



## **Aspetos do comportamento da via-férrea em zonas com singularidades e defeitos de geometria**

**Eduardo Fortunato** (efortunato@lnec.pt)

**André Paixão** (apaixao@lnec.pt)

*Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC)*



## **AGENDA**

- 1 – Introdução**
- 2 – Influência do deficiente apoio das travessas no comportamento da via-férrea**
- 3 – Desempenho estrutural em zonas de transição e com defeitos de geometria**
- 4 – Avaliação do comportamento de zonas com singularidades**

# 1 – INTRODUÇÃO

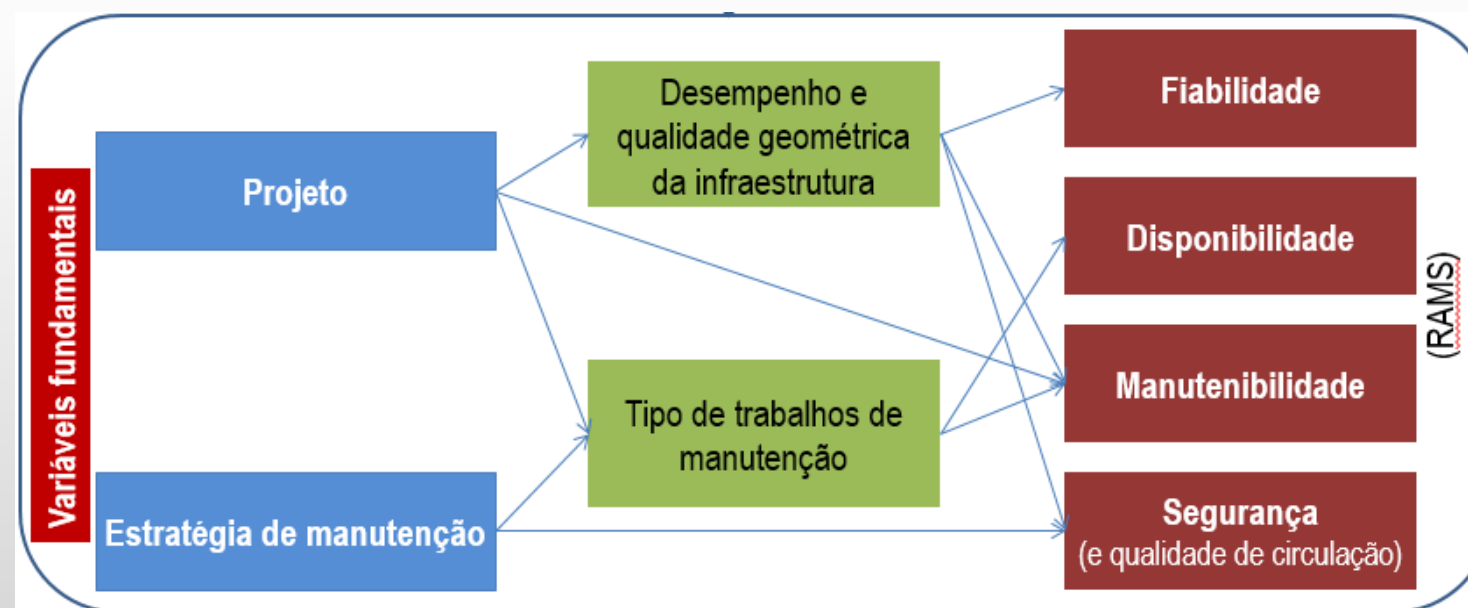
## Qualidade geométrica da via

- desvios de parâmetros geométricos em relação ao valor médio ou ao valor de projeto
- diminui com a passagem do tráfego e ao longo do tempo
- fundamental no âmbito da avaliação do desempenho da via, porque a sua degradação:
  - ✓ provoca amplificações dinâmicas das cargas do material circulante, promovendo a degradação da via e dos veículos
  - ✓ induz maior esforço de manutenção (custos e interdições de via)
  - ✓ resulta em menor qualidade do serviço (afrouxamentos, supressão de comboios e menor conforto dos passageiros)
  - ✓ pode afetar a segurança da operação ferroviária

## Varáveis que influenciam a qualidade geométrica da via

### Variáveis externas

- Objetivos e estratégia de transporte (passageiros, mercadorias)
- Recursos financeiros
- Enquadramento legal e regulamentar (normas e especificações de projeto e de manutenção, etc.)
- Condições locais (geográficas, climáticas, geológicas, etc.)





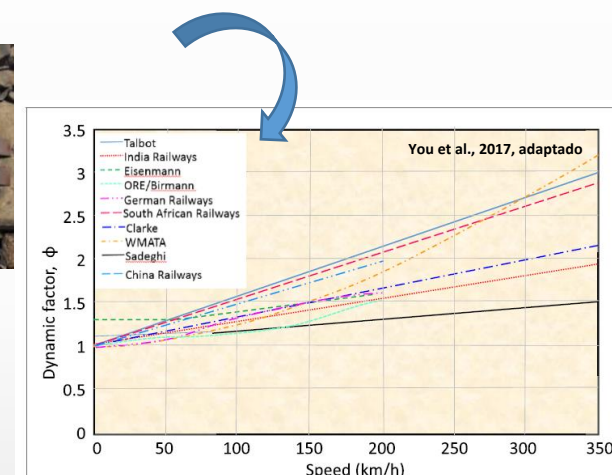
## Singularidades que influenciam a qualidade geométrica e o desempenho da via-férrea

### Superestrutura

- ✓ aparelhos de mudança de via
- ✓ aparelhos de dilatação do carril
- ✓ soldadura de carril
- ✓ danos nos elementos da via



Acréscimo de carga dinâmica



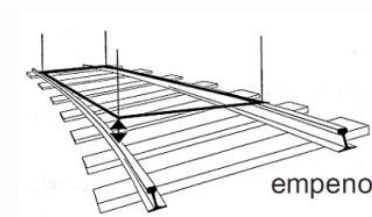
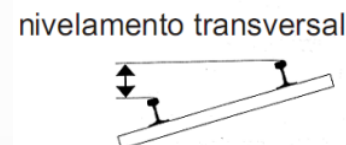
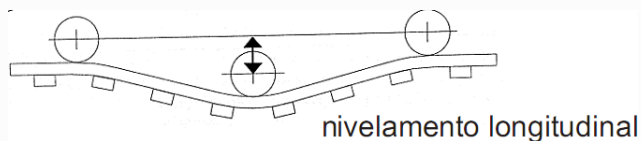
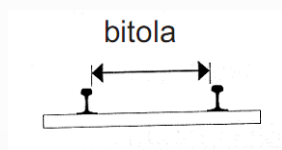
### Subestrutura

- ✓ variação de rigidez dos materiais em zonas de transição
  - escavação / aterro
  - aterro de solo / aterro de agregado / aterro de materiais tratados
- ✓ variação de rigidez entre terraplenagens e obras de arte
- ✓ assentamentos diferenciais devido a deformações plásticas



## Avaliação da qualidade geométrica da via

- Análise de defeitos de geometria (D1:  $3\text{ m} < \lambda \leq 25\text{ m}$ ; D2:  $25\text{ m} < \lambda \leq 70\text{ m}$ ; D3:  $70\text{ m} < \lambda \leq 150\text{ m}$ )



EN 13848-5 (Geometria da via e níveis de qualidade geométrica admissíveis)

IT.VIA.018 -Tolerâncias dos parâmetros geométricos da via (REFER) – Tolerâncias de Alerta, Intervenção, Ação Imediata

- Análise de índices globais de qualidade geométrica (EN 13848-6, .....)
- Análise da resposta dinâmica em função das características da via e do veículo e da velocidade de circulação: (EN 13848-6)
  - ✓ forças de interação veículo-via
  - ✓ acelerações (verticais) na estrutura, nos eixos e nas carruagens
  - ✓ forças de contacto entre as travessas e o balastro



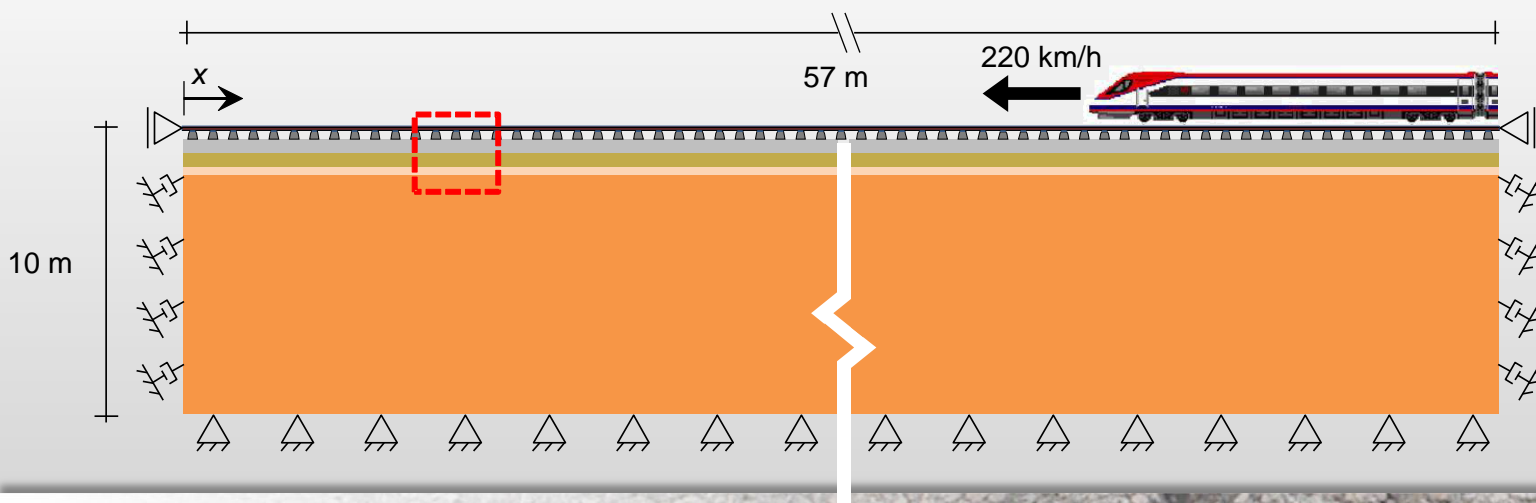
## 2 – INFLUÊNCIA DO DEFICIENTE APOIO DAS TRAVESSAS NO COMPORTAMENTO DA VIA-FÉRREA

### • Objetivos:

- ✓ desenvolvimento de métodos que permitam antecipar situações críticas na via-férrea e que permitam classificá-las quanto ao seu impacto sobre a estrutura e sobre a interação via-veículo.
- ✓ estabelecimento de indicadores de desempenho úteis para o planeamento dos trabalhos de manutenção da via.

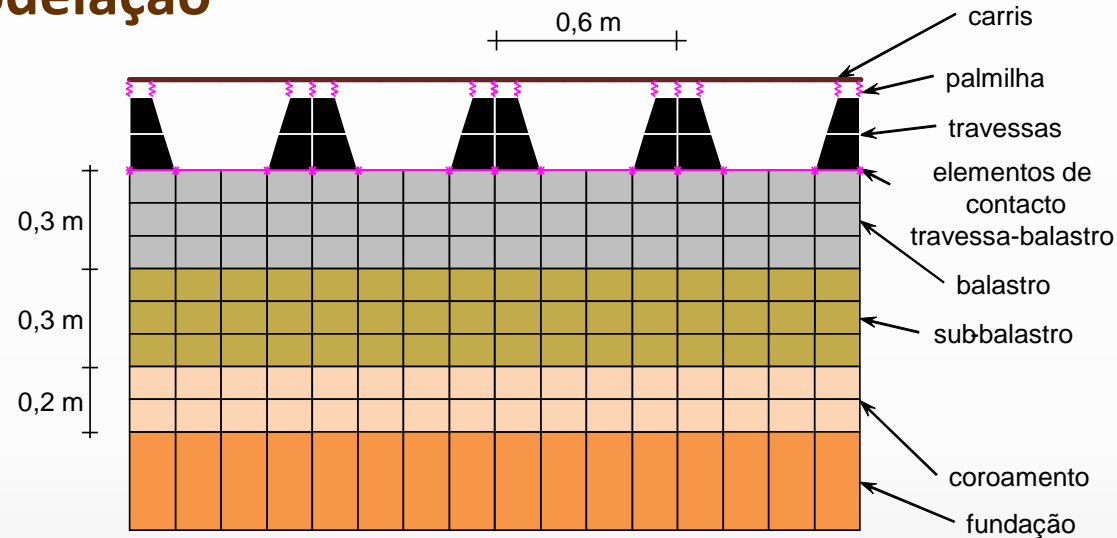
### • Avaliação da influência da forma dos defeitos de nivelamento longitudinal no sistema via-veículo.

### • Estudo paramétrico com análises dinâmicas não-lineares num modelo FEM calibrado e validado com medições em campo.

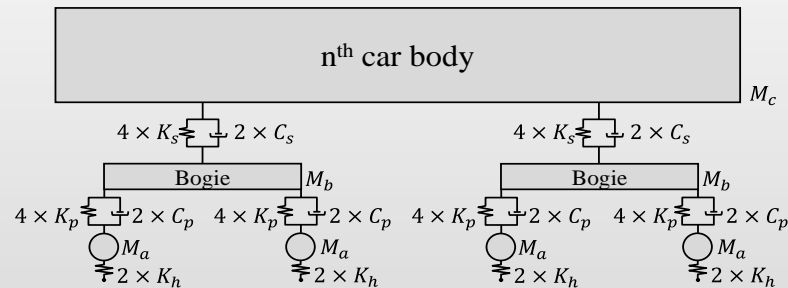


- Modelos 2D FEM (ANSYS) com elementos planos (est. plano de tensão)
- Condições de fronteira visco-elásticas para minimizar reflexão de ondas
- Consideração da interação veículo-via utilizando elementos de contacto entre a roda e o carril (Penalty/Lagrange)
- Método de resolução Newton-Raphson, devido às não linearidades do problema
- Método de integração das equações de equilíbrio dinâmico de Newmark (integração implícita)  $dt = 0.001$  s

## Modelação



Alfa Pendular (220 km/h)

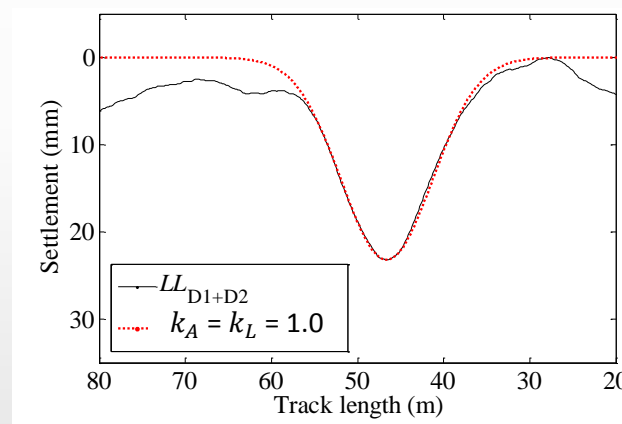
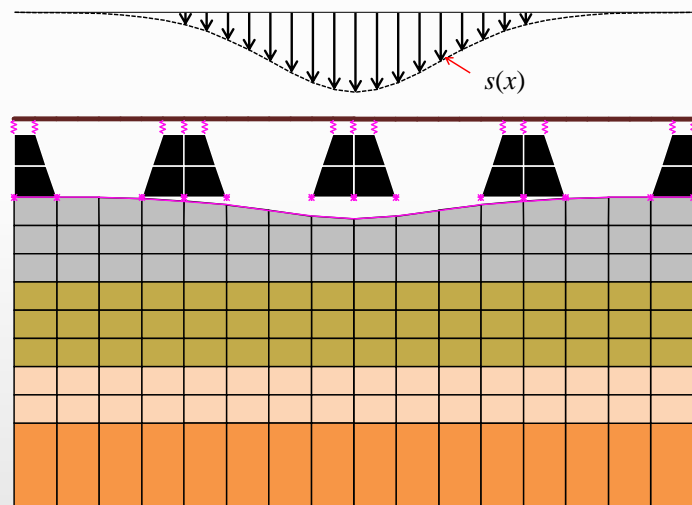


Componente	$E_i$ MPa	$\nu_i$ -	$\beta_i$ $s \times 10^{-3}$	$\rho_i$ kg/m <sup>3</sup>
<b>Travessas</b>	$30 \times 10^3$	0,25	-	6360*
<b>Balastro</b>	130	0,20	0,4	1530
<b>Sub-balastro</b>	200	0,30	0,4	1935
<b>Coroamento</b>	2820	0,30	2,6	1935
<b>Fundação</b>	80	0,30	2,9	2040

Parâmetro	Valor
Massa das carruagens, $M_c$	36901 kg
Rigidez da suspensão secundária, $K_s$	256,4 kN/m
Amortecimento da suspensão secundária, $C_s$	35 kN.s/m
Massa do bogie (sem eixos), $M_b$	4932 kg
Rigidez da suspensão primária, $K_p$	564 kN/m
Amortecimento da suspensão primária, $C_p$	18 kN.s/m
Massa do eixo, $M_a$	1800 kg
Rigidez Hertziana de contacto roda-carril, $K_h$	$1,24 \times 10^6$ kN/m

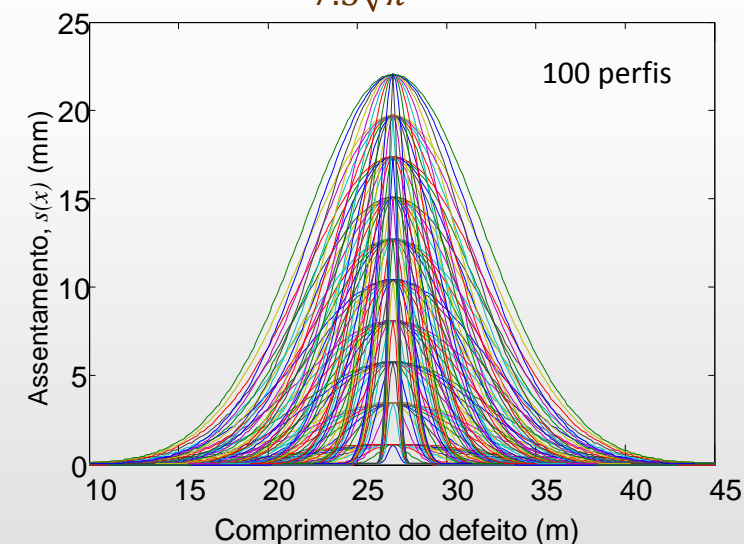


## Geração de perfis de assentamento e introdução no modelo numérico



Funções do tipo *Delta de Dirac*:

$$s(x) = \frac{k_A \times 308}{7.5\sqrt{\pi}} e^{-(x-x_{dip})^2/(k_L \times 7.5)^2}$$

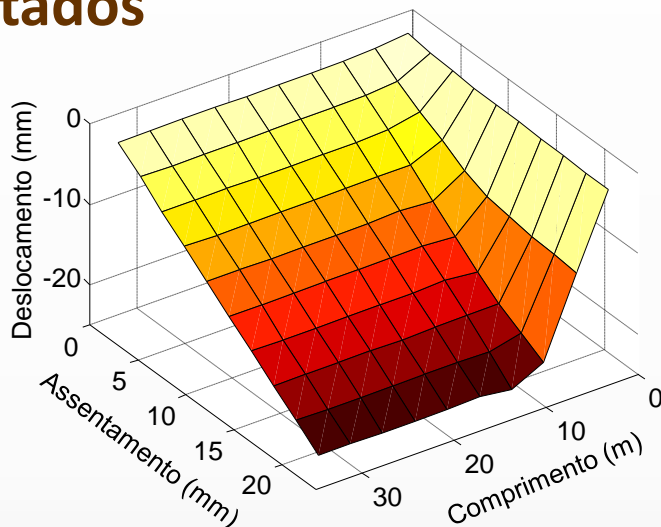


Amplitude do defeito de nivelamento longitudinal (assentamento): 1,2 a 22,0 mm

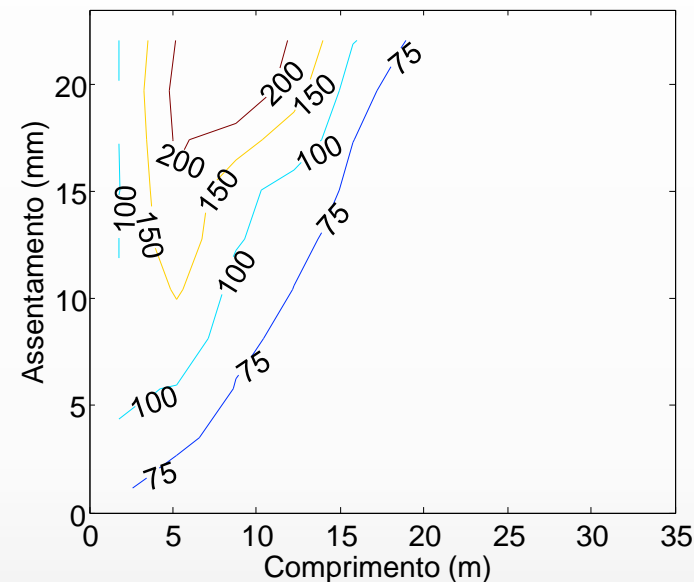
Comprimento do defeito de nivelamento longitudinal: 1,75 a 33,3 m

## Análise de resultados

Deslocamentos  
verticais máximos  
do eixo



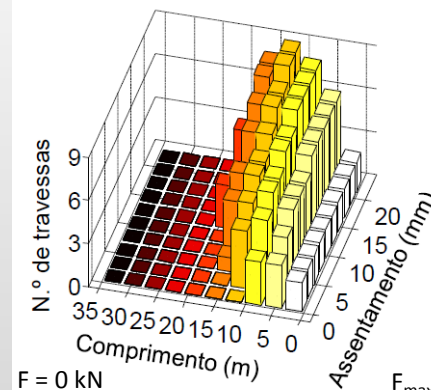
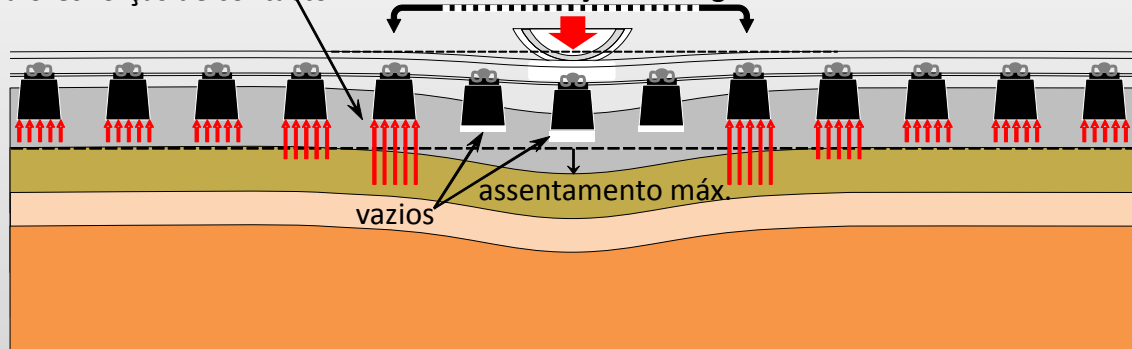
Valores máximos da  
força de contacto  
travessa-balastro (kN)



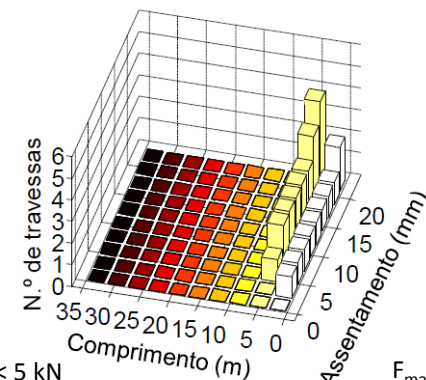
## Análise de forças de contacto em travessas mal apoiadas

maiores forças de contacto

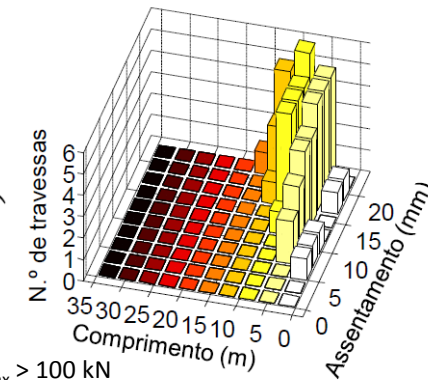
redistribuição de carga



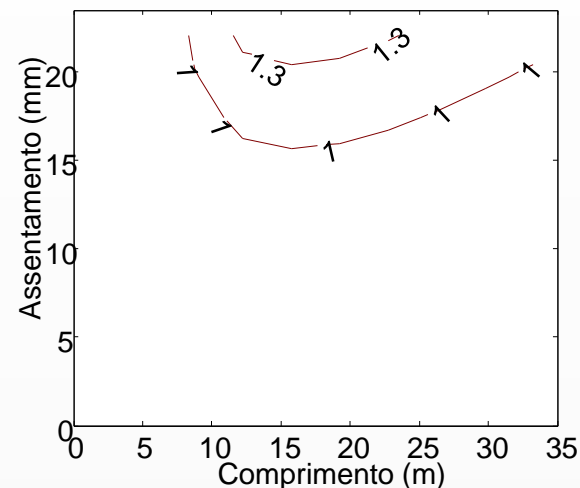
$F_{\max} < 5 \text{ kN}$



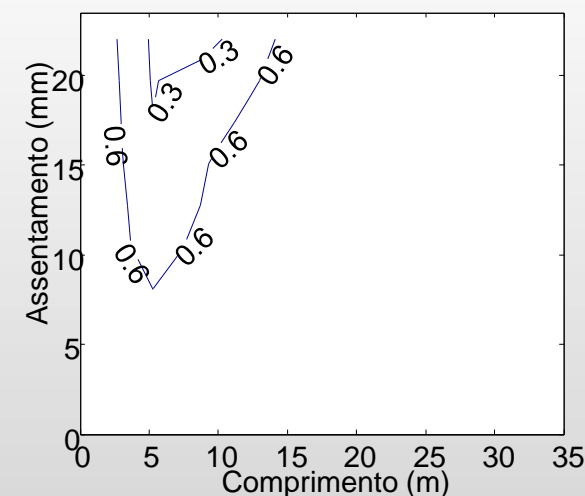
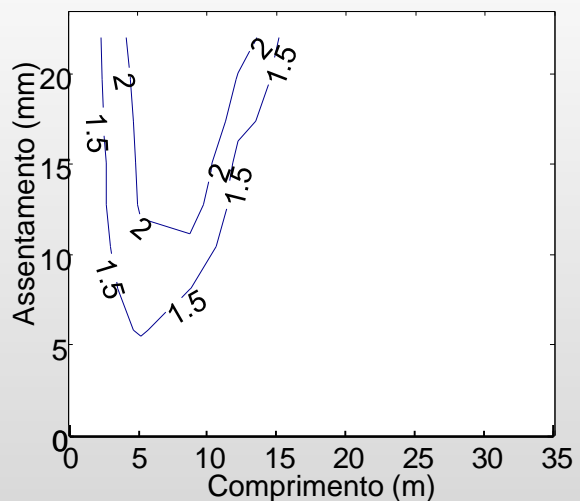
$F_{\max} > 100 \text{ kN}$



Valores extremos das acelerações  
verticais das carruagens ( $m/s^2$ )

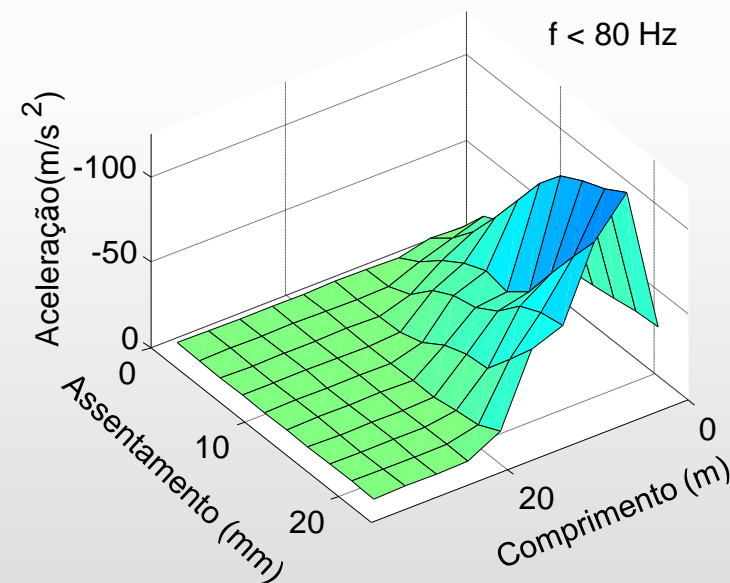
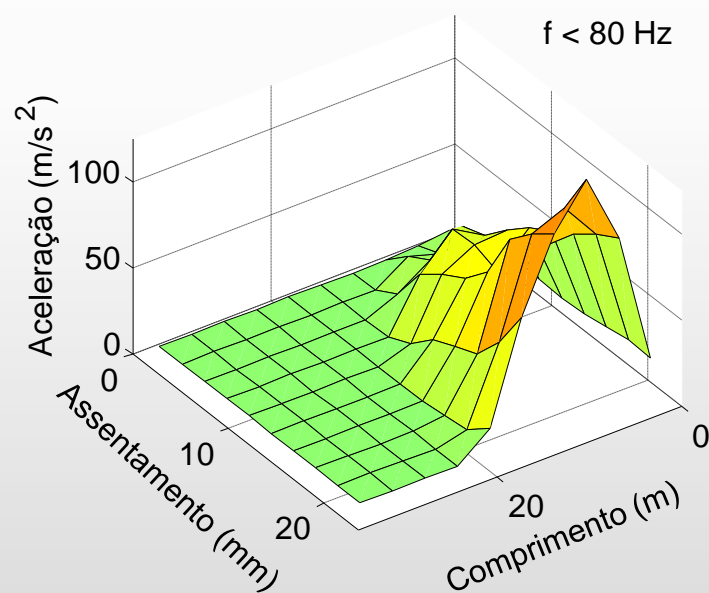


Valores extremos do coeficiente dinâmico  
( $Q_{dyn} / Q_{sta}$ ): a) máximos; b) mínimos



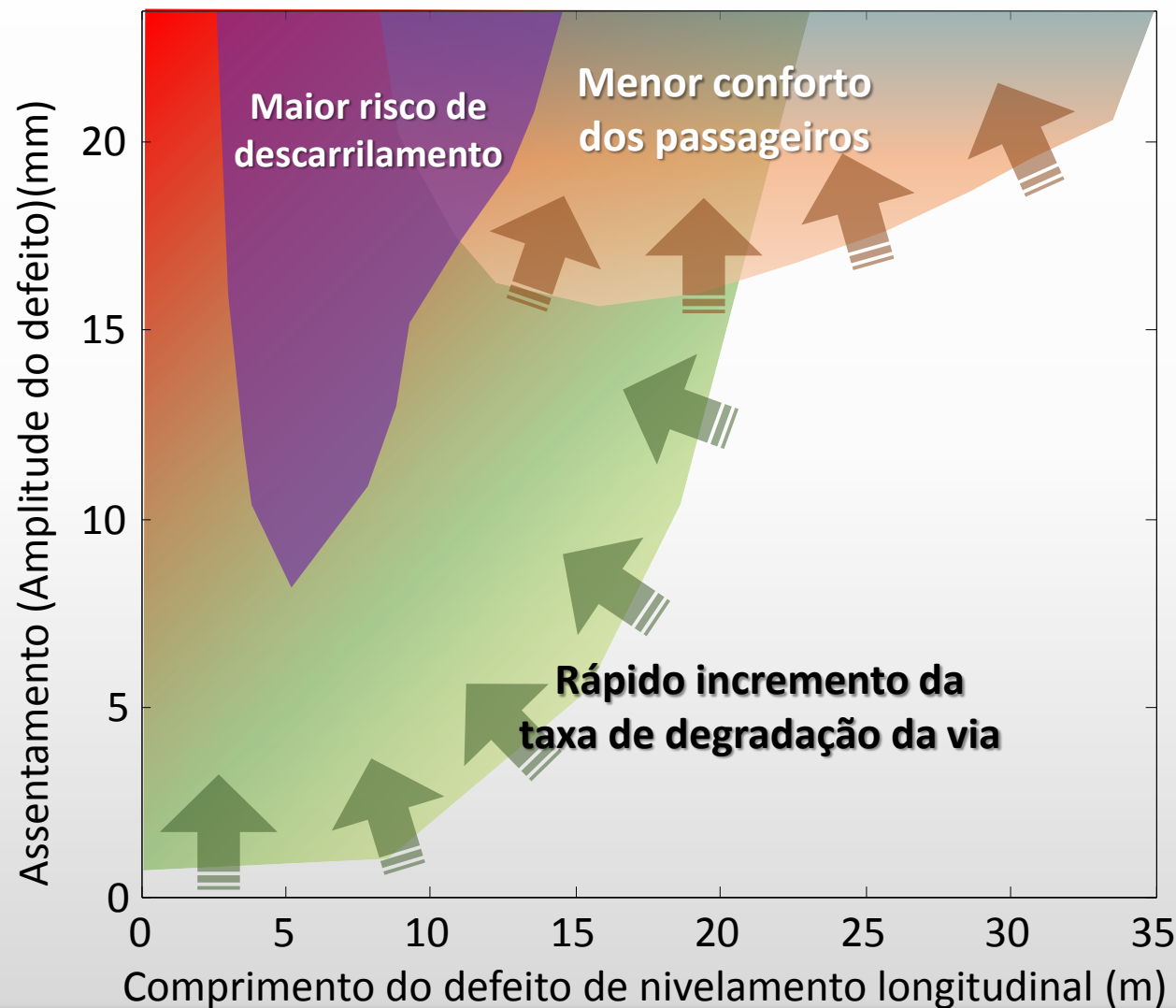


Valores extremos de aceleração das travessas  
( $f < 80$  Hz): a) positivos; b) negativos



## Estabelecimento de indicadores de desempenho

(para Alfa Pendular, 220 km/h)



$a_{travessa} > 10 \text{ m/s}^2$

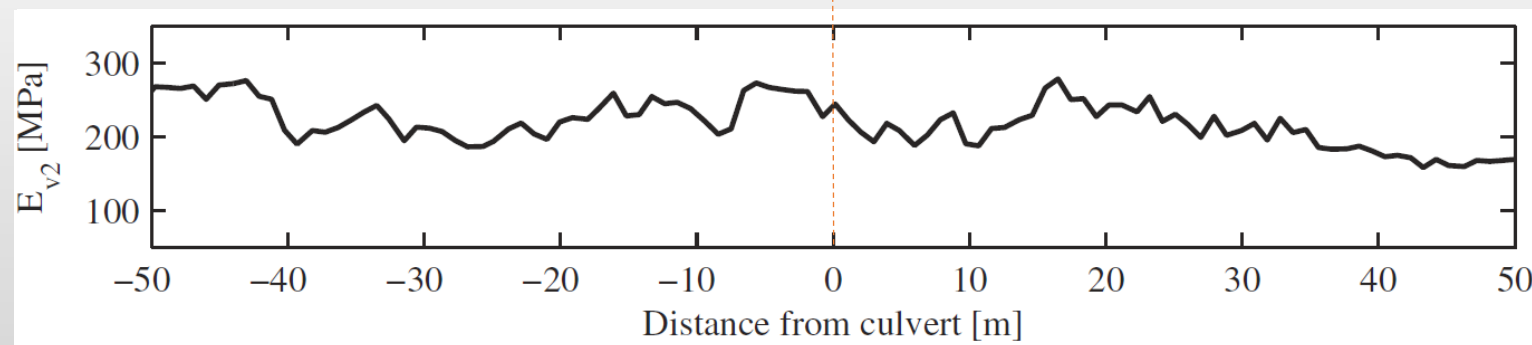
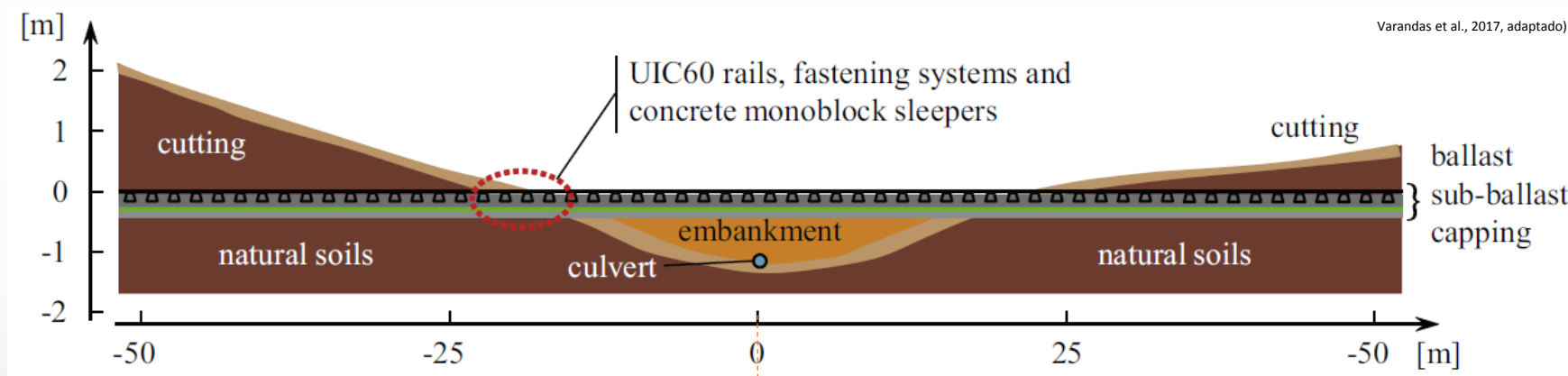
coeficiente dinâmico  
offload factor  $< 0.6$   
(Xia et al., 2006)

$a_{car} > 1.0 \text{ m/s}^2$   
(EN 1990)

## Conclusão....

### 3 – DESEMPENHO ESTRUTURAL EM ZONAS DE TRANSIÇÃO E COM DEFEITOS DE GEOMETRIA

Transições aterro escavação e passagens inferiores “profundas”

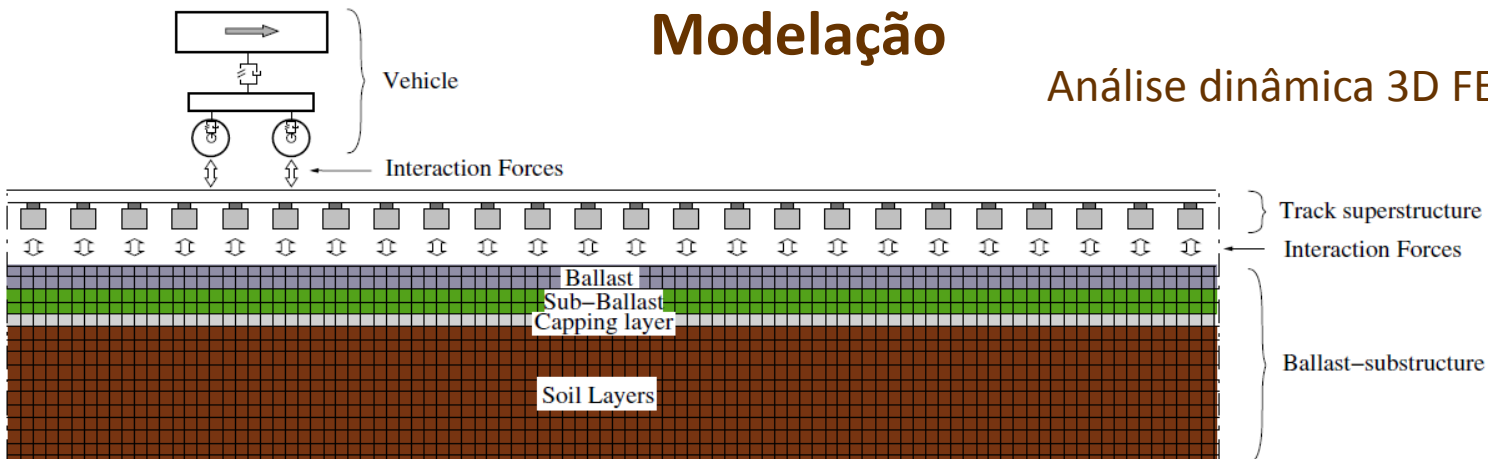


$E_{v2}$  medido durante a construção no  
topo do sub-balastro



## Modelação

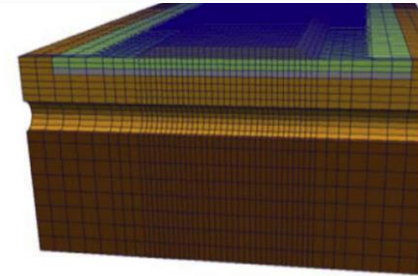
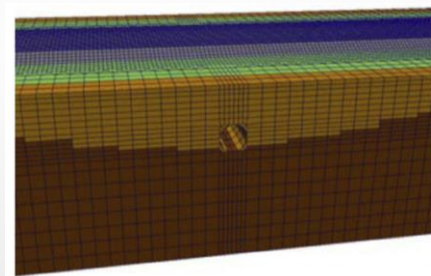
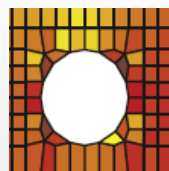
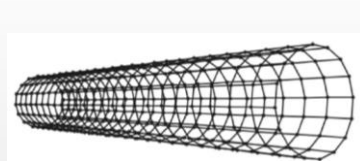
### Análise dinâmica 3D FEM – *Pegasus*



Layer	H [m]	$\rho$ [t/m <sup>3</sup> ]	E [MPa]	$\nu$ [-]	$\zeta$ [%]	$f_1$ and $f_2$ [Hz]
Ballast	0.3	1.73	130	0.2	3	2 and 800
Sub-ballast	0.3	2.20	200	0.3	3	2 and 800
Capping layer	0.2	2.20	500	0.3	3	2 and 800
Natural soil	9.5	2.04	120	0.3	3	2 and 800
Soil embankment	–	2.04	90	0.3	3	2 and 800

Modelo A - Com culvert

Modelo B - Sem culvert



## Bogie do Alfa Pendular

Secondary suspension

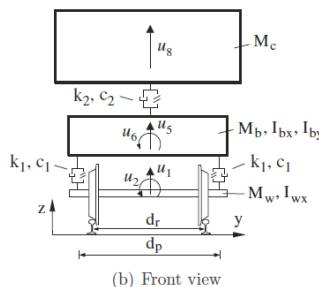
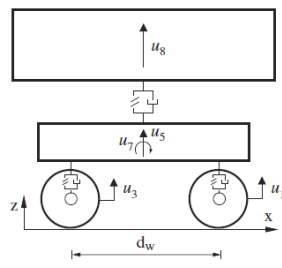
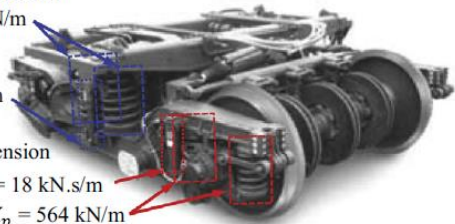
$$K_s = 256.4 \text{ kN/m}$$

$C_s = 35 \text{ kN.s/m}$

Primary suspension

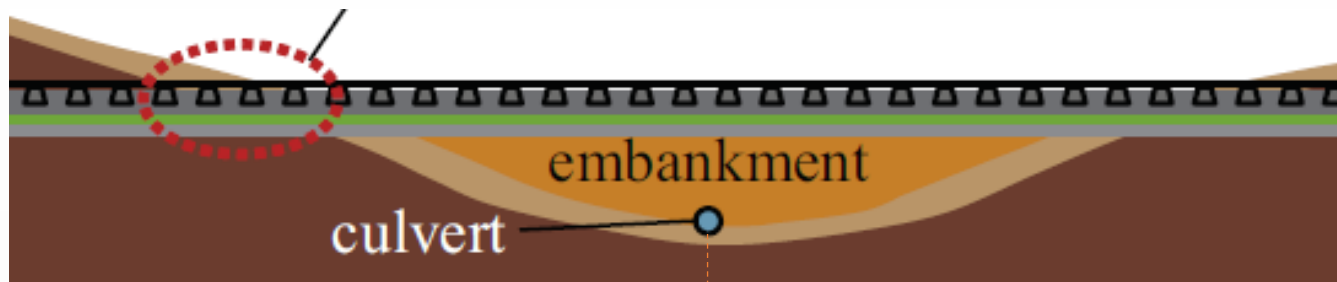
$$C_p = 18 \text{ kN.s/m}$$

$$K_p = 564 \text{ kN/m}$$

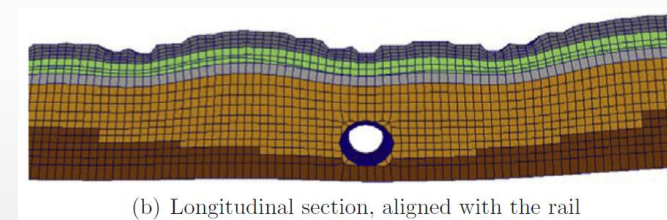
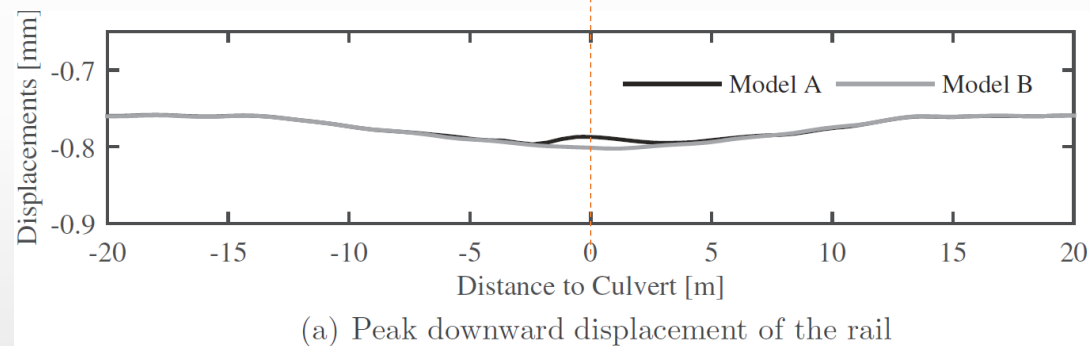
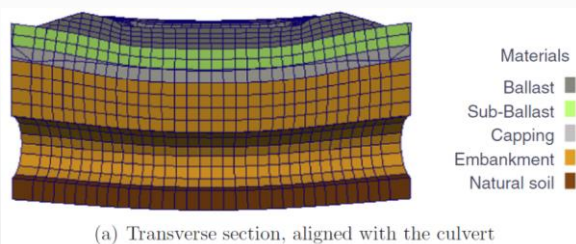


Parameter	Notation	Value	Units
Mass of wheelset	$M_w$	1.80	t
Mass of bogie	$M_b$	4.93	t
Mass of carbody	$M_c$	36.76	t
Moment of inertia of wheelset	$I_{wx}$	0.90	tm <sup>2</sup>
Moment of inertia of bogie in x dir.	$I_{bx}$	2.10	tm <sup>2</sup>
Moment of inertia of bogie in y dir.	$I_{by}$	2.60	tm <sup>2</sup>
Stiffness of primary suspension	$k_1$	1128.0	kN/m
Damping of primary suspension	$c_1$	18.0	kNs/m
Stiffness of secondary suspension	$k_2$	1025.6	kN/m
Damping of secondary suspension	$c_2$	70.0	kNs/m
Bogie Wheelset distance	$d_w$	2.70	m
Primary suspension distance	$d_p$	2.14	m
Wheels radius	$R_w$	0.445	m

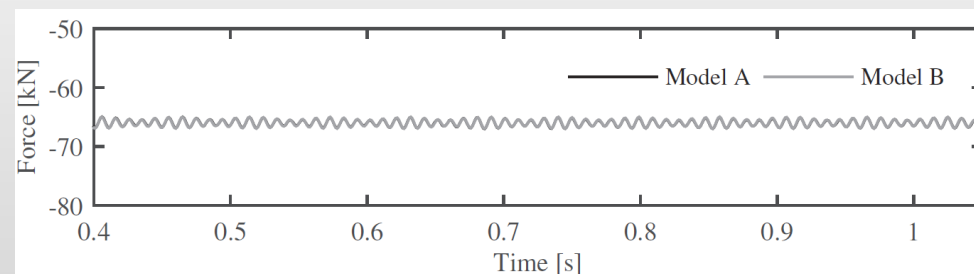
## Análise de resultados



### Deflexões calculadas

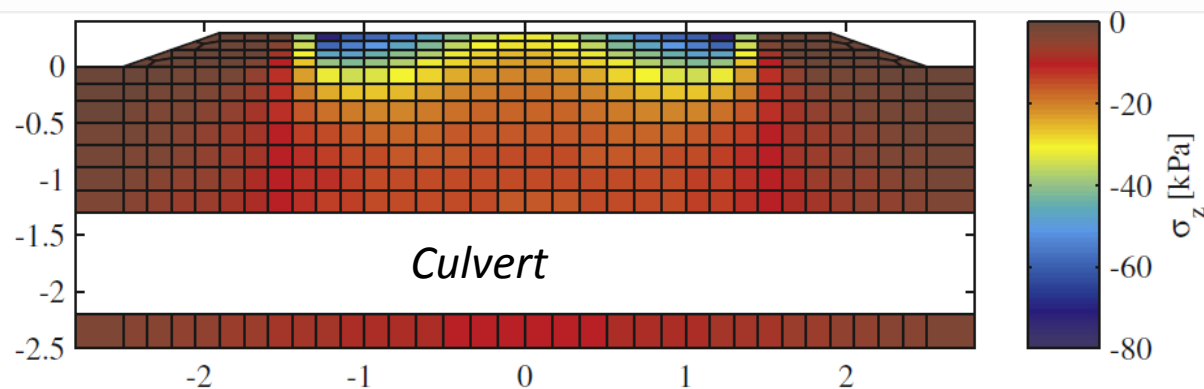


### Forças calculadas

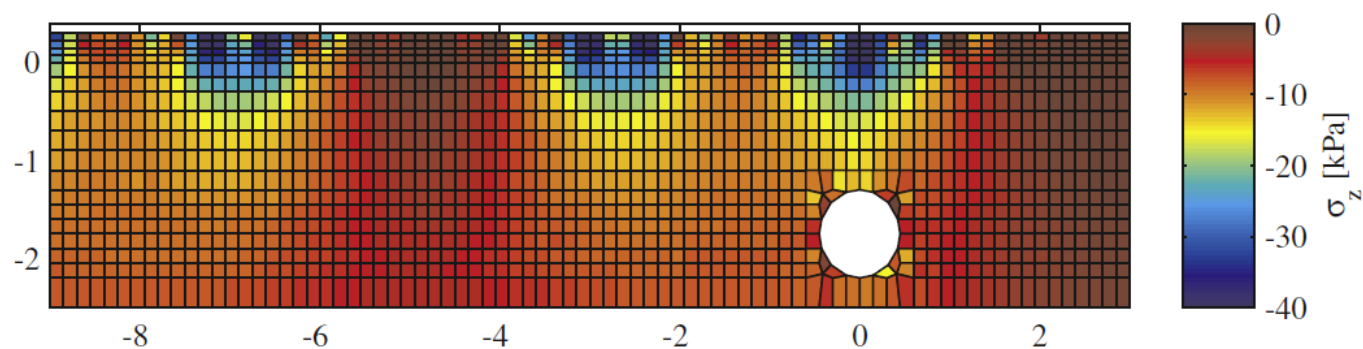




## Tensões verticais no balastro e na fundação obtidas no Modelo A, quando o 1º eixo passa sobre a “culvert”



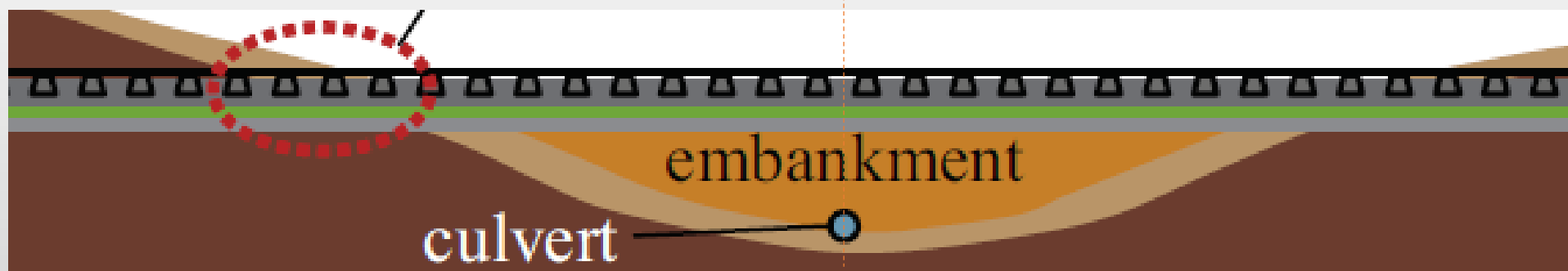
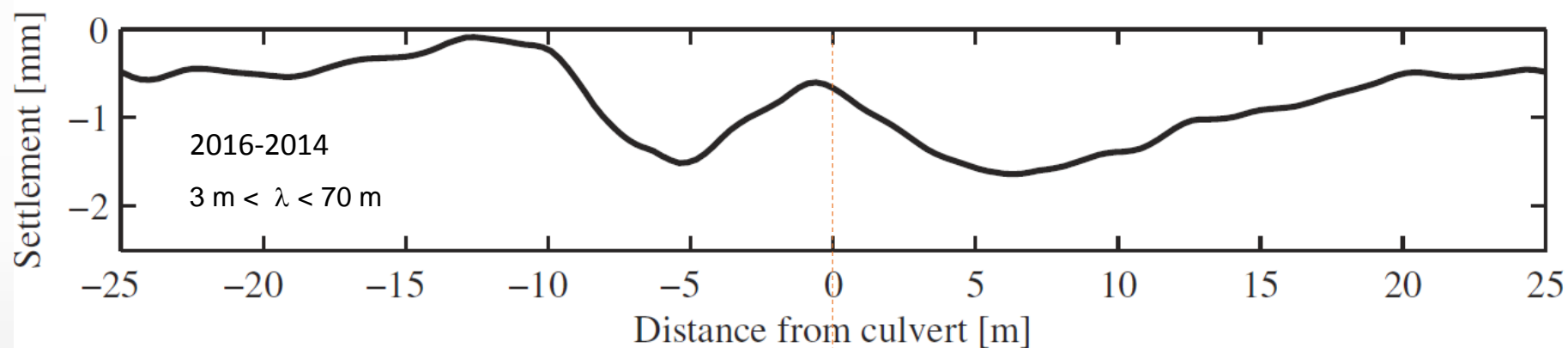
(a) Transverse section, aligned with the culvert



Longitudinal section, aligned with the rail (color range truncated between 0 and -40 kPa)

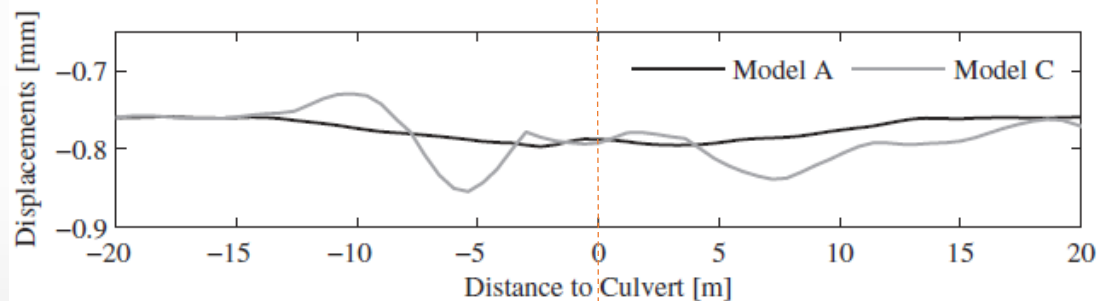
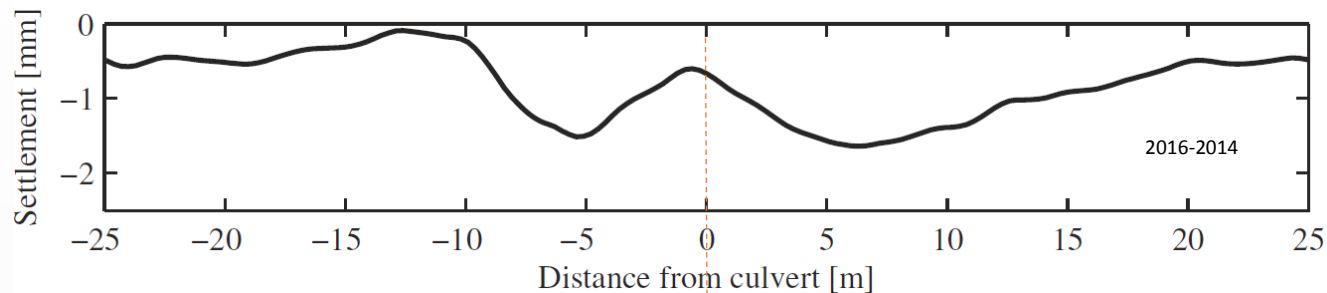


## Assentamentos medidos com equipamento de via durante a operação ferroviária

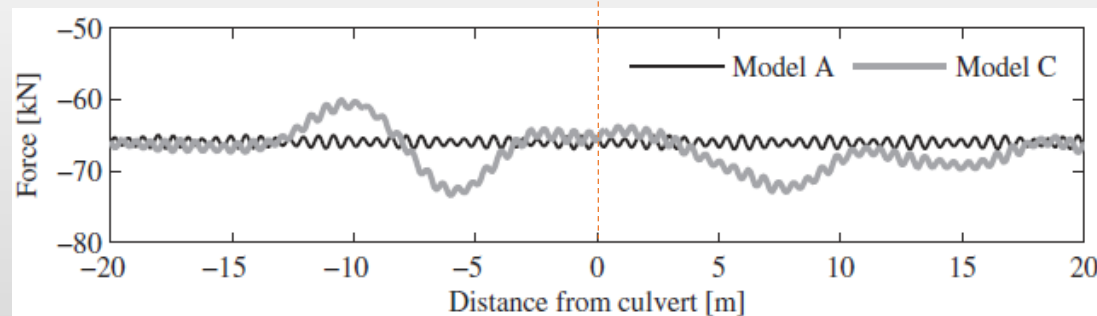


## Assentamentos medidos durante a operação

O Modelo C é idêntico ao  
Modelo A mas considera as  
irregularidades do  
nivelamento longitudinal

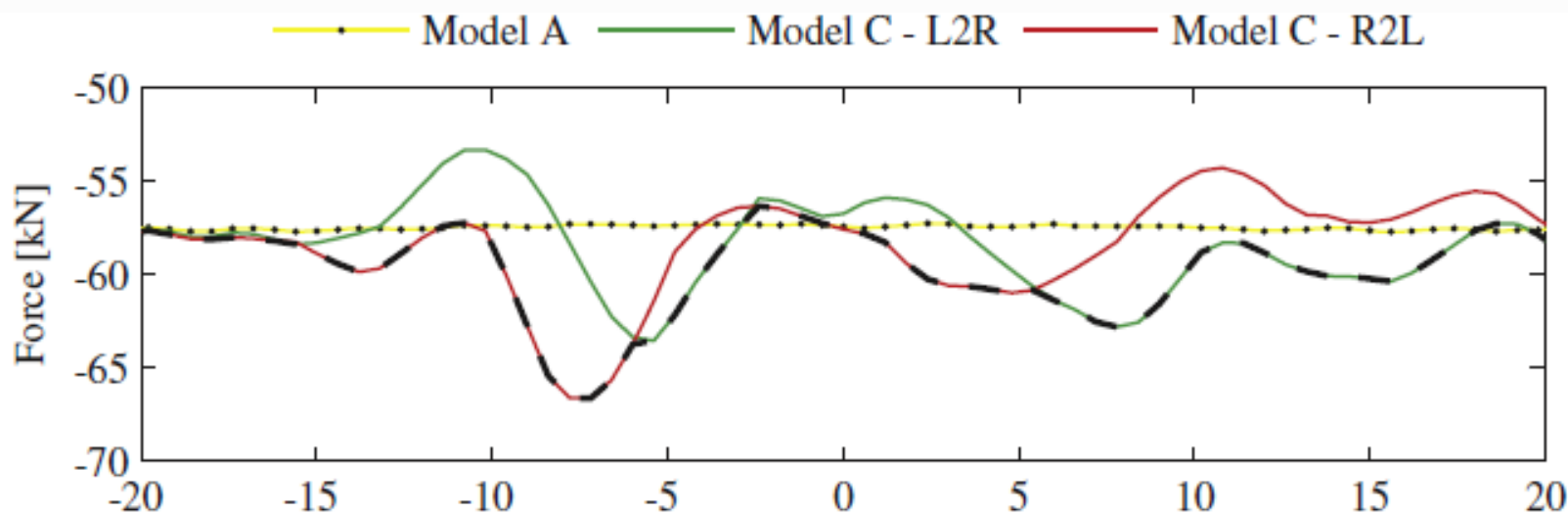


(a) Peak downward displacement of the rail



(b) Maximum wheel-rail interaction forces along the track

## Resposta distinta em função do sentido de circulação



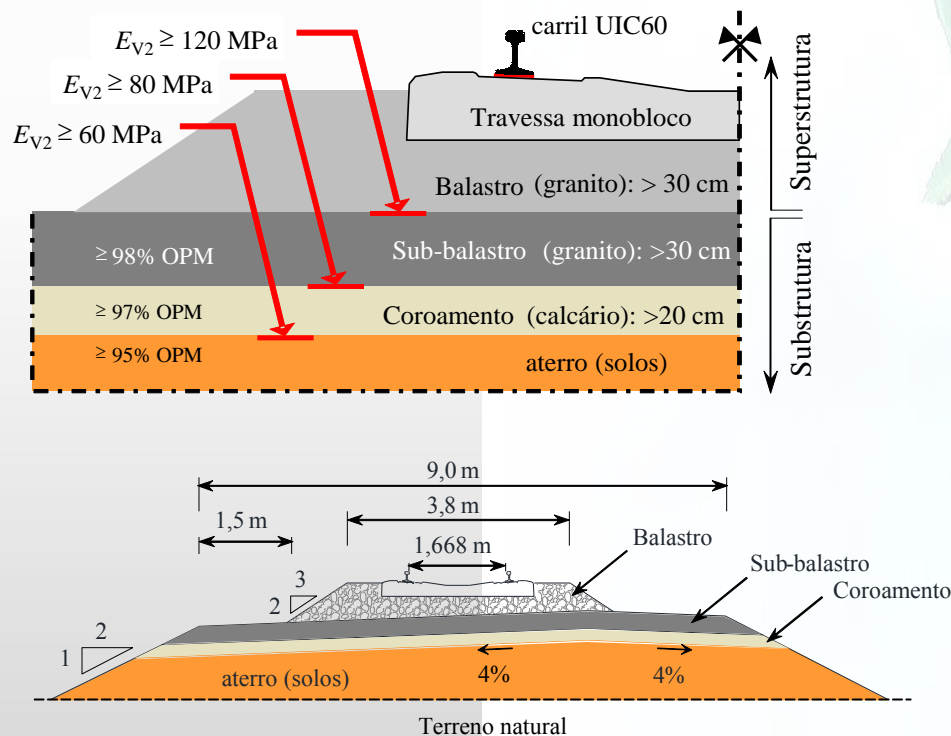
Maximum sleeper-ballast contact forces due only to the vehicle loading considering passages in both directions.

## Conclusão....



## 4 – AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE ZONAS COM SINGULARIDADES

Via balastrada de 29 km (220 km/h; 25 t/eixo)

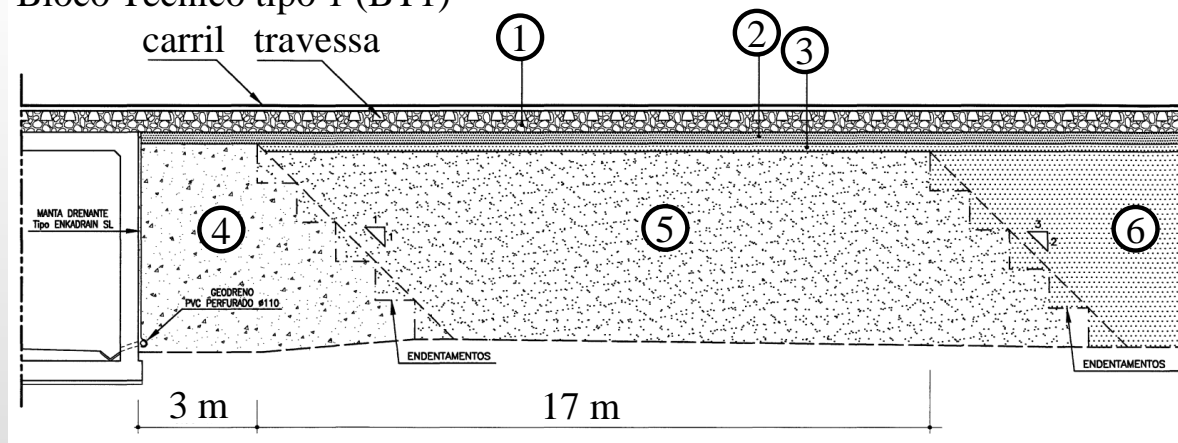


## Aterros de transição

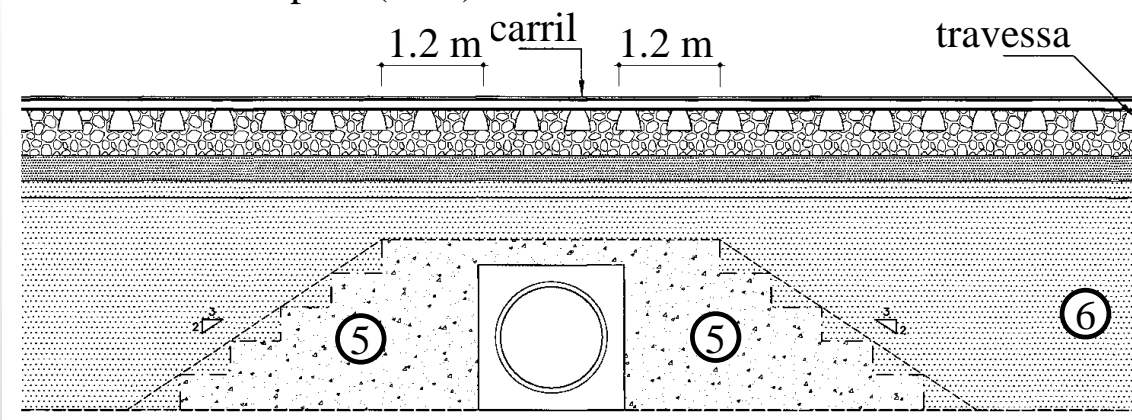
### Objetivos

- **variação gradual de rigidez em transições** - entre as terraplenagens e as obras de arte e nas passagens sobre estruturas enterradas
- **redução de assentamentos diferenciais**

Bloco Técnico tipo 1 (BT1)



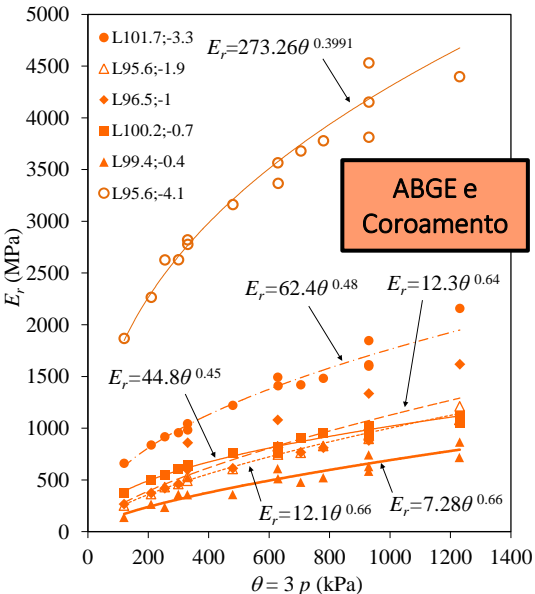
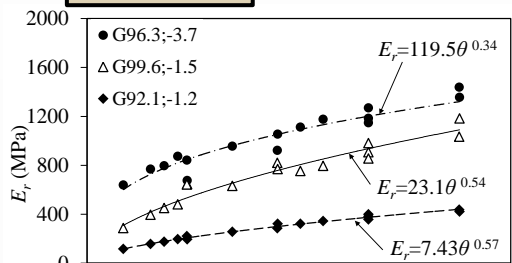
Bloco Técnico tipo 2 (BT2)





## Caracterização laboratorial de geomateriais

### Sub-balastro



Ensaios triaxiais de carga cíclica com variação da pressão de confinamento (Método A, HSL da EN 13286-7)

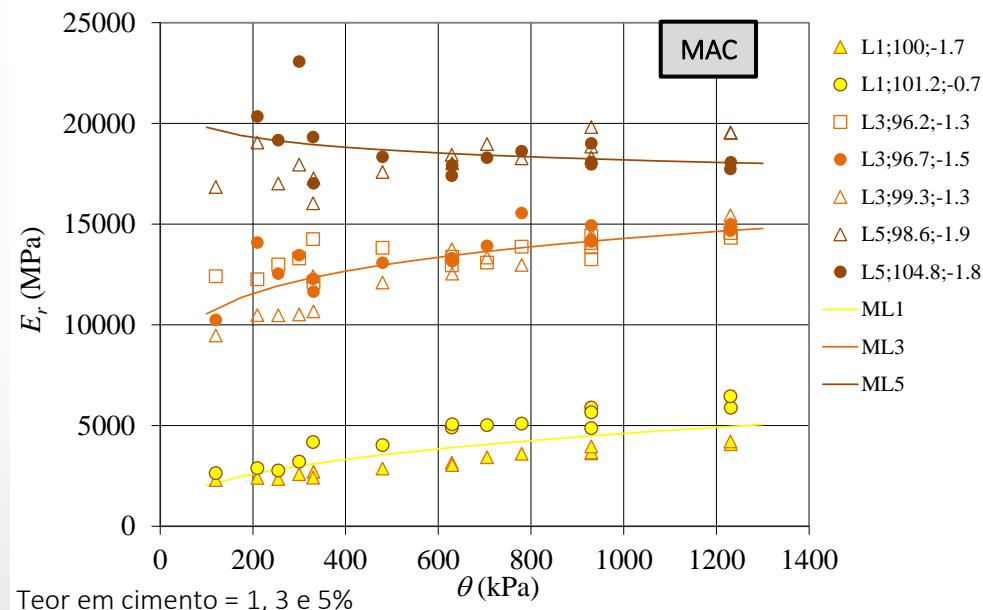
- Estudo do comportamento de deformação resiliente
- Estudo do comportamento de deformação permanente

Classificação dos materiais granulares (EN 13286-7):

### Classe C1



Provetes  
200 x 400 mm



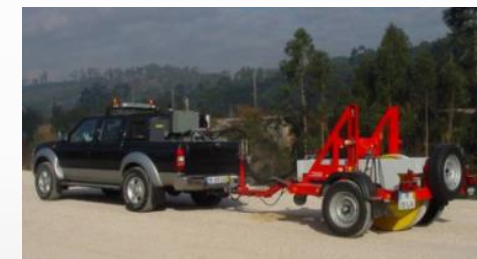
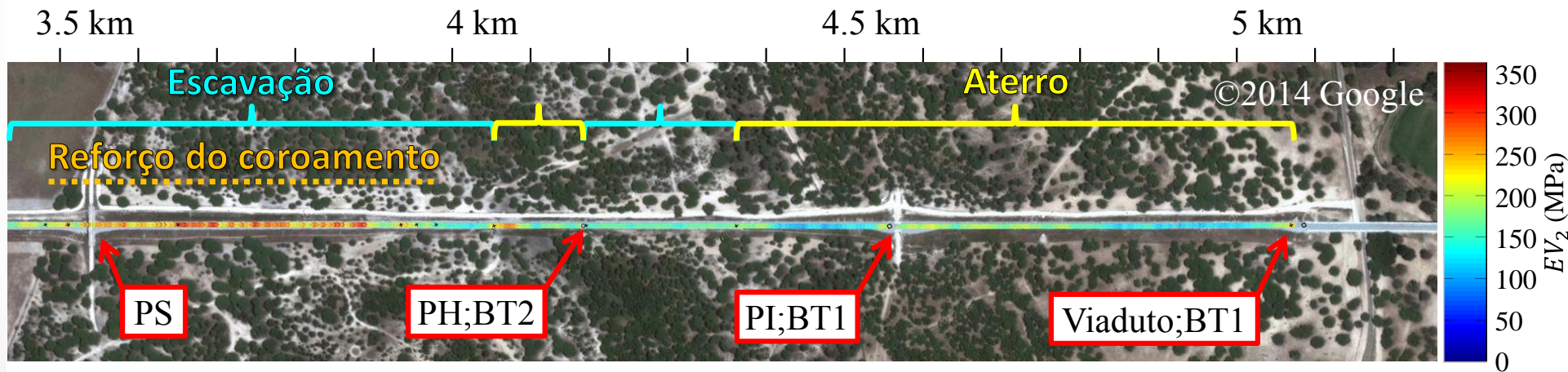
Ensaios convencionais

Parâmetro	REFER IT.GEO.006 (sub-balastro)	Granito		Calcário	
		$\bar{x}$	CV	$\bar{x}$	CV
Los Angeles, LA	LA $\leq 25$	23	0.03	27	0.01
Micro-Deval, MDE	MDE $\leq 18$	5	0.08	12	0.03
Los Angeles + Micro-Deval, LA+MDE	LA+MDE $< 40$	28	0.03	39	0.01
Valor azul metileno multiplicado pela % passada pelo peneiro de 2 mm, MB (g/kg)	MB $< 1$	0,35	0,58	0,75	0,17
Grau de compactação – OPM (%)	$> 98$	99,4	0,01	98,7	0,01

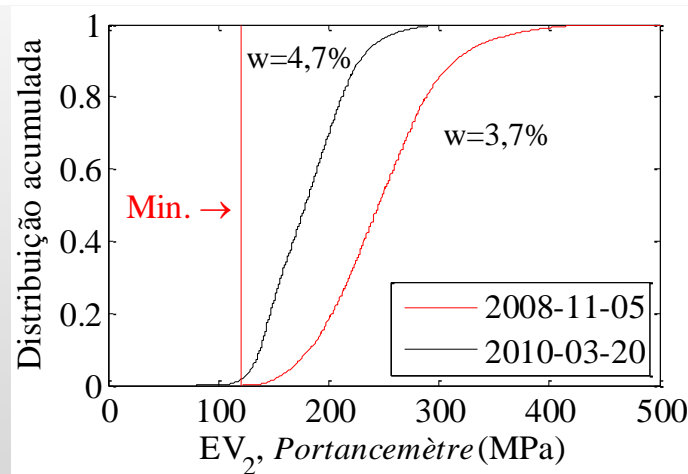
$\bar{x}$  – valor médio; CV – coeficiente de variação.



- Módulo de deformabilidade no sub-balastro ( $EV_2$ ) - 174 PLT => **120 <  $EV_2$  < 250 MPa** (média de 205 MPa)
- Variação espacial de  $EV_2$  em função das singularidades (ex: blocos técnicos em obras de arte e em estruturas enterradas)

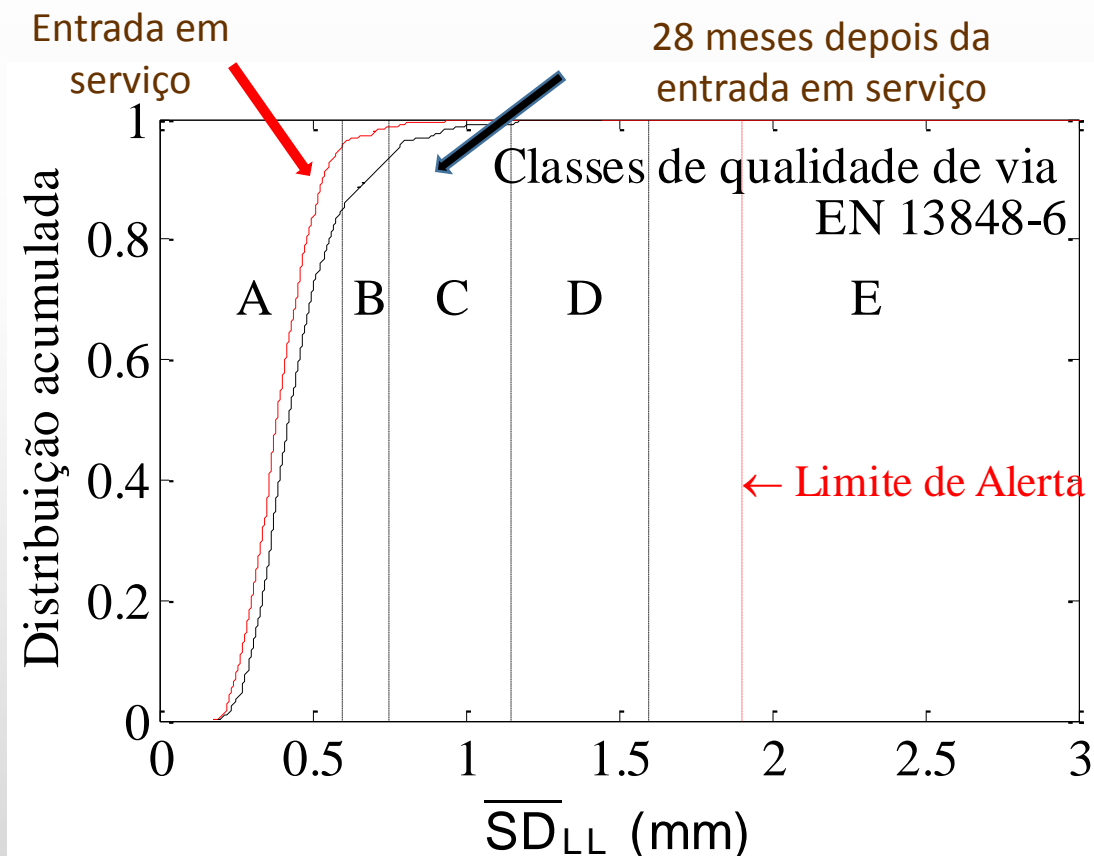


- Diminuição do  $EV_2$  com aumento de  $w$



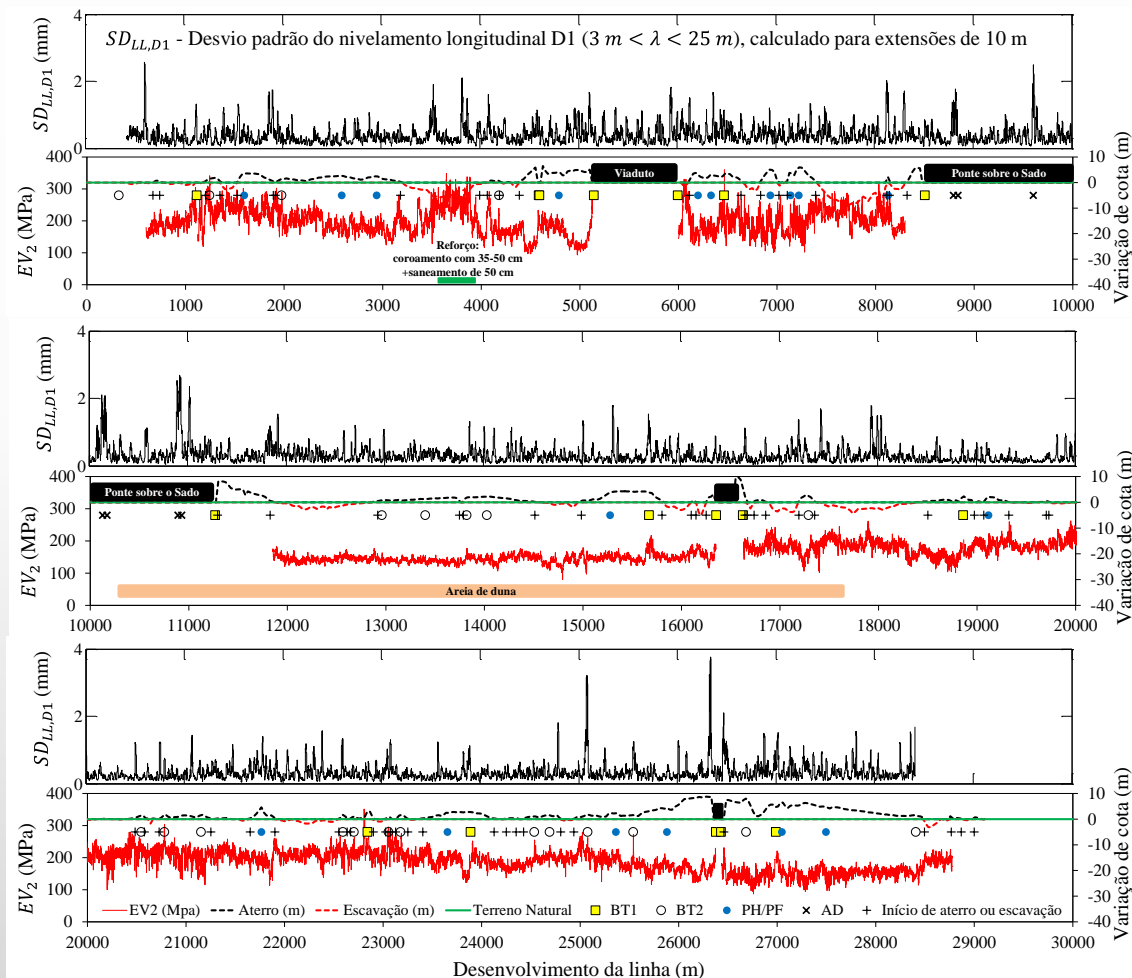
## Avaliação dos parâmetros geométricos da via-férrea em operação

- Distribuição acumulada do valor médio do desvio padrão (2 carris), relativo aos defeitos de nivelamento longitudinal ( $\overline{SD}_{LL,D1}$ )
- Comprimento de onda entre 3 e 25m (D1) para distâncias de 200m, e classes de qualidade de via para velocidades até 220km/h.





Valores de  $EV_2$  medidos sobre o sub-balastro durante a construção e valores de  $\overline{SD}_{LL,D1}$  medidos durante a operação.

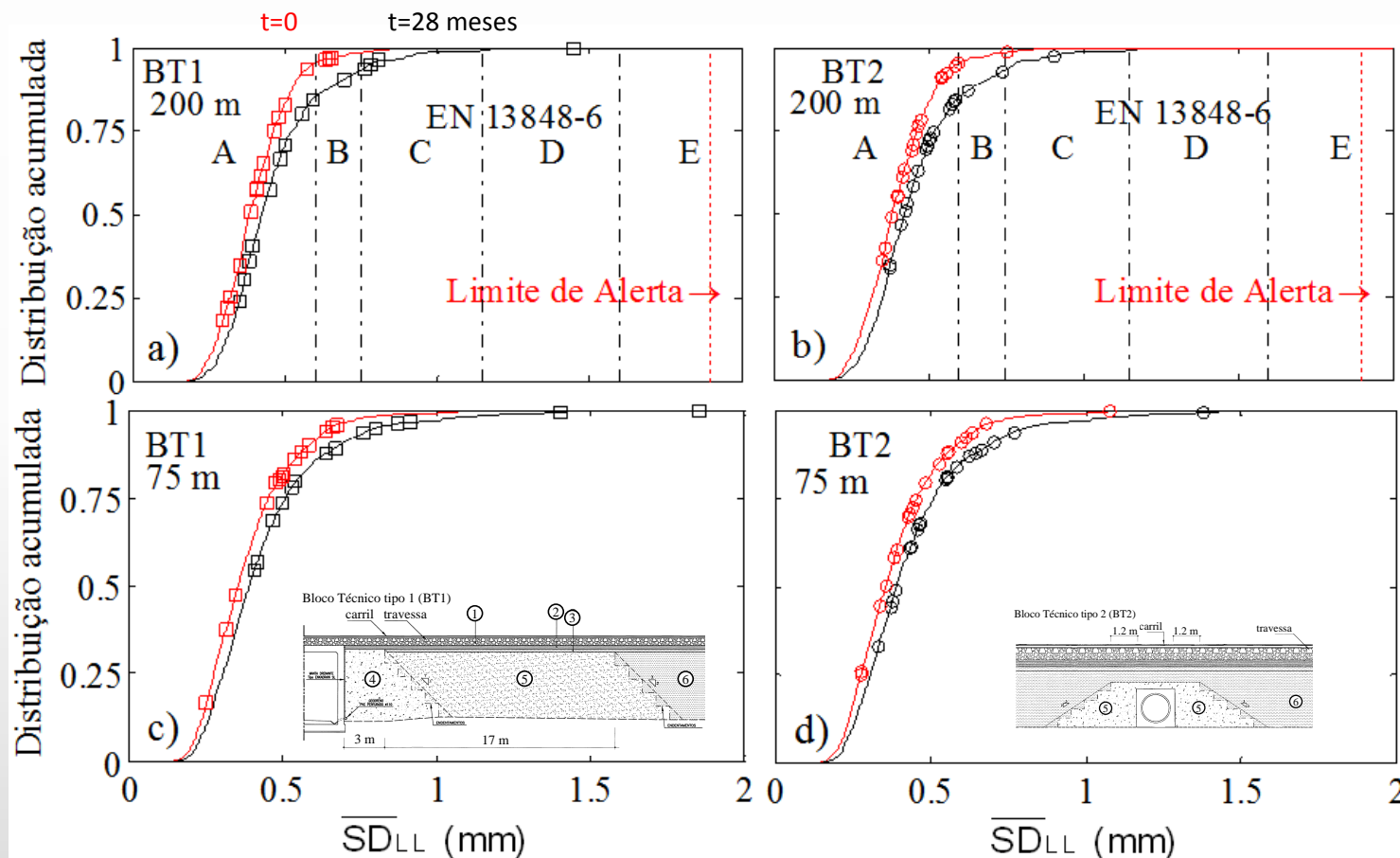


### • Valores mais elevados de $SD_{LL,D1}$ :

- ✓ locais onde existem **aparelhos de dilatação** (sobre as obras de arte)
- ✓ em muitas das situações de **início de aterro ou escavação** (transições)
- ✓ em diversos locais onde foram instaladas **passagens hidráulicas, passagens de fauna e blocos técnicos**
- ✓ em zonas de **variação rápida de  $EV_2$**



Representação das zonas com singularidades nas curvas e distribuição acumulada do  $\overline{SD}_{LL,D1}$  em duas campanhas distintas



- $\overline{SD}_{LL,D1}$  de BT1 e de BT2 concentram-se na **parte superior das curvas**, sendo mais notório na **análise para distâncias de 75m**
- Nos casos de BT1 os pontos representados sobre a curva da segunda campanha **sobem** ainda para uma **posição mais elevada** => **defeitos localizados nos BT1 ganham relevância no tempo**

### Proposta:

Análise dos parâmetros de modo a individualizar as singularidades



Cálculo de  $\overline{SD}_{LL,D1}$  para distâncias mais curtas

✓ Programação mais eficiente das intervenções de manutenção e uma melhor gestão de ativos

## Considerações finais

- É possível proceder à análise dos efeitos da variação da qualidade geométrica da via considerando a resposta dinâmica em função das características da via e do veículo e da velocidade de circulação.
- Os assentamentos diferenciais conduzem a situações críticas em termos de degradação da via (devido a cargas excessivas), de requisitos de segurança (limites de “descarga” e perda de contacto eixo-carril) e de conforto dos passageiros (devido à amplificação de acelerações que ocorrem no interior das carruagens).
- A variação da rigidez da subestrutura, entre valores normais, não induz efeitos dinâmicos significativos na via-férrea, quando a circulação se faz a velocidades até 220 km/h.
- Apesar da existência de blocos técnicos com o objetivo de promover a transição gradual de rigidez e evitar assentamentos diferenciais entre estruturas distintas, não tem sido ainda possível eliminar zonas com taxa de degradação mais elevada.



Não descobrimos ainda o anel de Giges ....mas



## Agradecimentos



Projeto de I&D&I conjunto “Avaliação do comportamento de zonas de transição na via-férrea da Variante de Alcácer” desenvolvido pelo **LNEC** e pela **FEUP**, com o apoio da anterior REFER, E.P.E, atual IP - **Infraestruturas de Portugal, S.A.**



Apoio da **Fundação para a Ciência e a Tecnologia**, através da bolsa de doutoramento: ref. SFRH/BD/75821/2011



Parte deste estudo foi desenvolvido no âmbito da atividade do Grupo de Trabalho 4 – “Subestrutura da via-férrea, incluindo zonas de transição” - da **Comissão Portuguesa de Geotecnia nos Transportes (CPGT)** da Sociedade Portuguesa de Geotecnia (SPG).

**Obrigado pela vossa atenção !**