



56º Congresso Brasileiro do Concreto



TRÁFEGO FERROVIÁRIO DE ALTA-VELOCIDADE: DESAFIOS NA SIMULAÇÃO DA RESPOSTA DINÂMICA DA VIA FÉRREA

Pedro Alves Costa, Aires Colaço, Rui Calçada e António Cardoso

Índice

- Motivação
- Conceito de velocidade crítica
- Velocidade crítica do sistema via-macício
- Influência do comportamento não linear do solo
- Caso de estudo - Ledsgard
- Conclusões

1. Motivação

1. Motivação

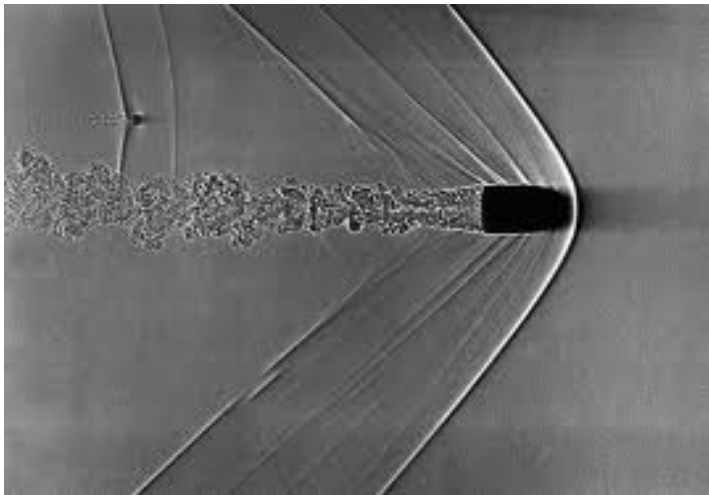
WORLD SPEED RECORDS ON MANNED TRAINS



Novo paradigma: a velocidade crítica do sistema via-macijo pode ser alcançada!!

1. Motivação

Quando a velocidade de circulação do comboio atinge a “barreira crítica”, ocorre uma grande radiação de energia, sendo o efeito semelhante a...

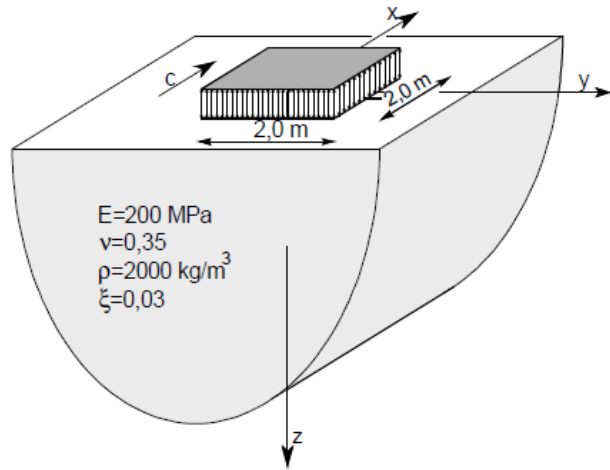


...contudo, em materiais geotécnicos este efeito pode ser consideravelmente mais complexo!



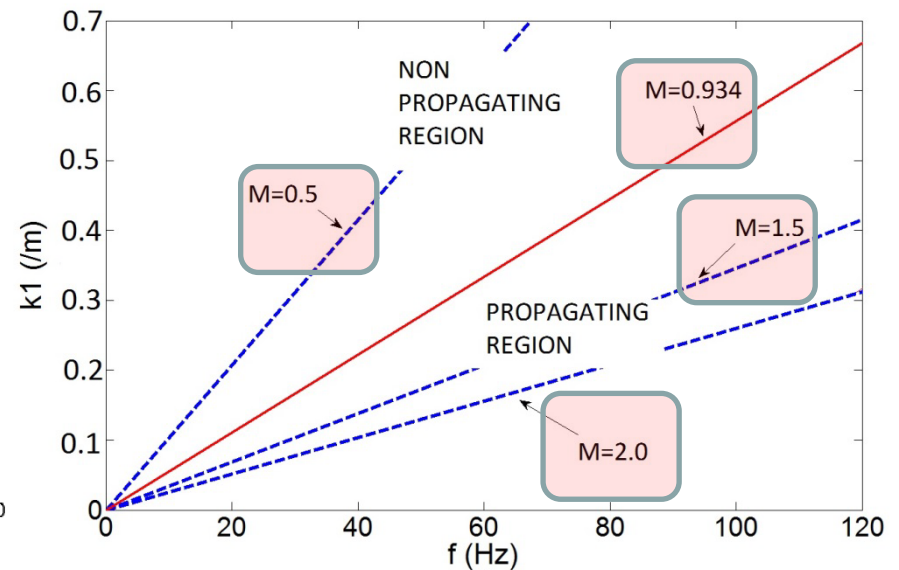
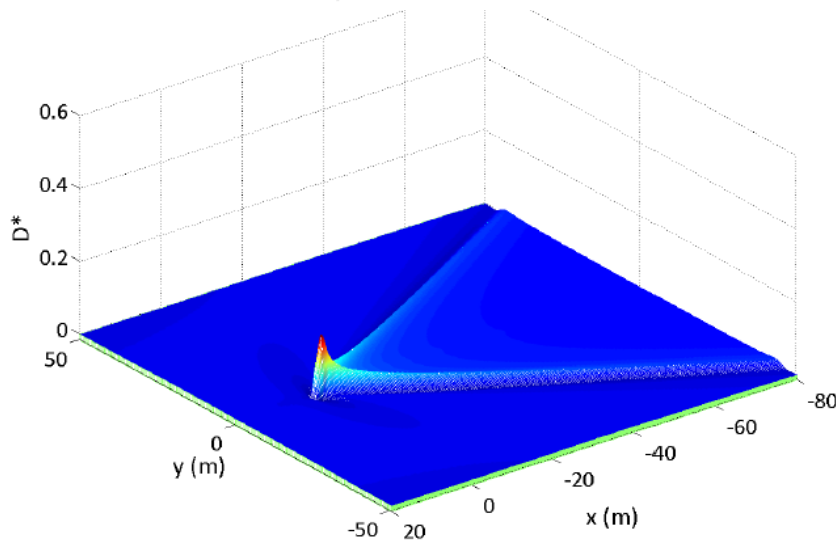
2. Conceito de velocidade crítica

2. Conceito de velocidade crítica



$$p_z(x, y, 0, t) = \begin{cases} \frac{1}{2a \times 2b} \delta(x - ct) & |x| < a, |y| < b \\ 0 & \text{elsewhere} \end{cases}$$

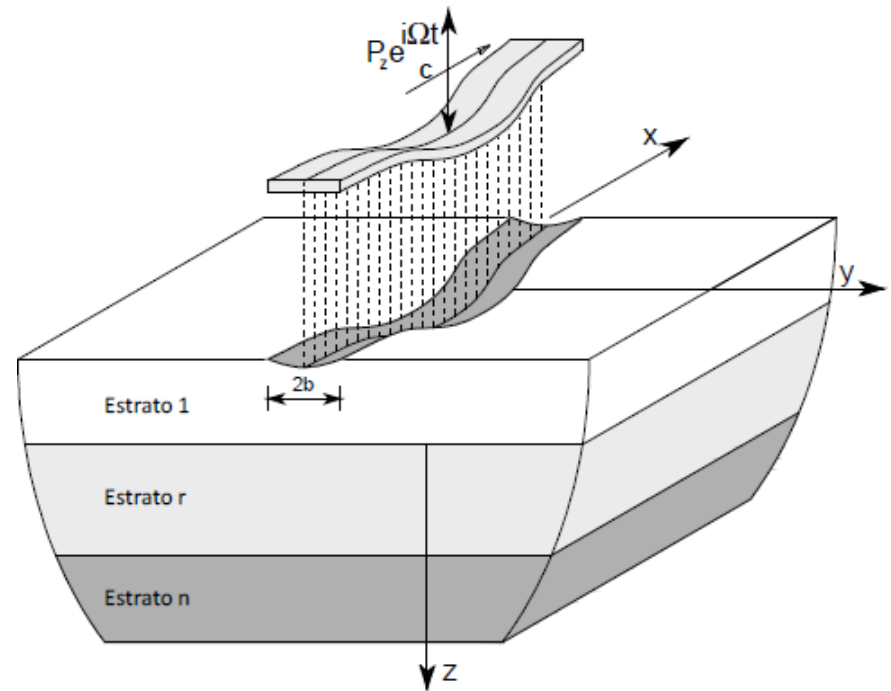
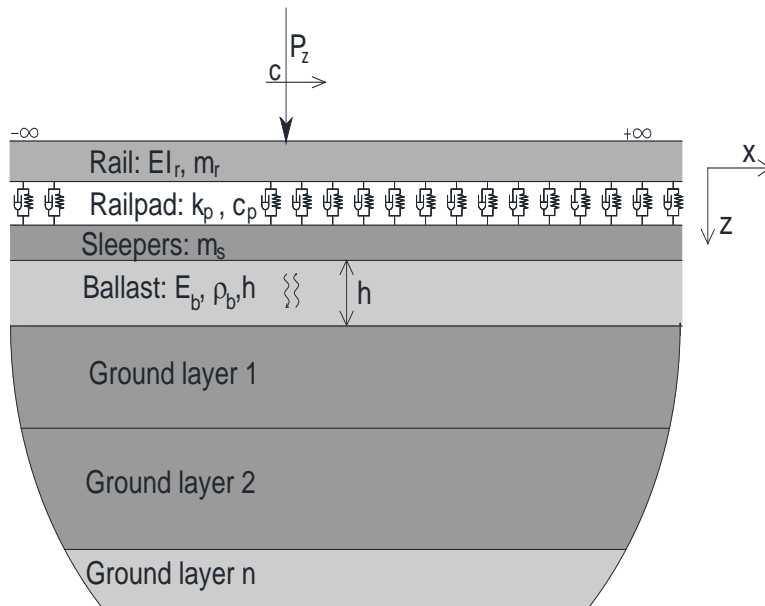
$$p_z(k_1, y, 0, \omega) = f(k_1, y) \delta(\omega - ck_1)$$



3. Velocidade crítica do sistema via-macijo

3. Velocidade crítica do sistema via-macião

Modelos simplificados semi-analíticos



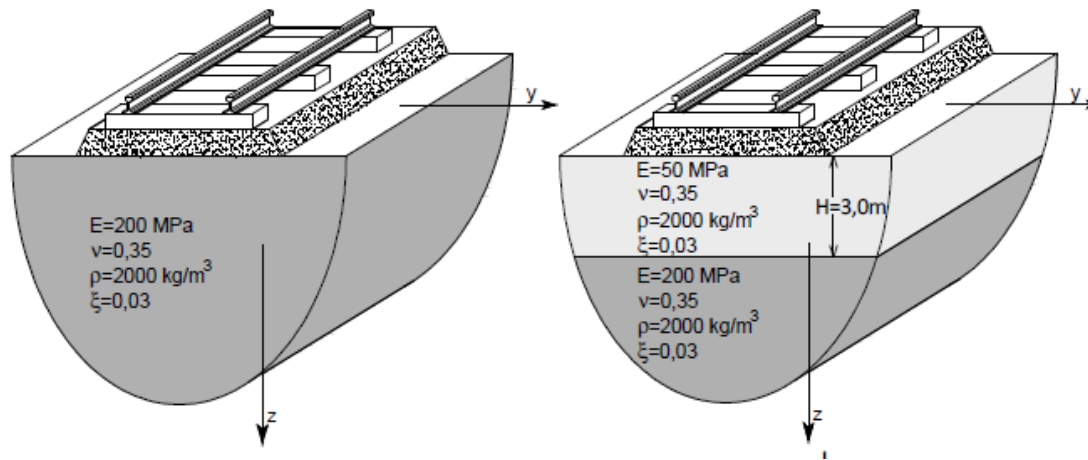
Sheng, X., C. Jones, and D. Thompson, *A theoretical study on the influence of the track on train-induced ground vibration*. Journal of Sound and Vibration, 2004. **272**: p. 909-936.

Alves Costa, P., et al. *Um modelo de análise dinâmica de maciços sujeitos a ações de tráfego: Validação experimental*. in *11º Congresso Nacional de Geotecnia*. 2008. Coimbra.

Alves Costa, P., *Vibrations of track-ground system induced by railway traffic. Numerical modelling and experimental validation*, in *Faculty of Engineering*. 2011, University of Porto: Porto.

3. Velocidade crítica do sistema via-macião

Modelos simplificados semi-analíticos

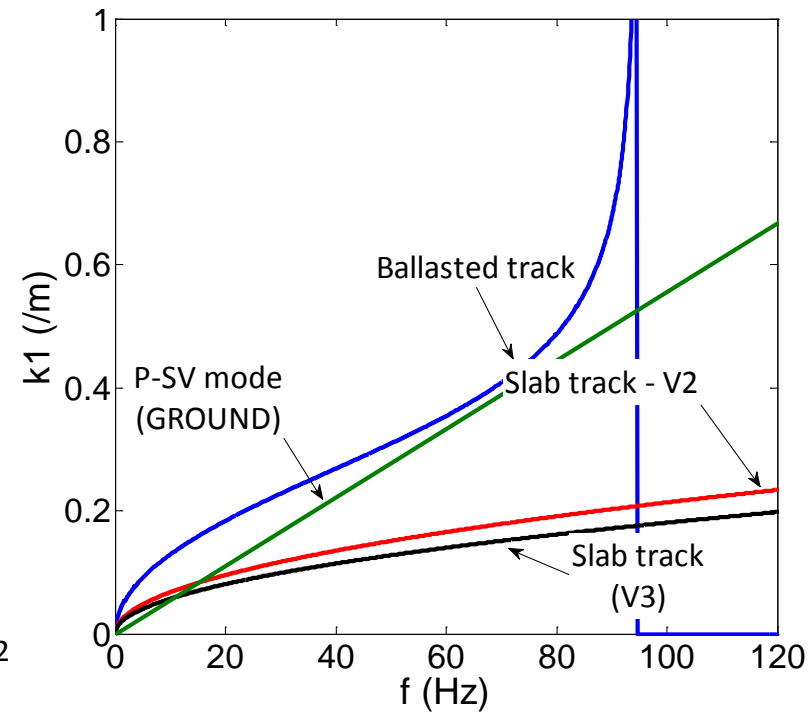
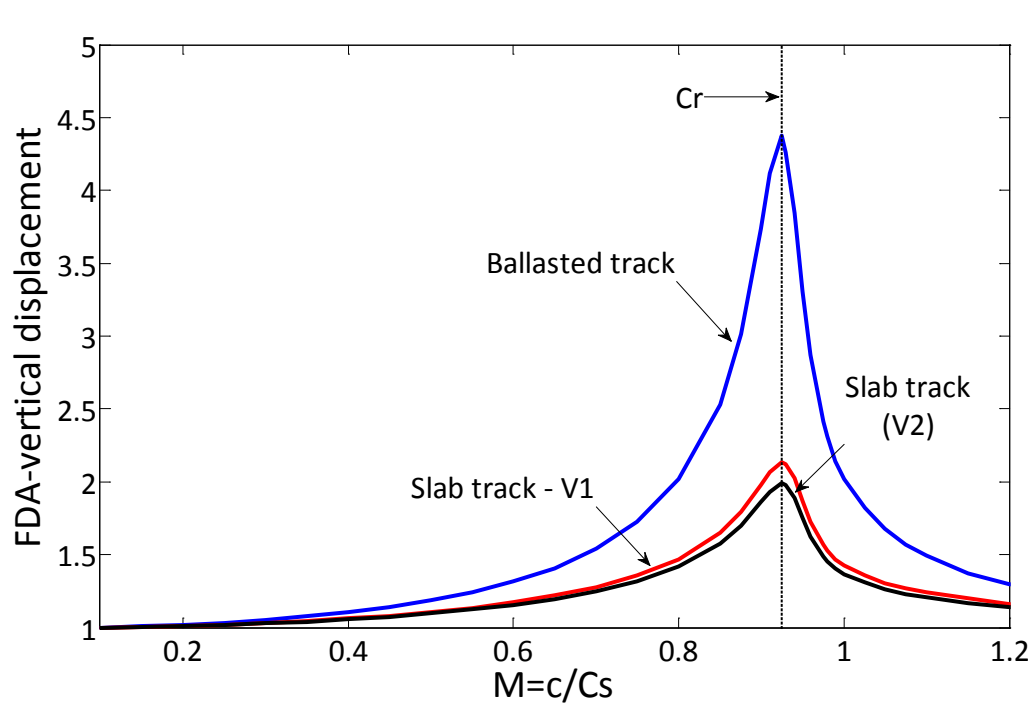


	V1 (ballasted track)	V2 (slab track)	V3 (slab track)
Rail	UIC60	UIC60	UIC60
$m_{\text{sleeper}} \text{ (kg/m)}$	490	-	-
$h_{\text{ballast/slab}} \text{ (m)}$	0.35	0.35	0.44
$E_{\text{bal/last/slab}} \text{ (Pa)}$	130e6	30e9	30e9
$r_{\text{ballast/slab}} \text{ (kg/m}^3\text{)}$	1700	2500	1990

3. Velocidade crítica do sistema via-macião

Modelos simplificados semi-analíticos

Cenário geotécnico homogêneo

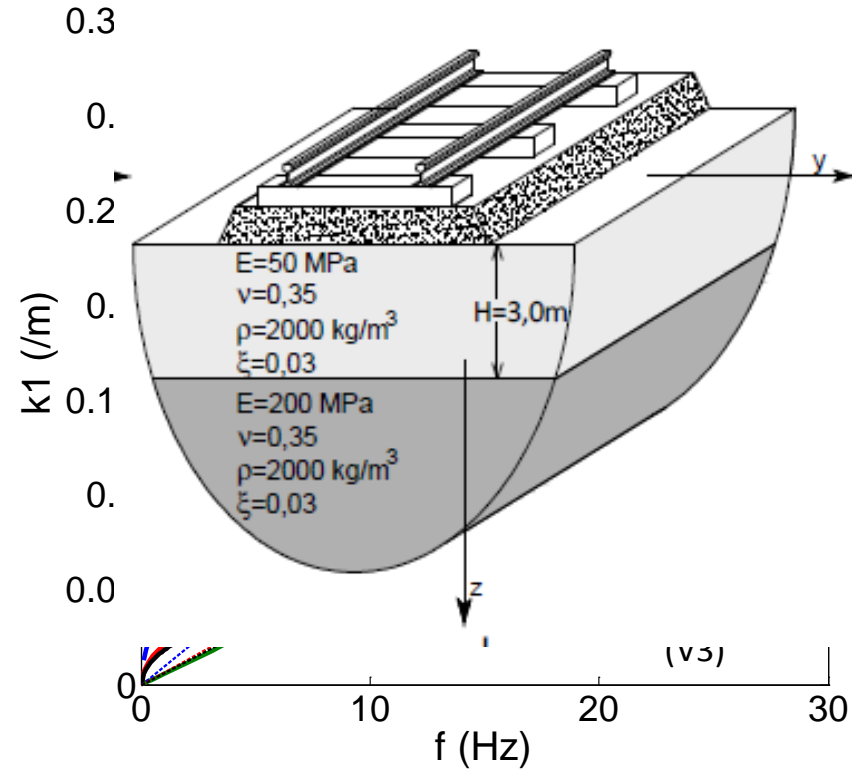
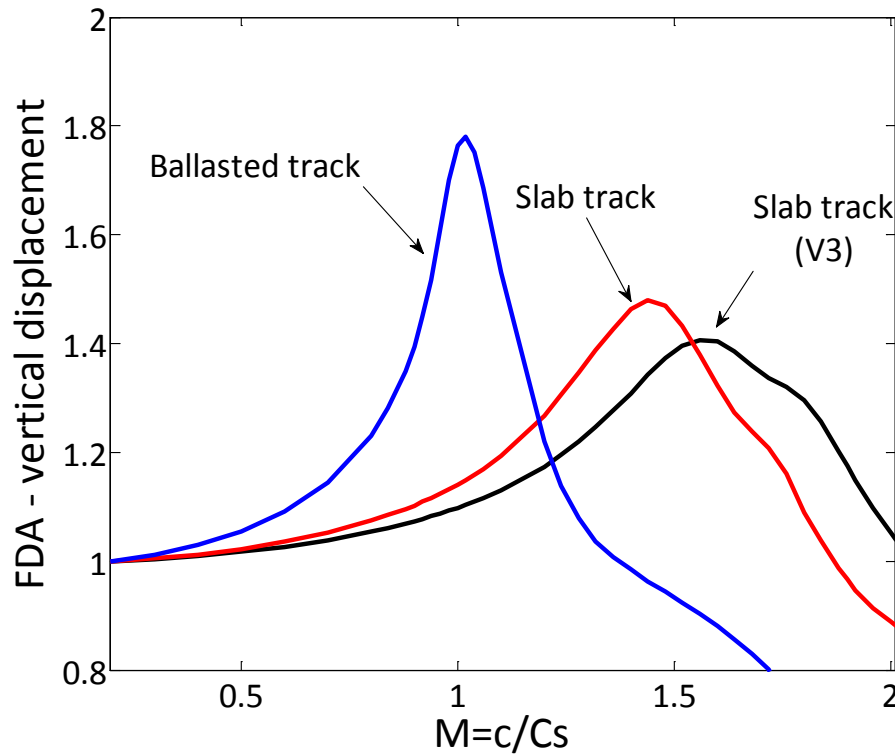


A velocidade crítica é totalmente definida pelas propriedades do macião de fundação.

3. Velocidade crítica do sistema via-macião

Modelos simplificados semi-analíticos

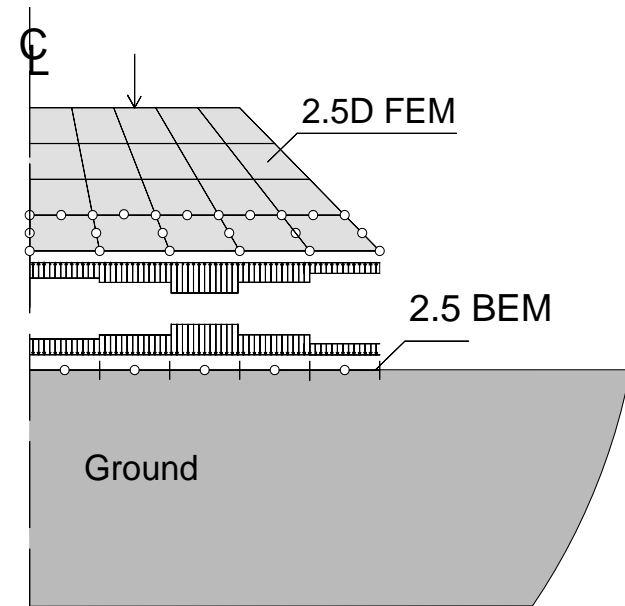
Cenário não homogêneo



O valor da velocidade crítica é dependente das propriedades dinâmicas da via férrea (rigidez de flexão longitudinal e massa).

3. Velocidade crítica do sistema via-macião

Modelos numéricos detalhados



$$(K_1^{\text{global}} + ik_1 K_2^{\text{global}} + k_1^2 K_3^{\text{global}} + k_1^4 K_4^{\text{global}} - \omega^2 M^{\text{global}} + K_5^{\text{global}}(k_1, \omega)) \tilde{u}_n(k_1, \omega) = \tilde{p}_n(k_1, \omega)$$

Geometria regular – 2.5D BEM

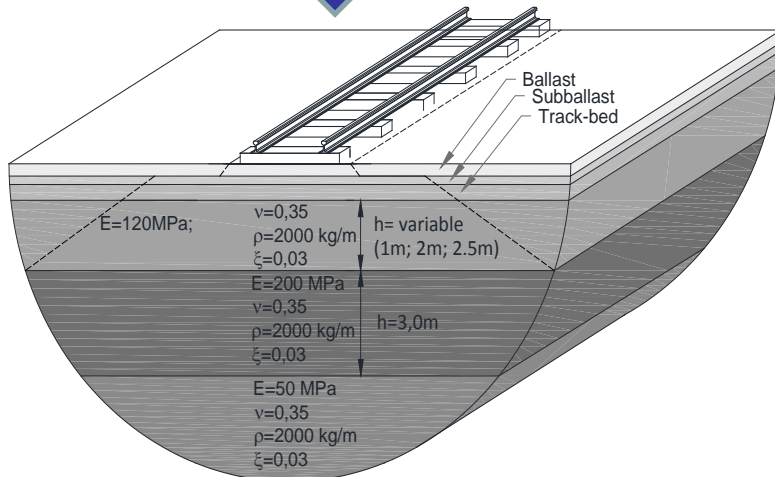
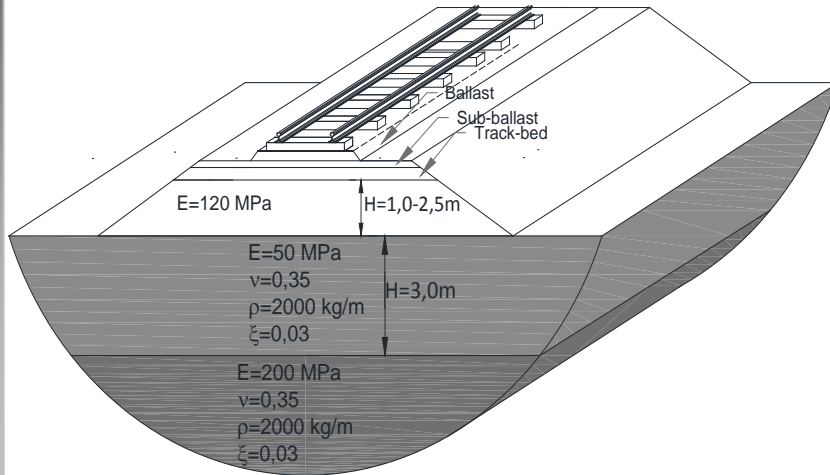
Geometria irregular – 2.5D FEM

Alves Costa, P., R. Calçada, and A. Cardoso, *Track-ground vibrations induced by railway traffic: In-situ measurements and validation of a 2.5D FEM-BEM model*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2012. **32**: p. 111-128.

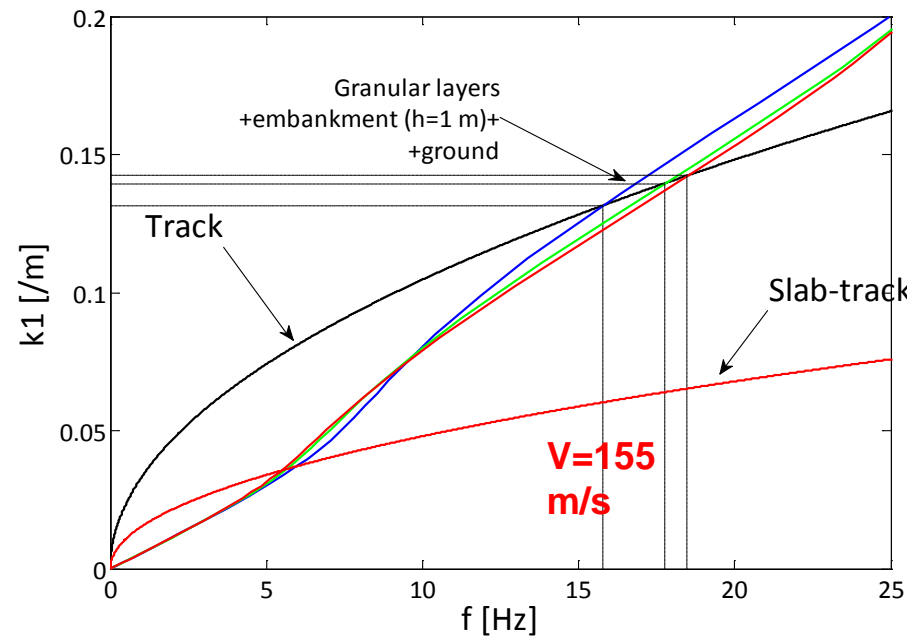
Alves Costa, P.; A. Colaço, R. Calçada, A. Cardoso, *Critical speed of railway tracks. Detailed and simplified approaches*. Transportation Geotechnics, 2014 (doi: 10.1016/j.trgeo.2014.09.003)

3. Velocidade crítica do sistema via-macião

Metodologia simplificada – exemplo de aplicação

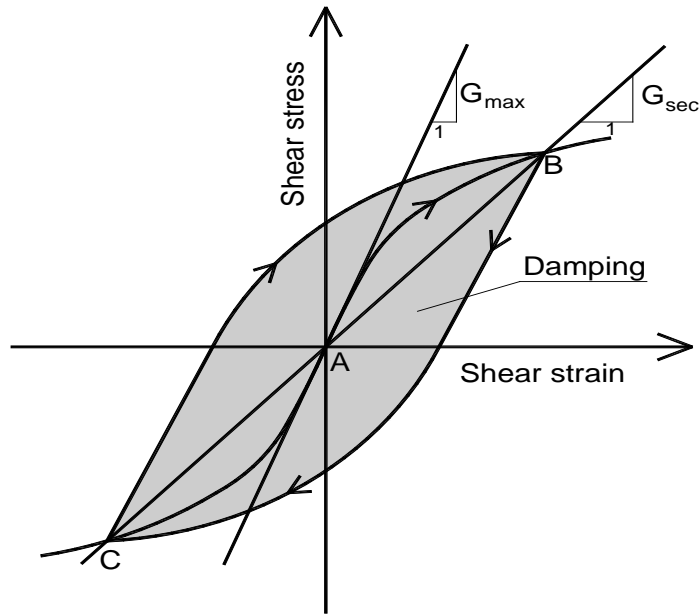


Método	Aterro h=1 m (m/s)	Aterro h=2 m (m/s)	Aterro h=2.5 m (m/s)
2.5 FEM-BEM	118	123	124
Simplificado	119	126	127



4. Comportamento não linear do solo

4. Comportamento não linear



Deformações	10 ⁻⁶	10 ⁻⁵	10 ⁻⁴	10 ⁻³	10 ⁻²	10 ⁻¹
	Small	Medium			High	Failure
Elástico	[Bar chart: dark purple to blue]					
Elastoplástico		[Bar chart: blue to dark purple]			[Bar chart: dark blue to blue]	
Efeito de carregamento cíclico				[Bar chart: dark purple]	[Bar chart: dark blue]	
Metodologia de análise	Elástico linear		Linear equivalente		Não linear	

Não linearidade material do solo;



A velocidade crítica passa a ser dependente das propriedades do material circulante

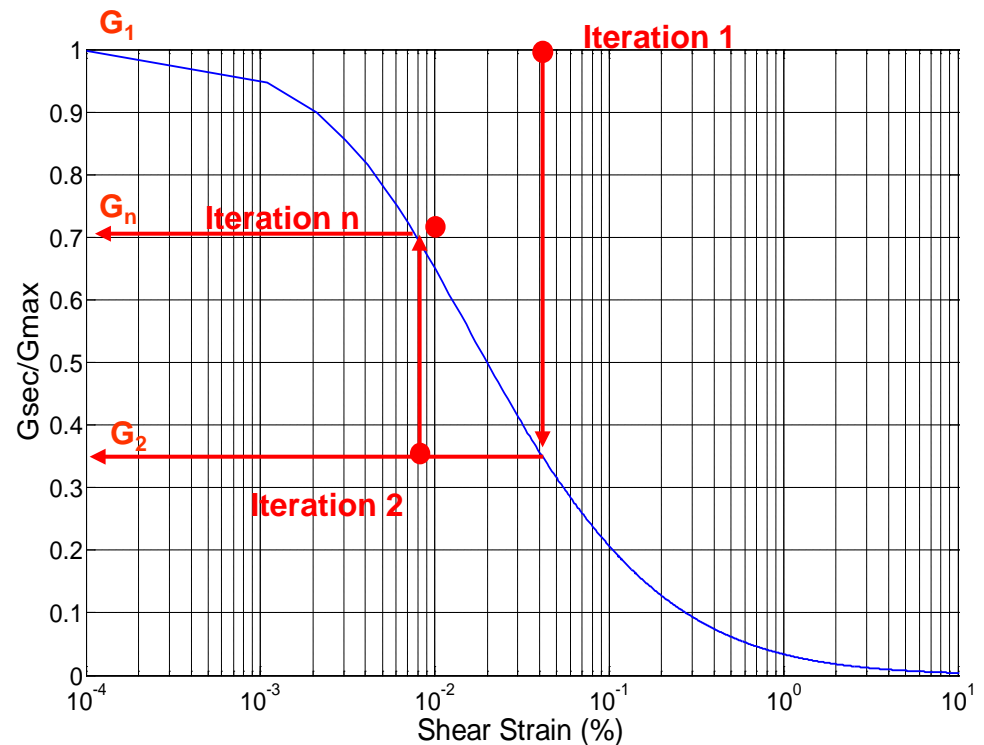
Necessidade de desenvolvimento de novas metodologias

4. Comportamento não linear

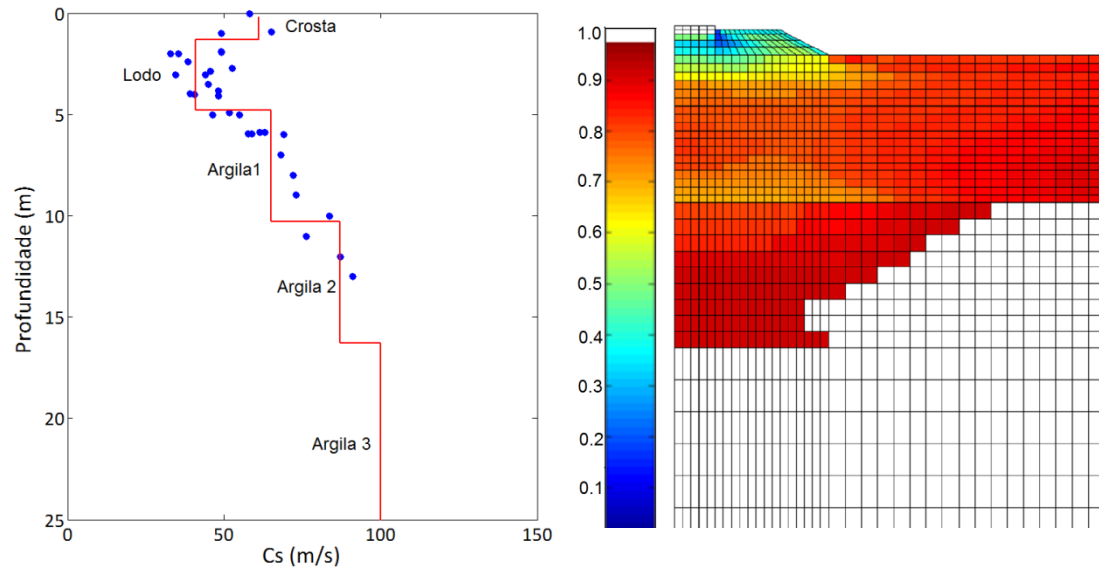
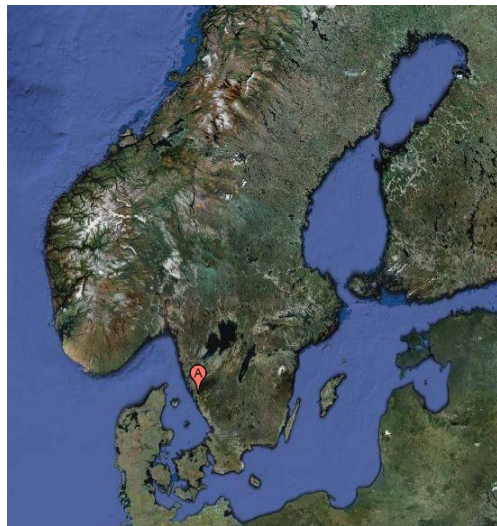
Análise linear equivalente – procedimento numérico

Procedimento numérico iterativo:

- Propriedades condizentes com pequenas deformações
- Avaliação da história temporal de deformação e cálculo de γ_{eff} para cada elemento
- Partindo do valor de γ_{eff} , correcção dos valores de G_{sec}^{i+1} e ξ^{i+1} e desenvolvimento de nova análise linear
- Passos 2 e 3 são repetidos até que se verifique convergência dos valores de rigidez e amortecimento em função da distorção ocorrida.



5. Caso de estudo - Ledsgard

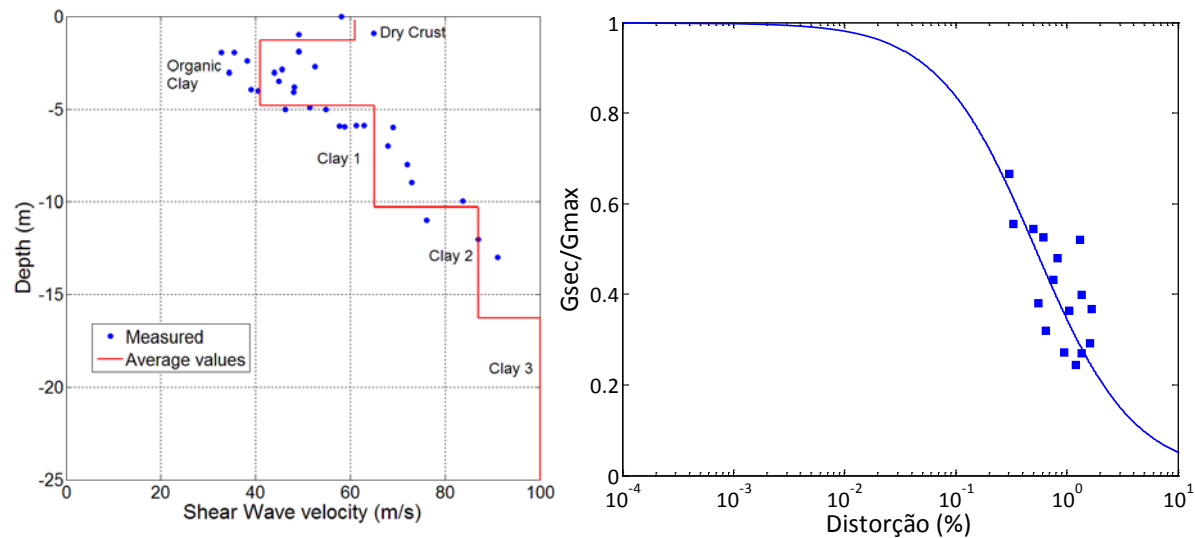
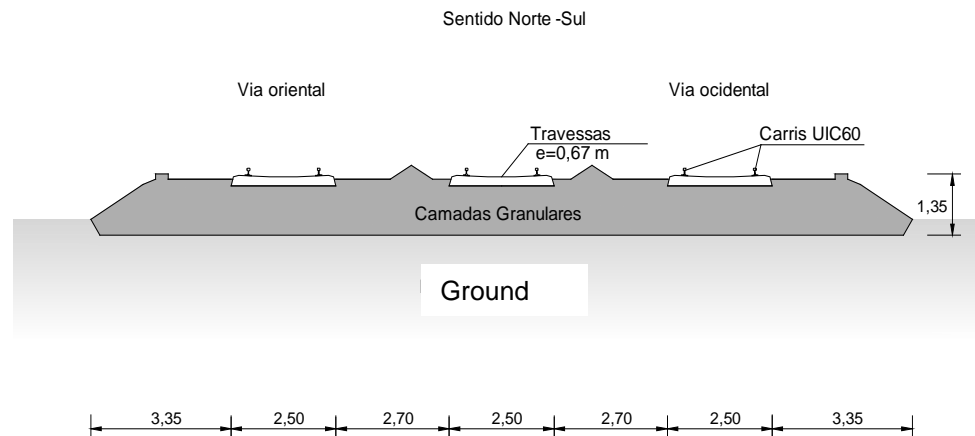
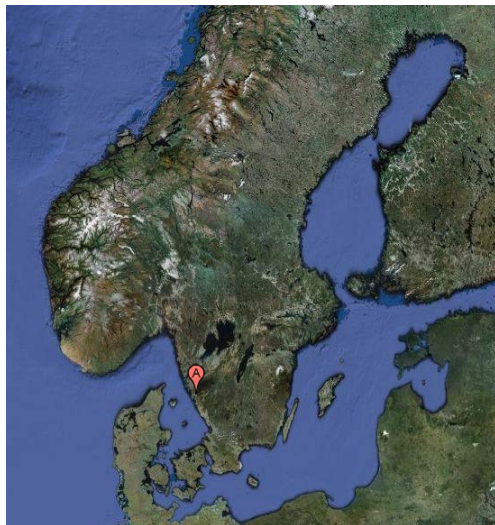


Alves Costa, P., et al., *Influence of soil non-linearity on the dynamic response of high-speed railway tracks*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2010. **30**(4): p. 221-235.

Alves Costa, P., R. Calçada, and A. Silva Cardoso, *Track-ground vibrations induced by railway traffic*, in *Applications of Computational Mechanics in Geotechnical Engineering*, L. Sousa, et al., Editors. 2012, Balkema.

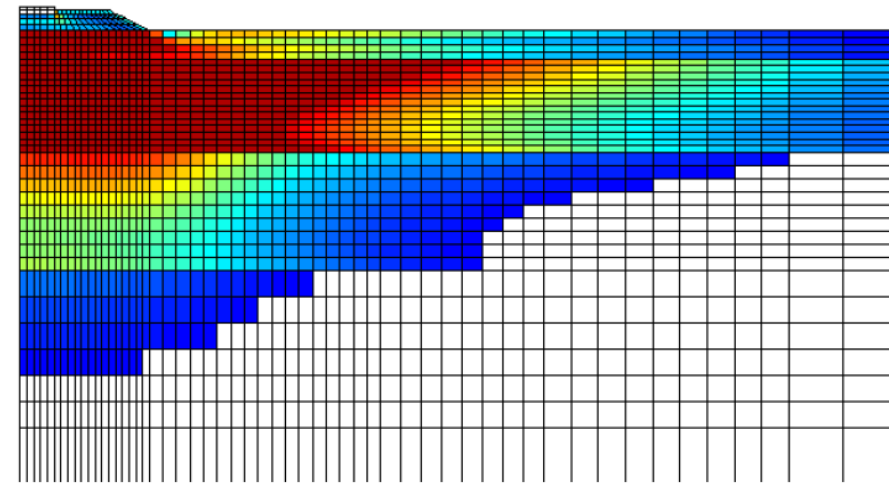
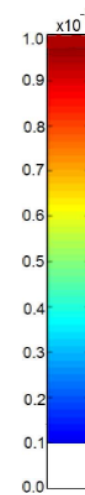
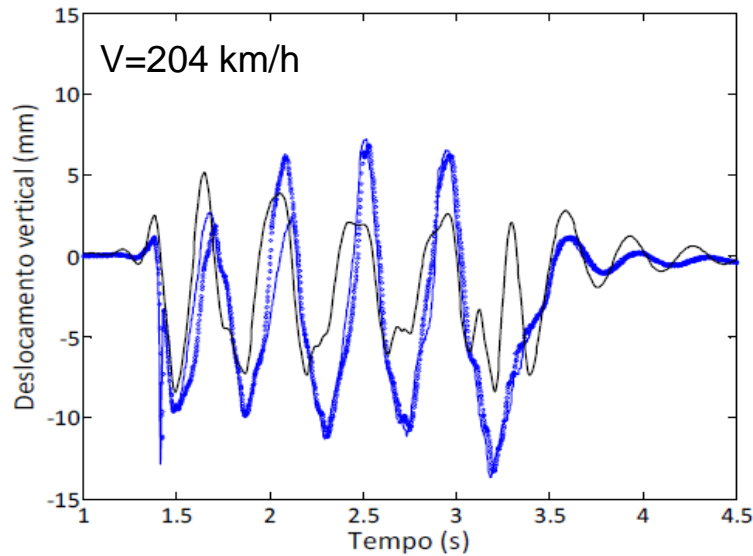
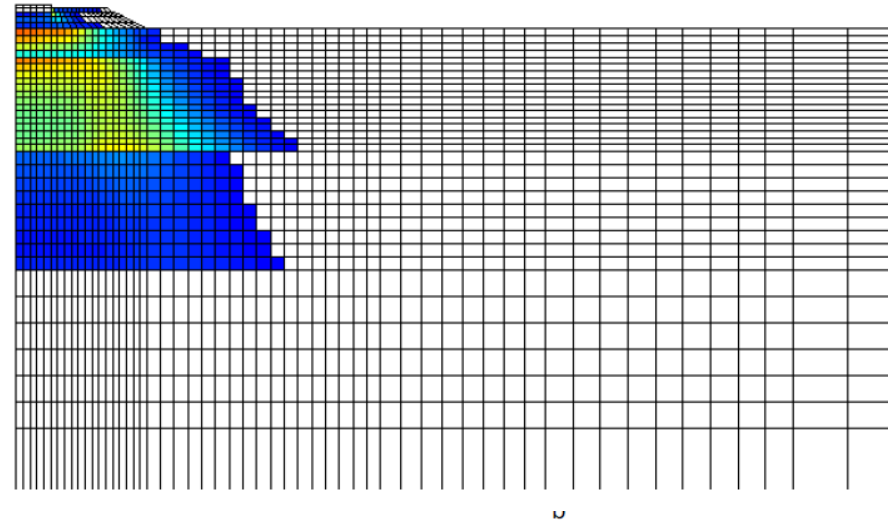
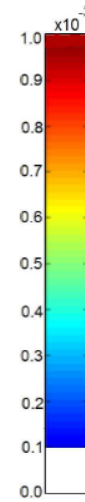
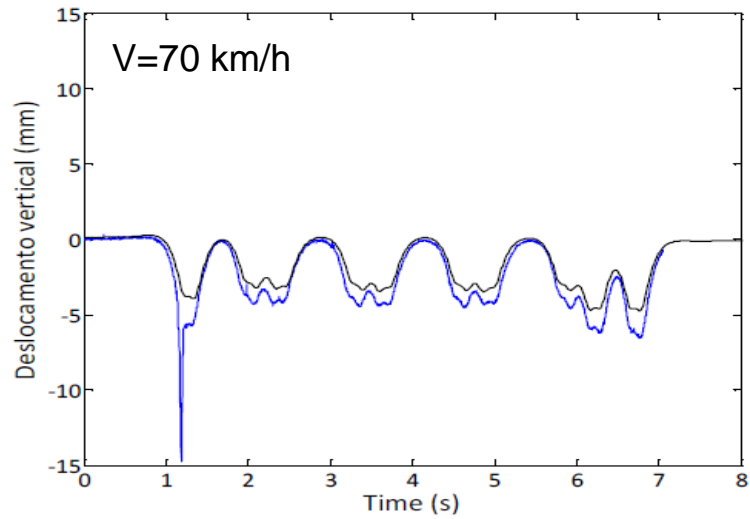
5. Caso de estudo - Ledsgard

Descrição geral



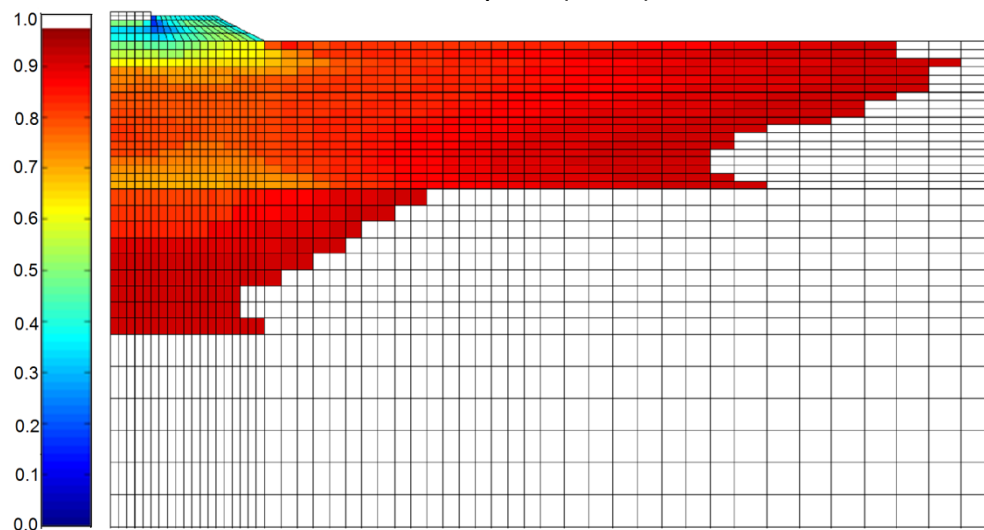
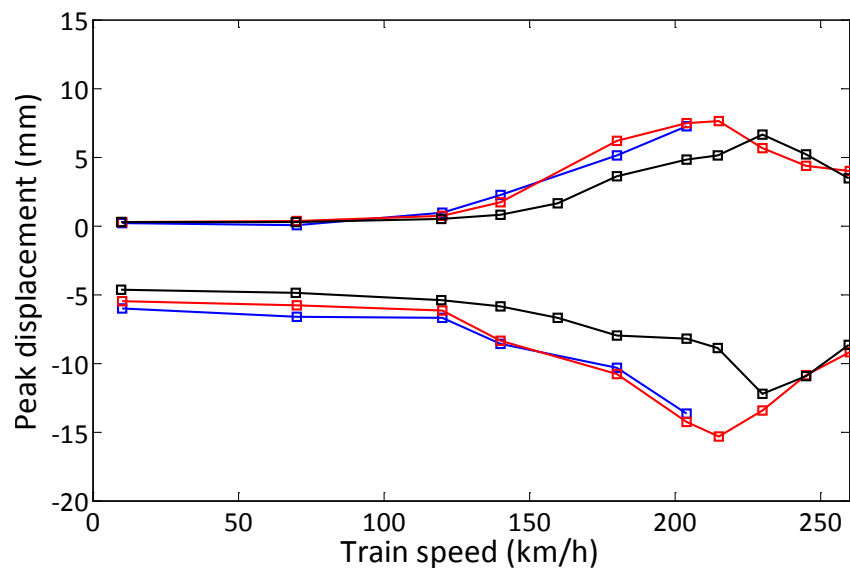
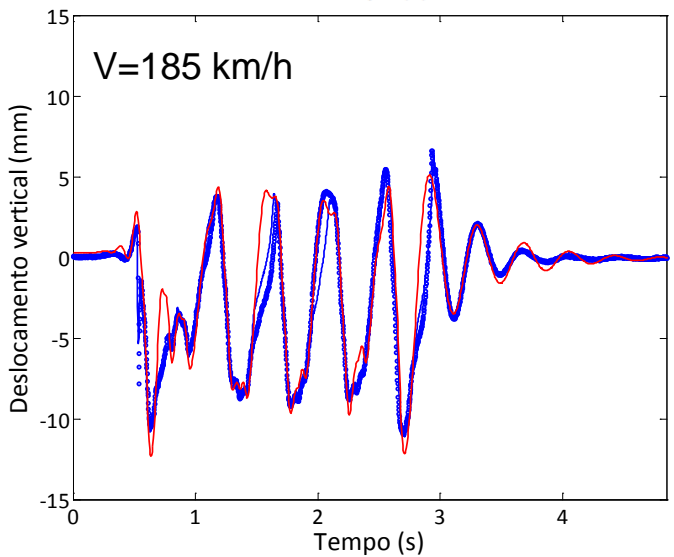
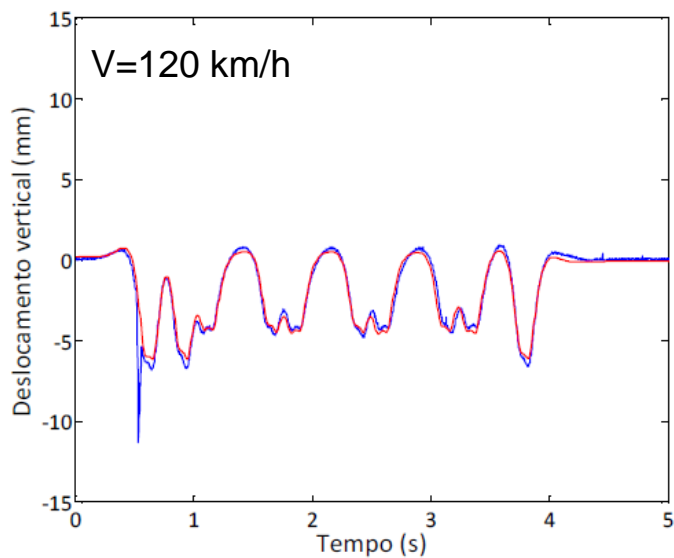
5. Caso de estudo - Ledsgard

Análise elástica



5. Caso de estudo - Ledsgard

Análise linear equivalente



6. Conclusões

6. Conclusões

Partindo da formulação do problema da resposta dinâmica de um sólido face a uma carga em movimento, foi analisado o problema da velocidade crítica em vias ferroviárias.

Atendendo à exigência computacional inerente à avaliação da velocidade crítica, foi proposta uma metodologia simplificada que permite a sua avaliação em regime elástico

Quando a velocidade do comboio se aproxima da velocidade crítica, o pressuposto de comportamento linear do sólido não é mais válido.

É proposta uma metodologia baseada no método 2.5D para a análise da resposta dinâmica de vias férreas atendendo ao comportamento não linear da fundação.

Agradecimentos

O presente trabalho compreende investigação desenvolvida sob financiamento da "FCT - Fundação para a Ciência e Tecnologia", Portugal, nomeadamente através do projecto de investigação PTDC/ECM/114505/2009.



Obrigado pela vossa atenção

pacosta@fe.up.pt