



ANÁLISE DOS EFEITOS DE CARGA EM PONTES BRASILEIRAS COMPARANDO O MODELO DE CARGA MÓVEL COM DADOS DE PESAGEM EM MOVIMENTO (WIM)

Palestrantes:

Prof. Túlio N. Bittencourt, PhD – USP

Prof. Enson Portela, DSc – IFCE



Sumário



- 1. *Motivação***
- 2. *Sistema de Pesagem em Movimento***
- 3. *Estatísticas do Tráfego***
- 4. *Análise de Confiabilidade de Pontes Brasileiras***
- 5. *Desenvolvimento de um Modelo de Carga Móvel para Pontes Brasileiras***
- 6. *Conclusões***

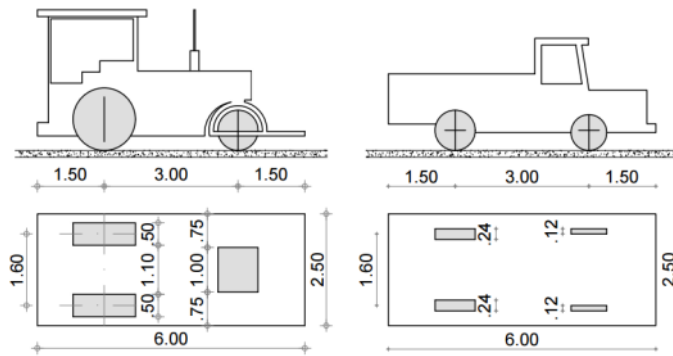


Motivação

Modelo de carga móvel para pontes brasileiras

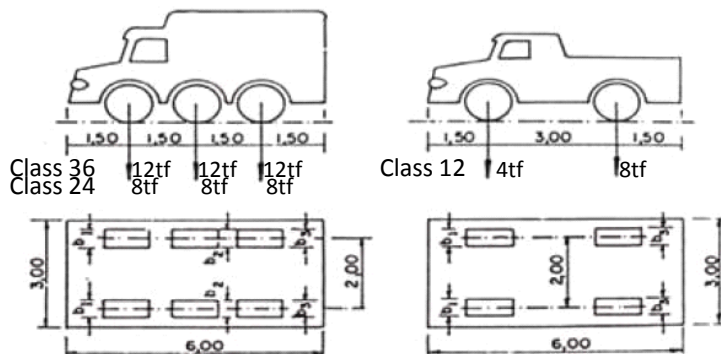
- O primeiro modelo de carga (NB-6) para pontes rodoviárias brasileiras foi publicado em 1943 e era baseado no modelo alemão (DIN 1072)

1940's:



Compressores	Tipo A	Tipo B	Tipo C	Unidades
Peso total	7	16	24	tf
Peso da roda dianteira	5	7	10	tf
Peso da roda traseira	1	4,5	7	tf
Largura da roda dianteira	1	1	1	m
Largura da roda traseira	10	40	50	cm
Distância entre os eixos diant. e traseiro	3	3	3	m
Distância entre os meios da rodas traseiras	160	160	160	cm

1960 - 1984:

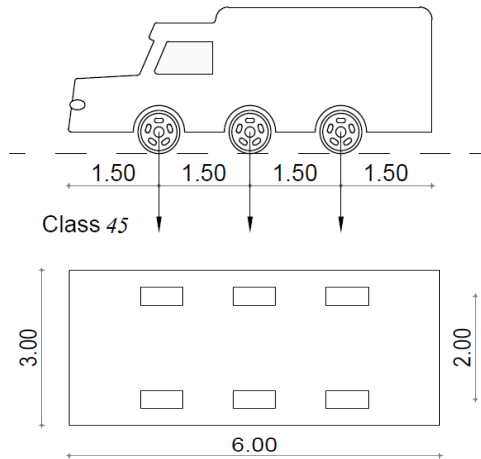


1984 - 2013:

Classes	Caminhão (KN)	Carga Distrib. (KN/m ²)
45	450	5
30	300	5
12	120	4



- A NBR7188 divide as pontes em duas classes:



Classe	Caminhão (KN)	Carga Distrib. (KN/m ²)
450	450	5
240	240	4

- As cargas devem ser posicionadas de forma a causar o efeito mais desfavorável para o elemento estrutural
- Somente um caminhão deve ser usado independentemente do número de faixas da ponte

Algumas questões surgem...

- O modelo de carga móvel brasileiro é adequado para as pontes rodoviárias de concreto armado e protendido ?
- Quão seguras são as pontes projetadas com este modelo de carga em relação ao tráfego atual e futuro?
- Qual a probabilidade de falha das pontes para diferentes comprimentos de vãos?



Objetivos do Estudo



- Desenvolver um modelo de carga móvel para as pontes brasileiras de concreto armado e protendido usando dados WIM e teoria da confiabilidade
 - Avaliar a segurança de pontes brasileiras considerando o tráfego atual como registrado pelo sistema de pesagem em movimento
-
- Tornar a tecnologia WIM mais popular e incentivar seu uso no Brasil
 - Criar um banco de dados confiável de características de caminhões, como: peso bruto total (PBT), peso por eixos, espaçamentos entre eixos e percentual de classes de caminhões
 - Desenvolver uma metodologia para avaliar o modelo brasileiro de carga móvel
 - Desenvolver uma abordagem para avaliar pontes brasileiras de concreto sob análise de confiabilidade



Sistema de Pesagem em Movimento (Weigh in Motion System- WIM)



- Sistemas WIM tornam-se uma alternativa em potencial para obter uma supervisão mais confiável do tráfego:
 - motoristas não percebem o sistema
 - motorista não “fogem” da pesagem
 - o sistema pode facilmente identificar caminhões pesados
 - o sistema pode auxiliar na estimativa de preços de pedágio

- Por outro lado:
 - precisa de calibrações devido aos efeitos da temperatura
 - instalação depende de MO qualificada
 - sensores tem uma vida útil limitada (~5anos)



- O sistema segue as recomendação dada por ASTM E1318 (2002) e são classificados como Tipo I

Data Item Produced by WIM Systems	Type I	Type II	Type III	Type IV
1. Wheel Load	•		•	•
2. Axle Load	•	•	•	•
3. Axle-Group Load	•	•	•	•
4. Gross-Vehicle Weight	•	•	•	•
5. Speed	•	•	•	•
6. Center-to-Center Spacing Between Axles	•	•	•	•
7. Vehicle Class (via axle arrangement)	•	•		
8. Site Identification Code	•	•	•	•
9. Lane and Direction of Travel	•	•	•	
10. Date and Time of Passage	•	•	•	•
11. Sequential Vehicle Record Number	•	•	•	•
12. Wheelbase (front-most to rear-most axle)	•	•		
13. Equivalent Single-Axle Loads (ESALs)	•	•		
14. Violation Code	•	•	•	•

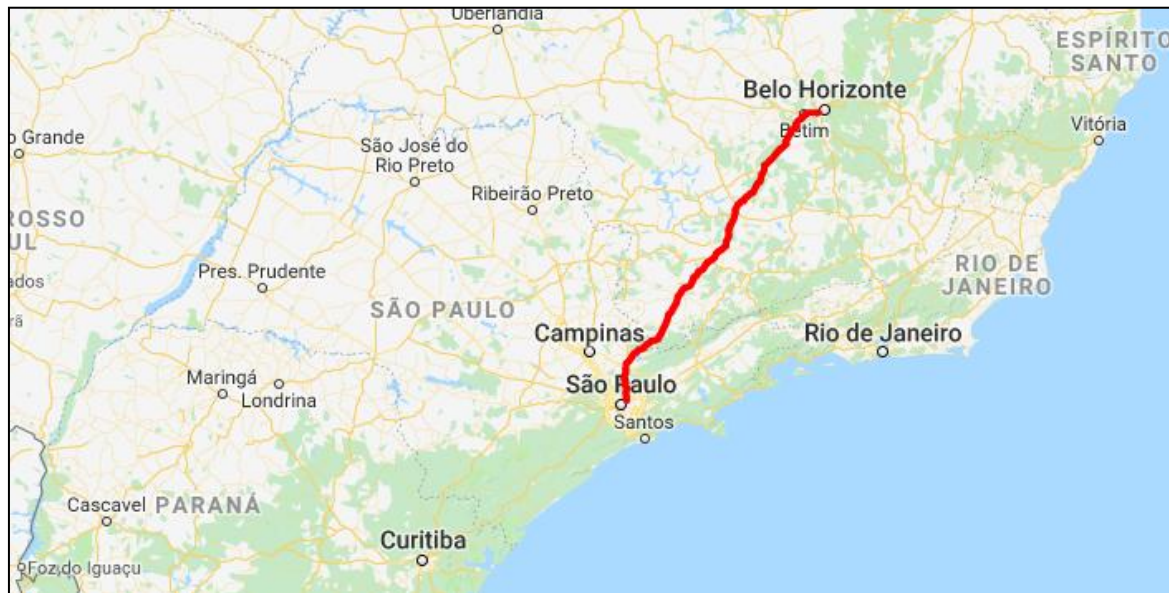
Data Item Produced by WIM Systems	Type I
Gross-Vehicle Weight	±10%
Individual Axle weight	±15%
Group Axle Weight	±15%
Traffic Volume	> 99.5%
Speed	±1.5%
Length	±8.0%



Sistema WIM/SP



- Instalado na Rodovia Fernão Dias (BR381) em Julho de 2015
- Rodovia sob concessão à Arteris S.A.

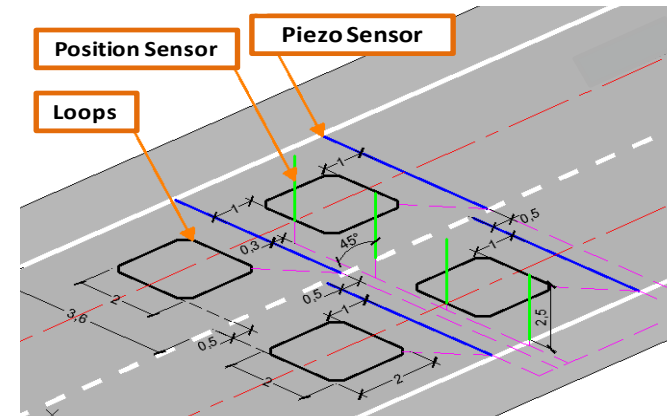


O sistema é feito de duas linhas de sensores piezoelétricos*, dois *loops* de identificação de presença e sensores de temperatura do pavimento

O arranjo final é do tipo L-S-L-S

O sensor tem 2.73 m de comprimento e 1.27 cm de largura

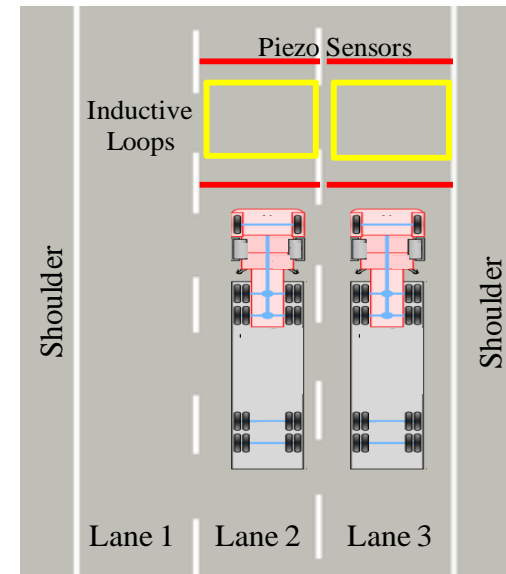
*convertem pressão em pulso elétrico





Sistema WIM/RS

- Instalado na Rodovia Osvaldo Aranha (BR-290) em 2013
- Rodovia sob concessão à Concepa S.A.



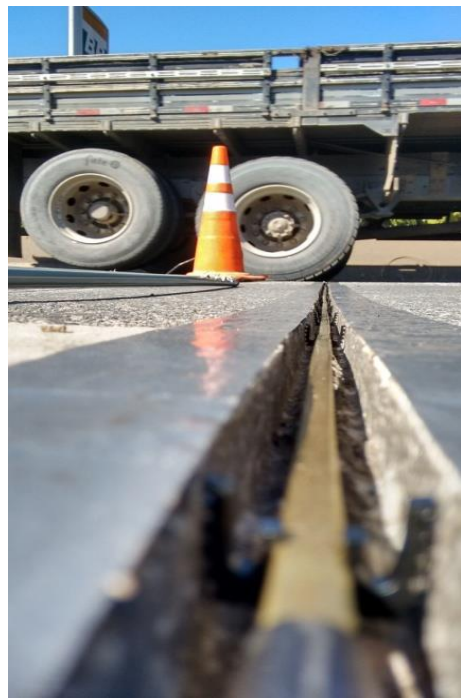
O sistema é feito de duas linhas de sensores piezoelétricos ,
e um *loop* indutivo

O arranjo final é do tipo S-L-S

O sensor tem 3.64 m de comprimento e 1.30 cm de largura



Sistema WIM/SP - Instalação





Calibração

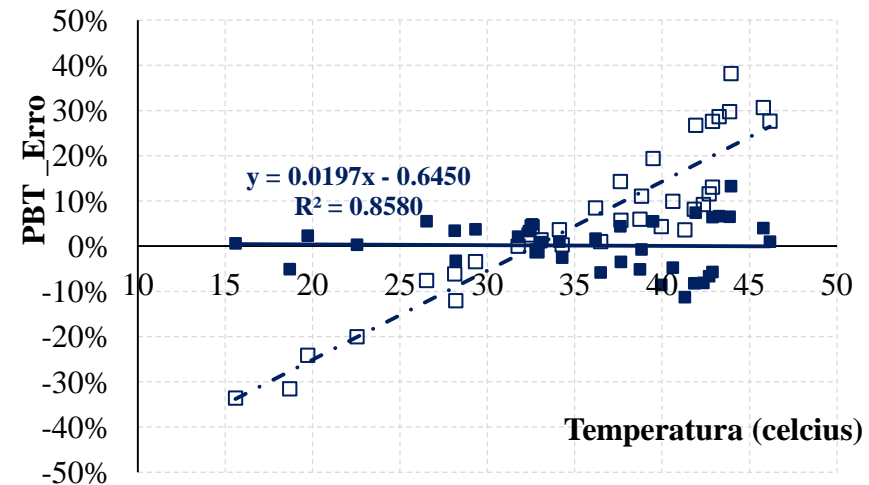
- Resposta dos sensores são influenciadas pela variação da temperatura
- Compensação desse efeito deve ser considerada nos dados
- Calibração do sistema pode ser feita com um caminhão de peso conhecido



O caminhão atravessa a estação WIM várias vezes em diferentes velocidades e períodos do dia/ano.



7 calibrações realizadas





Checagem da Qualidade dos dados



- O teste desenvolvido por Southgate (2001) e aplicado por Davis (2007) foi usado neste projeto
- O teste consiste em usar o carga do eixo frontal do caminhão 3S2 para verificar os dados WIM usando uma regressão logarítmica



- Caminhões 3S2 tem relação estável entre o eixo frontal e o espaçamento entre o primeiro e segundo eixos
- Catálogos de montadoras foram investigados ajustar o teste proposto a frota brasileira

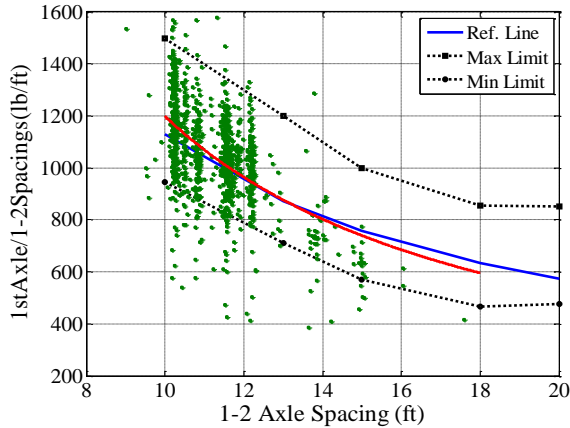
Espaçamento entre primeiro e segundo eixos (cm)	Peso do eixo da direção (kg)
300	4767
310	4622
320	4302
330	3897
350	4392
355	4471
360	4487
370	4293



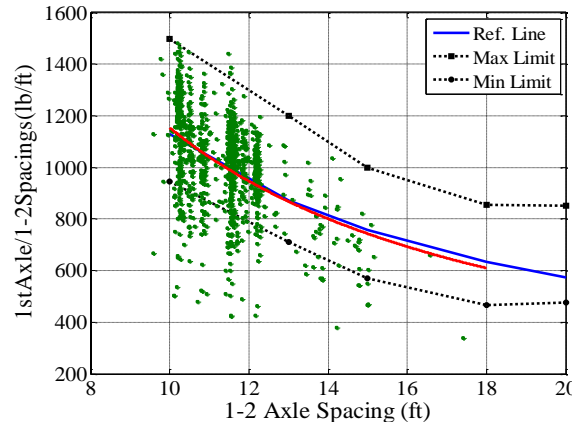
Checagem da Qualidade dos dados



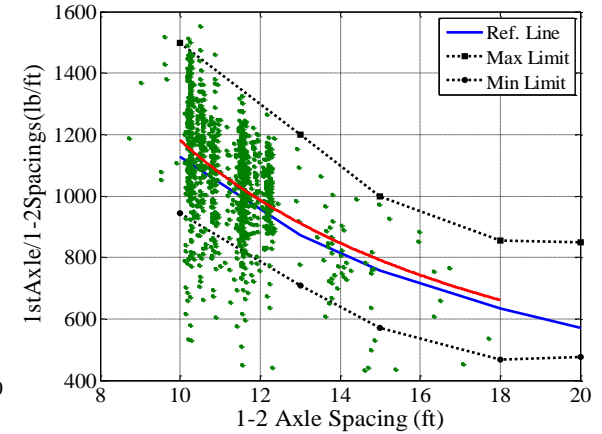
Resultados:



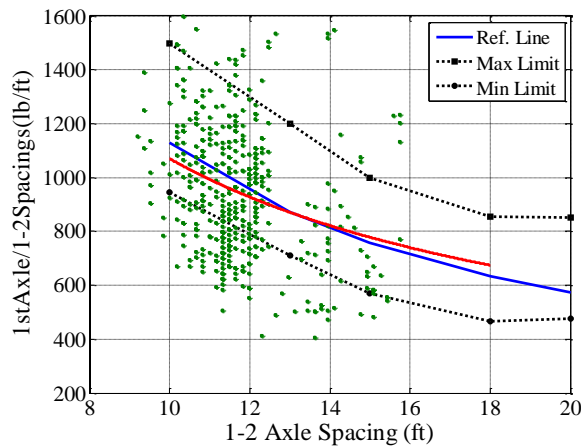
São Paulo – Faixa direita 10/2015



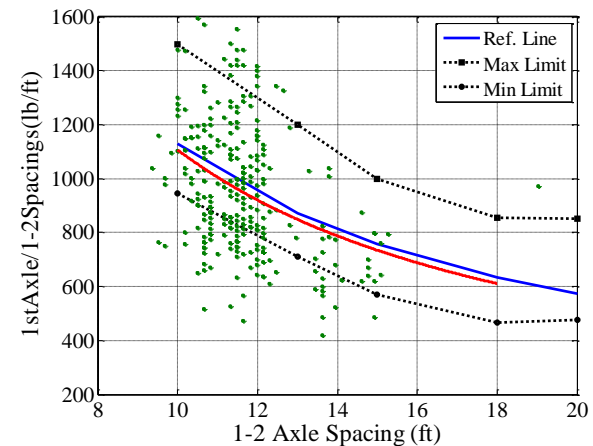
São Paulo – Faixa direita 06/2016



São Paulo – Faixa direita 06/2017



Rio Grande - 06/2014



Rio Grande - 03/2014



Filtragem dos dados

- A filtragem minimiza a possibilidade de medidas erradas e/ou irrelevantes

Avalia veículos pelos critérios estabelecidos

- PBT mínimo ≤ 6.2 tons
- Eixo simples ≤ 2.2 tons
- Tandem duplo > 32 tons
- Espaçamento entre eixos ≤ 0.92 m
- Comprimento total (L) > 36 m
- $L > 15.4$ m e PBT ≤ 10.43 tons
- Peso de eixo individual > 18 tons
- Peso total $\neq 10\% \sum(\text{pesos dos eixos})$
- $\sum(\text{distância entre eixos}) > L$ caminhão
- $L < 5$ metros
- Velocidade > 170 km/h
- Peso do primeiro eixo > 10 tons
- PBT máximo > 138 tons

Dados do WIM

Classifica frota conforme características de cada veículo

Avalia veículos pelos critérios estabelecidos

- PBT mínimo ≤ 6.2 tons
- Eixo simples ≤ 2.2 tons
- Tandem duplo > 32 tons
- Espaçamento entre eixos ≤ 0.92 m
- Comprimento total (L) > 36 m
- $L > 15.4$ m e PBT ≤ 10.43 tons
- Peso de eixo individual > 18 tons
- Peso total $\neq 10\% \sum(\text{pesos dos eixos})$
- $\sum(\text{distância entre eixos}) > L$ caminhão
- $L < 5$ metros
- Velocidade > 170 km/h
- Peso do primeiro eixo > 10 tons
- PBT máximo > 138 tons

Veículo se encaixa em algum critério?

SIM

Arquivo com veículos excluídos

NÃO

Análise dos dados

Número
"N"

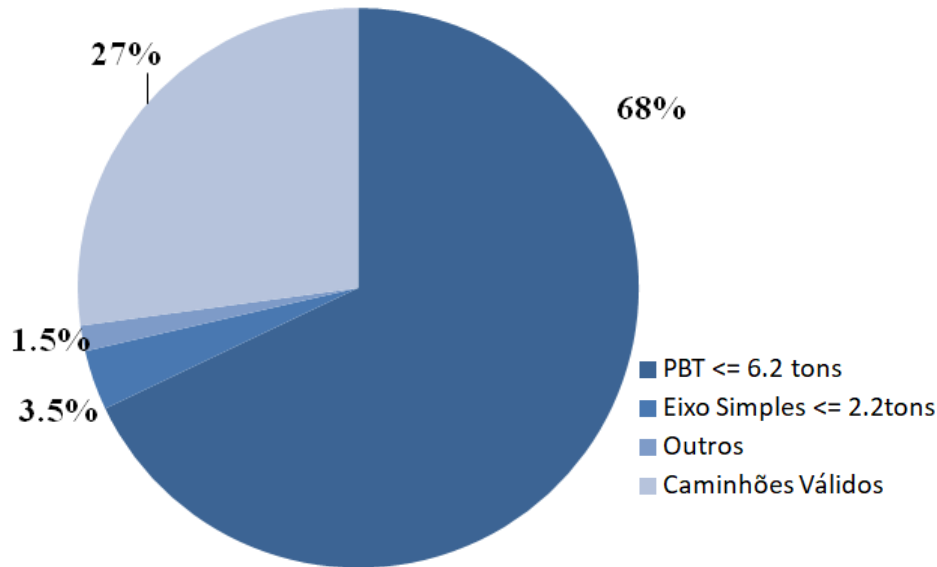
Modelo
carga móvel



Filtragem dos dados - Resultados

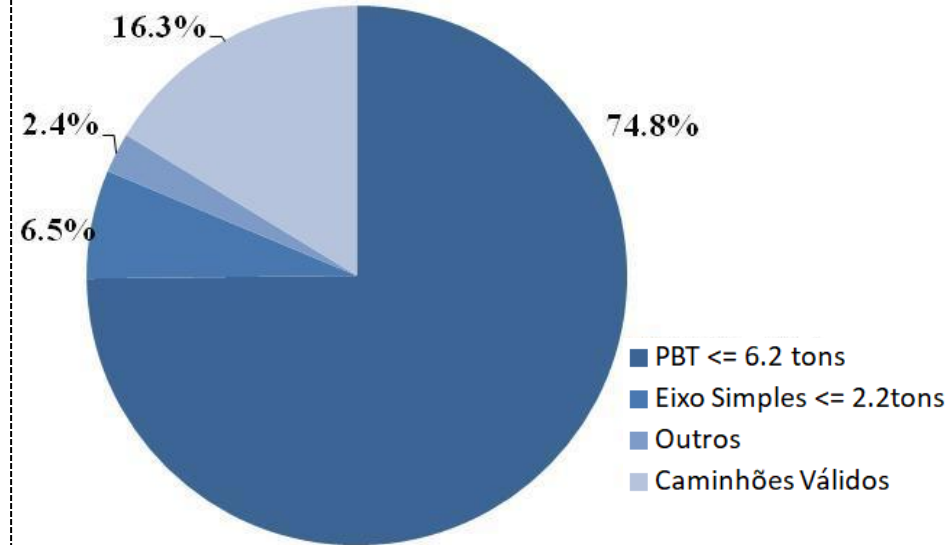
Resultados:

São Paulo



Setembro 2015 a Agosto 2017
8.35 milhões de registros;
VMD* de 13292 veículos;
6.08 milhões de veículos foram filtrados;
3631 caminhões qualificados por dia.

Rio Grande do Sul



Março 2014 a Junho 2014 (79 dias)
0.927 milhões de registros;
VMD de 11736 veículos;
0.77 milhões de veículos foram filtrados;
1962 caminhões qualificados por dia.

*VMD: Volume Médio Diário de veículos;

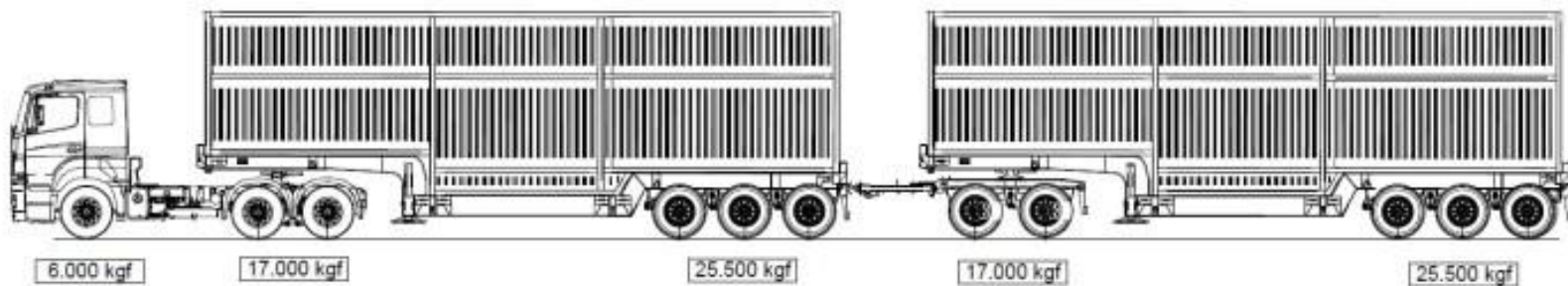


Estatísticas de Múltiplas Presenças de Caminhões em Pontes



Estatísticas de presença de caminhões

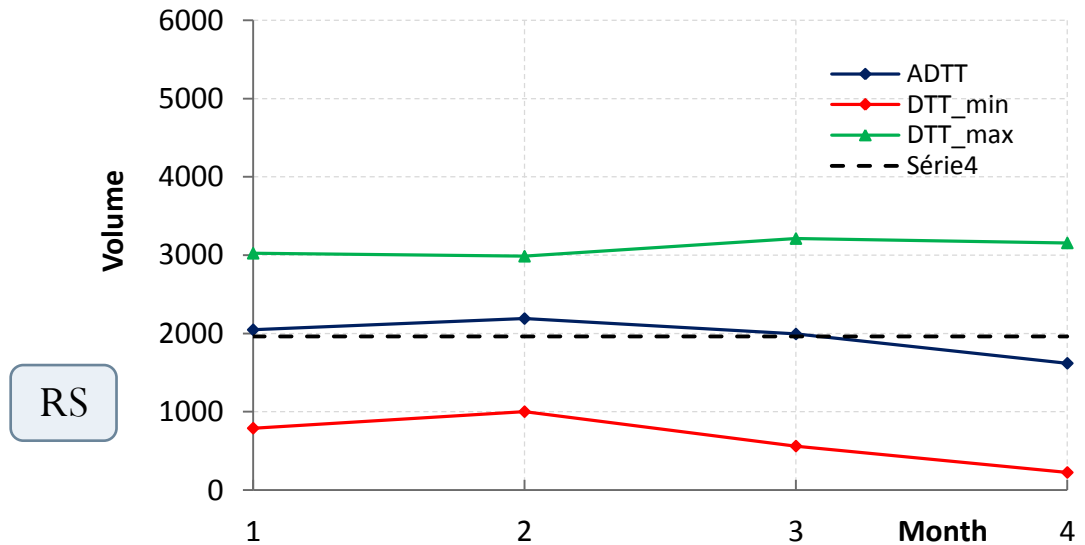
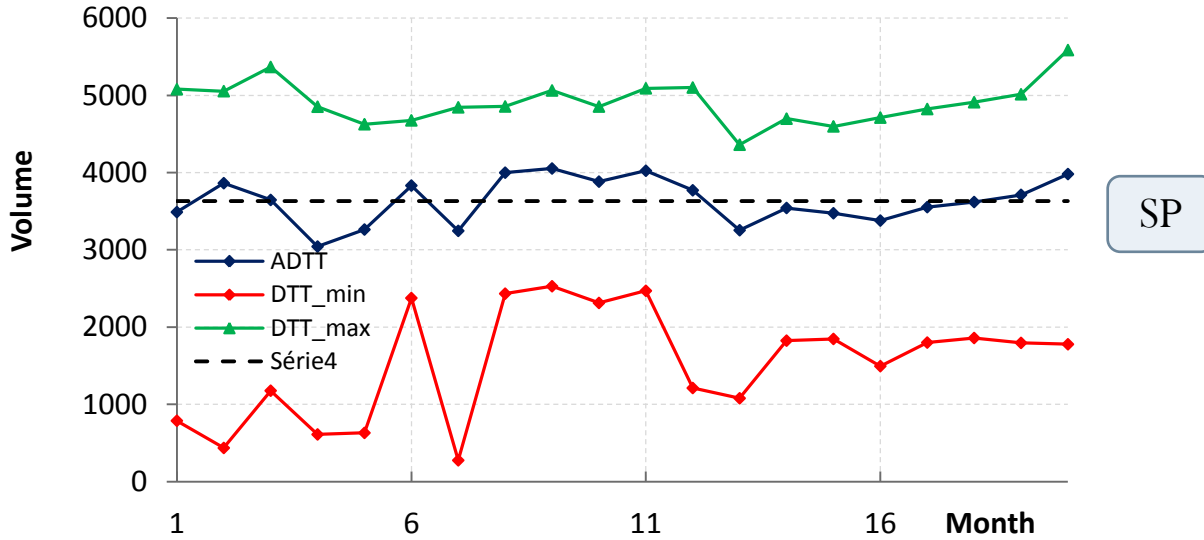
- Luchi (2006), Rossigali (2013) e Ferreira (2007) são os trabalhos mais completos no Brasil
- Resolução 12 do CONTRAN (1998) fixa pesos e dimensões do caminhões
- Resolução 12: peso máximo permitido
 - 45 toneladas (caminhão simples)
 - 57 toneladas (unidade tratora + unidade acoplada)
- Resolução 640: caminhões de 11 eixos com até 91 toneladas





Estatística de Volume de Tráfego

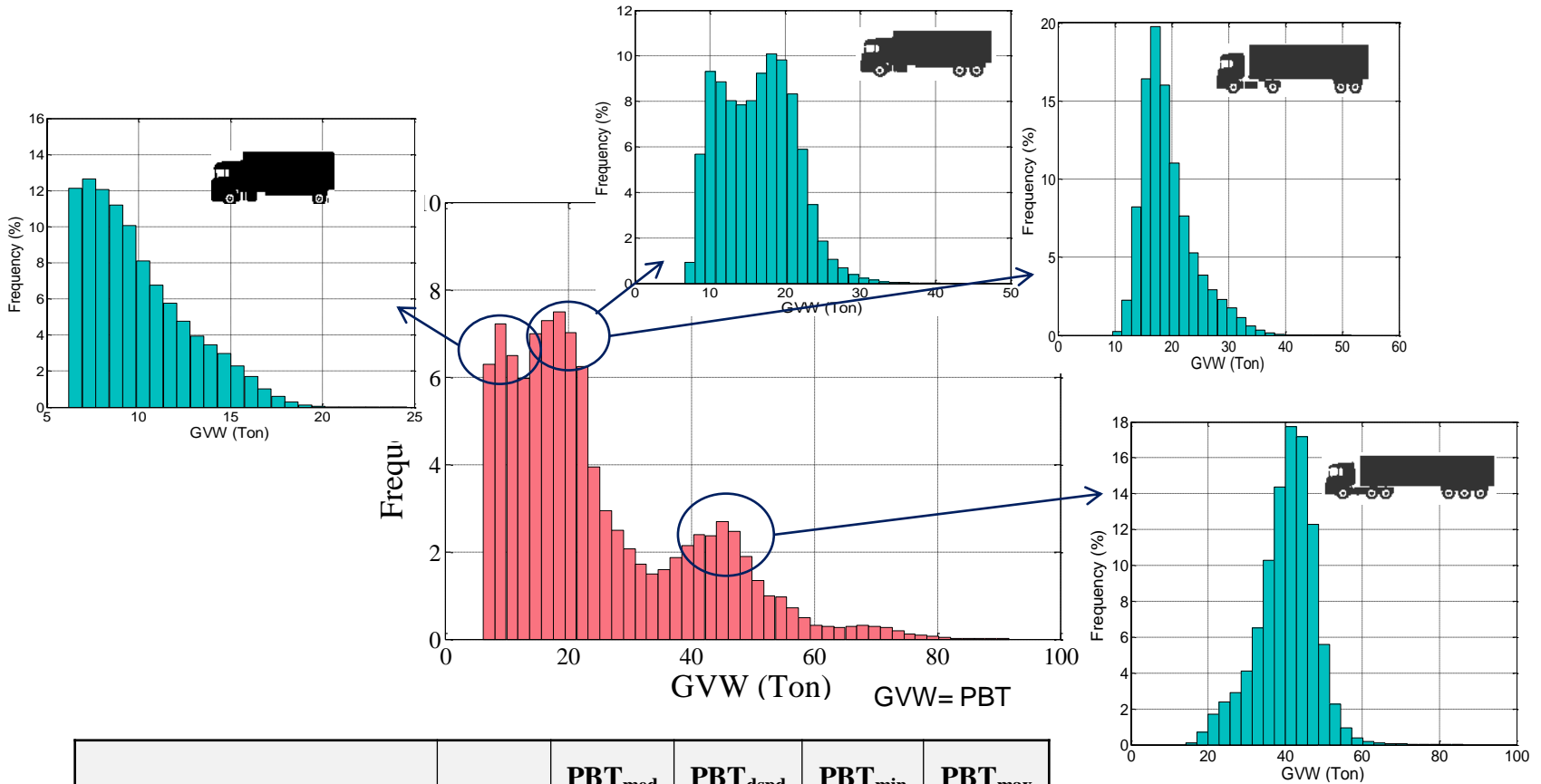
- VMDC – volume médio diário de caminhões - entre 3043 e 4053
- A média de 3631 caminhões (São Paulo) e 1962 (Rio Grande do Sul)





Estatística de Volume de Tráfego - SP

- Picos revelam a participação predominante de uma dada classe de caminhões

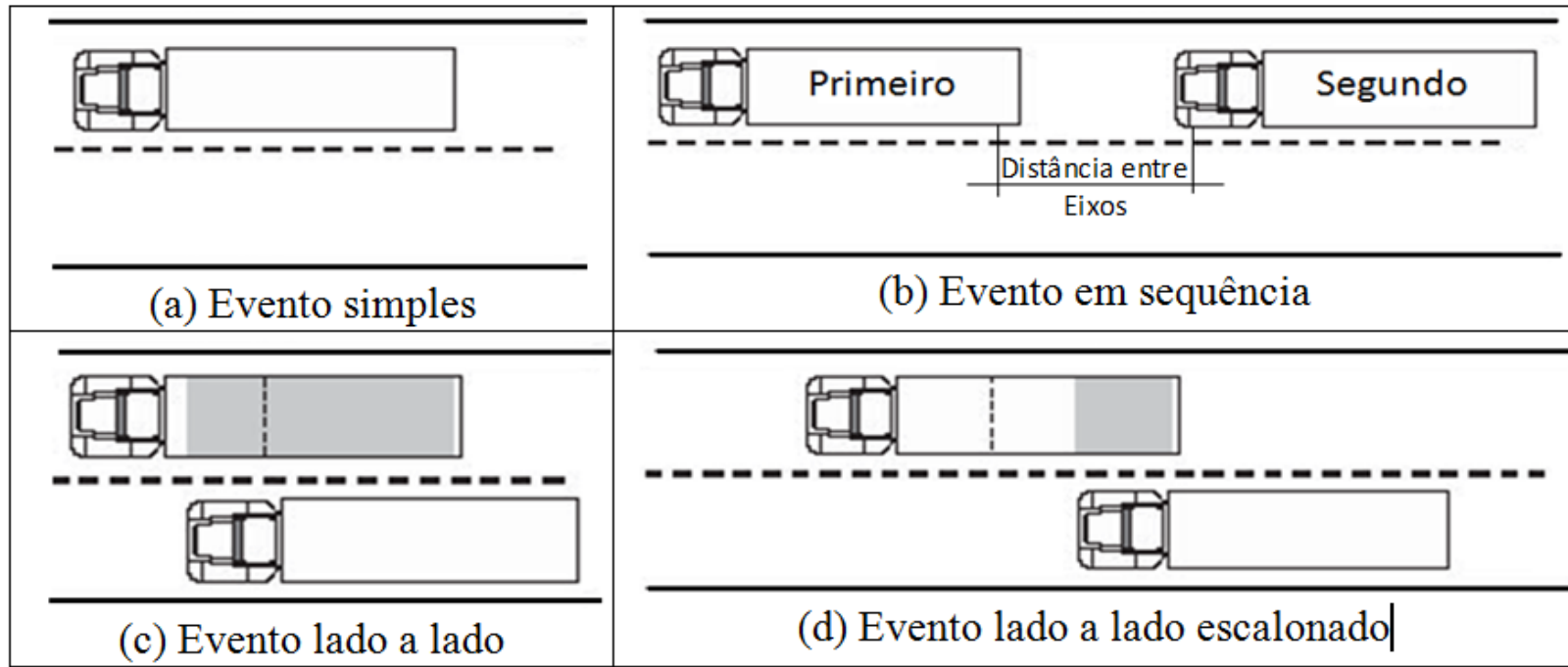


Classes (DNIT)	[%]	PBT _{med} [ton]	PBT _{dspd} [ton]	PBT _{min} [ton]	PBT _{max} [ton]
2C/2CB	15.36	10.36	3.23	6.20	27.51
3C/3CD/3DC/3BB/3BC/3CB	23.40	17.32	5.60	6.68	41.65
2S2/2B2/2BD/2DB	12.96	19.91	5.44	9.67	58.50
2S3	9.46	33.76	9.02	12.42	71.22
3S3/3D3	14.75	43.02	9.70	13.99	89.94



Estatísticas de Múltiplas Presenças de Caminhões

- Arranjo similar ao de Gindy e Nassif (2006) foi considerado:

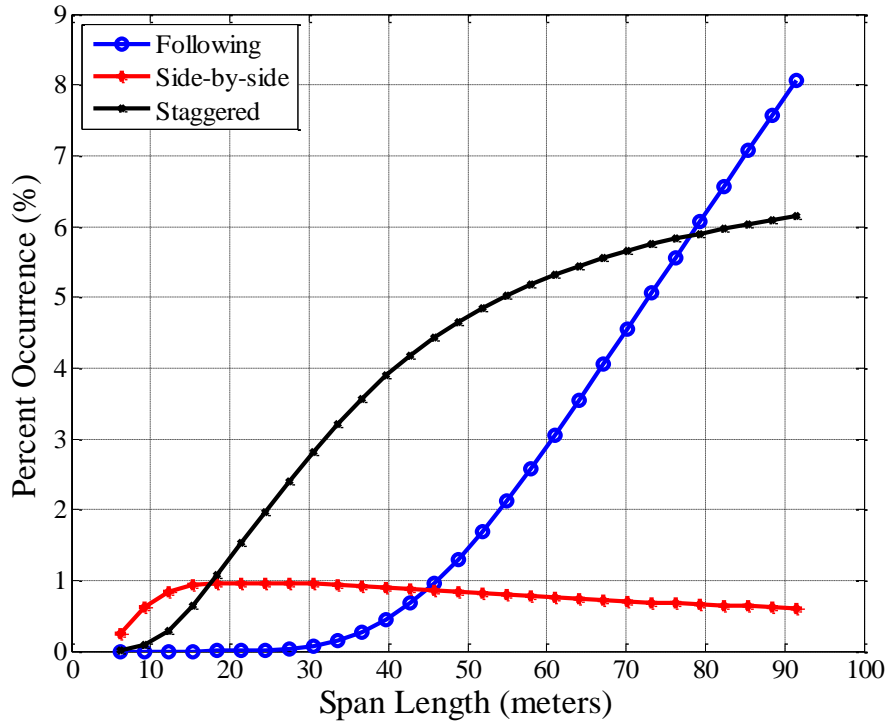


WIM precisa de uma resolução de 0.01 segundo.

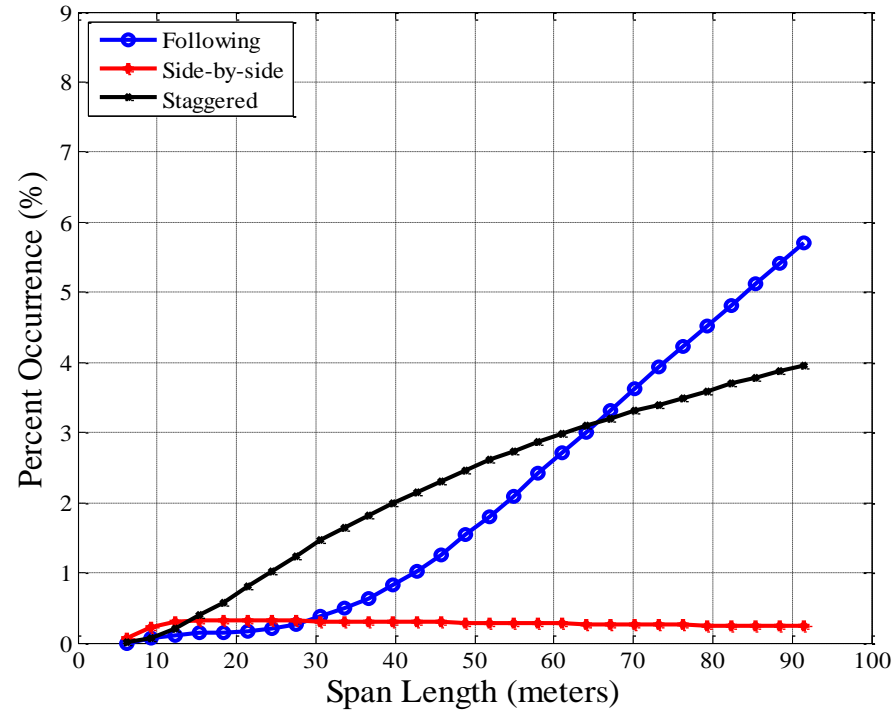


Estatísticas de Múltiplas Presenças de Caminhões

Caminhões qualificados são simulados sobre pontes:



SP



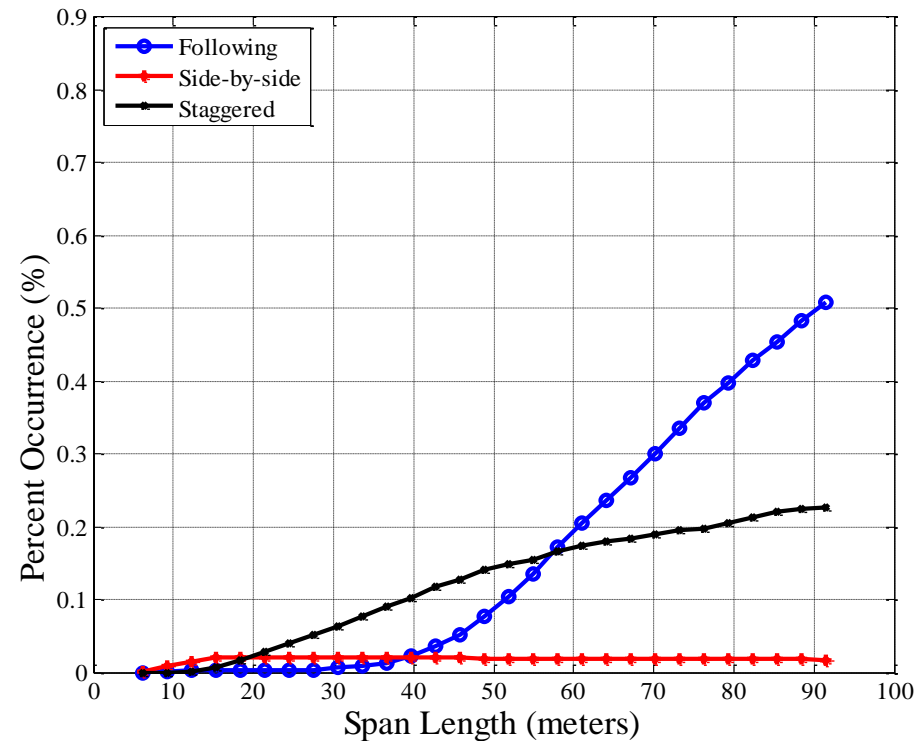
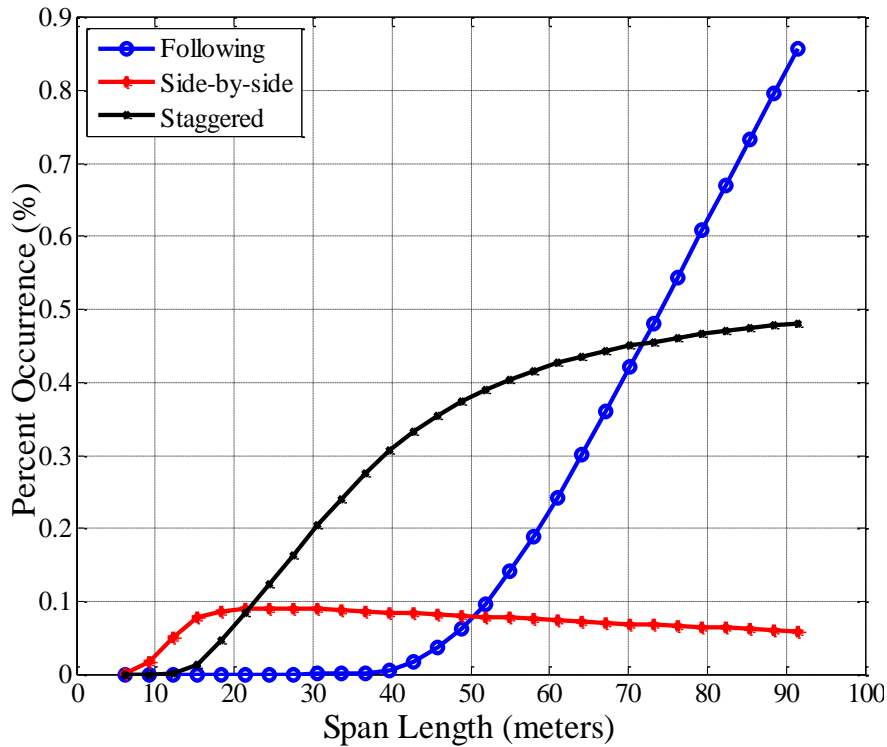
RS

Span length: comprimento do vão.



Estatísticas de Múltiplas Presenças de Caminhões

Probabilidade de dois caminhões pesados (36,3 toneladas) ocorrendo juntos





Análise de Confiabilidade de Pontes Brasileiras



Pontes Brasileiras Seleccionadas



- 60 pontes foram usadas:

39 pretendidas
21 armadas

- Nowak (1999) usou 107 pontes existentes (pontes de aço)
- As pontes são de cinco estados:



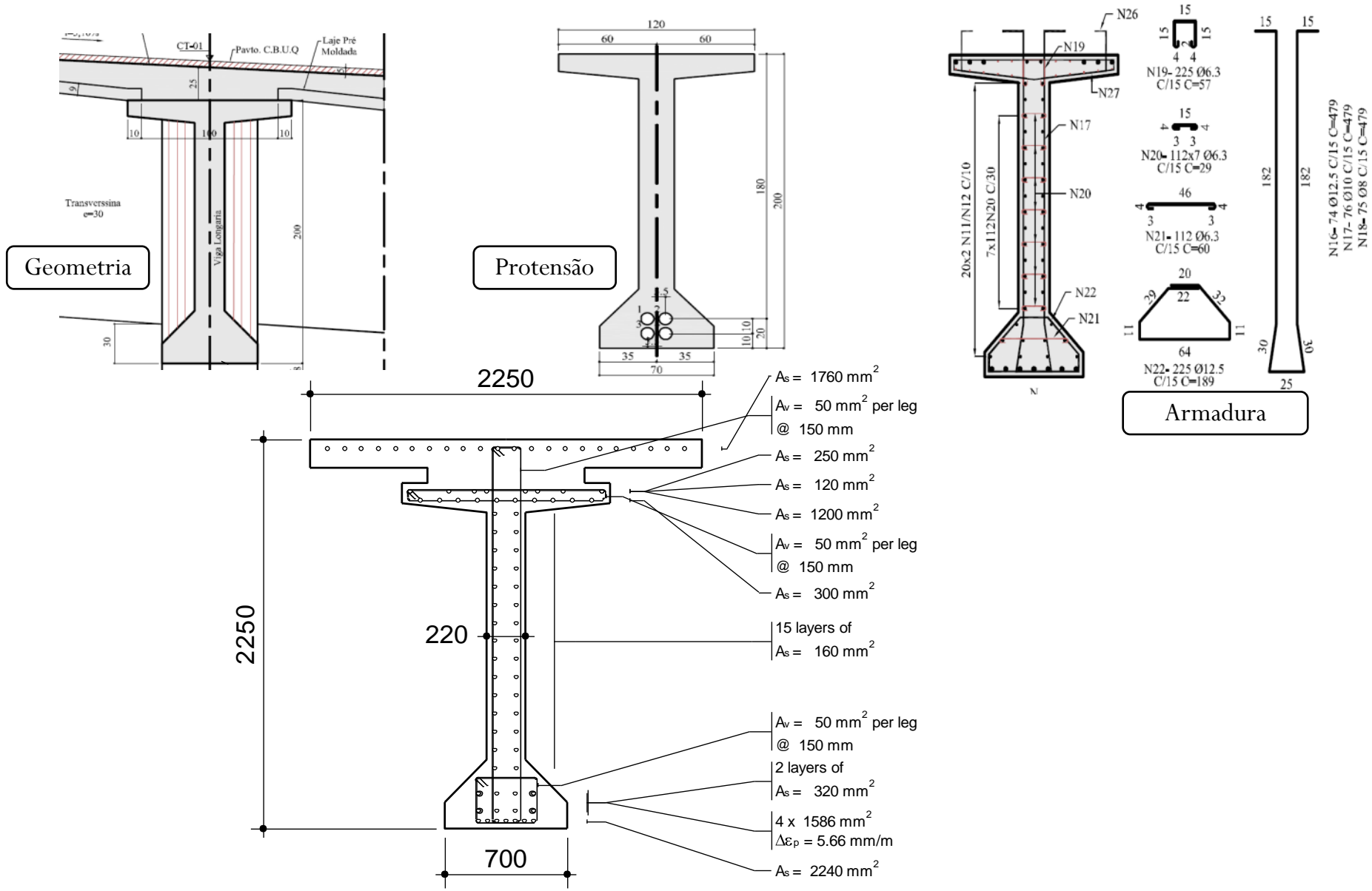
- O comprimento do vão varia de 14 a 60 metros
- Espaçamento entre longarinas varia de 215 cm a 340cm
- O conjunto é composto por pontes de 3,4,5,6,7 e 10 longarinas e também viga caixão
- A maioria das pontes tem concreto com resistência de 40 MPa



Pontes Brasileiras

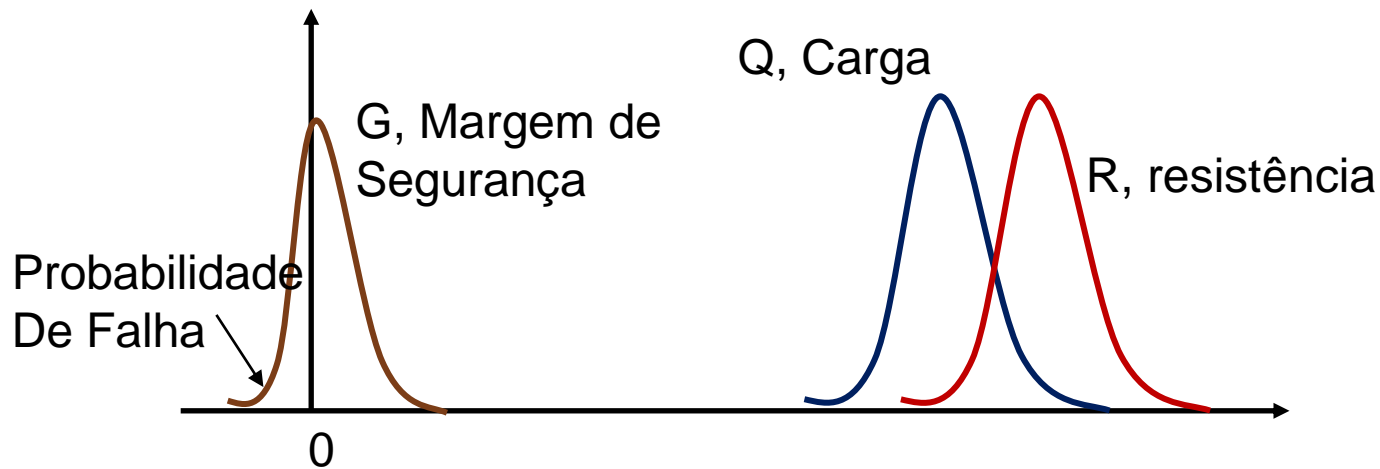
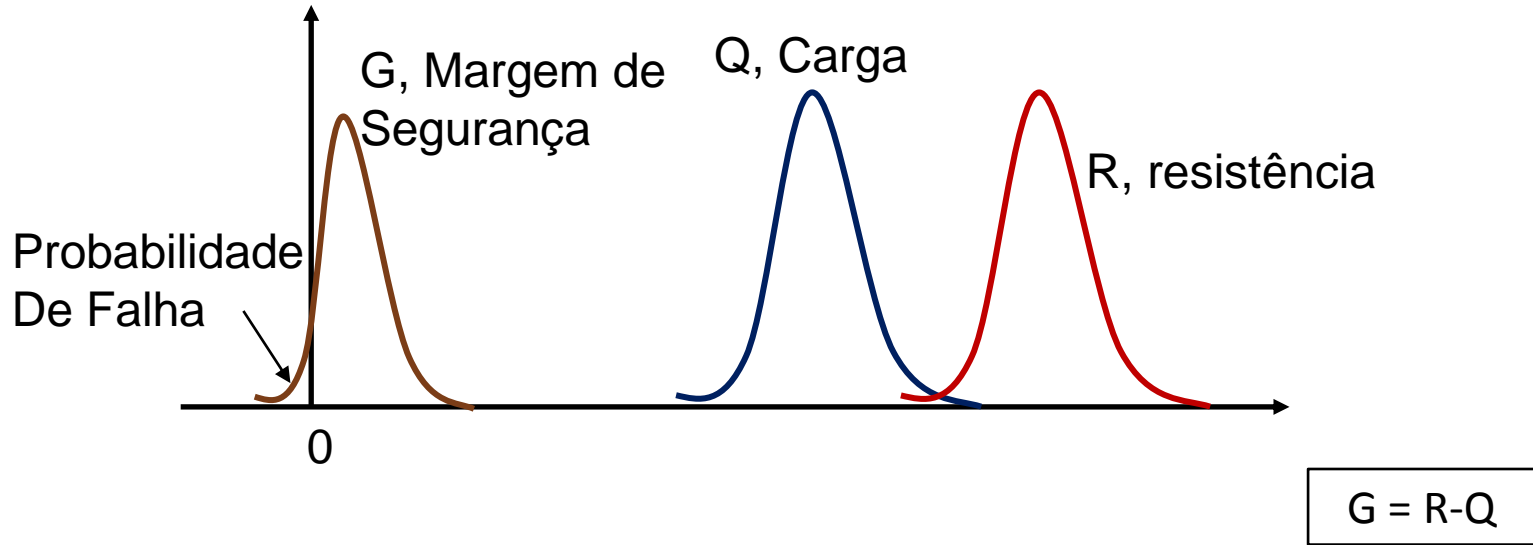


- Seção transversal típica deve incluir:



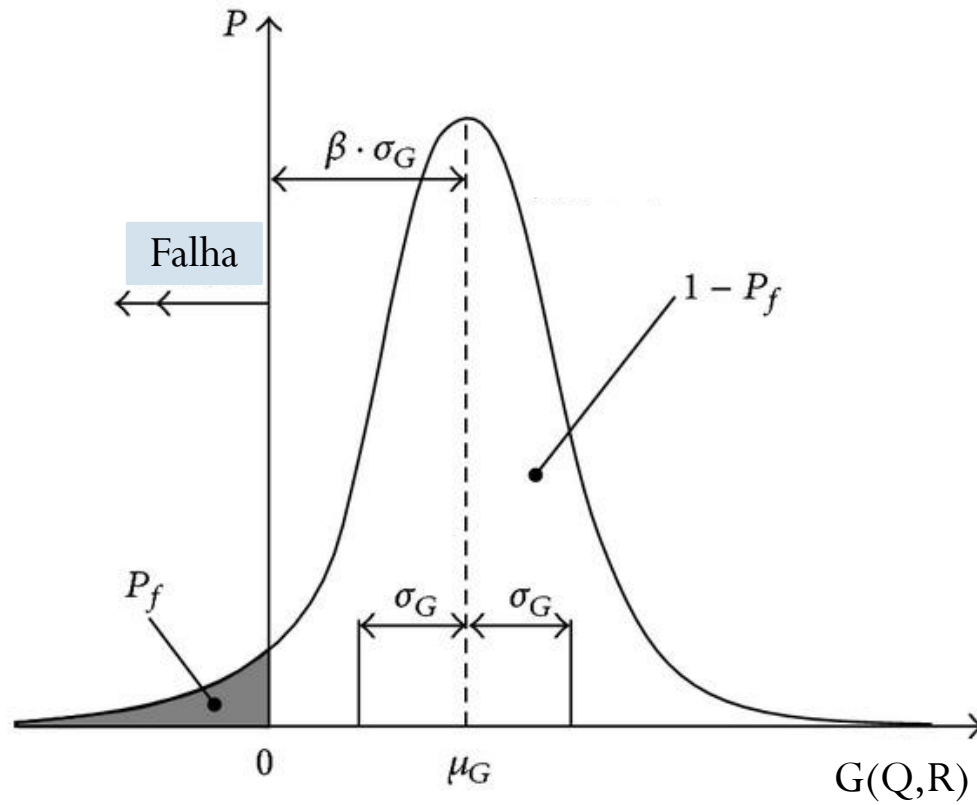


Probabilidade de Falha





Probabilidade de Falha



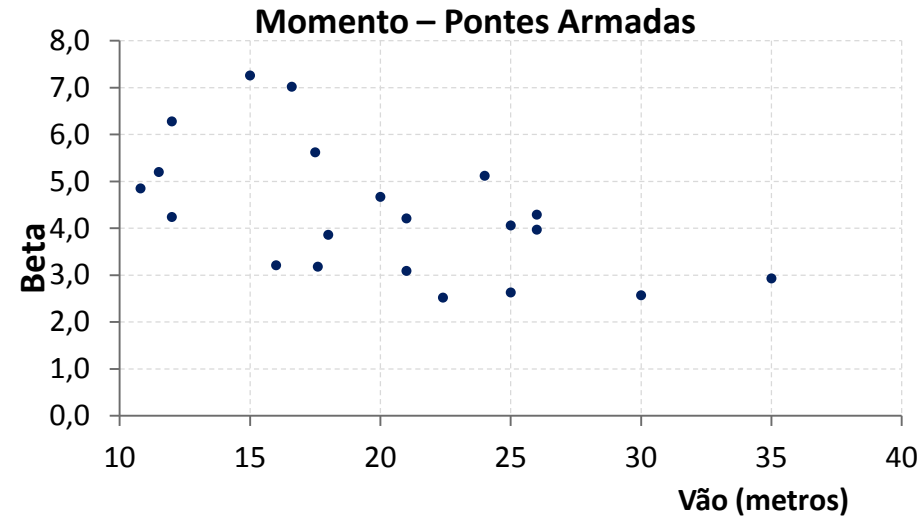
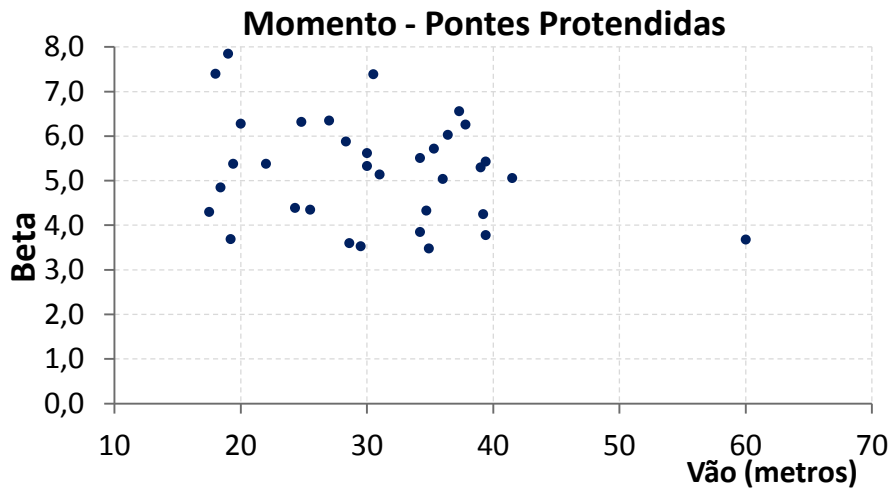


Resultados para Probabilidade de Falha: TB-450



- Usando os componentes de carga nominal os índices de confiabilidade podem ser estimado
- Apenas o ELU foi considerado na forma da seguinte equação:

$$R > D1 + D2 + D3 + LL + \text{Impacto}$$



- Probabilidade de falha para pontes de concreto armado é maior do que para pontes de concreto protendido
- Probabilidade de falha tende a aumentar com o aumento do vão



Fatores de Carga e de Resistência



- A nova equação de Estado Limite:

$$\frac{R}{\gamma_{Res}} = 1.4DL + 1.5D3 + \gamma_{LL}(LL + Impacto)$$

Fatores de carga para os modelos calibrados (γ_{LL}):

	Estado Limite	TB-450	Modelo Proposto
Concreto Armado	Momento	1.50	1.80
	Cisalhamento	1.60	1.80
Concreto Protendido	Momento	1.50	1.80
	Cisalhamento	1.50	1.80

Fatores de resistência:

	Estado Limite	TB-450	Modelo Proposto
Concreto Armado	Momento	1.00	1.00
	Cisalhamento	1.10	1.10
Concreto Protendido	Momento	1.10	1.05
	Cisalhamento	1.15	1.10

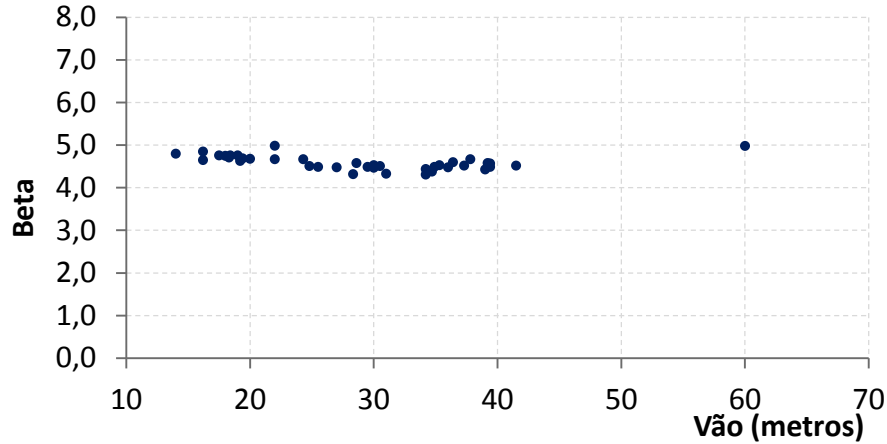


Confiabilidade do modelo de carga móvel calibrado

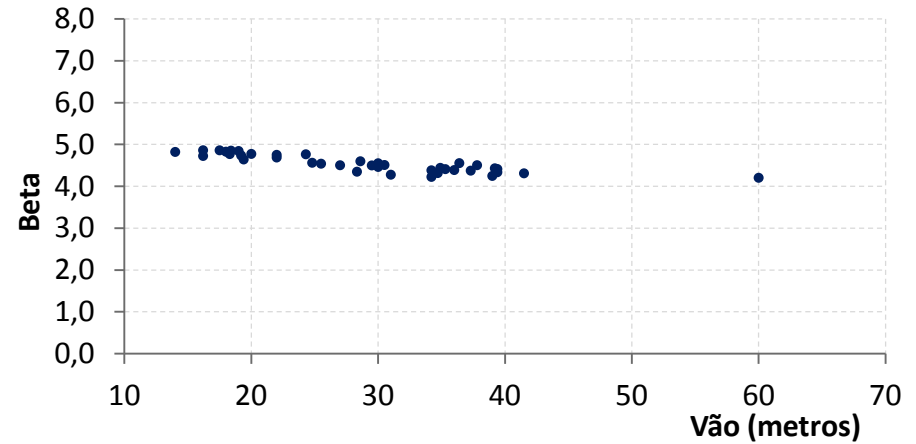


Resultados – Momento Fletor para Pontes Protendidas:

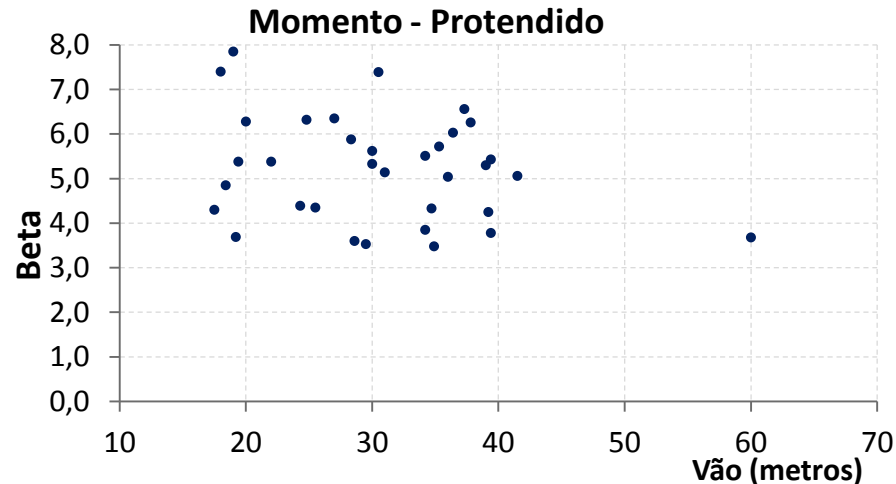
TB-450 (calibrado)



Modelo Proposto



TB-450 (Sem Calibração)

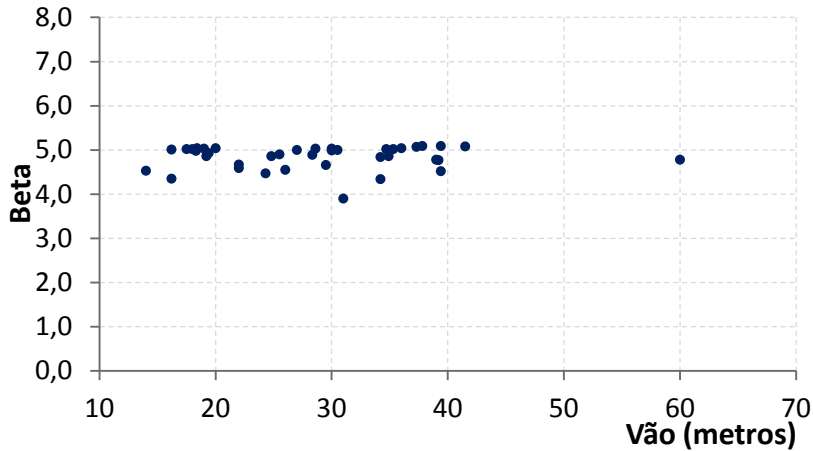




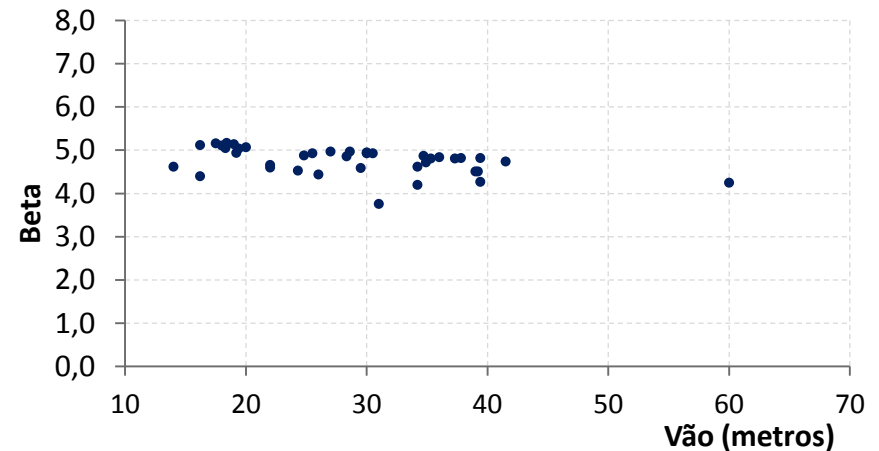
Confiabilidade do modelo de carga móvel calibrado

Resultados – Cisalhamento Pontes Protendidas :

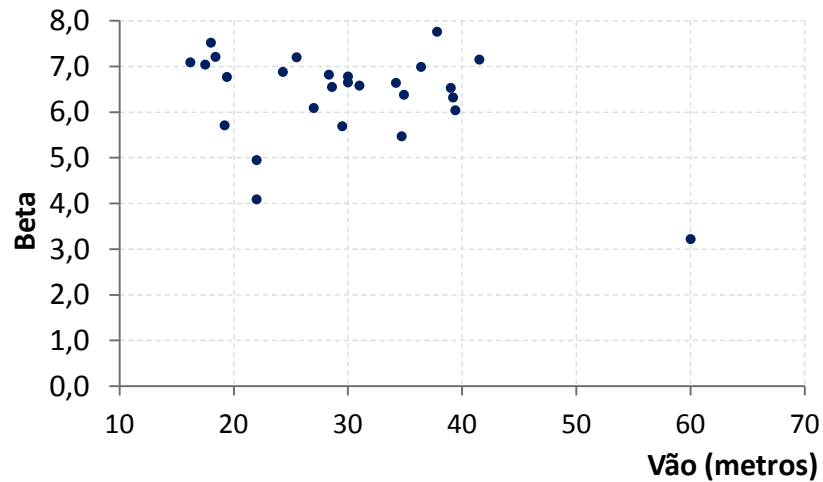
TB-450 (calibrado)



Modelo Proposto



TB-450 (Sem Calibração)





Desenvolvimento de um Modelo de Carga Móvel para Pontes Brasileiras baseado em Dados WIM



Análise de carga móvel – Caminhões Isolados



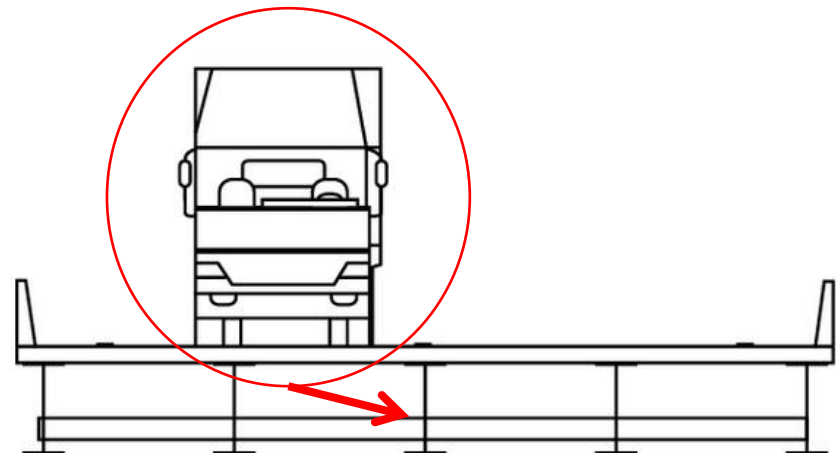
- Somente vigas internas foram analisadas
- Por praticidade, usou-se fatores de distribuição como proposto pela AASHTO

$$LE_{Single} = LE_{Truck} \frac{DF_1}{1.2}$$

Sendo o fator de distribuição de carga DF_1 dado por:

$$DF_1 = 0.06 + \left(\frac{S}{14}\right)^{0.4} \left(\frac{S}{L}\right)^{0.3} \left(\frac{K_g}{12Lt_s^3}\right)^{0.1}$$

L é o comprimento do vão em pés, S é o espaçamento entre longarinas em pés, t_s é a espessura da laje em polegadas e K_g representa a rigidez longitudinal





Análise de carga móvel – Múltiplos Caminhões

- Dois caminhões – superposição:

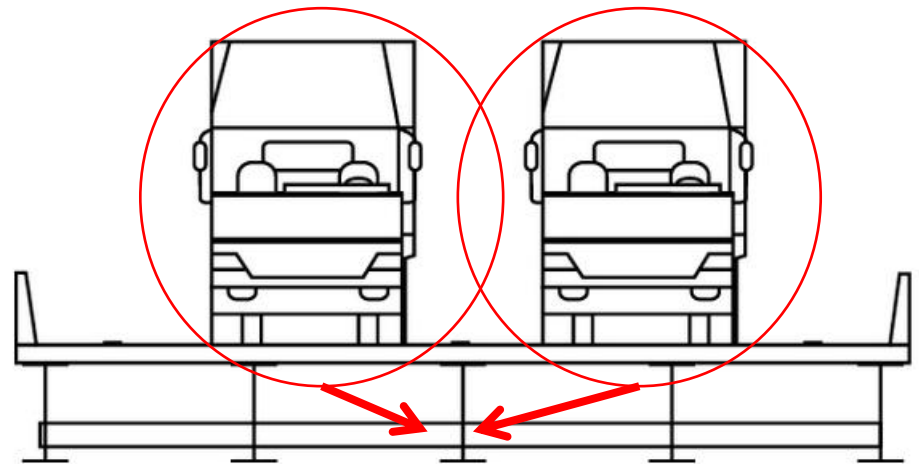
$$LE_{Mult} = \frac{DF_1}{1.2} LE_{Trk_1} + \left(DF_2 - \frac{DF_1}{1.2} \right) LE_{Trk_2}$$

O fator de distribuição DF_2 é dado por:

$$DF_2 = 0.075 + \left(\frac{S}{9.5} \right)^{0.6} \left(\frac{S}{L} \right)^{0.2} \left(\frac{K_g}{12L_s^3} \right)^{0.1}$$

Duas situações diferentes de presença de caminhões múltiplos são abordadas nesta tese:

- Ocorrências de todos os caminhões sobre a ponte
- Ocorrência de caminhões pesados



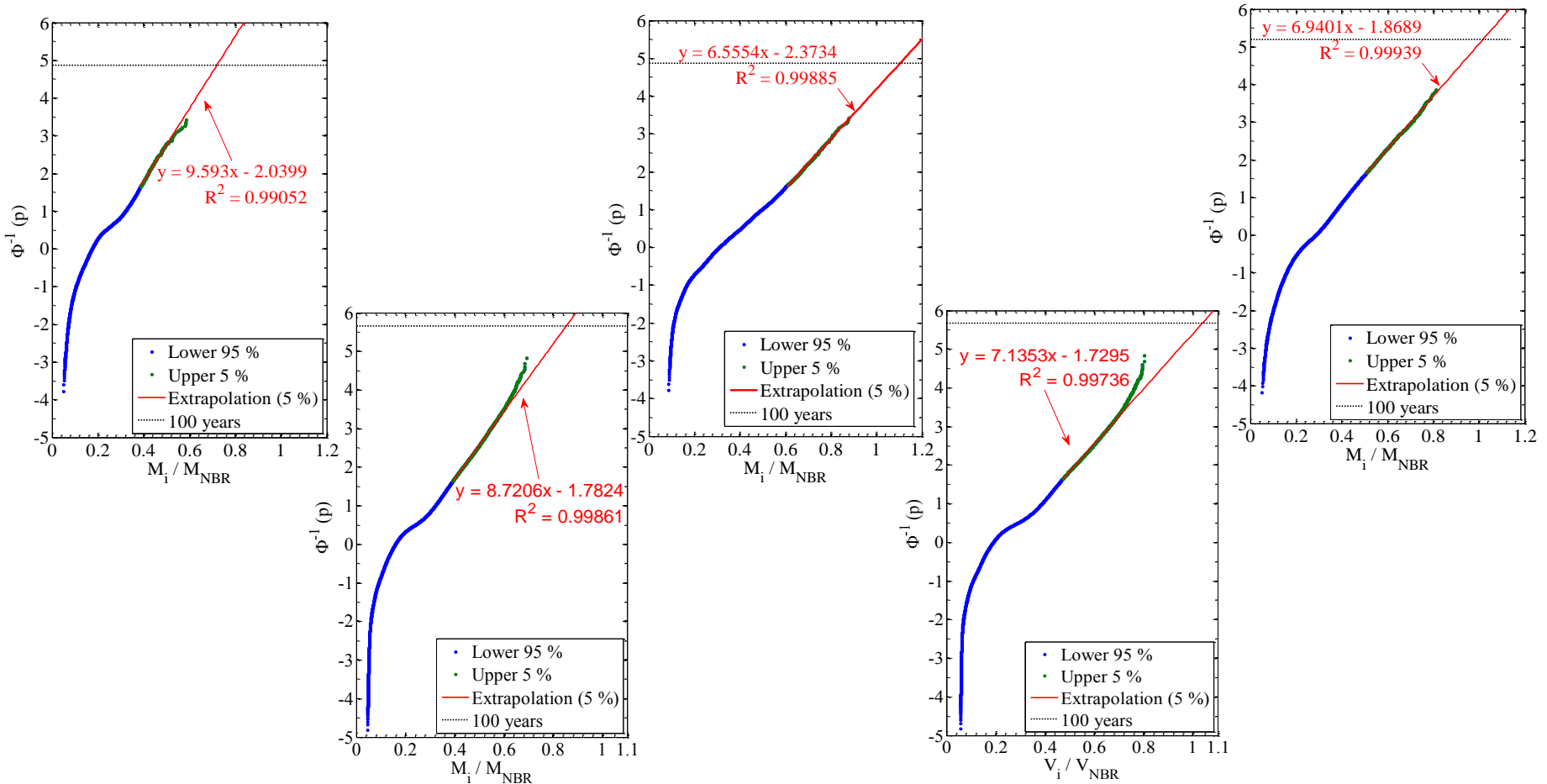


Papel de Probabilidade Normal – Bias Factor



- Bias Factor: razão entre o efeito de carga médio dos caminhões em relação ao efeito de carga pelo TB-450

$$\text{Bias Factor: } \lambda_i = \mu_{\text{WIM}} / \text{TB-450}$$

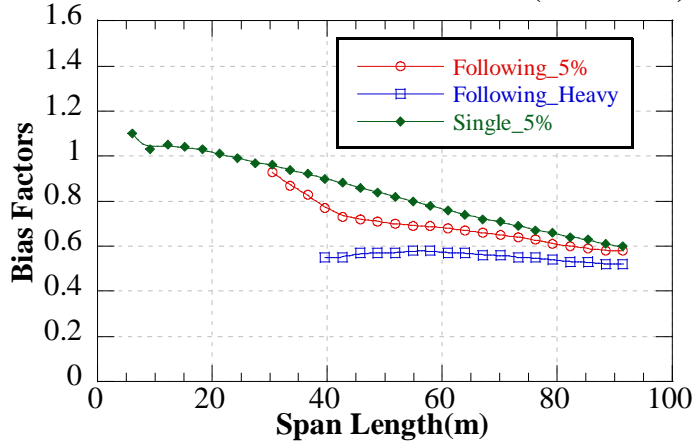




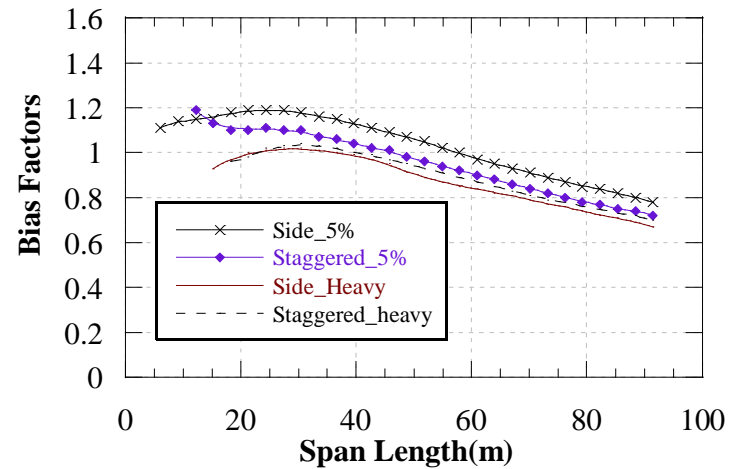
Bias Factors – Momento Positivo



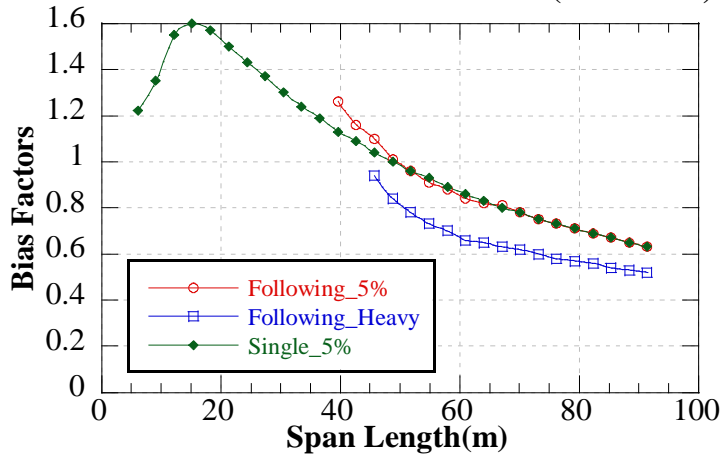
Bias Factors for Positive Moments (One Lane)



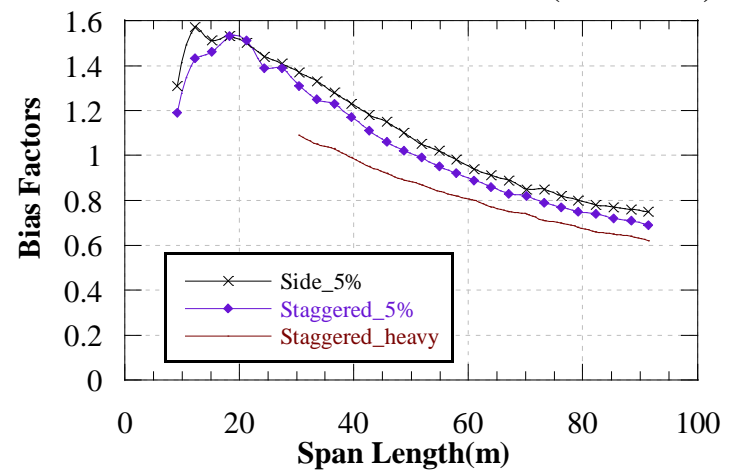
Bias Factors for Positive Moments (Two Lanes)



Bias Factors for Positive Moments (One Lane)

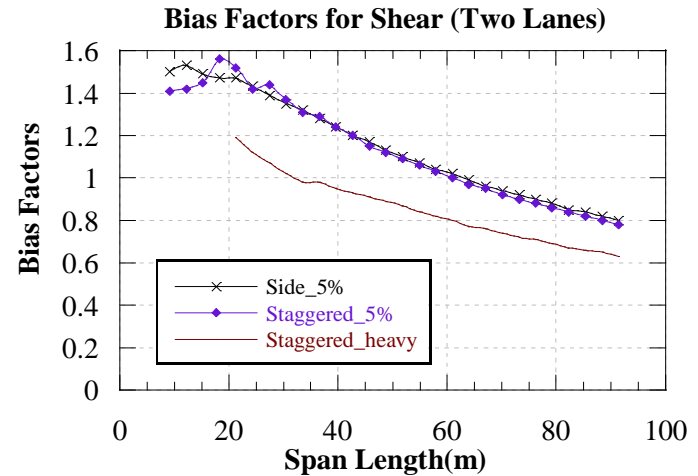
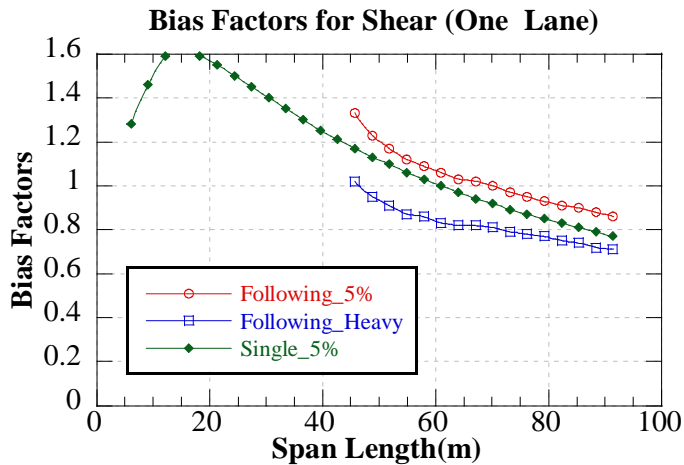
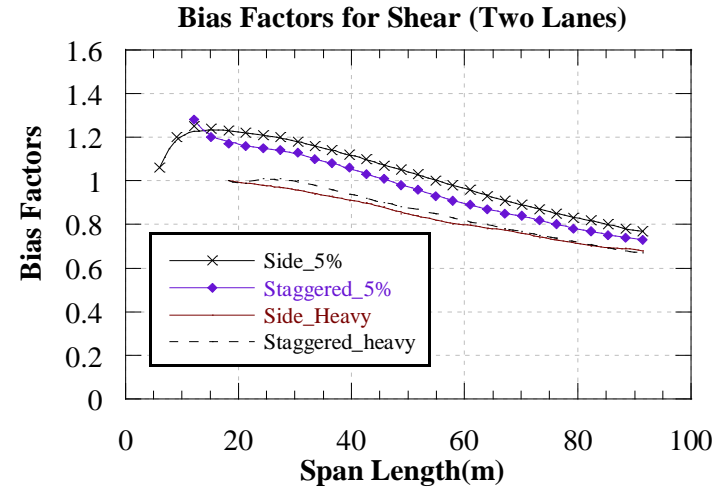
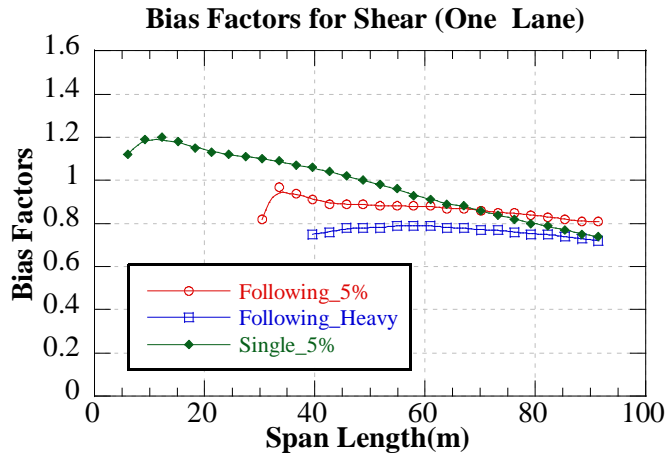


Bias Factors for Positive Moments (Two Lanes)





Bias Factors – Cisalhamento (shear)

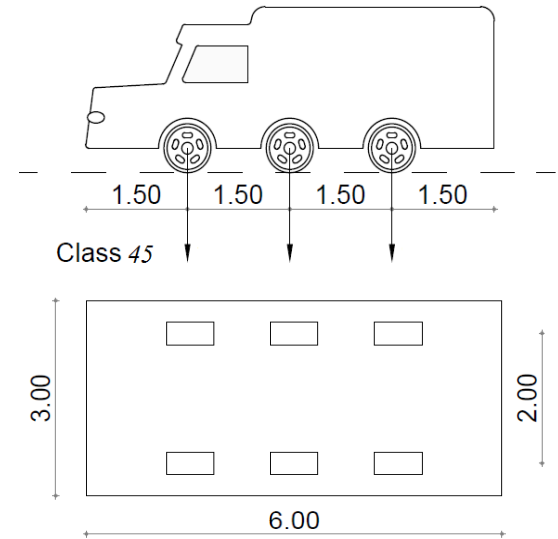
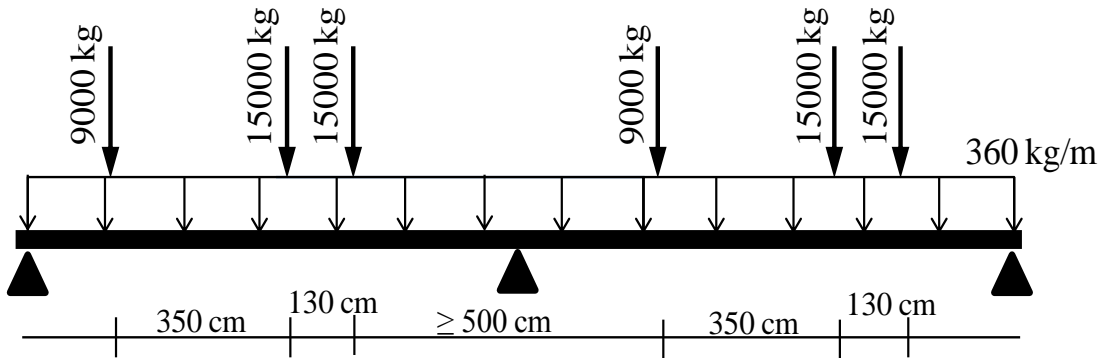
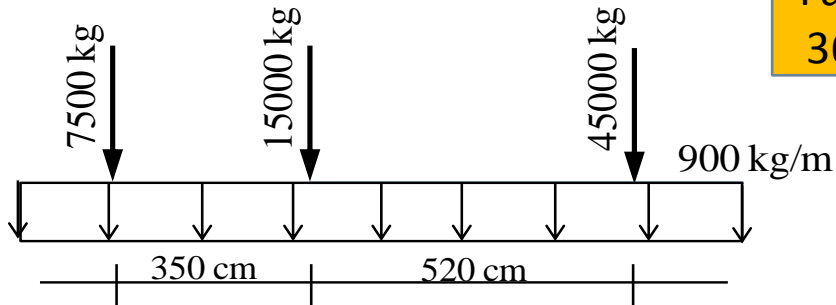




Desenvolvimento do Modelo de Carga Móvel

- Detectaram-se os caminhões de maior representatividade no tráfego
- 2C, 3C, 2S2, 2S3, 3S3 foram considerados na definição do modelo de carga
- Chegou-se ao seguintes modelos:

Faixa de 360cm.



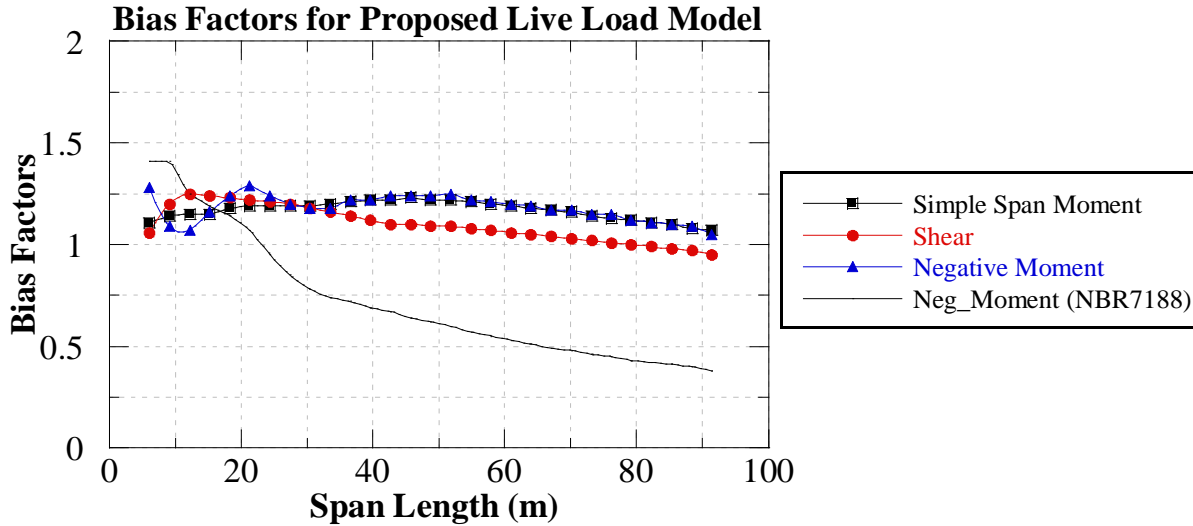
Classe	Caminhão (KN)	Carga Distrib. (KN/m ²)
450	450	5
240	240	4



Desenvolvimento do Modelo de Carga Móvel

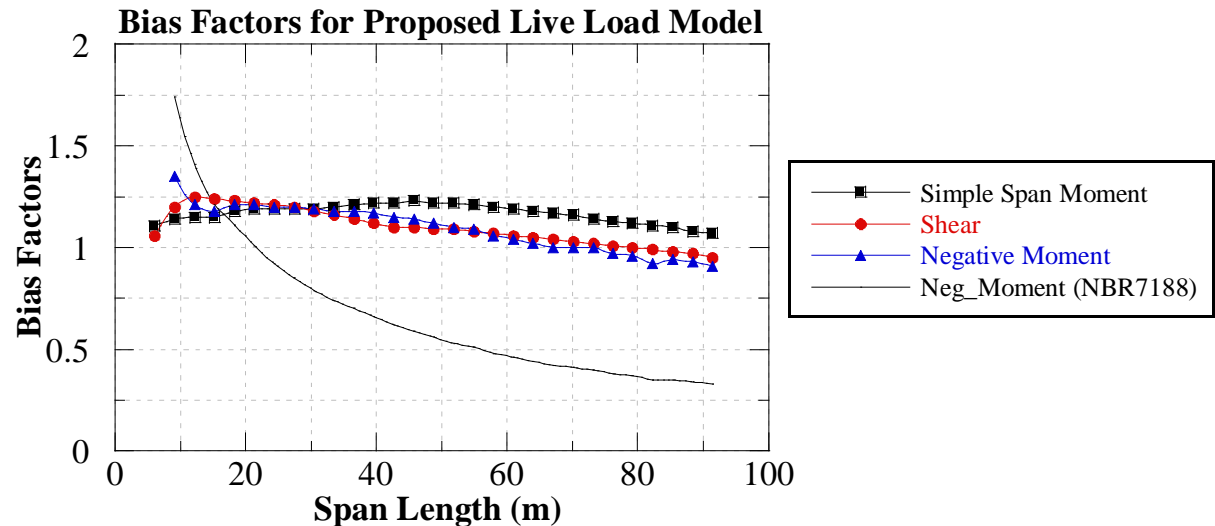


- Relação esforços Caminhões/Modelo (bias factor):



São Paulo

Rio Grande do Sul





Conclusões



- Os dados WIM foram essenciais para se alcançarem os resultados obtidos
- Os mesmos dados podem ser utilizados para análise de diferentes tipos de pontes e pavimentos
- É necessário aumentar o banco de dados para realizar análises mais confiáveis – mais estações WIM pelo Brasil
- Calibrações devem ser feitas periodicamente (a cada 6 -12 meses) para obter resultados úteis e válidos
- É necessário aumentar o número de pontes e com diferentes tipologias
- Caminhões 2C, 3C e 3S3 são os mais comuns: em média representam 54%



Conclusões



- Ocorrência de dois caminhões pesados em faixas adjacentes tem uma probabilidade de ocorrência muito baixa - 0,02%
- TB-450 apresenta valores baixos de probabilidade de falha para os Estados Limites Estudados: Flexão e Cisalhamento $P_f = 10^{-4}$ a 10^{-8}
- TB-450 apresenta valores de probabilidade de falha não uniformes em relação ao comprimento de extensão das pontes
- TB-450 apresenta probabilidade de falha mais alta para pontes de maiores vãos (cisalhamento, momento positivo ou negativo);
- Probabilidade de falha são mais baixas em pontes protendidas
- Probabilidades de falhas menos conservadoras poderiam ser adotadas, mas para este fim programas de manutenção teriam que ser mais efetivos



Bibliografia



- Portela, E. L. Analysis and Development of a Live Load Model for Brazilian Concrete Bridges Based on WIM data. São Paulo, 2018. 160.
- Portela, E. L.; Teixeira, R. M.; Bittencourt, T. N.; Nassif, H. Single and multiple presence statistics for bridge live load based on weigh-in-motion data. Journal of Structure and Materials, v. 10, p. 1163-1173, 2017.
- Luchi, L.A. Reavaliação do trem-tipo à luz das cargas reais nas rodovias brasileiras, Tese de Doutorado, EPUSP. 2006.
- Gindy, M., and Nassif, H., H. Multiple presence statistics for bridge live load base on weigh-in-motion data. Journal of the Transportation Research Board, No. 2028, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., 2007.
- Nowak, A. S. Live load model for highway bridges. Structural Safety, 13, 1999. pp 53-66.
- Nowak, A.S. Calibration of the LRFD Bridge Design Code. NCHRP Report 368, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C. 1999.
- O'Brien, E.J. and Enright, B. Modeling same-direction two-lane traffic for bridge loading. Structural Safety, No. 33, pp. 296-304. 2011.
- Rossigali, C., E. Atualização do Modelo de Cargas Móveis para Pontes Rodoviárias de Pequenos Vãos no Brasil. Tese de D.Sc. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 2013.
- Ferreira, L. M. Development of truck weight limits for concrete bridges using reliability theory. Ph.D. Thesis – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 2006.

Agradecimentos



arteris



ANTT
Agência Nacional de
Transportes Terrestres



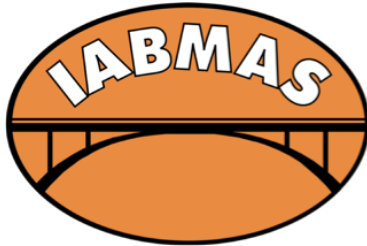
POLI USP



CNPq
Conselho Nacional de Desenvolvimento
Científico e Tecnológico



CAPES



<http://www.iabmas.org/>



<http://www.iabmas-br.org/>

Obrigado!!!