

# Pesagem em Movimento de Trens com Uso da Técnica B-WIM em um Viaduto de Concreto Armado

José Alves de Carvalho Neto - [decarvalho@ufpa.br](mailto:decarvalho@ufpa.br)  
Luis Augusto Conte Mendes Veloso - [lveloso@ufpa.br](mailto:lveloso@ufpa.br)

*Universidade Federal do Pará/ Instituto de Tecnologia/ Faculdade de Engenharia Civil e Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil*



Anais do 56º Congresso Brasileiro do Concreto  
CBC2014  
Outubro / 2014

© 2014 - IBRACON - ISSN 2175-8182



# SUMÁRIO

## 1.Introdução

## 2.Algoritmo para Pesagem e Caracterização de Veículos (MOSES)

### 2.1. Validação do algoritmo

## 3.Modelagem em Elementos Finitos da OAE 01

### 3.1. Obtenção das linhas de influência da ponte

### 3.2. Estudo da influência da velocidade na determinação das cargas

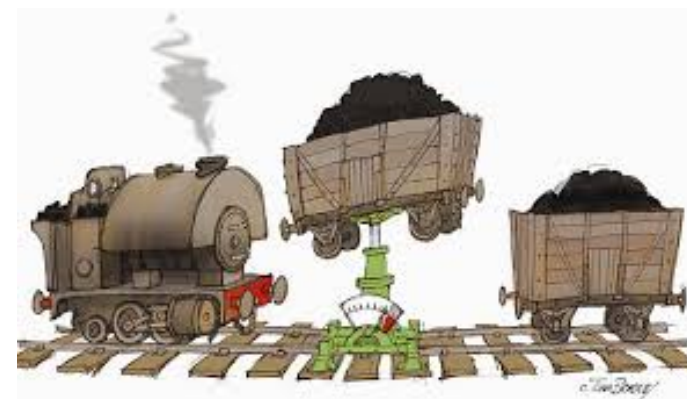
## 4.Caracterização e pesagem (dados experimentais)

## 5.Conclusões



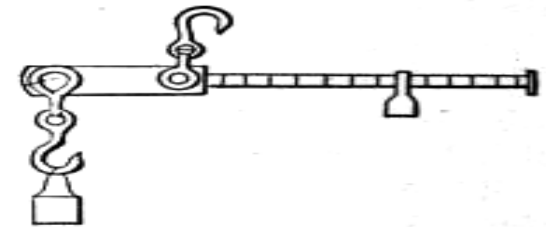
# 1.Introdução

- Estudos sobre cargas de tráfego se tornaram mais comuns devido à expansão do tráfego rodoviário de mercadorias na segunda metade do século XX;
- Verificou-se que o aumento das cargas transportadas levavam a deterioração dos pavimentos e pontes;
- No caso das ferrovias, o controle do tráfego é importante para auxiliar a manutenção da via permanente e das obras de arte (controle da carga transportada).



# 1.Introdução

- **A EXIGÊNCIA PARA PESAR VEÍCULOS**
  - Pedágios para a conservação de rodovias de acordo com o peso dos veículos;
  - Dificuldades: veículos “içados” para a pesagem;
  - Advento das células de carga;
  - Criação das plataformas de pesagem;
  - Processo de pesagem muito lento



# 1.Introdução

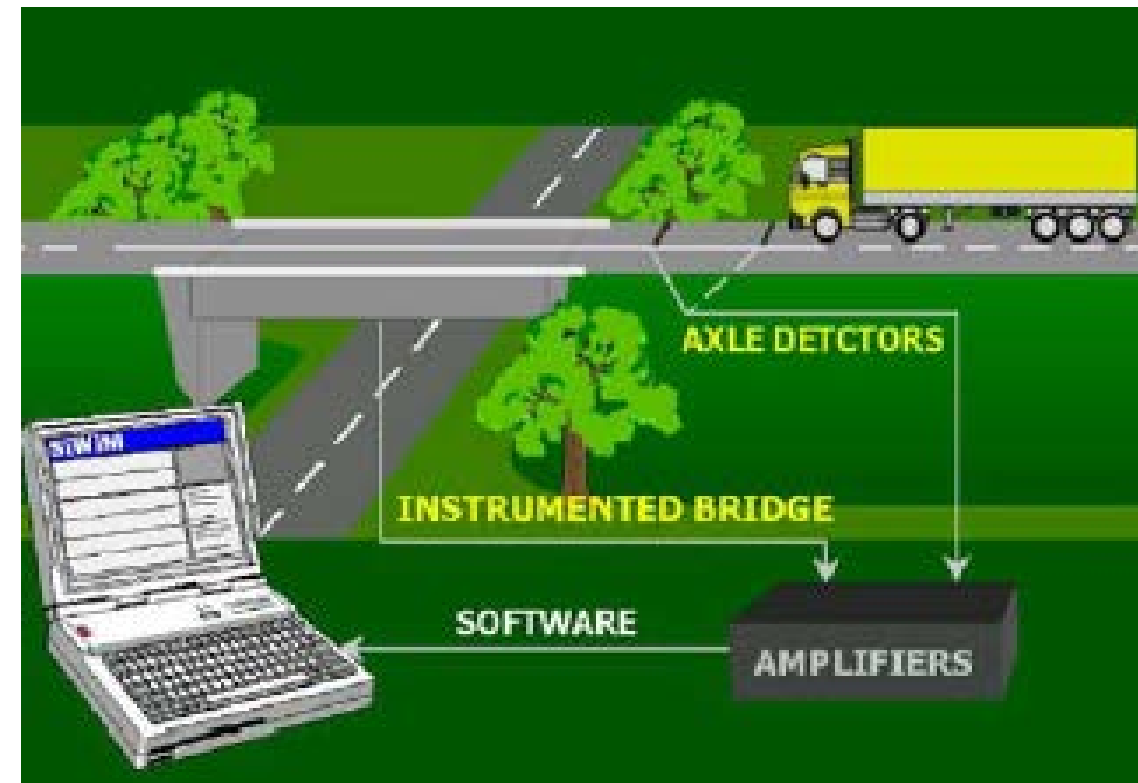
- **SISTEMAS DE MEDIÇÕES ATUAIS**

- Sistemas “Weigh-in-Motion” (WIM)

A pesagem do veículo é feita durante o tráfego sobre a via



WIM



B-WIM

# 1.Introdução

- O “Bridge Weigh-In-Motion” (B-WIM), desenvolvido na década de 70 por Moses (Moses, 1979);
- Amplamente usado na Austrália na década de 80 com a implementação do sistema “Culway” (Tierney, 1996);
- Difusão na Europa pelo projeto WAVE (1998).

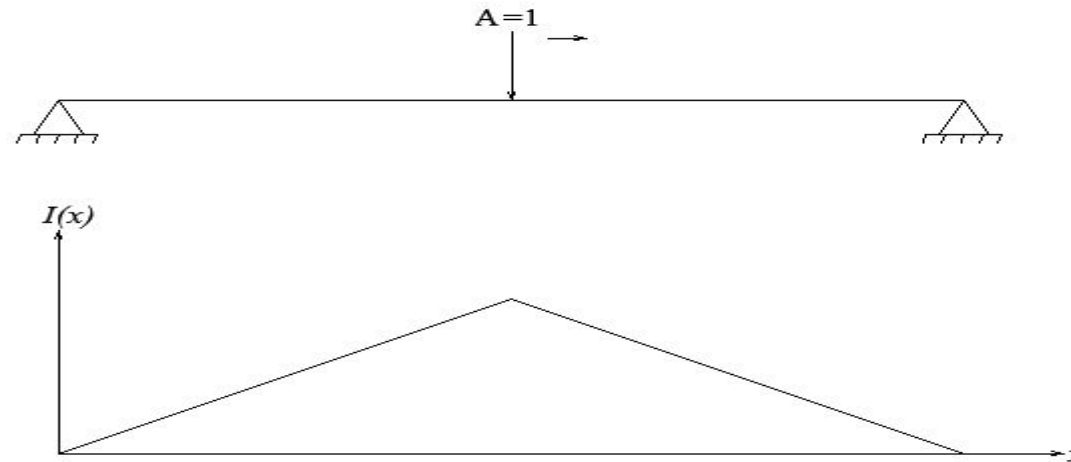
## VANTAGENS

- Vantagens:
  - Pesagem ao longo do comprimento da ponte enquanto que os demais medem uma faixa do pavimento;
  - Possibilidade de eliminar o efeito dinâmico;
  - Aplicação em rodovias e ferrovias.



# 2. Algoritmo para Pesagem e Caracterização de Veículos

- **B-WIM: Algoritmo de Moses (1979)**
- Baseado na linha de influência da ponte (longarinas)



- Na determinação experimental do momento fletor em uma seção transversal (longarinas) através das deformações medidas.

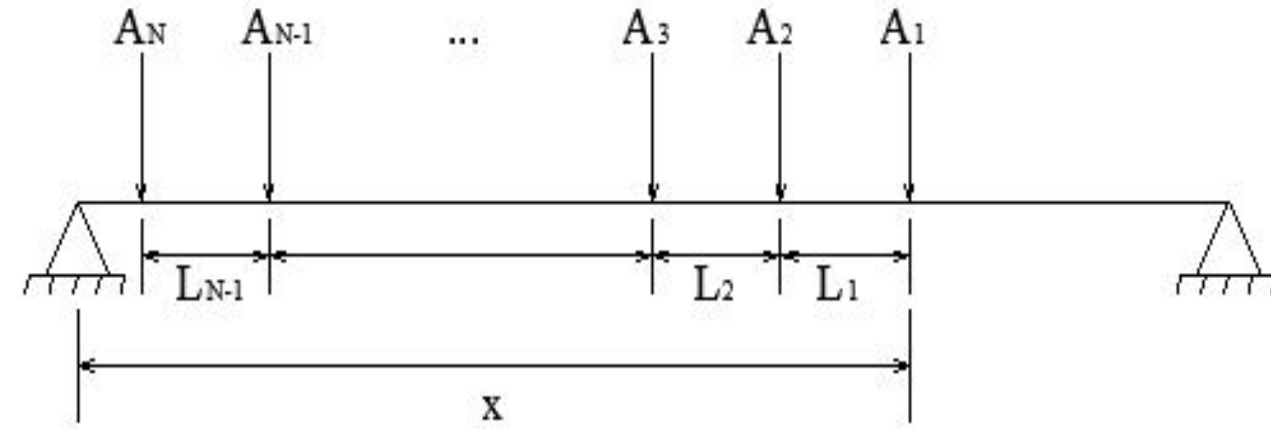
$$M_i = f(\varepsilon_i)$$

$f(\varepsilon_i)$  é a função das deformações medidas na viga  $i$ .

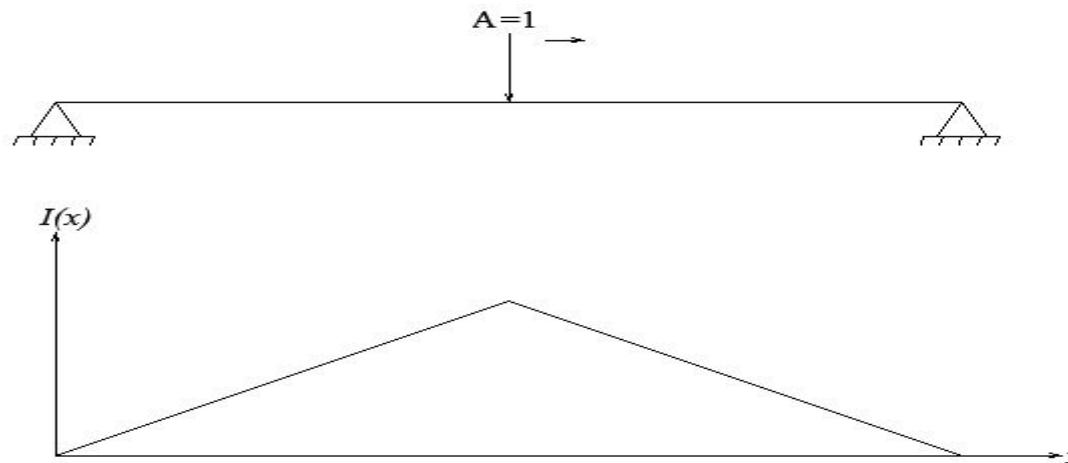
# 2. Algoritmo para Pesagem e Caracterização de Veículos

- B-WIM: Algoritmo de Moses (1979)

$$M_k(t_k) = \sum_{i=1}^N A_i I_i(t_k)$$



$M(t_k)$  é o momento fletor teórico no instante de tempo  $k$ .





# 2. Algoritmo para Pesagem e Caracterização de Veículos

- **B-WIM: Algoritmo de Moses (1979)**

Função desvio quadrática  $E$

$$E = \sum_{k=1}^{t_f} [M(t_k) - M^*(t_k)]^2$$

Equação geral para o vetor  $A$ , cargas dos eixos e Peso Bruto Total do veículo (PBT)

$$\{A\} = [F]^{-1}\{M\}$$

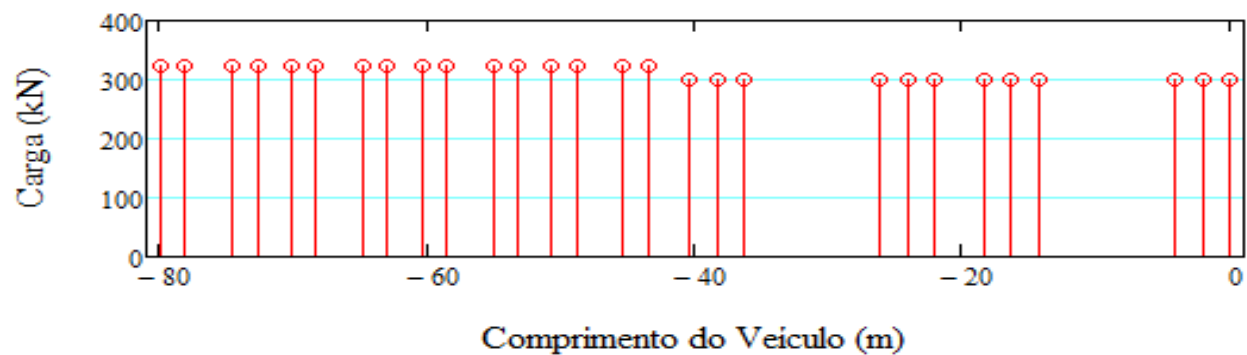
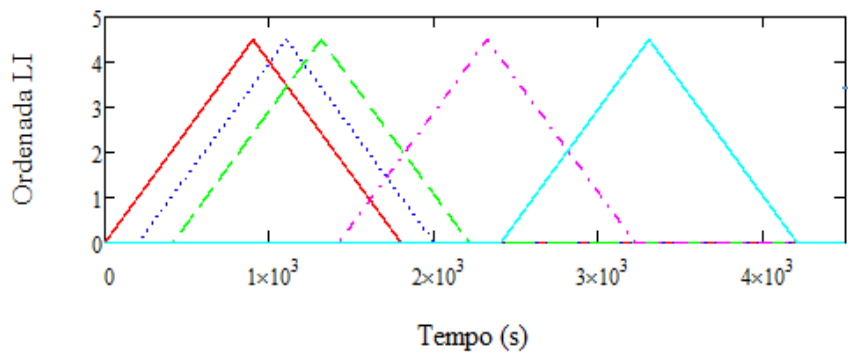
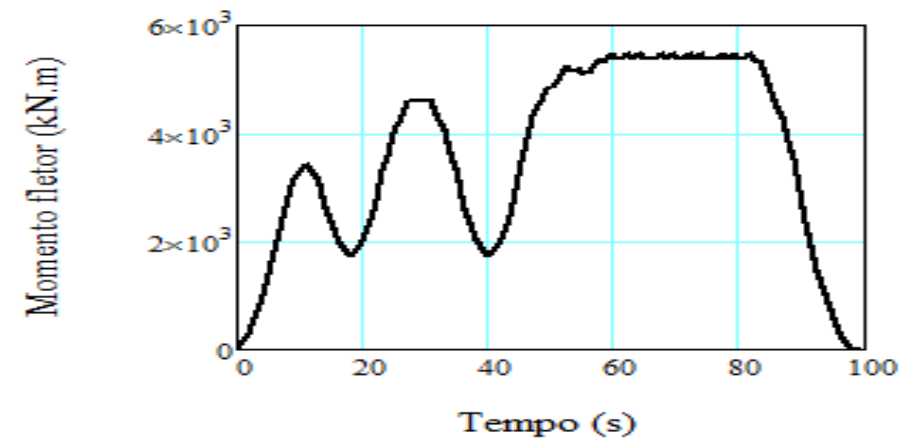
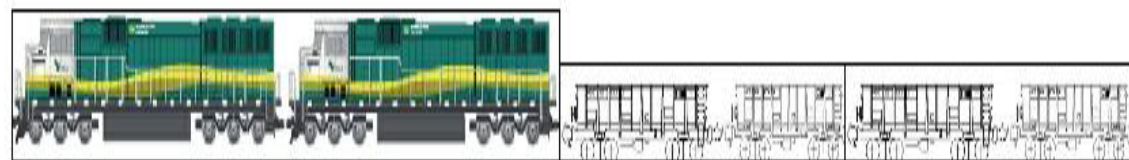
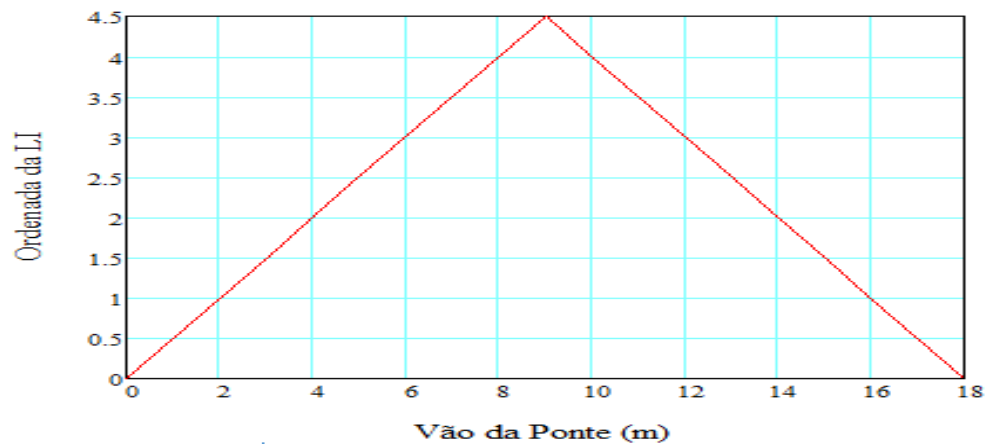
$$PBT = \sum_{j=1}^N A_j$$

$$[F] = [F_{ij}] = \sum_{k=1}^T I_i(t_k) I_j(t_k)$$

$$\{M\} = \{M_j\} = \sum_{k=1}^T M^*(t_k) I_j(t_k)$$

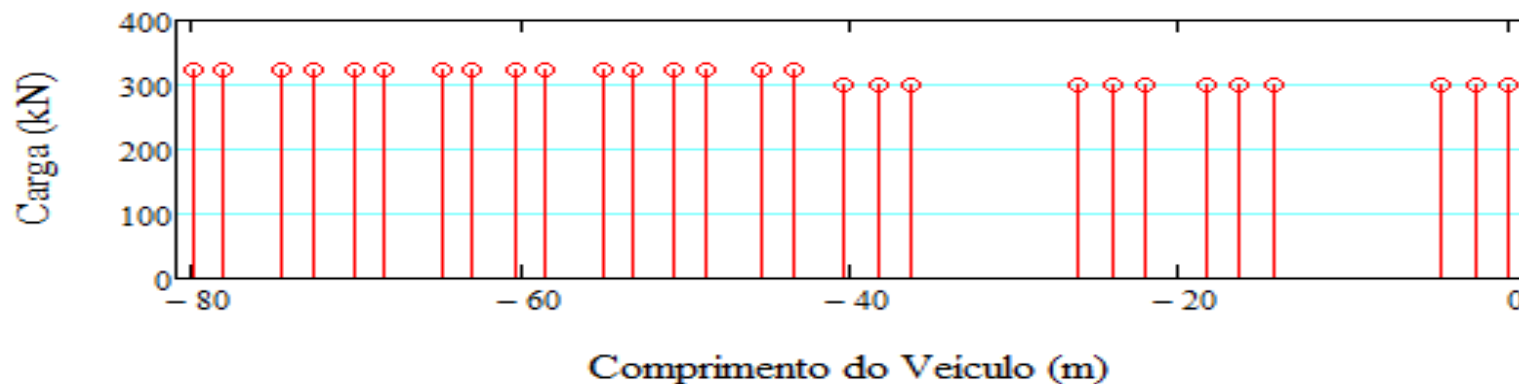


# 2.1. Validação do algoritmo

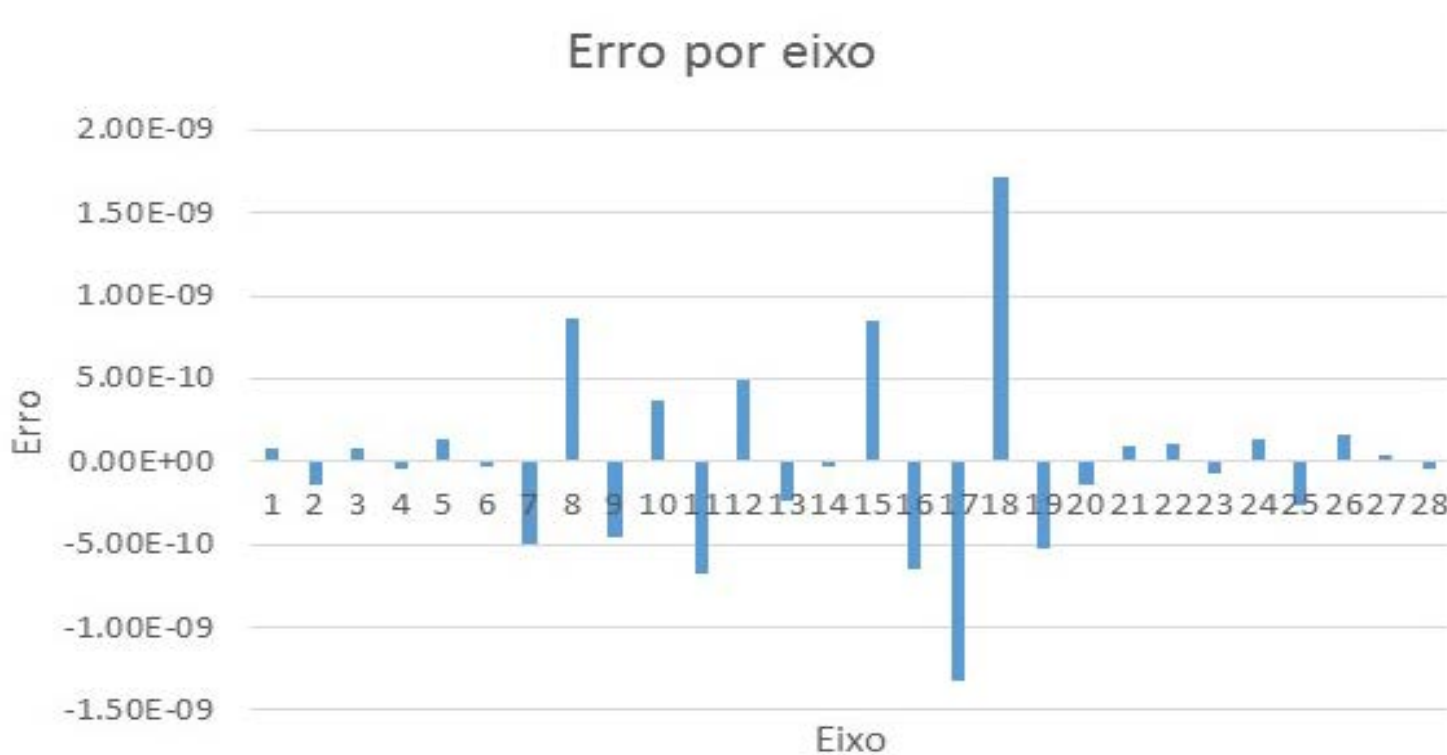


# 2.1. Validação do algoritmo

- Validação Teórica

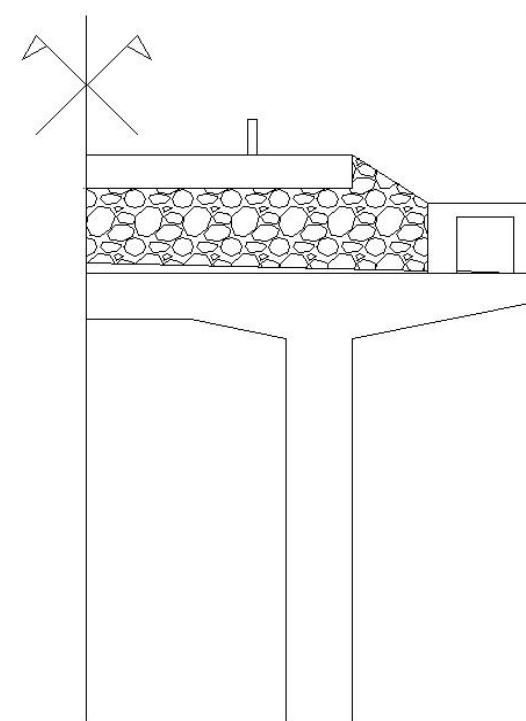


Erro por eixo



# 3. Modelagem em Elementos Finitos

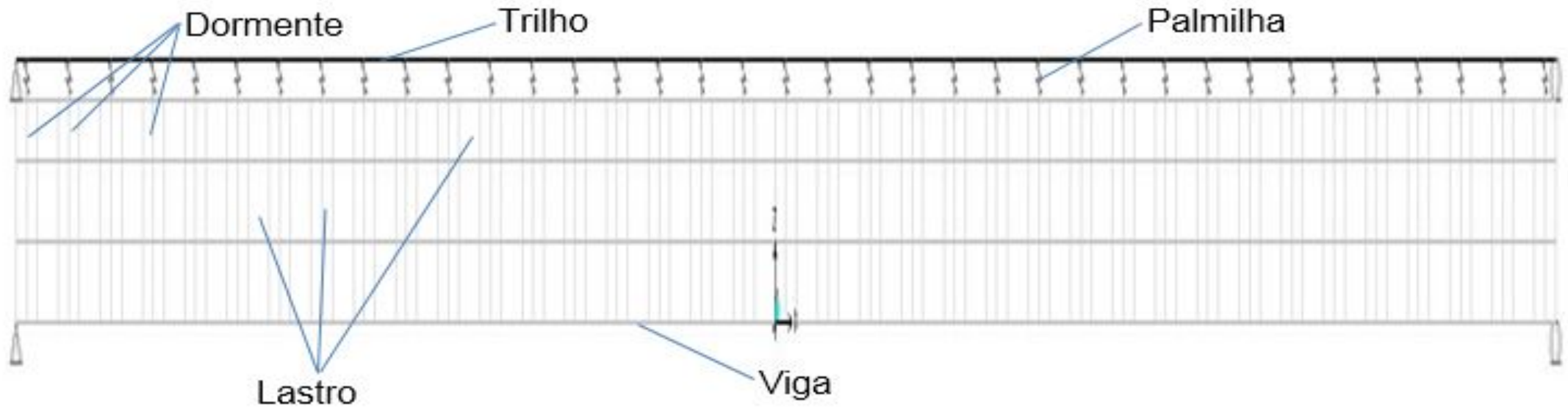
- Descrição da Estrutura



- Viaduto sobre a CFN 1ª Travessia
  - Estrutura em Concreto Armado;
  - Vão isostático de 18 m;
  - Peso Próprio 1251 kN;

# 3. Modelagem em Elementos Finitos

- Modelo numérico em elementos finitos

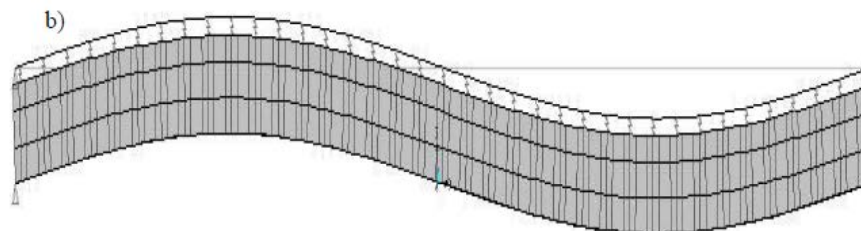
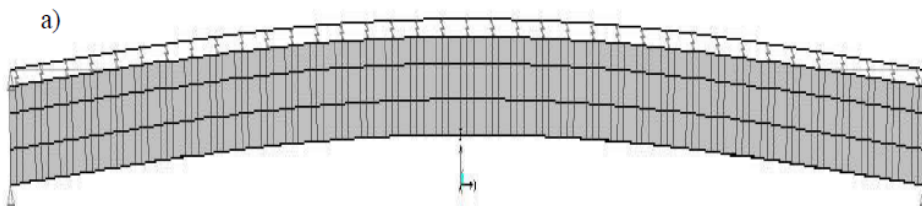


- Modelagem da estrutura e dos elementos da via (lastro, palmilhas, trilhos e dormentes)

# 3.1. Obtenção das linhas de influência

- **Análise modal**

Modo	Frequência (Hz)	Tipo
1	8,42	Flexão Vertical
2	30,21	Flexão Vertical
3	36,23	Flexão Transversal
4	61,88	Flexão Vertical
5	82,63	Flexão Transversal



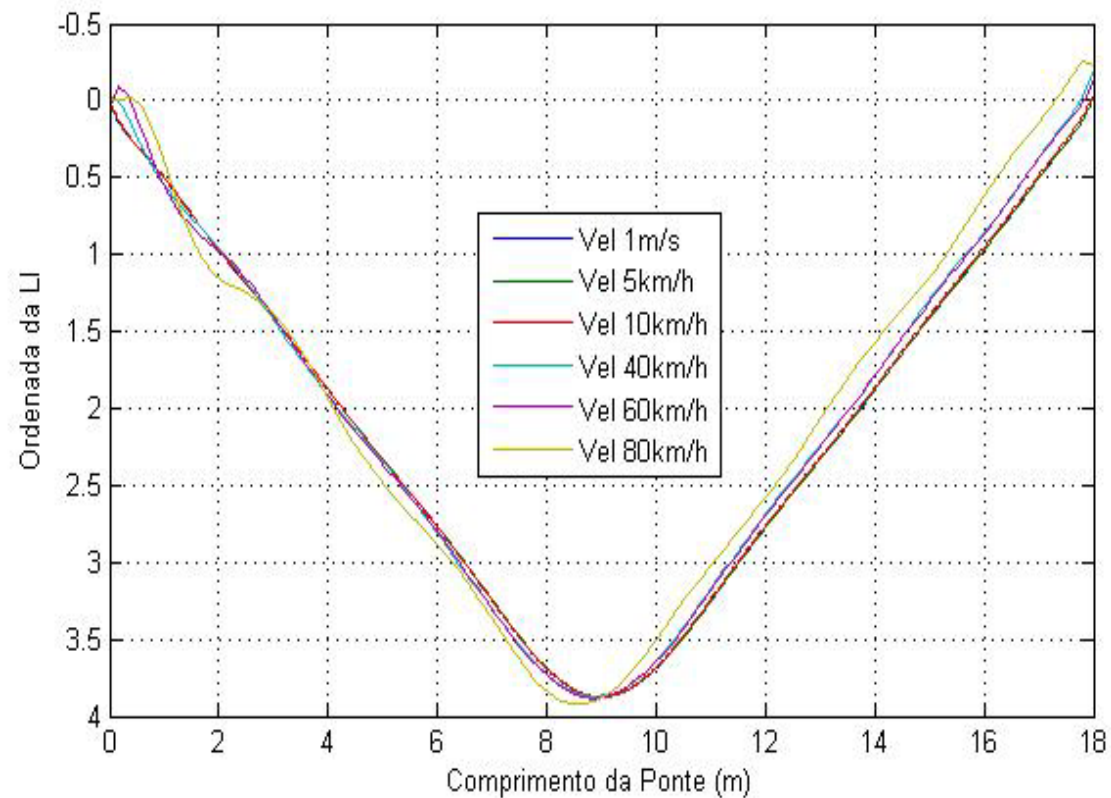
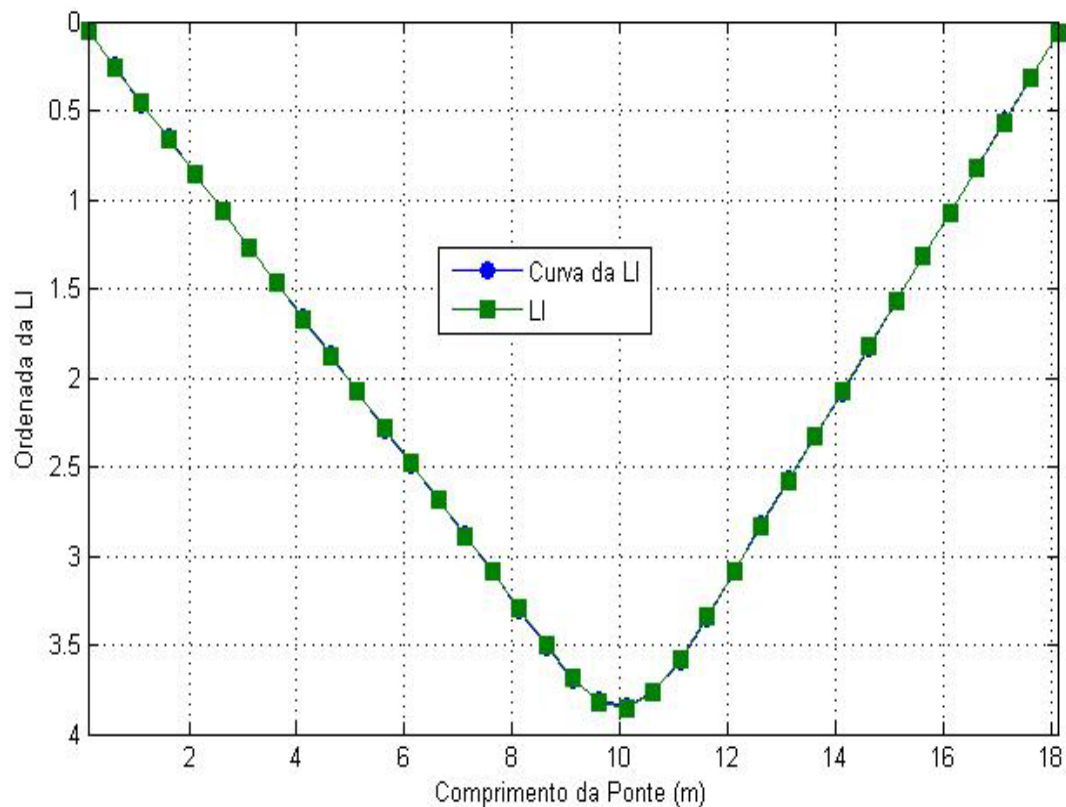
- **Frequências associadas ao carregamento**

	Frequências (Hz)					
Veículo	80 km/h	60 km/h	40 km/h	10 km/h	5 km/h	1 m/s
Locomotiva	1,56	1,17	0,78	0,19	0,10	0,07
Vagão	4,15	3,11	2,07	0,52	0,26	0,19

Média móvel de ordem 7 e um filtro digital passa-baixa com frequência de corte de 8 Hz, um valor inferior a 1ª frequência natural (8,42 Hz) e superior a maior frequência de passagem do trem (4,15 Hz para passagem dos eixos do vagão a 80 km/h).

# 3.1. Obtenção das linhas de influência

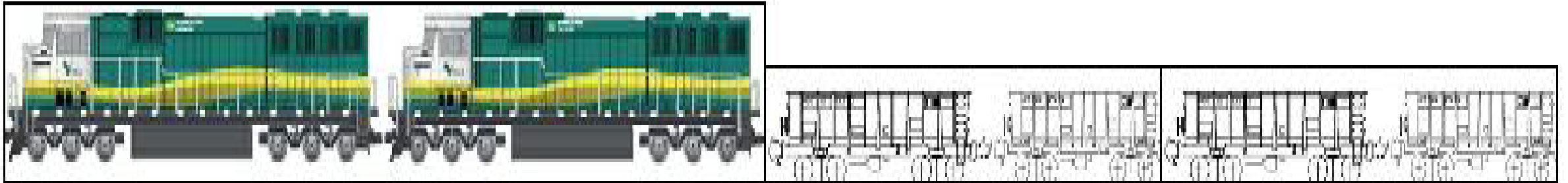
- Obtenção da linha de influência



## 3.2. Estudo da influência da velocidade

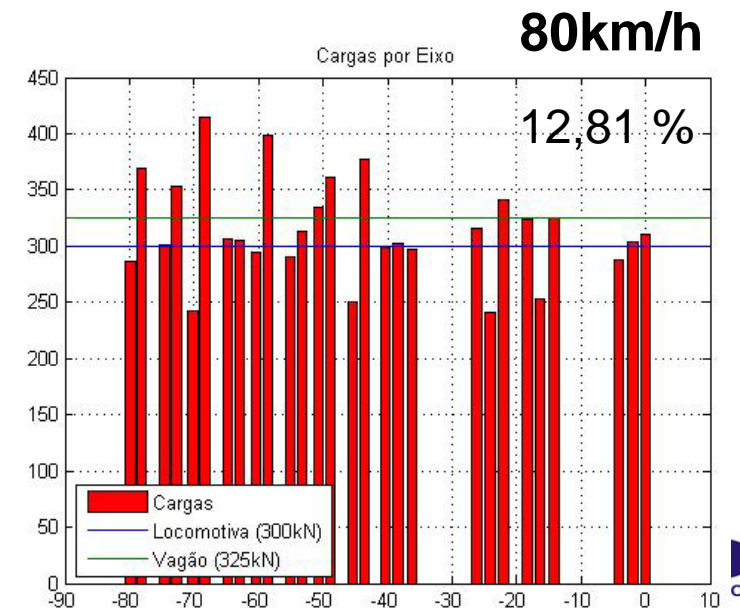
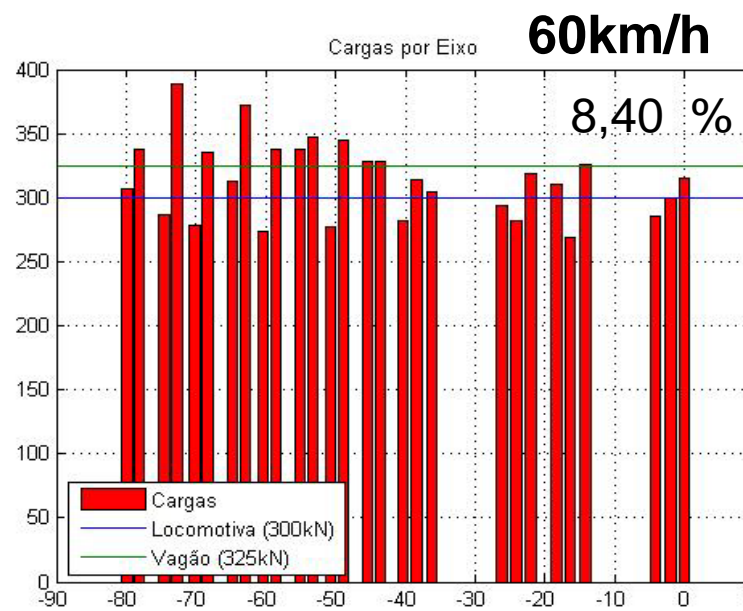
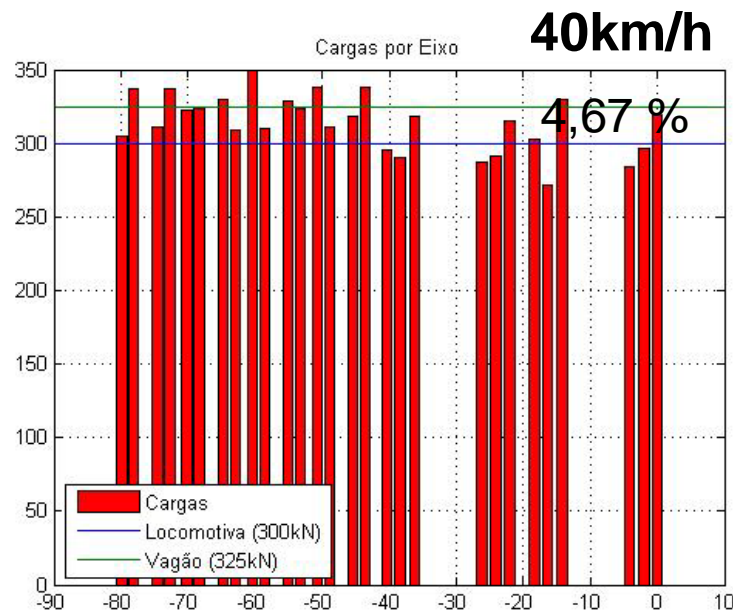
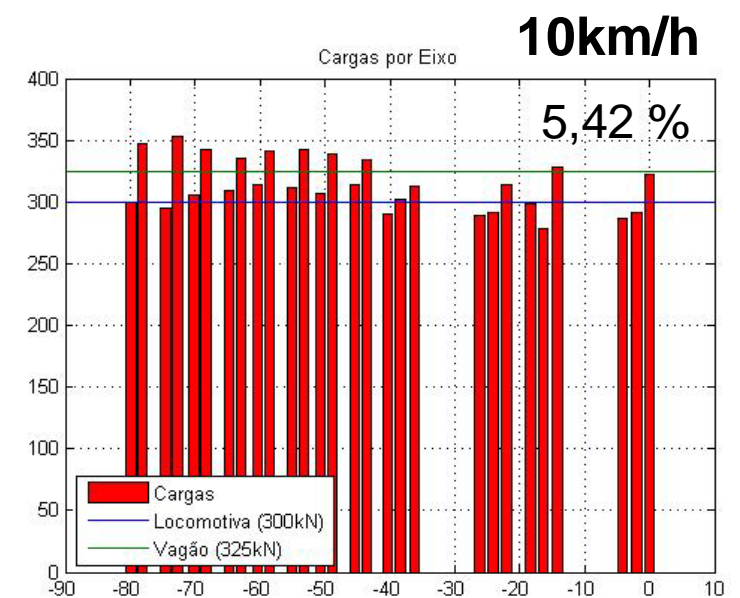
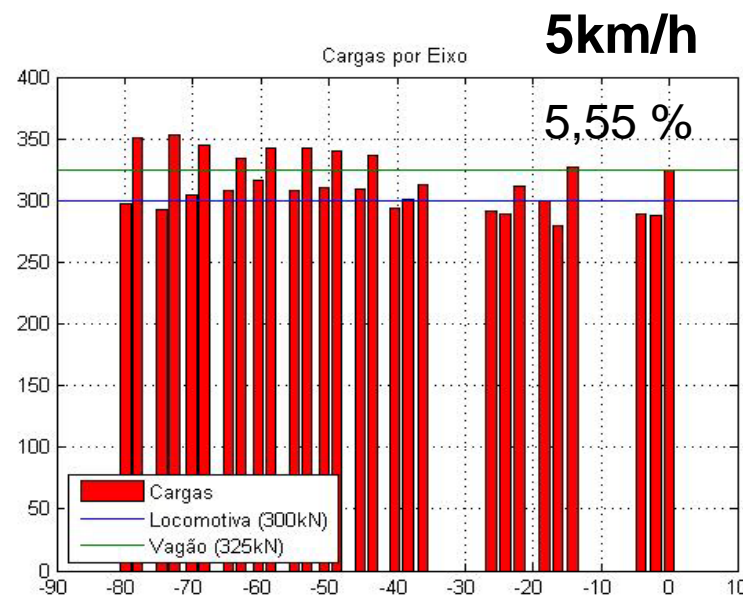
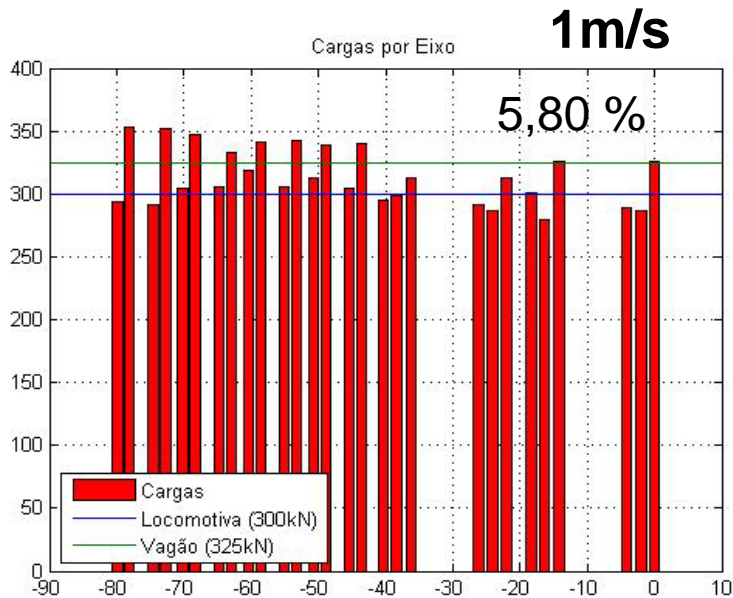
Trem: 2 locomotivas (300 kN/eixo) e 4 vagões (325 kN/eixo)

Velocidades de 1 m/s, 5 km/h, 10 km/h 40 km/h, 60 km/h e 80 km/h.





# 3.3. Estudo da influência da velocidade



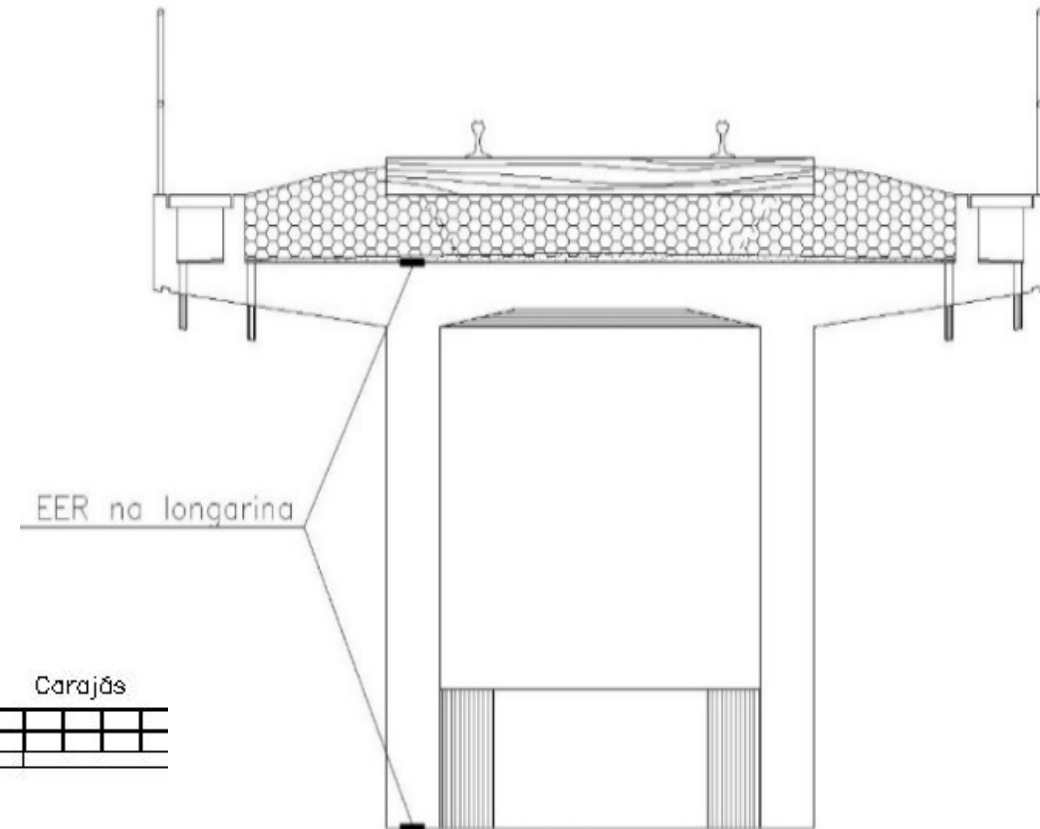
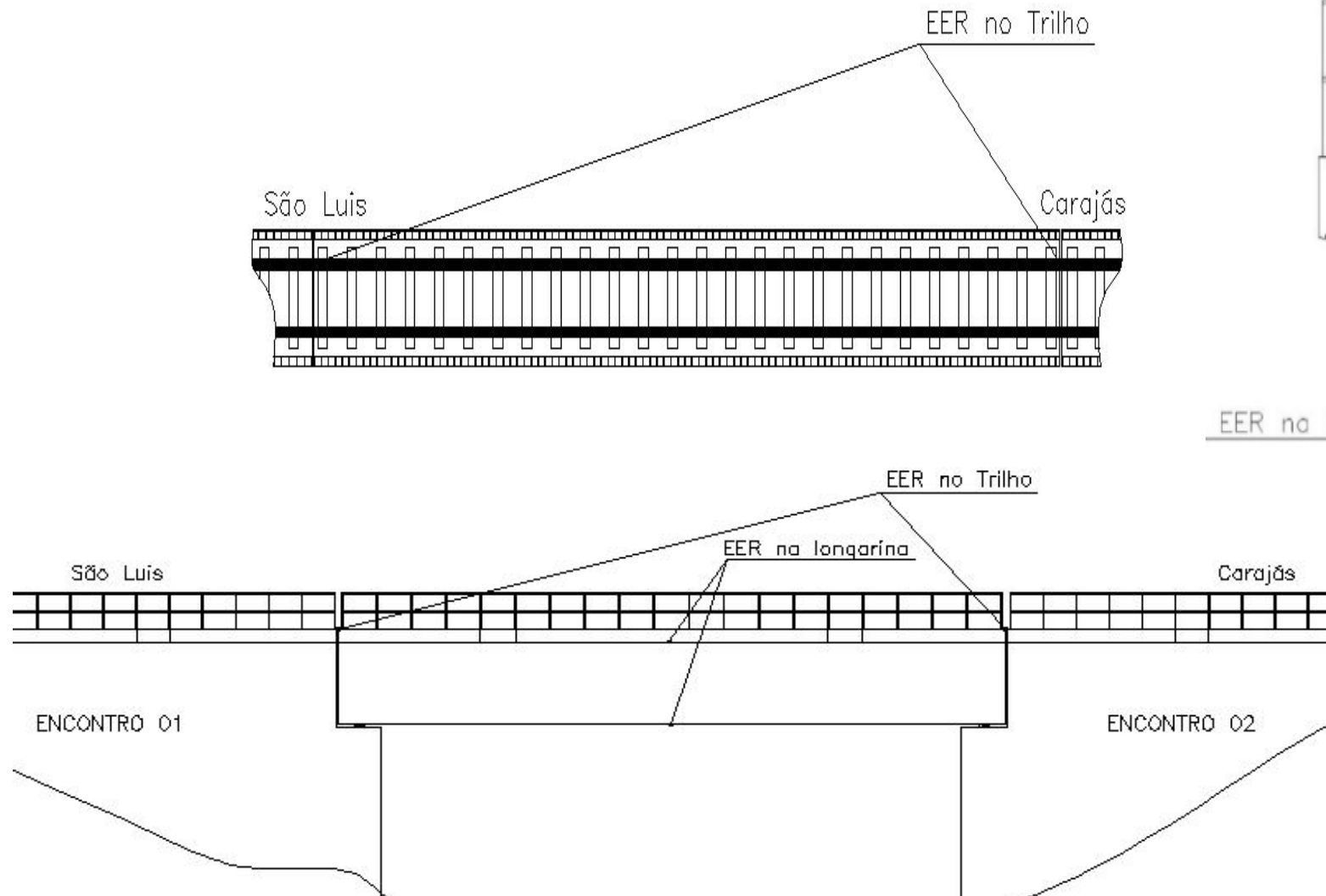
## 3.2. Estudo da influência da velocidade

Velocidades	PBT (kN)	Erro em relação ao PBT (%)	Erro Médio por eixo (%)
1 m/s	8792,49	0,085	5,80
5 km/h	8795,70	0,048	5,55
10 km/h	8795,88	0,046	5,42
40 km/h	8796,83	0,035	4,67
60 km/h	8797,64	0,027	8,40
80 km/h	8797,80	0,025	12,81



# 4. Caracterização e pesagem (dados experimentais)

- Instrumentação do viaduto



# 4. Caracterização e pesagem (dados experimentais)

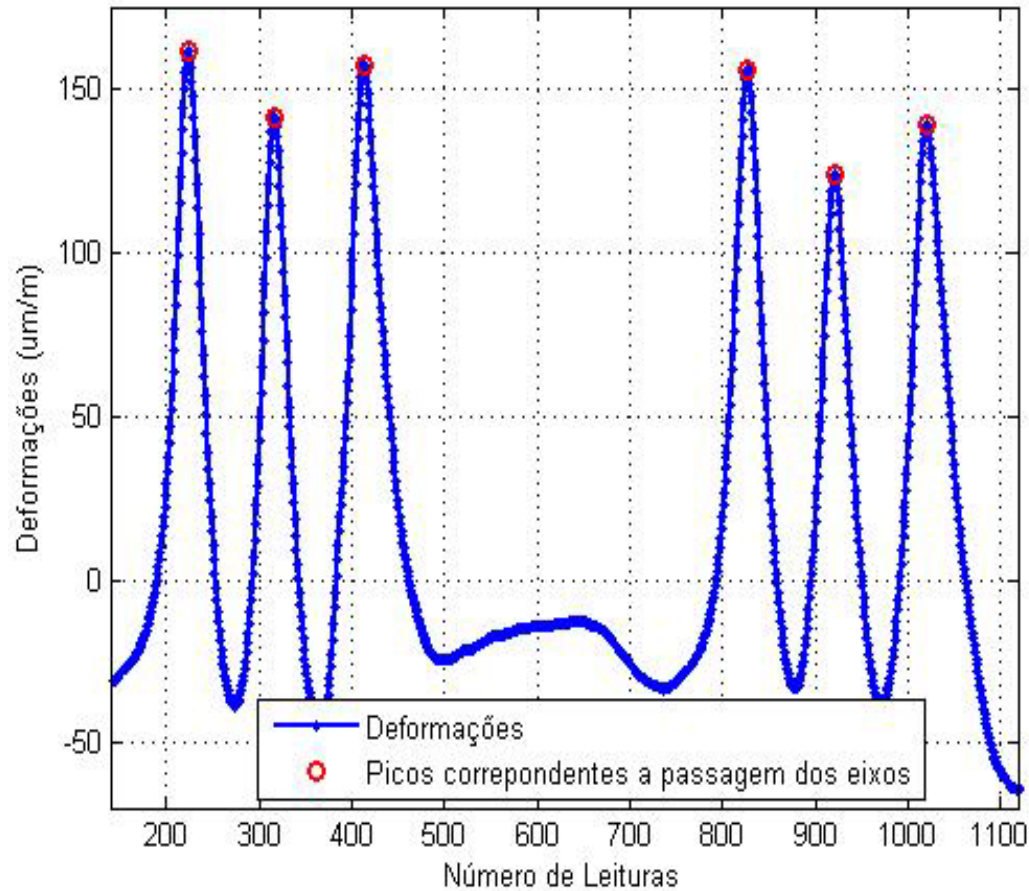
- Propriedades Mecânicas do Concreto

Testemunho	Módulo de Elasticidade (GPa)	Resistência (MPa)
Encontro E1	33,8	40,7
Encontro E1	30,2	40,8
Laje	44,7	41,6
Valores médios	36,2	41,0
Valores de projeto	27,5	18

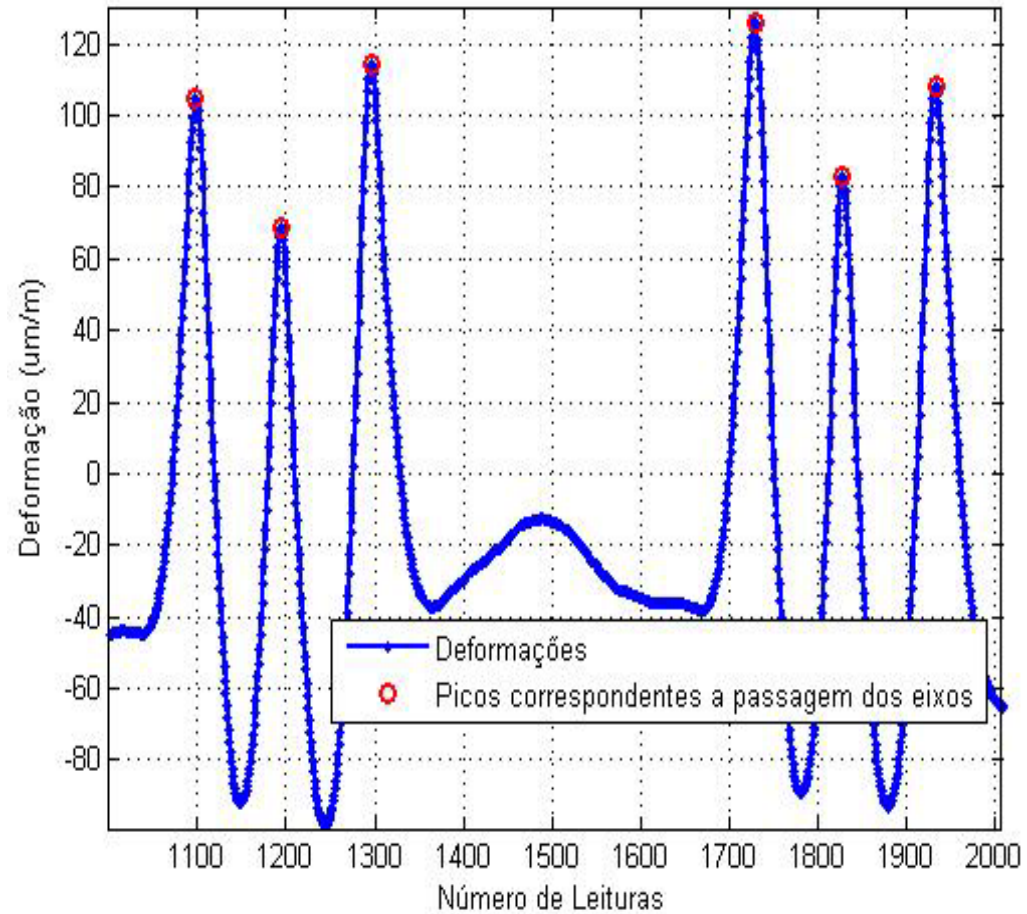


# 4. Caracterização e pesagem (dados experimentais)

- Caracterização da Locomotiva



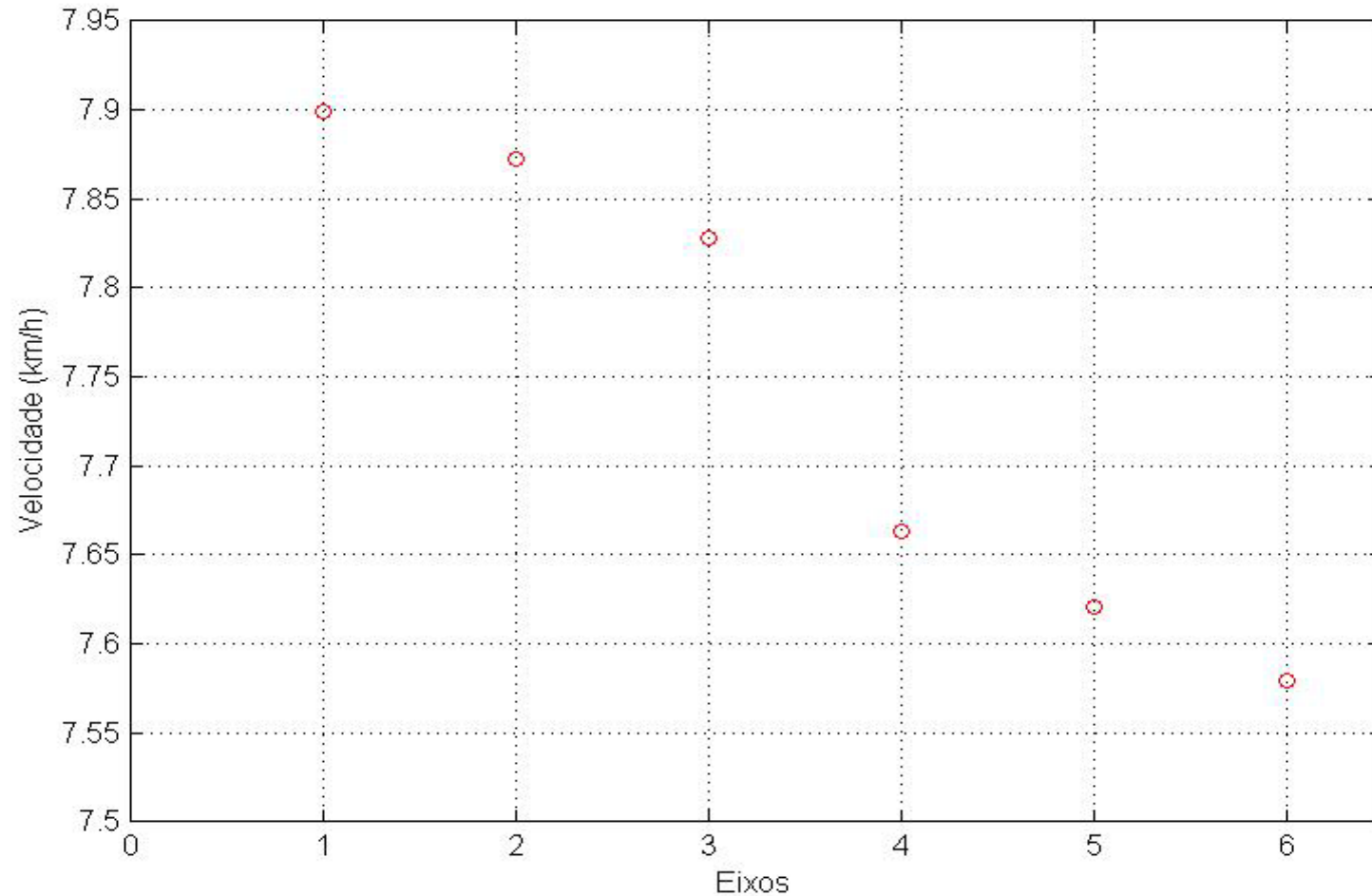
Lado de São Luis



Lado de Carajás

# 4. Caracterização e pesagem (dados experimentais)

- Caracterização da Locomotiva



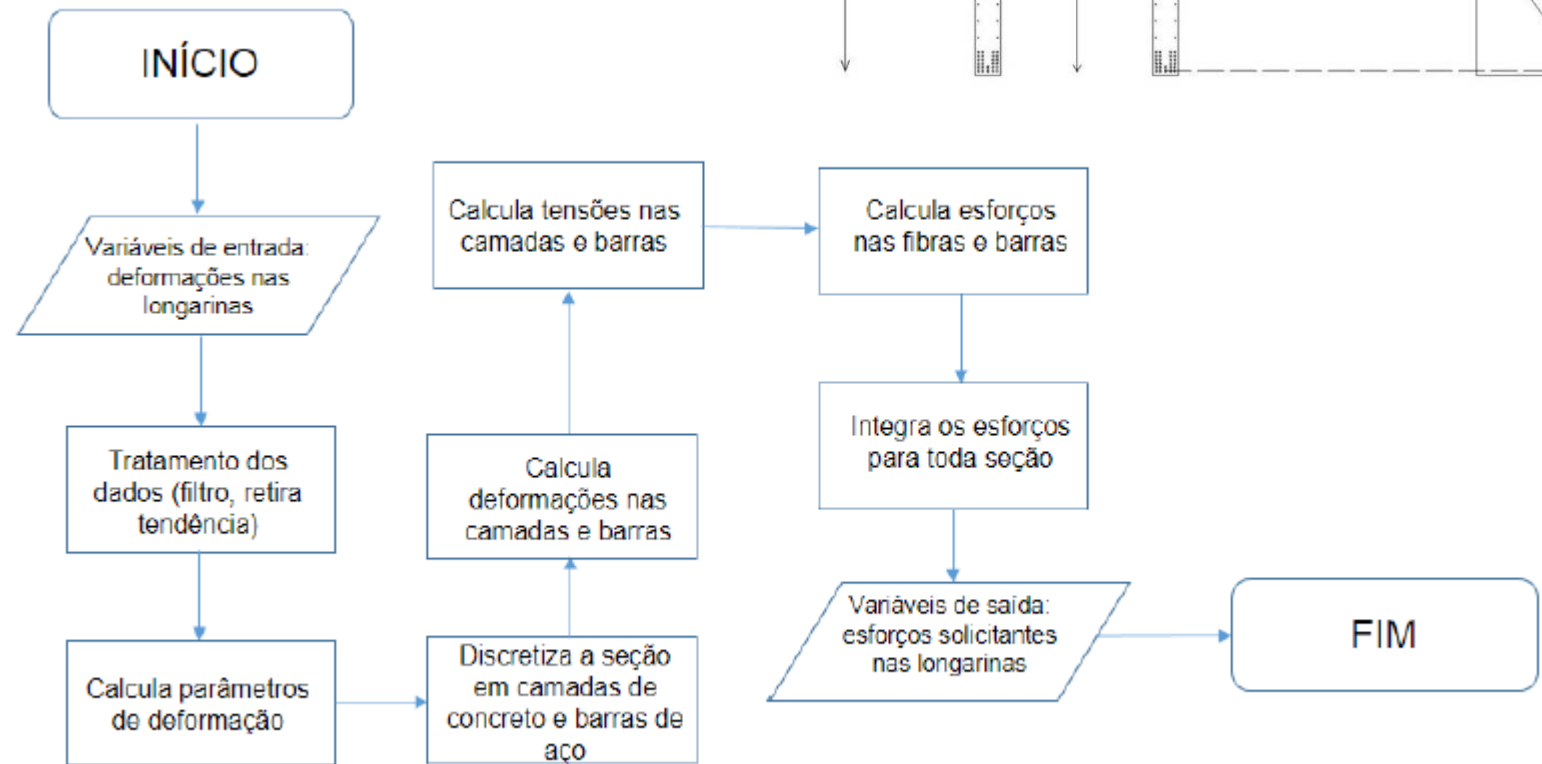
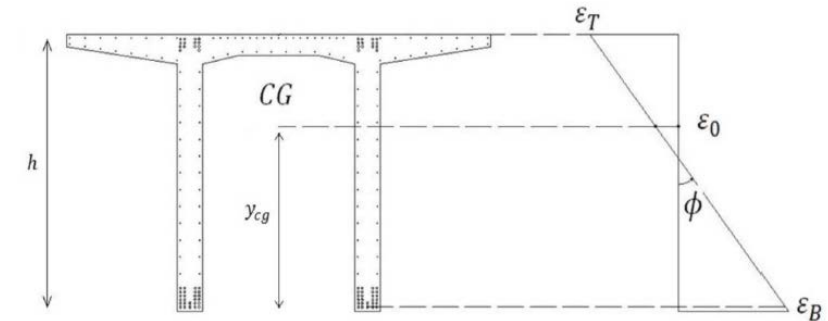
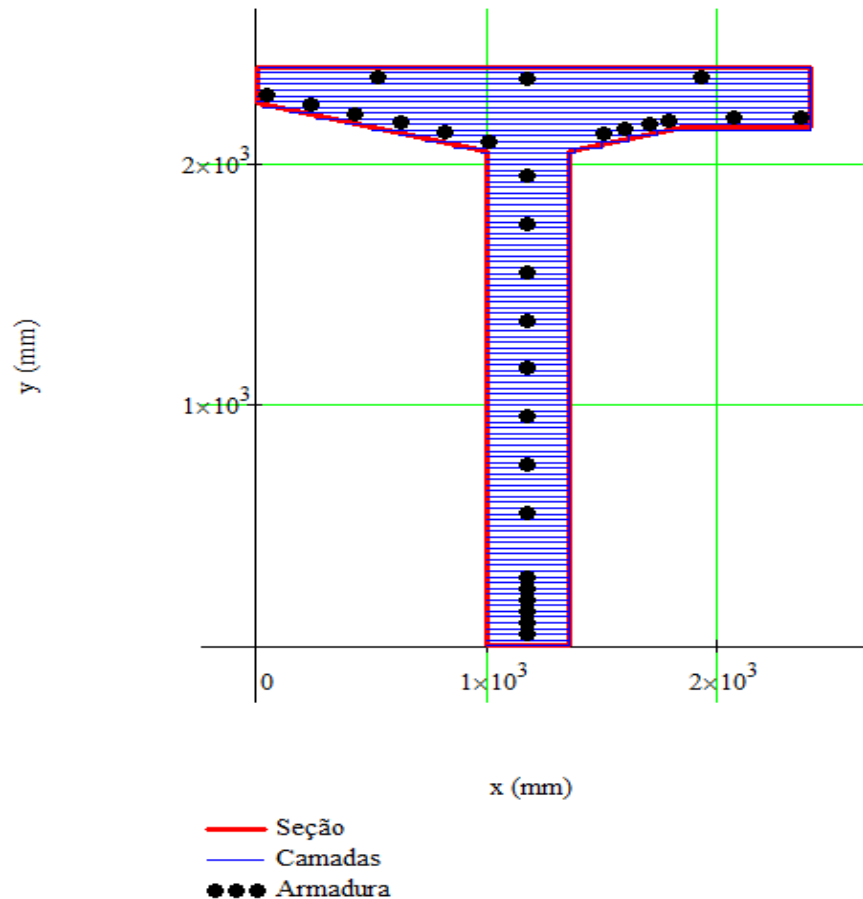
$$V_m = 7,74 \text{ km/h}$$

Distância Real (m)	Distância Obtida (m)	Diferença (m)
0	0	0
2,0193	2,0324	0,0131
2,1209	2,1198	0,0010
10,0838	9,0475	1,0362
2,1209	2,0542	0,0666
2,0193	2,1854	0,1661



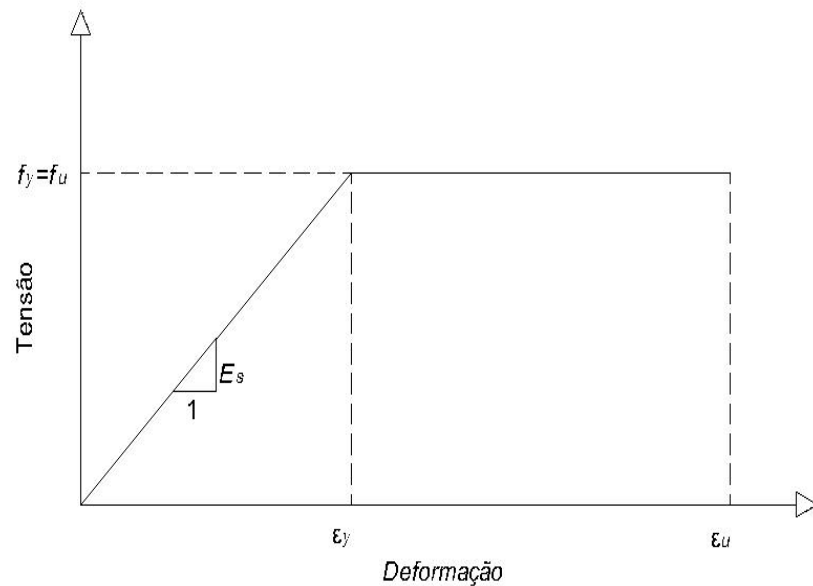
# 4. Caracterização e pesagem (dados experimentais)

- Obtenção da Série Temporal de Momento Fletor



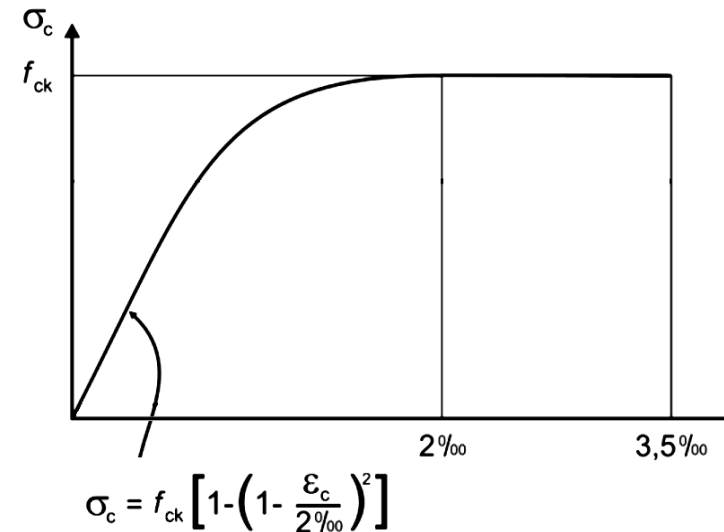
# 4. Caracterização e pesagem (dados experimentais)

- Modelos Constitutivos Aço

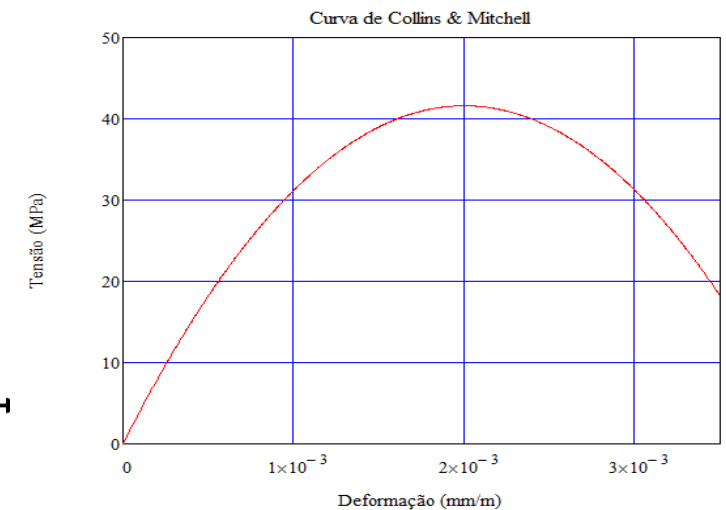


- Modelos Constitutivos Concreto

NBR 6118/2007



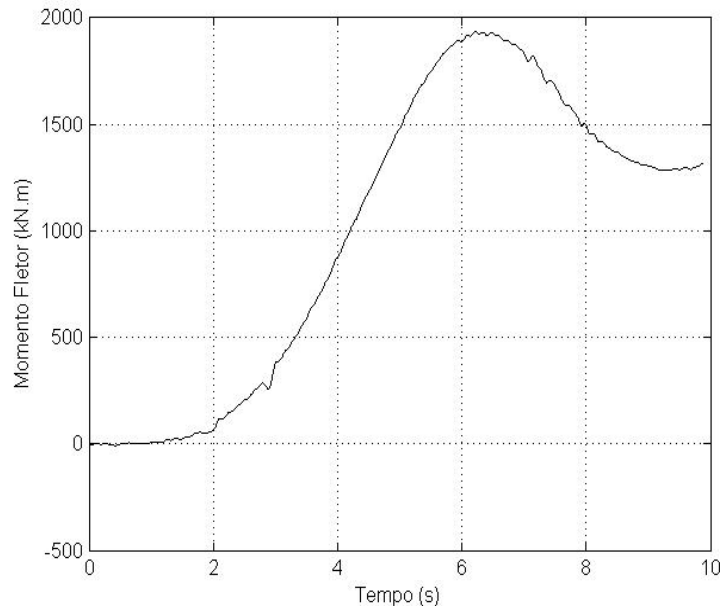
Collins e Mitchell (1991)



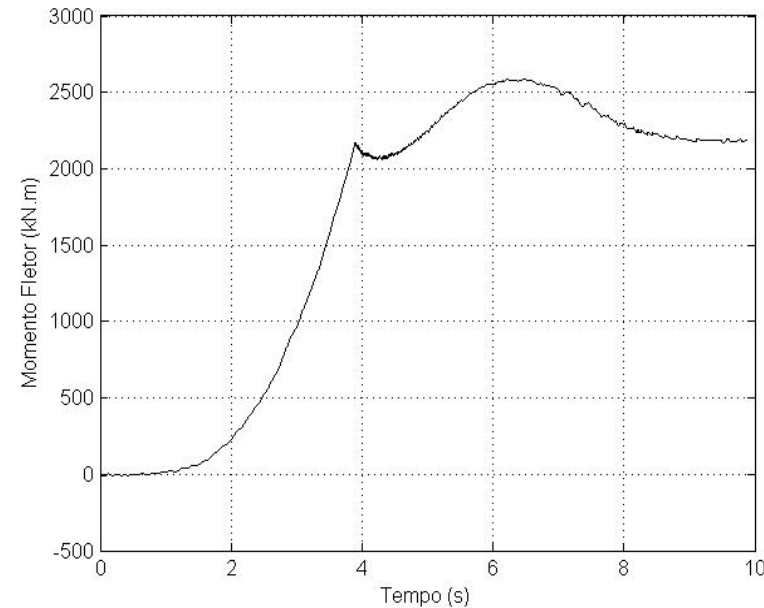


# 4. Caracterização e pesagem (dados experimentais)

- Obtenção da Série Temporal de Momento Fletor
  - Determinação do Esforço Solicitante Experimental



NBR 6118/2007



Collins e Mitchell (1991)



# 4. Caracterização e pesagem (dados experimentais)

**PBT Real**

**PBT (ABNT NBR 6118/2007)**

**PBT (Collins & Mitchell)**

1800 kN

1425,57 kN

1768,61 kN

**Erros**

20,80%

1,74%



# 5. Conclusões

- Influência da velocidade: erros médios de até 13% para a carga por eixo, sendo que não houve influência da velocidade para o peso bruto total (PBT) da composição.
- Determinação experimental das cargas por eixo não apresentou resultados satisfatórios. Com relação ao PBT, empregando-se a equação constitutiva normativa para o concreto obteve-se uma diferença de 20% do valor esperado enquanto que utilizando a equação constitutiva de Collins Mitchell (1991) para o concreto essa diferença foi de 2%.



# Agradecimentos

**PROPESP**

Pró-Reitoria de Pesquisa  
e Pós-Graduação | UFPA



**Fadesp**

Fundação de Amparo e Desenvolvimento da Pesquisa

**CNPq**

*Conselho Nacional de Desenvolvimento  
Científico e Tecnológico*



**VALE**



Anais do 56º Congresso Brasileiro do Concreto  
CBC2014  
Outubro / 2014

© 2014 - IBRACON - ISSN 2175-8182



IBRACON

**OBRIGADO!**



Anais do 56º Congresso Brasileiro do Concreto  
CBC2014  
Outubro / 2014

@ 2014 - IBRACON - ISSN 2175-8182

