,01
Aeronave	250 kN e 1,3 MPa	66,6	2,87	-0,07
Automóvel	5 kN e 0,2 MPa	1,9	0,07	-0,002

Apud: José Tadeu Balbo



TRÁFEGO RODOVIÁRIO

Tráfego é um dos mais **importantes fatores** no projeto de pavimentos. A avaliação do seu efeito sobre os pavimentos é **tarefa complexa** e constitui uma das maiores dificuldades para tornar **racional o projeto** deste tipo de estrutura.

Fatores que concorrem para a complexidade do problema incluem:

- **Heterogeneidade das configurações dos eixos** dos veículos que compõem a frota;
- **Variações** nos valores das **cargas** de eixo e **pressões** de inflação dos pneumáticos, bem como variações destas ao longo do período de projeto;
- Variações na **velocidade** das cargas de eixo, condicionadas pela geometria da via e volume de tráfego;
- Efeito do **meio ambiente** (temperatura e umidade);
- Comportamento dos **materiais** das camadas do pavimento e do subleito.



DNIT

Publicação IPR - 723

TRÁFEGO RODOVIÁRIO

MANUAL DE ESTUDOS DE TRÁFEGO

2006

MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES
DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES
DIRETORIA DE PLANEJAMENTO E PESQUISA
COORDENAÇÃO-GERAL DE ESTUDOS E PESQUISA
INSTITUTO DE PESQUISAS RODOVIÁRIAS



Eixo simples de roda simples (ESRS)

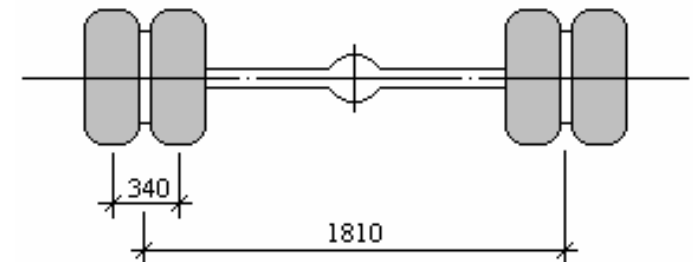
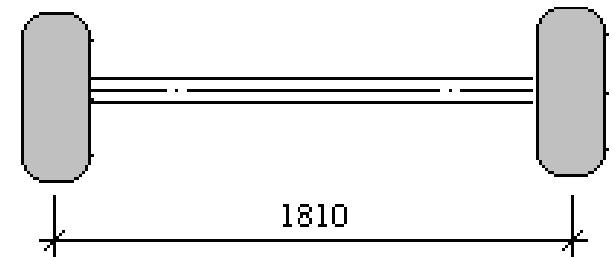
Eixo simples de roda dupla (ESRD)

Eixo tandem duplo (ETD)

Eixo tandem triplo (ETT)



EIXOS SIMPLES



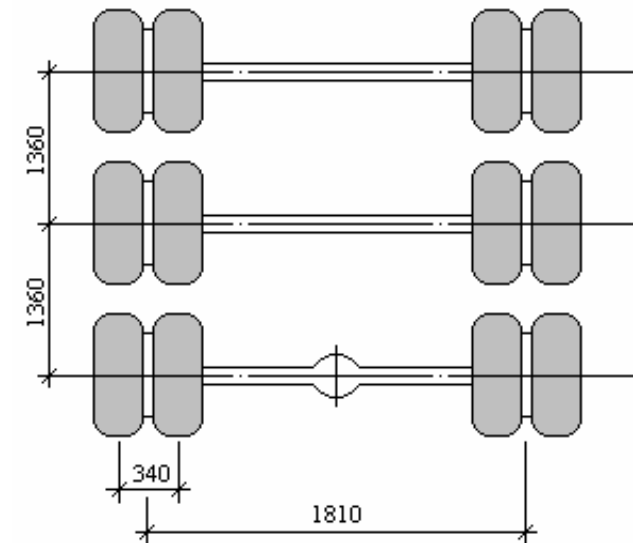
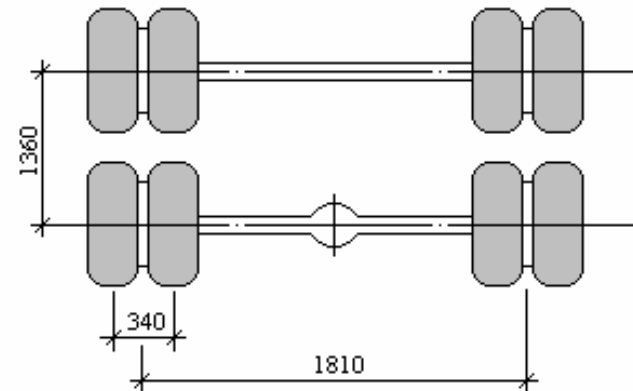
Apud: José Tadeu Balbo



EIXOS TANDEM



Apud: José Tadeu Balbo





TRÁFEGO RODOVIÁRIO

Pesos máximos permitidos (artigo 82)	Por eixos (t)	PBT/PBTC (t)
 	(6 + 10)	16
	(6 + 17)	23
 	(6 + 13,5)	19,5
	(6 + 25,50)	31,5 (*)
 	(6 + 10 + 10)	26
	(6 + 10 + 17)	33
	(6 + 10 + 20)	36
	(6 + 17 + 17)	40
	(6 + 17 + 20)	43
	(6 + 10 + 25,5)	41,5
	(6 + 10 + 30)	46 (**)
	(6 + 17 + 25,5)	48,5 (**)
	(6 + 13,5 + 25,5)	45 (***)
	(6 + 17 + 30)	53 (**)
	(6 + 10 + 10 + 10)	36
	(6 + 10 + 10 + 17)	43
	(6 + 17 + 10 + 10)	43
	(6 + 17 + 10 + 17)	50 (**)

Obs.: As cargas por eixo não podem exceder as especificações dos fabricantes (Artigo 79).
Os PBTC, devem ser sempre inferiores ou iguais à capacidade máxima de tração constante no certificado do veículo (Artigo 79).
Haverá uma tolerância de 5% por eixo, conforme lei nº 7.408 de 25/12/85.

(*) Só para alguns veículos adaptados anteriormente ao memorando DNER 150/78.

(**) Limitados ao máximo PBTC de 45 t conforme Artigo 82.

(***) Conforme Artigo 82, item VI

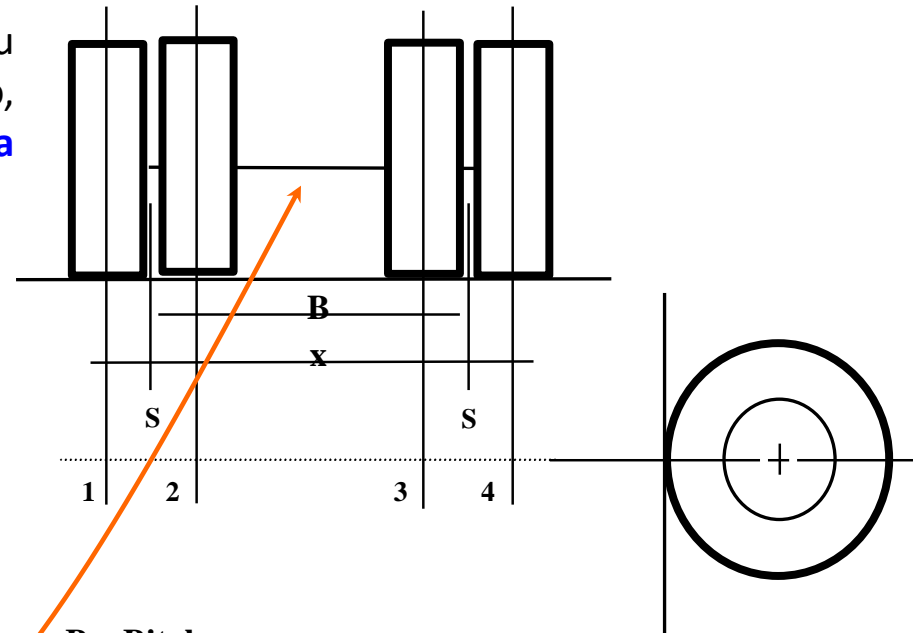


EIXO PADRÃO

EIXO PADRÃO - Número de Repetições

O pavimento é muitas vezes dimensionado pelo **número de repetições** de um eixo padrão (**8,2 tf = 80 kN**).

Quando a carga não é igual à carga padrão ou consiste num eixo em tandem duplo ou triplo, esta é **convertida** por um **Fator de Equivalência de Carga**.



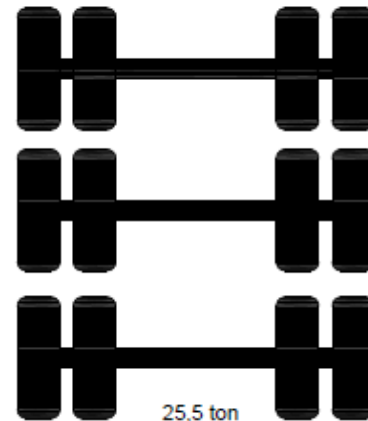
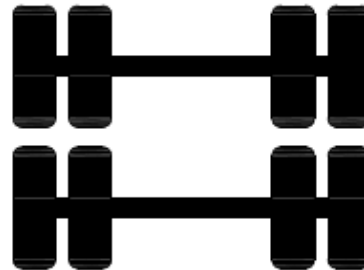
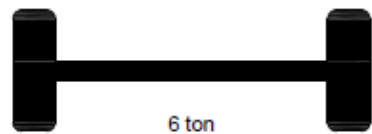
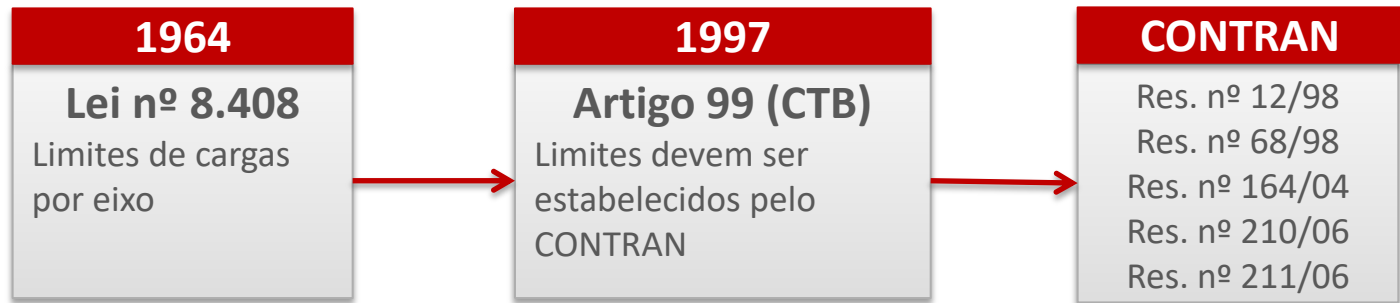
B – Bitola
S – Distância entre os centros das áreas de contato das componentes de uma roda dupla

Eixo padrão simples de roda dupla (ESRD)



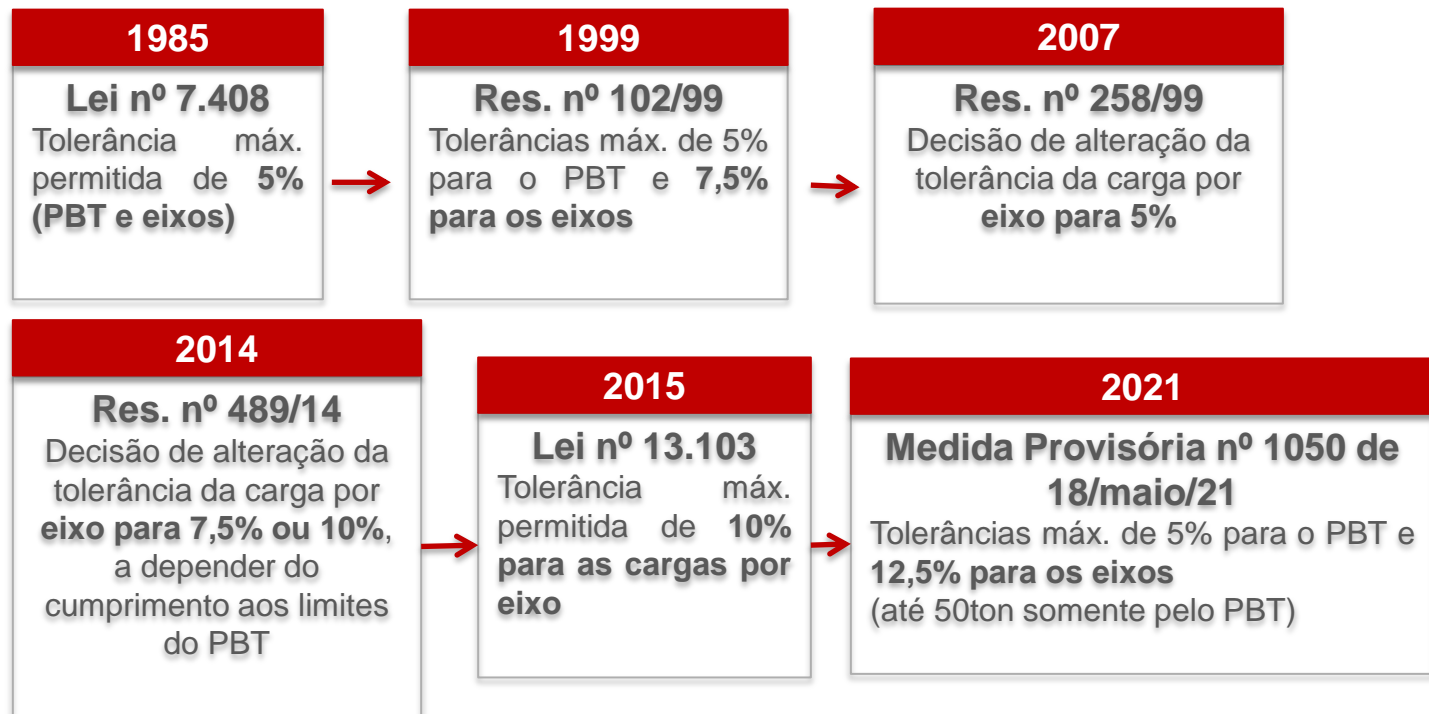
LEI DA BALANÇA

Estabelecimento de limites de peso e dimensões





Estabelecimento de tolerância máxima





Medida Provisória de
maio de 2021

Governo Federal

MEDIDA PROVISÓRIA Nº 1.050, DE 18/05/2021

Altera a Lei nº 7.408, de 25 de novembro de 1985, e a Lei nº 9.503, de 23 de setembro de 1997 - Código de Trânsito Brasileiro.

Artigo 1º.

- I - **5%** sobre os limites de **peso bruto total**;
 - II **12,5%** sobre os limites de **peso bruto transmitido por eixo** de veículos à superfície das vias públicas.
 - § 1º Para fins de fiscalização de veículos com **peso bruto total igual ou inferior a 50 toneladas**, admite-se tolerância **superior** à prevista no inciso II do caput (12,5% no eixo), desde que respeitados a tolerância prevista no inciso I do caput (5% sobre os limites de peso bruto total) e o limite técnico por eixo definido pelo fabricante.
- Art. 3º Esta Lei vigorará até 30 de abril de 2022



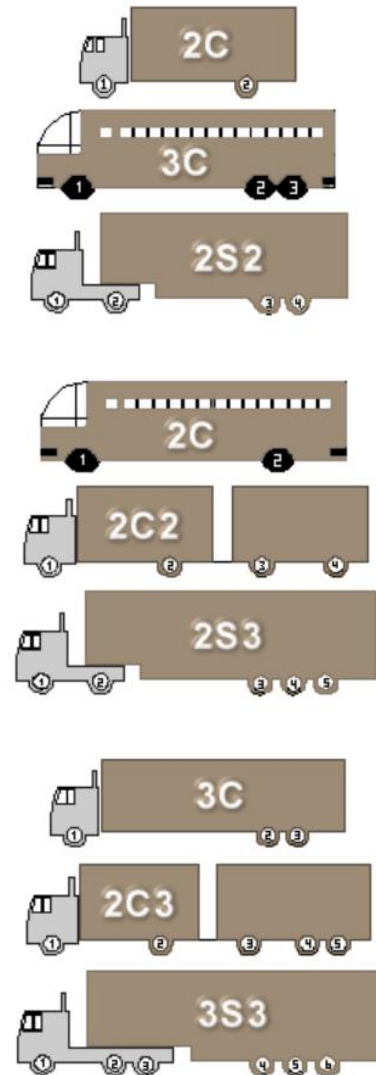
FATOR DE EQUIVALÊNCIA DE CARGA

FEC define o “**dano**” causado pela passagem sobre um pavimento de um **eixo em questão** quando comparado ao “**dano**” causado pela passagem do **eixo padrão**.

FEC = 9 está associado a um eixo cuja passagem representa a passagem de 9 eixos padrão.

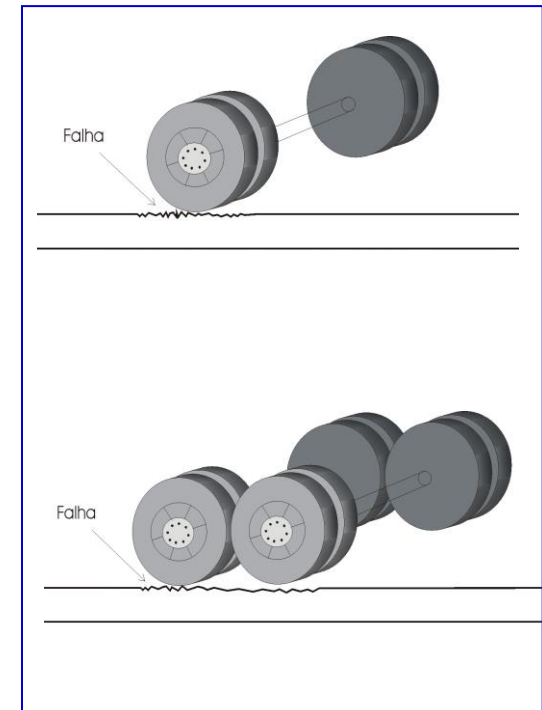
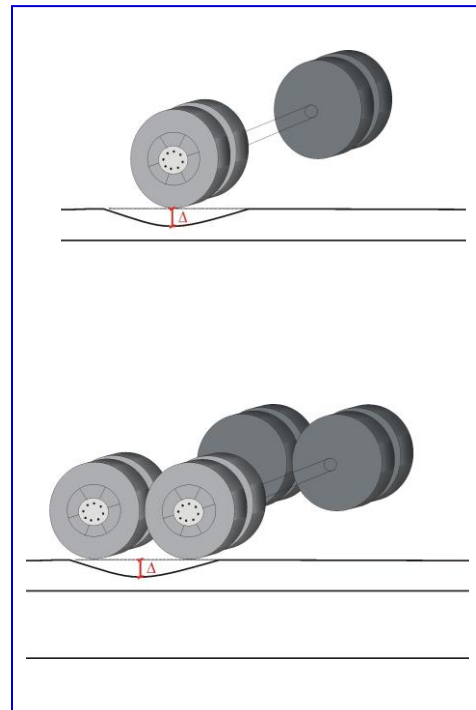
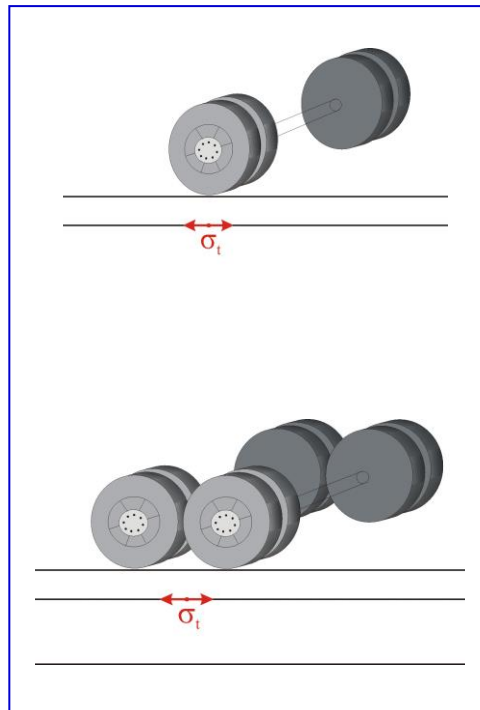
Portanto,

- eixos simples com **carga > 8,2 tf** terão **FEC > 1**, e
- eixos simples com **carga < 8,2 tf** terão **FEC < 1**





FATOR DE EQUIVALÊNCIA DE CARGA



FEC tradicionais (USACE) Turnbull et al. (1962):

Afundamento plástico no subleito, a 70 cm de profundidade, tendo como limite o padrão de 1 polegada.



FATOR DE EQUIVALÊNCIA DE CARGA

- O dimensionamento da estrutura de pavimento é sensível à ordem de grandeza do parâmetro que simula a ação do tráfego, por sua vez função dos **Fatores de Equivalência de Cargas (FEC)** usados para **converter** os **números de solicitações das diversas cargas de eixo** em **números equivalentes de solicitações de eixo padrão**.
- **FEC's do método do DNER** são os mesmos propostos pelo USACE (Corpo de Engenheiros Americanos).

Tipo de Eixo	Faixas de Cargas (tf)	Equações (P em tf)
Dianteiro simples e traseiro simples	0 – 8	$FEC = 2,0782 \times 10^{-4} \times P^{4,0175}$
	≥ 8	$FEC = 1,8320 \times 10^{-6} \times P^{6,2542}$
Tandem duplo	0 – 11	$FEC = 1,5920 \times 10^{-4} \times P^{3,4720}$
	≥ 11	$FEC = 1,5280 \times 10^{-6} \times P^{5,4840}$
Tandem triplo	0 – 18	$FEC = 8,0359 \times 10^{-5} \times P^{3,3549}$
	≥ 18	$FEC = 1,3229 \times 10^{-7} \times P^{5,5789}$

P = peso bruto total sobre o eixo



FATOR DE EQUIVALÊNCIA DE CARGA

Fatores do DNER PRO 159/85 (AASHTO)

Tipo de Eixo	Equações (para P em kN)	Equações (para P em tf)
Simplex de Rodagem Simplex	$F_{(SS)} = \left(\frac{P}{76,20} \right)^{4,32}$	$F_{(SS)} = \left(\frac{P}{7,77} \right)^{4,32}$
Simplex de Rodagem Dupla	$F_{(SD)} = \left(\frac{P}{80,12} \right)^{4,32}$	$F_{(SD)} = \left(\frac{P}{8,17} \right)^{4,32}$
Tandem Duplo (Rodagem Dupla)	$F_{(TD)} = \left(\frac{P}{147,88} \right)^{4,14}$	$F_{(TD)} = \left(\frac{P}{15,08} \right)^{4,14}$
Tandem Triplo (Rodagem Dupla)	$F_{(TT)} = \left(\frac{P}{225,06} \right)^{4,22}$	$F_{(TT)} = \left(\frac{P}{22,95} \right)^{4,22}$

Onde:

P = Peso bruto total sobre o eixo.



NÚMERO N

O projeto de pavimentos é baseado no número total de passageiros do eixo padrão durante o período de projeto. Para traduzir todos os eixos em termos do eixo padrão é necessária a utilização de **Fatores de Equivalência de Carga (FEC)**.

Os **FEC's** mais utilizados são:

USACE (*United States of America Corps of Engineers*)

AASHTO (*American Assoc. of State and Highway Transportation Officials*).

O **FEC** define o “**dano**” causado pela passagem sobre um pavimento de um eixo em questão quando comparado ao “dano” causado pela passagem do eixo simples de roda dupla de **8,2 tf (eixo padrão)**.



FATOR DE CARGA

Enquanto **FEC** trata da correspondência entre **um** único **conjunto de eixo** (simples, duplo ou triplo) e o eixo padrão simples de roda dupla, **FC** é relativo a **todos os conjuntos de eixo** que operam na via

FC é um FEC ponderado pelos diversos conjuntos de eixo da frota de veículos (Conceito associado à frota)

Eixos Simples (tf)	Frequência na amostra	Porcentagem (P_j)	FEC_j^*	Equivalência de Operações ($P_j \times FEC_j$)
t_1	n_1	P_{j1}	FEC_1	$P_{j1} \times FEC_1$
t_2	n_2	P_{j2}	FEC_2	$P_{j2} \times FEC_2$
...
Eixos Tandem(tf)				
t'_1	n'_1	P'_{j1}	FEC'_1	$P'_{j1} \times FEC'_1$
t'_2	n'_2	P'_{j2}	FEC'_2	$P'_{j2} \times FEC'_2$
...
		100		FC



FATOR DE EIXO

- **Conceito associado à frota**, e não a cada categoria de veículo

$$FE = n/V_t$$

n = número total de **eixos** da frota

V_t = volume total do tráfego na amostragem

$$FE = (p_2/100) \times 2 + (p_3/100) \times 3 + \dots + (p_n/100) \times n$$

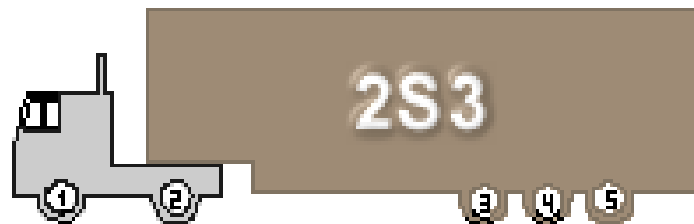
p_2 = % veículos de 2 eixos

p_3 = % veículos de 3 eixos

p_n = % veículos de n eixos

Semi-reboque 2S3

5 eixos ou 3 eixos ?





EQUIVALÊNCIA DE OPERAÇÕES

Trabalho original (Turnbull et al., 1962)

- Não é definido especificamente um FC ou um FE
- **Total de Equivalência de Operações** = $FE \times FC \times VMDa$
desde que FE seja calculado através do **conjunto de eixos**

Eixos Simples (tf)	FEC _j *	Operações por dia	Equivalência de Operações (O _j × FEC _j)
t ₁	FEC ₁	O ₁	O ₁ × FEC ₁
t ₂	FEC ₂	O ₂	O ₂ × FEC ₂
...	...		
Eixos Tandem (tf)			
t' ₁	FEC' ₁	O' ₁	O' ₁ × FEC' ₁
t' ₂	FEC' ₂	O' ₂	O' ₂ × FEC' ₂
...
Total de Equivalência de Operações			$\Sigma (O_i \times FEC_i)$

* Chamado FATOR DE EQUIVALÊNCIA DE OPERAÇÕES no trabalho original



FATOR DE VEÍCULO

a) $FV = FE \times FC$ (conceito de **frota**)

b) $FV = \sum (P_i \times FV_i) / 100$ (conceito de **categoria de veículo**) Queiróz (1982) – pesquisa ICR – FEC da AASHTO

- Métodos iguais desde que FE seja calculado com base nos "**CONJUNTOS DE EIXO**"
- Encontra-se por vezes o uso do conceito de "eixos individuais" para cálculo de **FE**
- As duas expressões de FV podem levar a valores diferentes (impacto no número N)



FATOR DE VEÍCULO

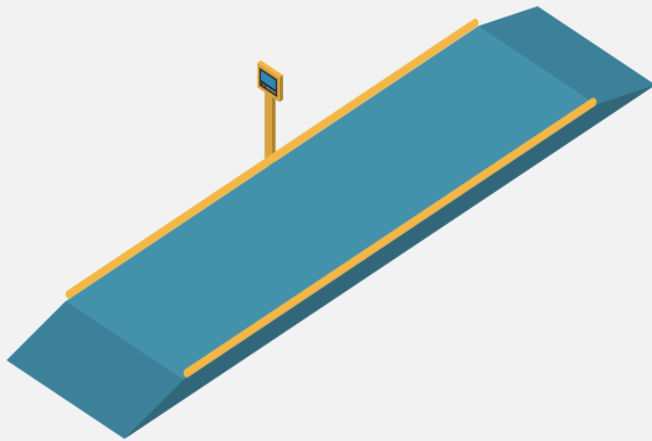
É importante ainda observar que o **FV** será bastante diferente caso se considere somente a **frota de veículos comerciais** ou se considere o **tráfego total**, incluindo os veículos de menor peso e conseqüentemente **FEC's desprezíveis**. **No caso de considerar-se o tráfego total, o FV será consideravelmente menor.**

Vale alertar para que se mantenha coerência na determinação do **número N**, ou seja, no caso de se calcular o **FV a partir do tráfego total deve-se usar o VMD total.**

No caso de calcular-se o **FV a partir apenas dos veículos comerciais**, deve-se considerar o **VMD relativo aos veículos comerciais.**

QUALQUER UM DOS DOIS PROCEDIMENTOS LEVARÁ AO MESMO NÚMERO N.

Dados de Pesagem

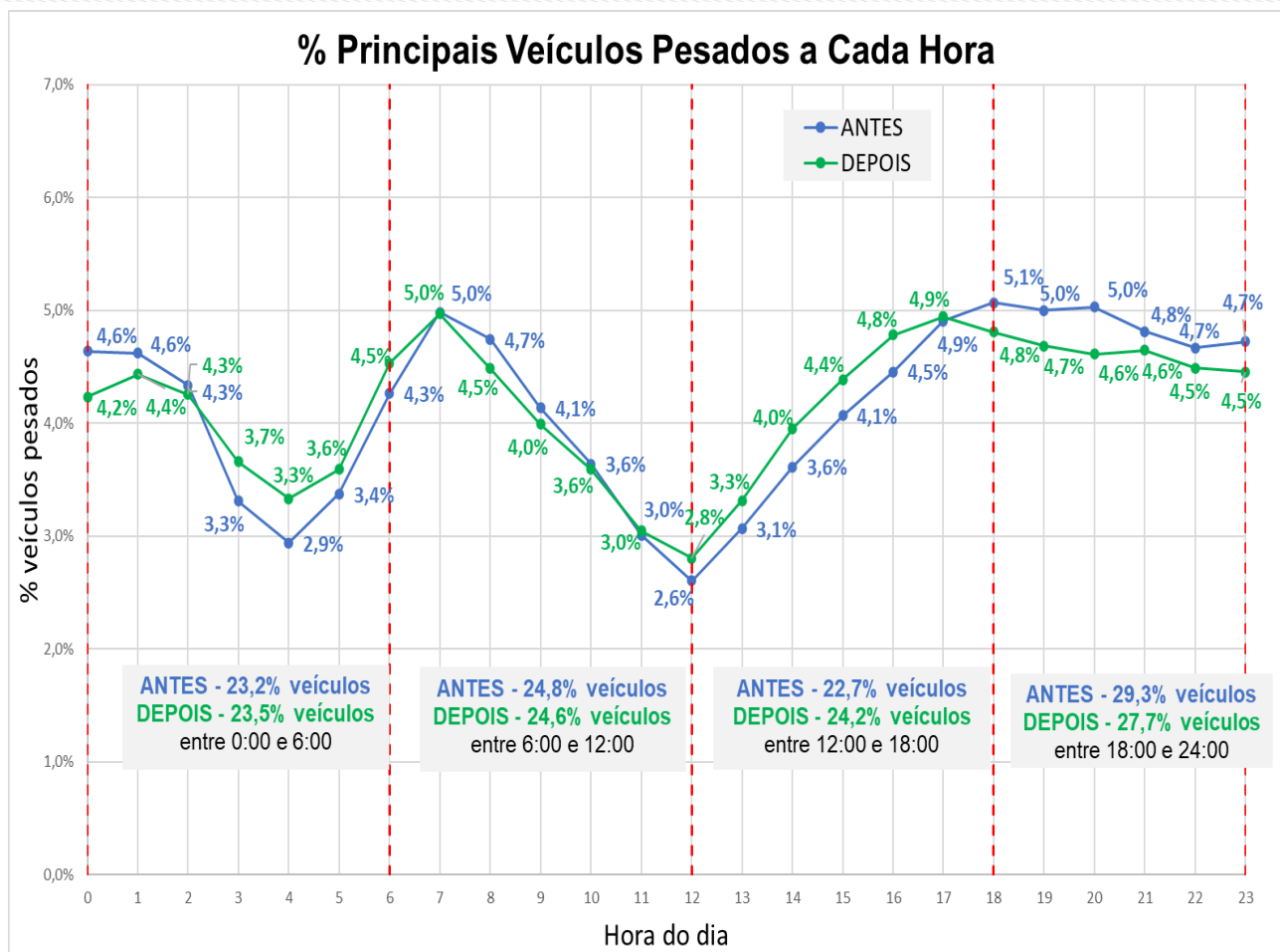


Balança Seletiva:

- Dados de 36 meses antes da alteração da lei (07/2011 a 06/2014);
- Dados de 36 meses depois da alteração da lei (07/2014 a 06/2017);
- Período total: **6 anos**

- Dados da balança seletiva, esta garante que todos os veículos pesados circulantes tiveram seus eixos aferidos;
- Amostra representativa estatisticamente e que garante a análise da sazonalidade anual.

Quantidade de Veículos por Cada Hora do Dia e Dia da Semana



Quinta-feira
18:00 e 24:00

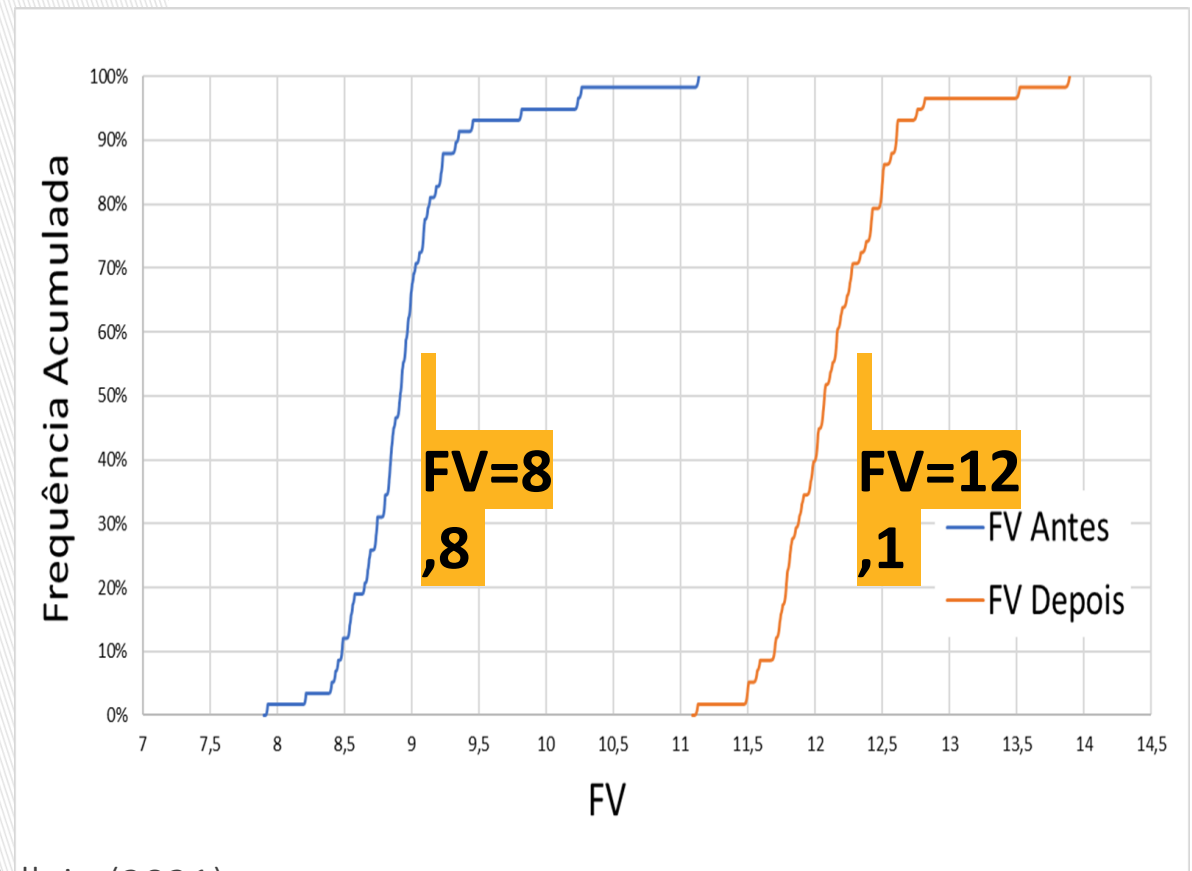
Dia da Semana Antes Depois

Segunda-feira	13,5%	14,2%
Terça-feira	16,2%	16,3%
Quarta-feira	17,1%	17,1%
Quinta-feira	17,9%	17,3%
Sexta-feira	15,1%	14,2%
Sábado	9,5%	9,6%
Domingo	10,7%	11,2%

ETAPA 5

Metodologia de Determinação do FV pela Abordagem Probabilística

- Etapa 5 - Simulação Monte Carlo para Cálculo Probabilístico do FV
- Simuladas 10.000 variações dos parâmetros do modelo de cada veículo.



Conclusão



Tolerância 7,5% na CML
até 06/2014

Tolerância 10% na CML
a partir 07/2014



Acréscimo de
2,5%
na faixa de tolerância
de carga por eixo



Ocasionou, para a rodovia
analisada no estudo de caso,
um aumento médio no dano
ao pavimento,
correspondente no

FV em 35%.



ESTUDO DE CASO

VMDa por categoria de veículo (TOTAL = 475):



2C = 140 (2 eixos individuais / 2 conjunto de eixos)



3C = 196 (3 eixos individuais / 2 conjunto de eixos)



2S2 = 9 (4 eixos individuais / 3 conjunto de eixos)



2S3 = 115 (5 eixos individuais / 3 conjunto de eixos)



3S3 = 15 (6 eixos individuais / 3 conjunto de eixos)

Categoria	Pesos por Conjunto de Eixo			FEC _j		
	CE1	CE2	CE3	CE1	CE2	CE3
2C	6 tf	10 tf	-	0,278	3,289	-
3C	6 tf	17 tf	-	0,278	8,549	-
2S2	6 tf	10 tf	17 tf	0,278	3,289	8,549
2S3	6 tf	10 tf	25,5 tf	0,278	3,289	9,300
3S3	6 tf	17 tf	25,5 tf	0,278	8,549	9,300



FATOR DE VEÍCULO

FATOR DE EIXO

- 1.569 eixos individuais:

$$FE = n/VMD = 1.569/475 = 3,3$$

- 1.089 conjuntos de eixo:

$$FE = n/VMD = 1.089/475 = 2,3$$

8,6

Categoria	VMDa	No. Eixos Individuais	No. Eixos Individuais × VMDa	No. Conj. Eixos	No. Conj. Eixos × VMDa
2C	140	2	280	2	280
3C	196	3	588	2	392
2S2	9	4	36	3	27
2S3	115	5	575	3	345
3S3	15	6	90	3	45
	475		1.569		1.089

FATOR DE CARGA

$$FC = \sum (n_i \times FEC_j) / \text{total de eixos individuais} = 4.090/1.569 = 2,6$$

$$FC = \sum (n_i \times FEC_j) / \text{total conjuntos de eixos} = 4.090/1.089 = 3,8$$



ESTUDO DE CASO

FV_i para cada categoria de veículo é a soma dos FEC_j para cada conjunto de eixo daquela categoria

Categoria	CE1	CE2	CE3	FV_i
2C	0,278	3,289	-	3,567
3C	0,278	8,549	-	8,827
2S2	0,278	3,289	8,549	12,116
2S3	0,278	3,289	9,300	12,867
3S3	0,278	8,549	9,300	18,127

Categoria	VMDa	P_i (%)	FV_i	$P_i \times FV_i$
2C	140	29,47	3,567	105,14
3C	196	41,26	8,827	364,22
2S2	9	1,89	12,116	22,96
2S3	115	24,21	12,867	311,52
3S3	15	3,16	18,127	57,24
	475	100		861,08

$$FV = 8,6$$



ESTUDO DE CASO

Determinação do número N

O número N no ano inicial é determinado por:

FV

$$N_{\text{presente}} = 365 \times \text{VMDa} \times \boxed{\text{FE} \times \text{FC}} \times \text{Ff} \times \text{Fs} \times \text{Fd}$$

onde,

- VMDa = volume médio diário anualizado no sentido mais solicitado
- FV = Fator de veículo
- Ff = Fator de frota (comerciais/total)
- Fs = Fator de sentido
- Fd = Fator de distribuição (faixa de projeto)

$$N_{\text{futuro}} = N_{\text{presente}} \times \frac{(1 + P.t)^2 - 1}{2t}$$

Linear

$$N_{\text{futuro}} = N_{\text{presente}} \times \frac{(1 + t)^P - 1}{\ln(1 + t)}$$

Geométrico

onde,

- P = período de projeto em anos;
- t = taxa de crescimento de tráfego.



EXCESSO DE CARGA

Possíveis consequências do excesso de carga

- **Manutenções e reabilitações antes do previsto** inicialmente em projeto.
- Aumento dos **custos operacionais dos veículos** (pneus danificados mais rapidamente, aumento do consumo de óleo e combustível, freios e suspensões serão mais exigidos).
- Aumento do **risco de acidentes** nas estradas.



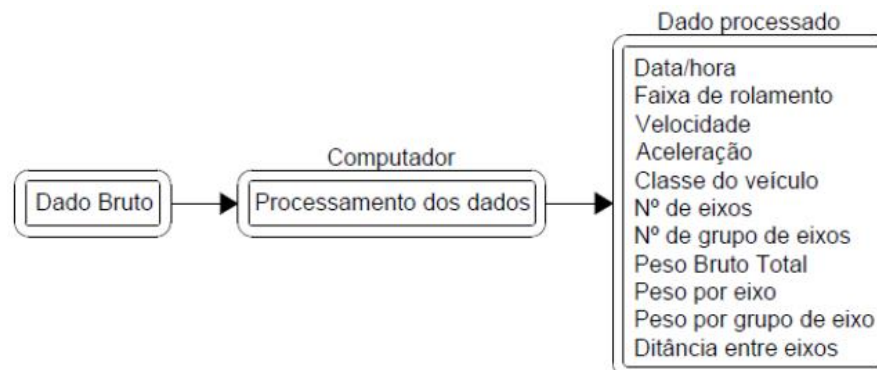


PESAGEM EM MOVIMENTO

A TECNOLOGIA

Sensores piezoelétricos com 2,73 m de comprimento, **laços indutivos** para identificação de presença de veículos, **sensores de temperatura** posicionados a 1,5 cm de profundidade e **equipamento para coleta e registro dos dados**

AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DOS DADOS




















PESAGEM EM MOVIMENTO

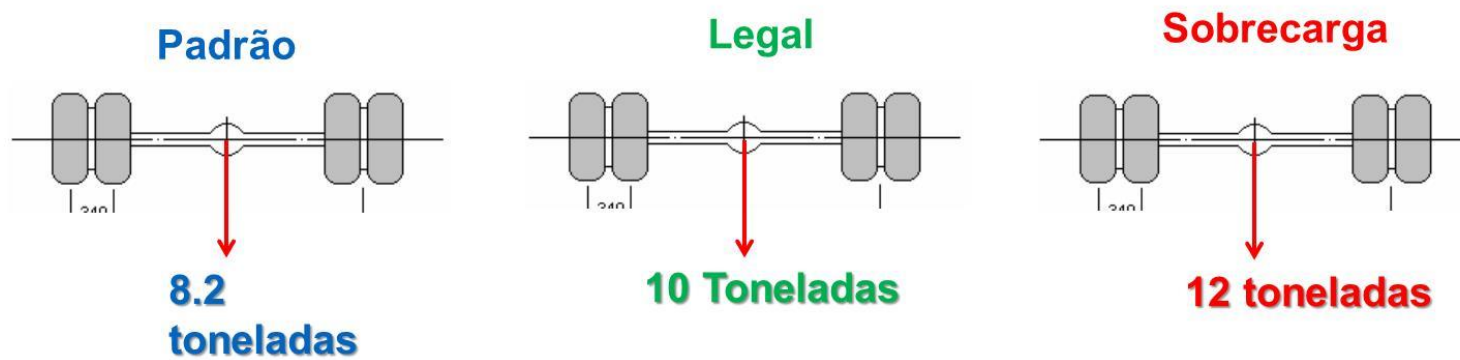
Autopista
Fernão Dias

arteris

A		3C/3CD/3DC/3BB/3BC/3CB	I		3M6/3Q6
B		2C/2CB	J		3S2/32D
C		3S3/3D3	K		2I2/2C2/2DL/2BI/2BR/2RB/2BB
D		2S2/2B2/2BD/2DB	L		2S1/2B1
E		2S3	M		3I2/3DL/3D2/3DD/3DJ/3C2/3IB
F		3D4/34D/3T4/3TD	N		3LD/3DT
G		3I3/3ID/3DN/3N3	O		3I1/3DI/33D/3C3/3JD
H		4DD/4DC/4CD/4CB/4DB/4CB/4BD			



PESAGEM EM MOVIMENTO

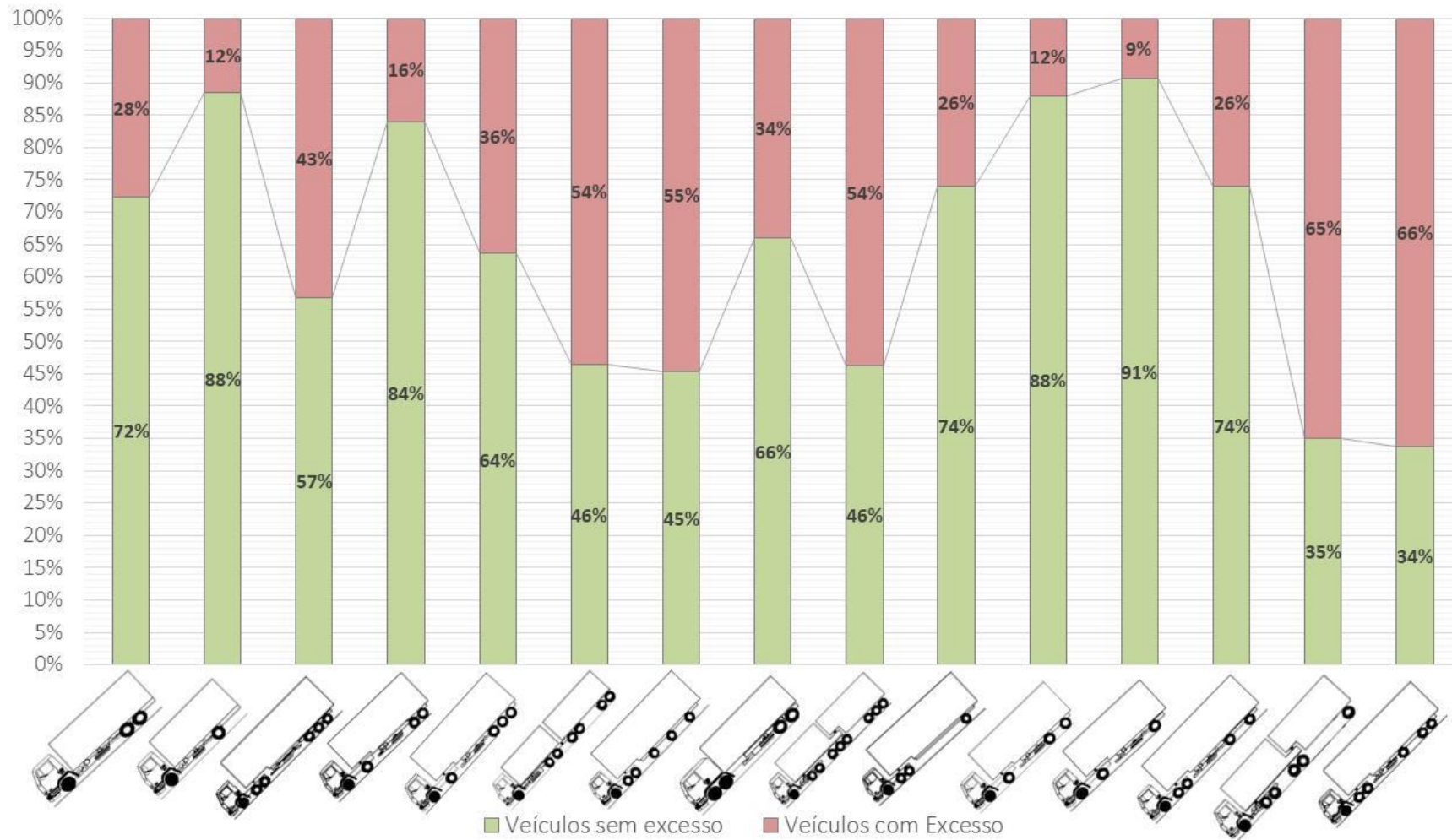


10 toneladas= 2.2 vezes mais danoso que o padrão (Dano relativo à qualidade de rolamento)
12 toneladas= 5 vezes mais danoso que o padrão (Dano relativo à qualidade de rolamento)



PESAGEM EM MOVIMENTO - EXCESSO DE CARGA

Porcentagem de excesso por categoria





PESAGEM EM MOVIMENTO - INFRADORES

Porcentagem de infratores por categoria

