

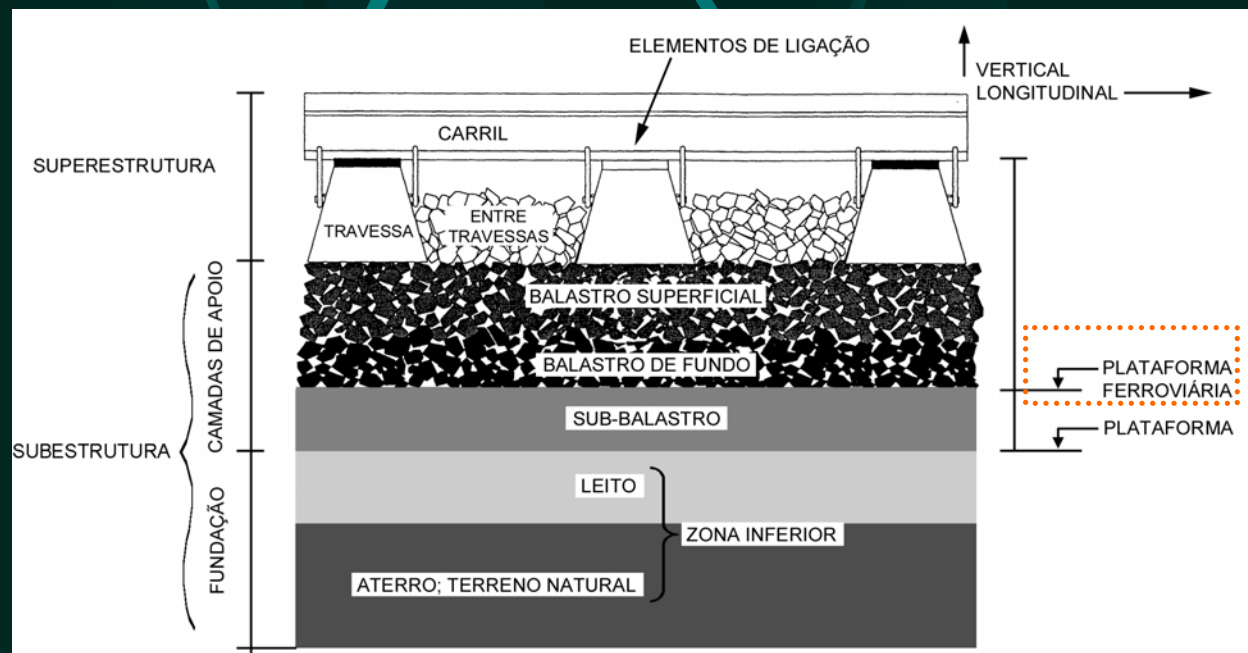
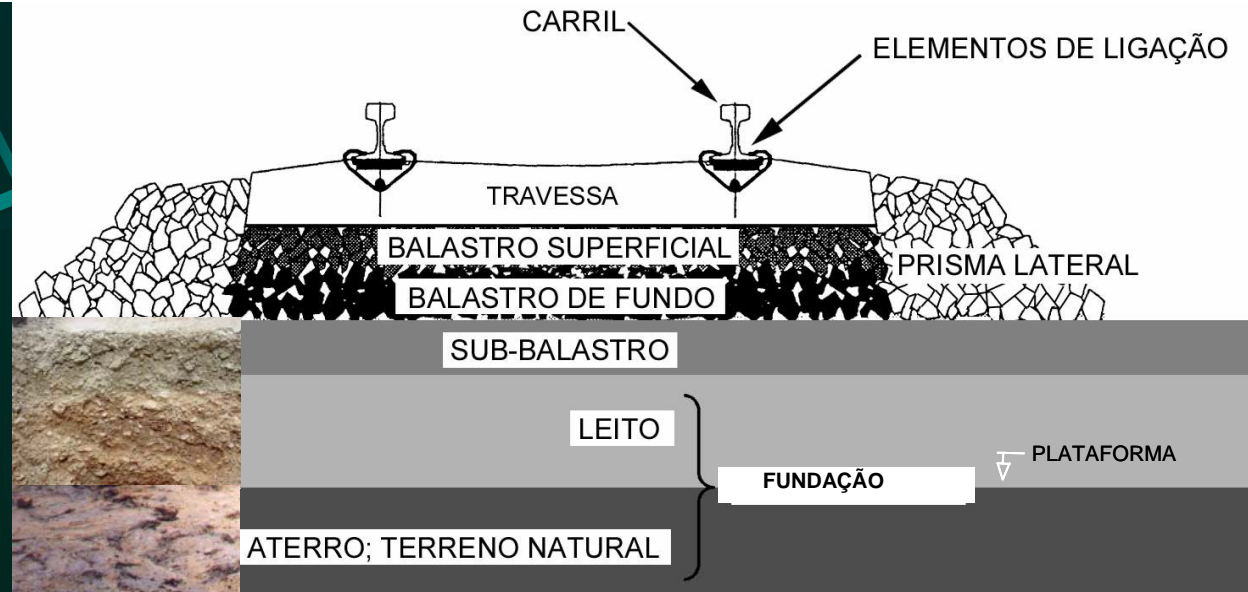
INOVAÇÕES NA CONSTRUÇÃO E NO CONTROLO DE ATERROS DE ESTRADAS E DE CAMINHOS DE FERRO DE ALTA VELOCIDADE PARTE 2

A. Gomes Correia – Universidade do Minho

Eduardo Fortunato - LNEC



ESTRUTURA DA VIA FÉRREA



Camadas de apoio do pavimento e da via férrea

Função

Fase de construção

Traficabilidade
Capacidade de suporte
Protecção das terraplenagens

Fase de exploração

Capacidade de carga do pavimento/via
Redução de tensões para a plataforma
Impermeabilização da plataforma
Drenagem das águas zenitais
Drenagem das águas subsuperficiais
Filtro e separação balastro/plataforma
Protecção contra o gelo

Materiais; espessura de camadas; técnicas construtivas

Execução

Materiais { granulometria
plasticidade
características das partículas

Camadas { homogeneidade
espessura
% compactação
módulo E_{v2}

Geometria { inclinações
cotas
regularidade

Exigências

Exploração

- Homogeneidade (longo trecho)
- Variabilidade reduzida (condições climáticas)

Conservação / Reabilitação

- Camada de desgaste
- Balastro
- Drenagem
- Plataforma
- Terraplenagens

Controlo da qualidade de construção de aterros e de camadas de apoio de pavimentos e de vias férreas

- **Especificação por procedimentos** – problemas relacionados com a variação dos materiais e das condições de construção;
- **Especificação por produto** – problemas relacionados com a representatividade dos ensaios;

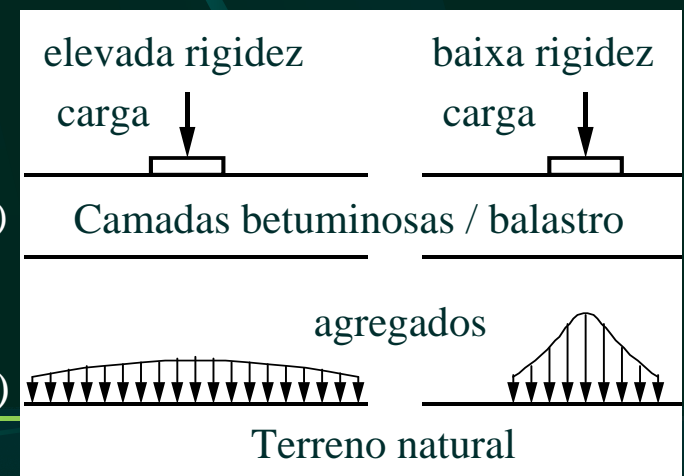
ex: $d_{\max} > 19\text{mm}$;

ex: energia de compactação em campo muito distinta da utilizada em laboratório;

- **Especificações baseadas no desempenho** – estabelecimento de valores mínimos de grandezas mecânicas que caracterizam as estruturas.

Por exemplo da rigidez da estrutura, procedendo à sua avaliação, pontualmente ou em contínuo, através de:

- ✓ Ensaio de Carga com Placa (ECP)
- ✓ Deflectómetro de Impacto Pesado (FWD) e Portátil (DIP)
- ✓ Medidor de capacidade de suporte em contínuo (MCSC)
- ✓ Soil Stiffness Gauge (SSG)
- ✓ Análise Espectral de Ondas de Superfície (SASW, CSW)



Dimensionamento das camadas de reforço de plataformas ferroviárias (LNEC, 2000)

Dados

$e_{\text{sub-balastro}}$

$E_{\sqrt{2}}$ topo terraplenagem

$E_{\sqrt{2}}$ material sub-balastro

$E_{\sqrt{2}}$ material leito

Admite-se

E topo do sub-balastro

Modelo de comportamento

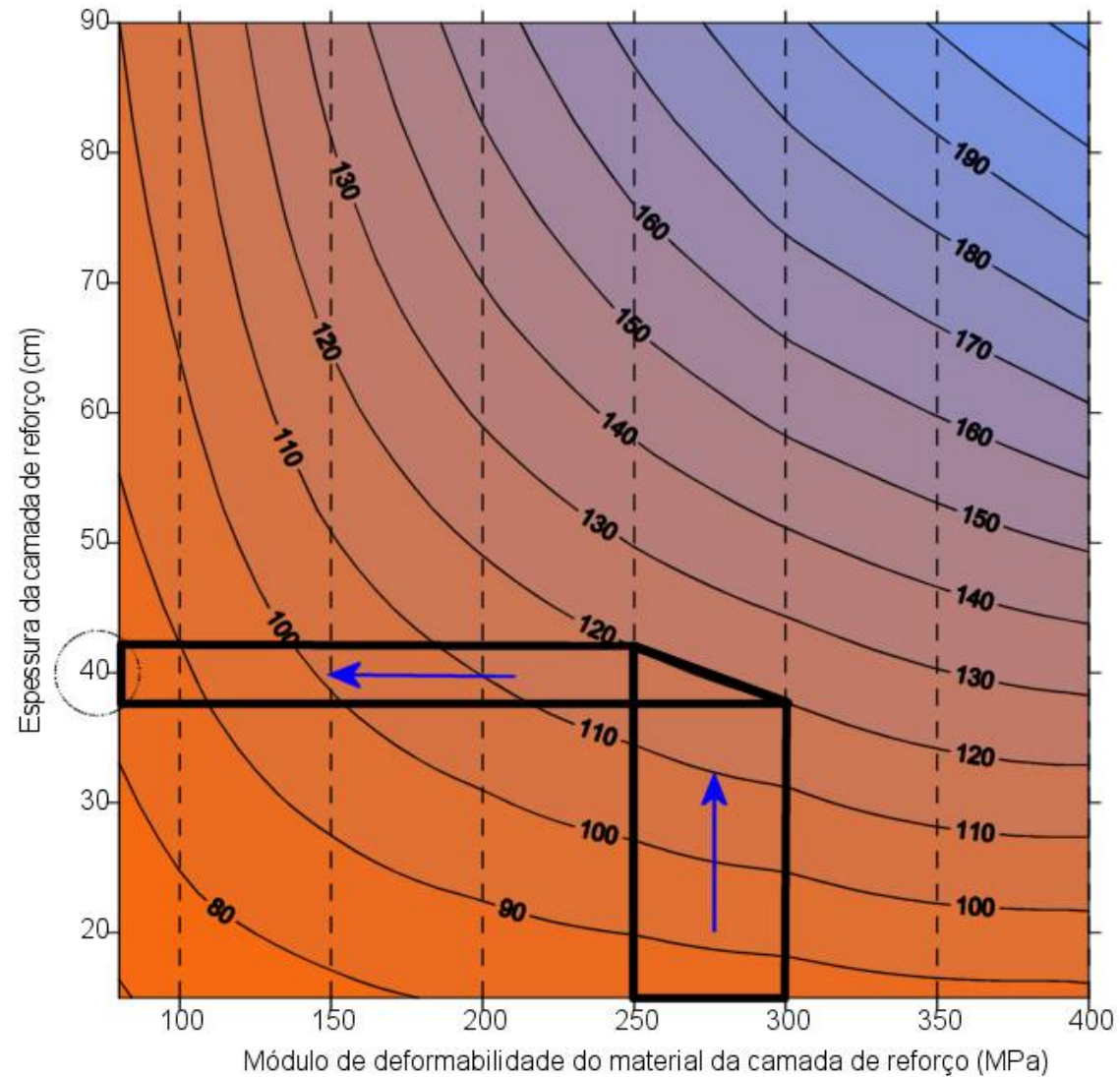
Condições de fronteira

Determina-se

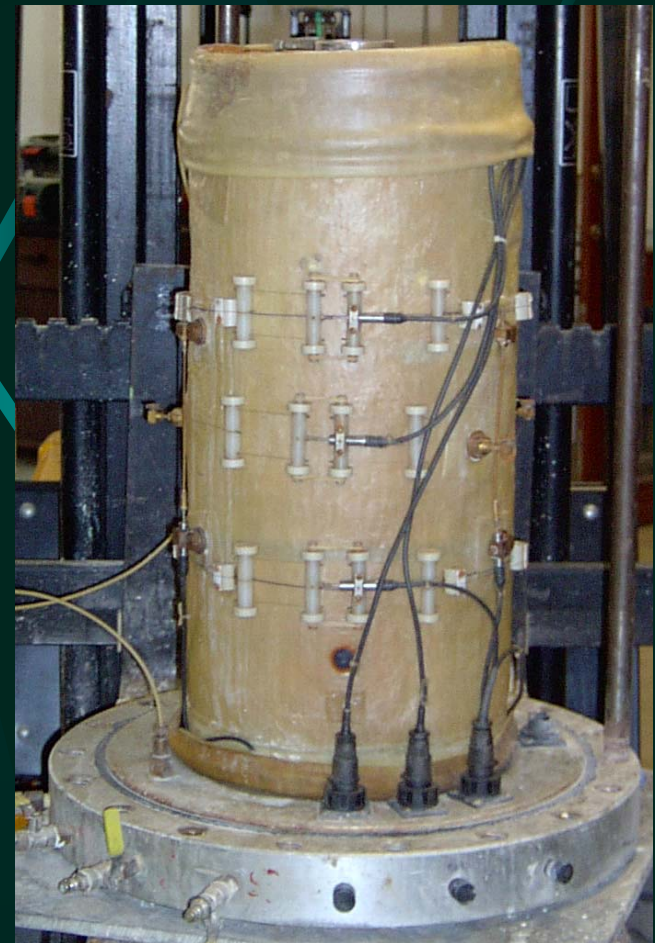
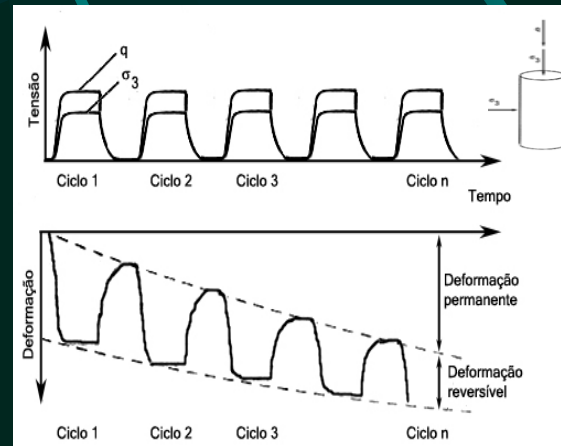
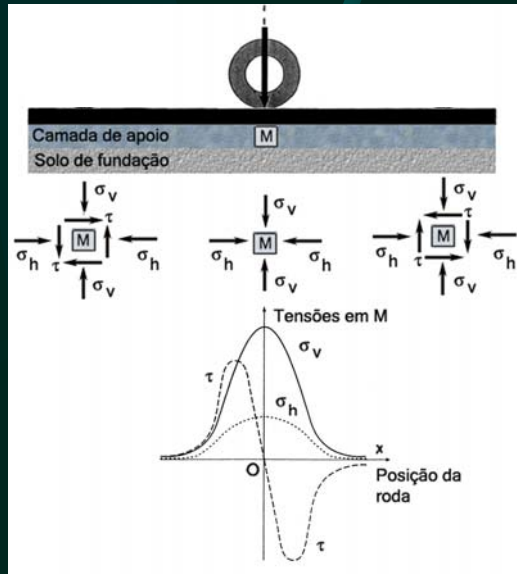
e camada de leito

Módulo de deformabilidade equivalente num meio semi-infinito

Fronteira rígida a 3 m
Sub-balastro com 300 MPa
Plataforma existente com 40 MPa

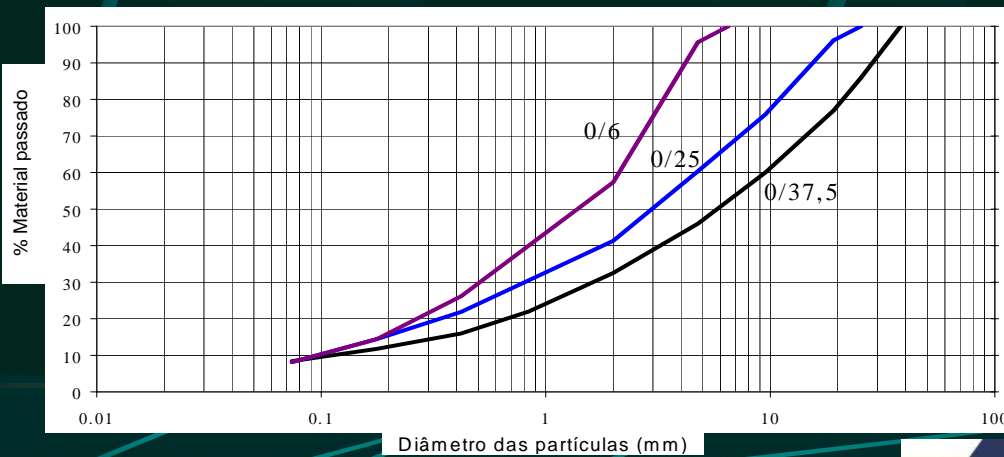


ENSAIOS DE CARGA TRIAXIAL CÍCLICA



Deformabilidade de agregados britados:

- várias compacidades; vários teores em água



$$\varepsilon_v = p_a^{1-n} \cdot p^{*n} \left[\frac{\gamma+2}{3.K_a} + \frac{n-1}{18.G_a} (\gamma+2) \cdot \left(\frac{q^*}{p^*} \right)^2 + \frac{\gamma-1}{3.G_a} \left(\frac{q^*}{p^*} \right) \right]$$

$$\varepsilon_q = \frac{2}{3} p_a^{1-n} \cdot p^{*n} \left[\frac{\gamma-1}{3.K_a} + \frac{n-1}{18.G_a} (\gamma-1) \cdot \left(\frac{q^*}{p^*} \right)^2 + \frac{2\gamma+1}{6.G_a} \left(\frac{q^*}{p^*} \right) \right]$$

$$\varepsilon_1^p = \varepsilon_1^{p0} \cdot \left[1 - \left(\frac{N}{N_0} \right)^{-B} \right] \cdot \left(\frac{l_{\max}}{p_a} \right)^n \cdot \frac{1}{\left(m + \frac{s}{p_{\max}} - \frac{q_{\max}}{p_{\max}} \right)}$$

A. Gomes Correia (agc@civil.uminho.pt)
Eduardo Fortunato (efortunato@Inec.pt)

Alguns resultados de ensaios realizados durante a renovação da plataforma ferroviária da Linha do Norte

Com os objectivos de avaliar:

- a qualidade da obra construída;
- a facilidade de utilização e o rendimento dos equipamentos;
- a repetibilidade dos valores obtidos em cada local;
- a sensibilidade dos valores às condições de ensaio;
- a relação entre os valores obtidos e os valores do módulo de deformabilidade obtidos pelo ECP ($E_{v2} - \phi=600 \text{ mm}, \sigma_{vmax}=250 \text{ kPa}$);
- a possibilidade de estes equipamentos contribuírem para o estabelecimento da energia de compactação necessária;
- a possibilidade de estes equipamentos permitirem detectar zonas com comportamento distinto, de forma muito mais fácil e económica do que recorrendo ao ECP.

Métodos utilizados



ZONA A – Renovação da plataforma ferroviária



Plataforma das terraplenagens em más condições



Camada de 30 a 45 cm de enrocamento calcário



$E_{v2 \min} = 40 \text{ MPa}$



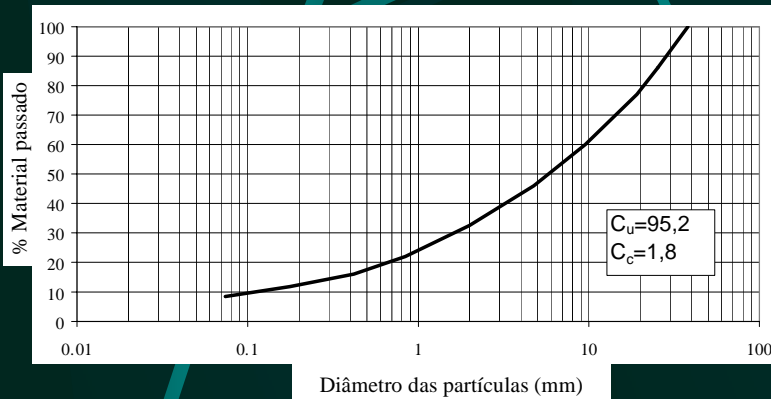
$E_{v2 \min} = 120 \text{ MPa}$

Leito de via: 20 a 35 cm de material calcário britado com granulometria 0/37,5 mm + Sub-balastro: 0,15 m de material de granítico de granulometria (0/37,5 mm)

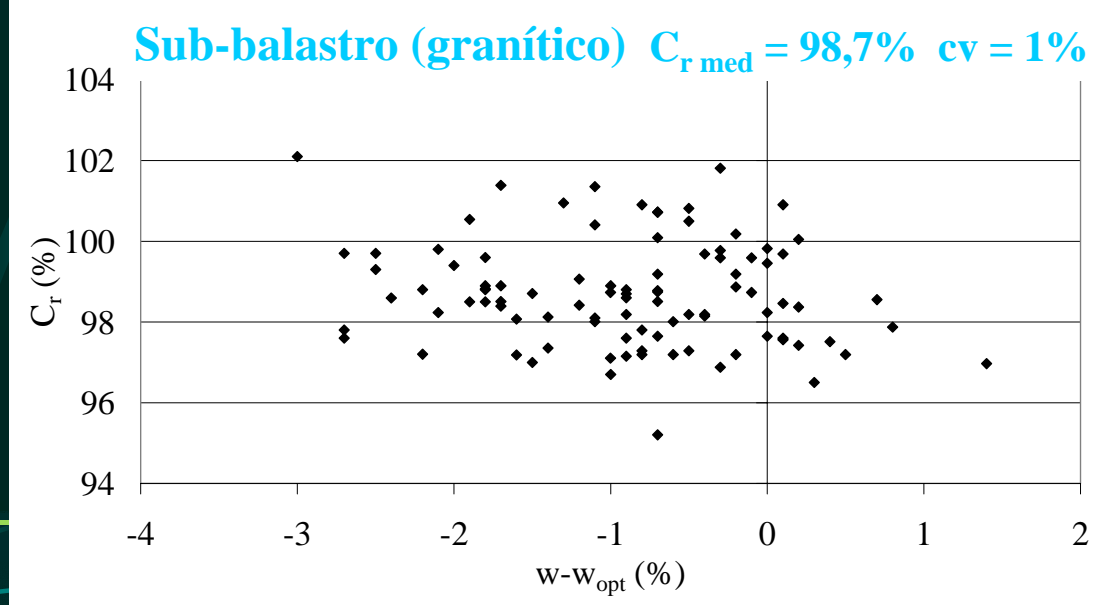
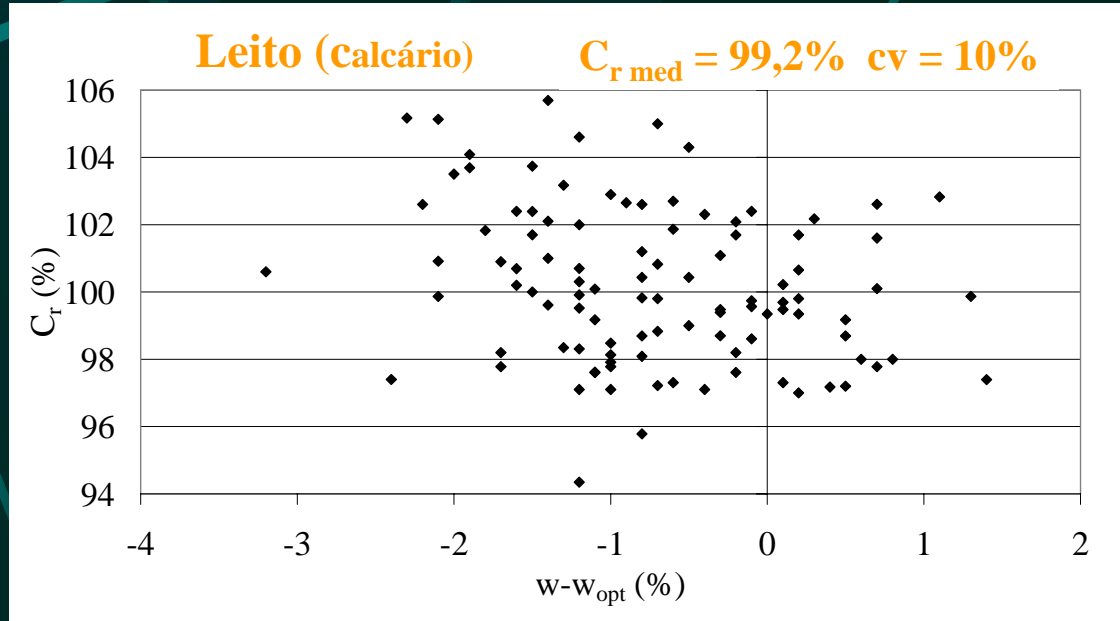
Leito de via e sub-balastro ambos construídos com material agregado britado de granulometria extensa numa espessura total de 0,35 m.

A. Gomes Correia (agc@civil.uminho.pt)
Eduardo Fortunato (efortunato@Inec.pt)

Exemplo do controlo da compactação num trecho de 10 km



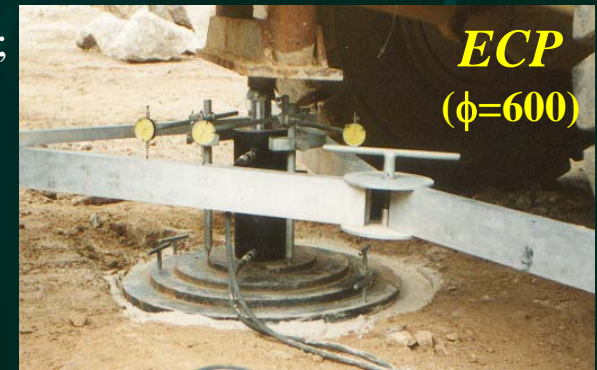
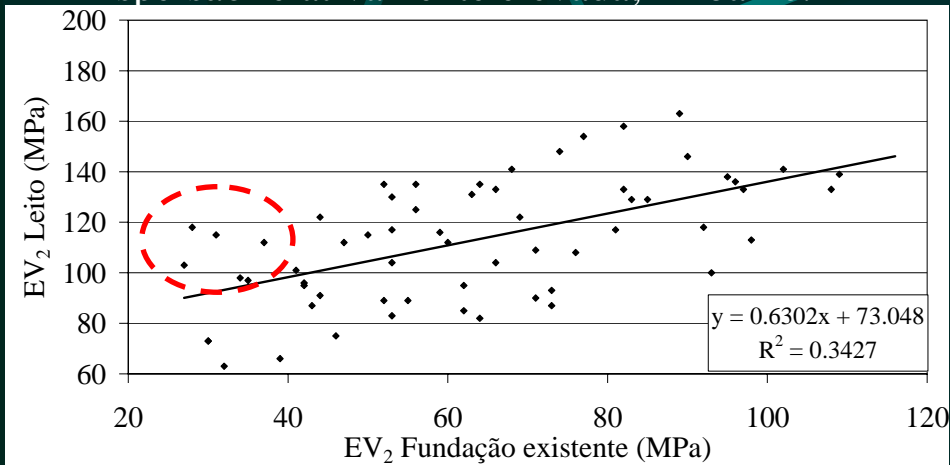
- ✓ Compactação relativa elevada;
- ✓ Maior dispersão no leito;
- ✓ Compactação do lado seco.



A. Gomes Correia (agc@civil.uminho.pt)
Eduardo Fortunato (efortunato@Inec.pt)

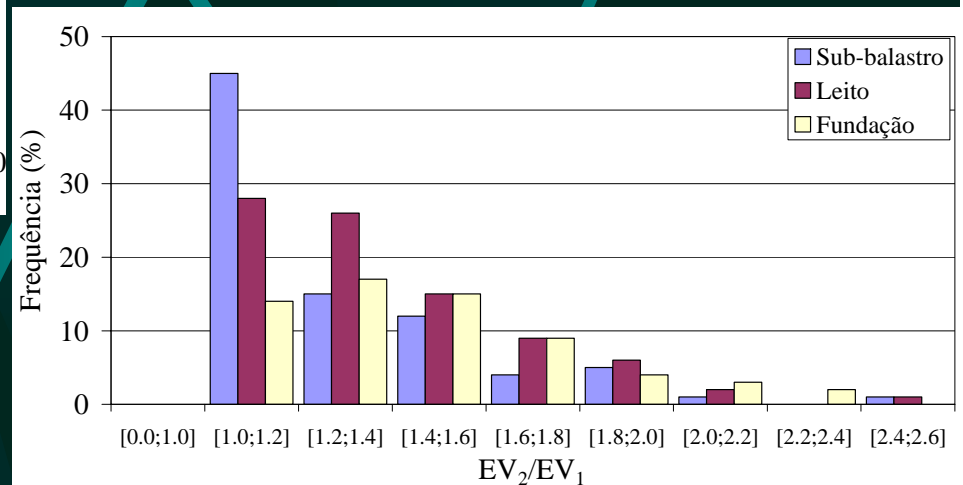
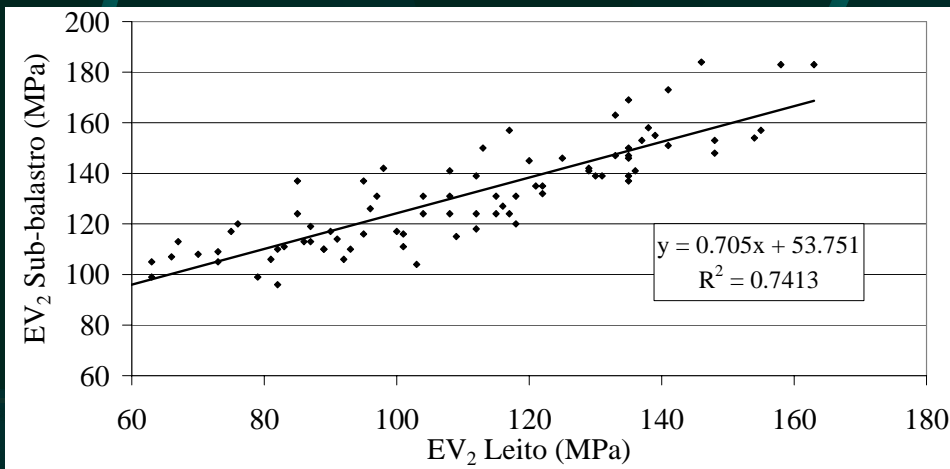
✓ Aumento significativo de EV_2 com a construção do leito (30% a 300%);

✓ Dispersão relativamente elevada; R^2 baixo.



✓ Aumento importante de EV_2 no domínio dos valores mais baixos, com a construção do sub-balastro (10% a 70%, com um valor máximo de cerca de 40 MPa)

✓ R^2 relativamente elevado.



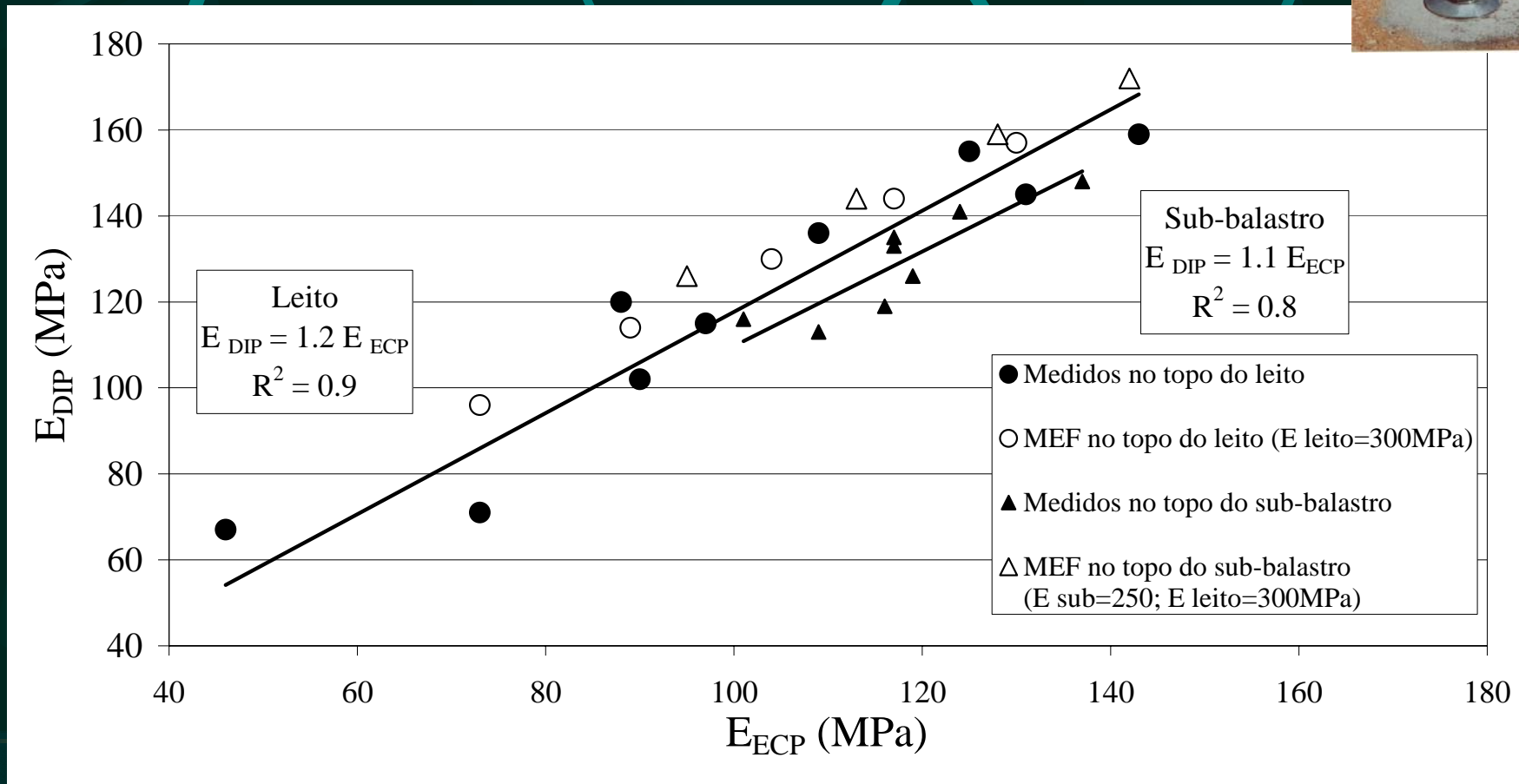
✓ $1 < EV_2/EV_1 < 2,5$;

✓ valores médios: 1,5 (F); 1,4 (L); 1,3 (SB);

✓ materiais distintos => distintas relações;

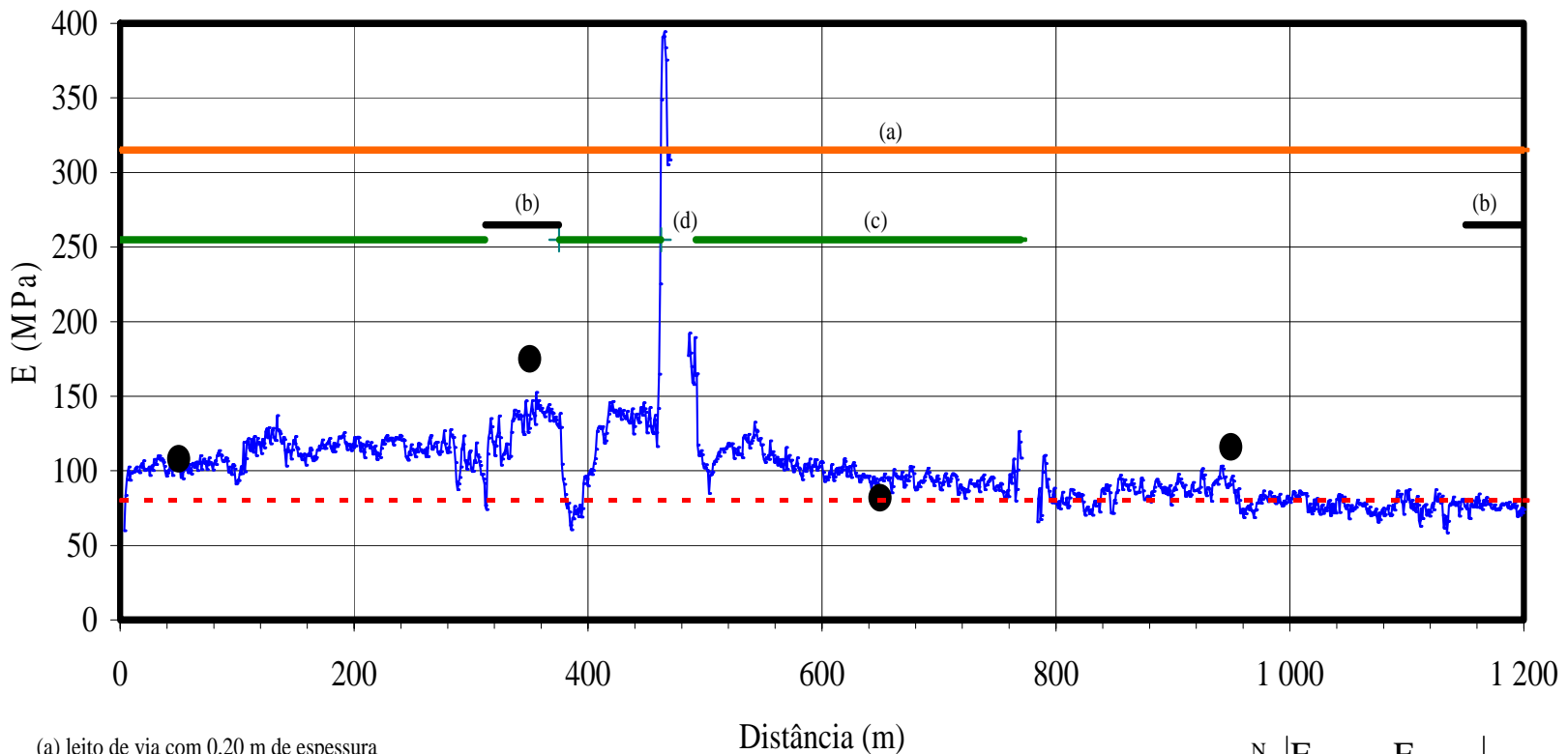
✓ resposta mais adequada da camada de sub-balastro em relação à de leito e desta em relação à fundação existente.

Valores do módulo de deformabilidade medidos com o ECP e o com DIP e calculados pelo MEF, no topo das camadas de leito e de sub-balastro na Zona A.



Módulo de deformabilidade obtido com o MCSC e com o ECP na Zona A no topo da camada de leito da via.

- $80 < EV_2 \text{ (MPa)} < 170$
- Efeito do número de passagens, detecção de zonas com anomalias; avaliação de soluções construtivas.



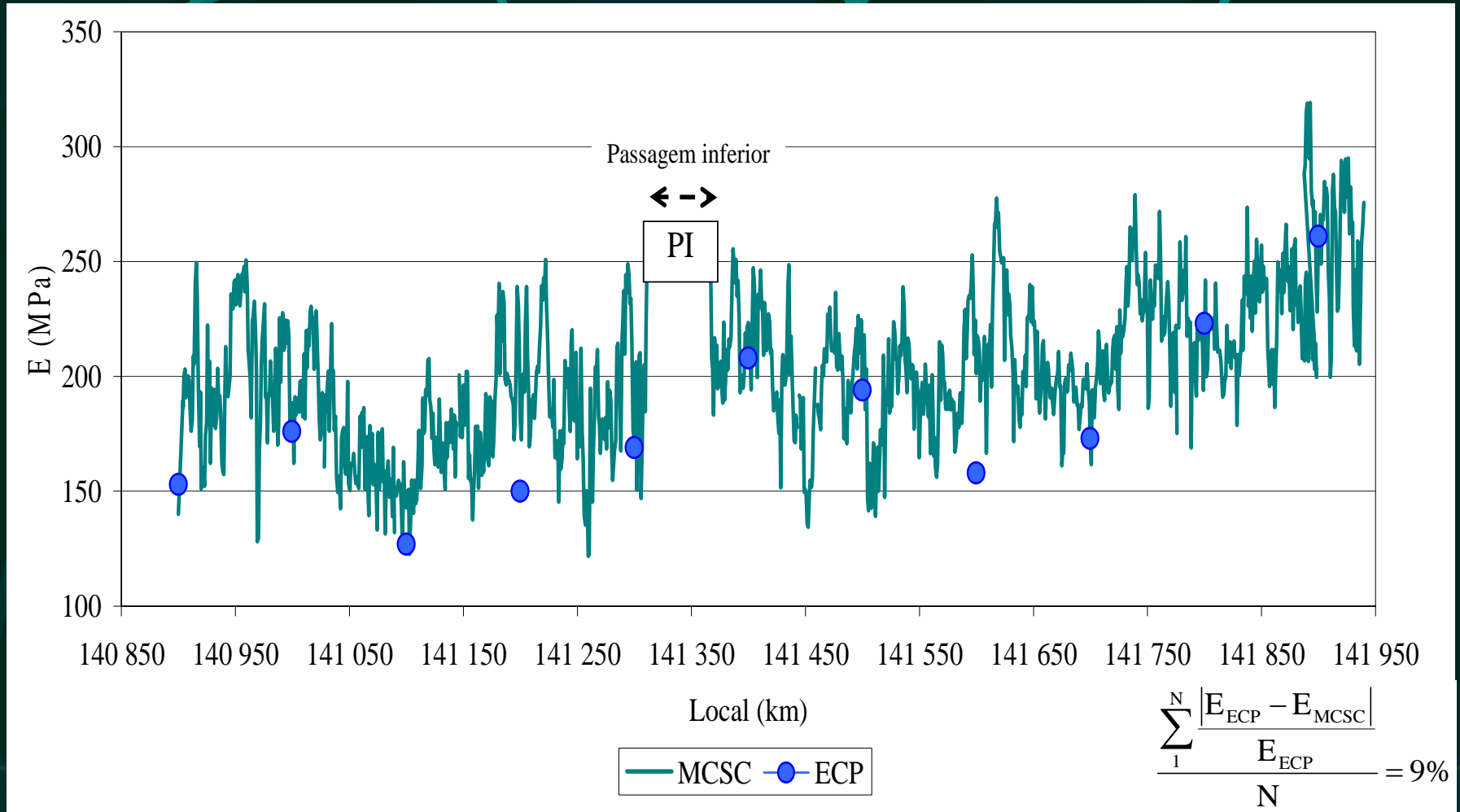
- (a) leito de via com 0,20 m de espessura
- (b) enrocamento com 0,30 m de espessura
- (c) geotêxtil
- (d) passagem inferior hidráulica

- - - Valor mínimo exigido (80 MPa)
— MCSC
● ECP

$$\frac{\sum_{i=1}^N |E_{ECP} - E_{MCSC}|}{N} = 12\%$$

Valores do modulo de deformabilidade obtidos com o MCSC e com o ECP na Zona B no topo do sub-balastro.

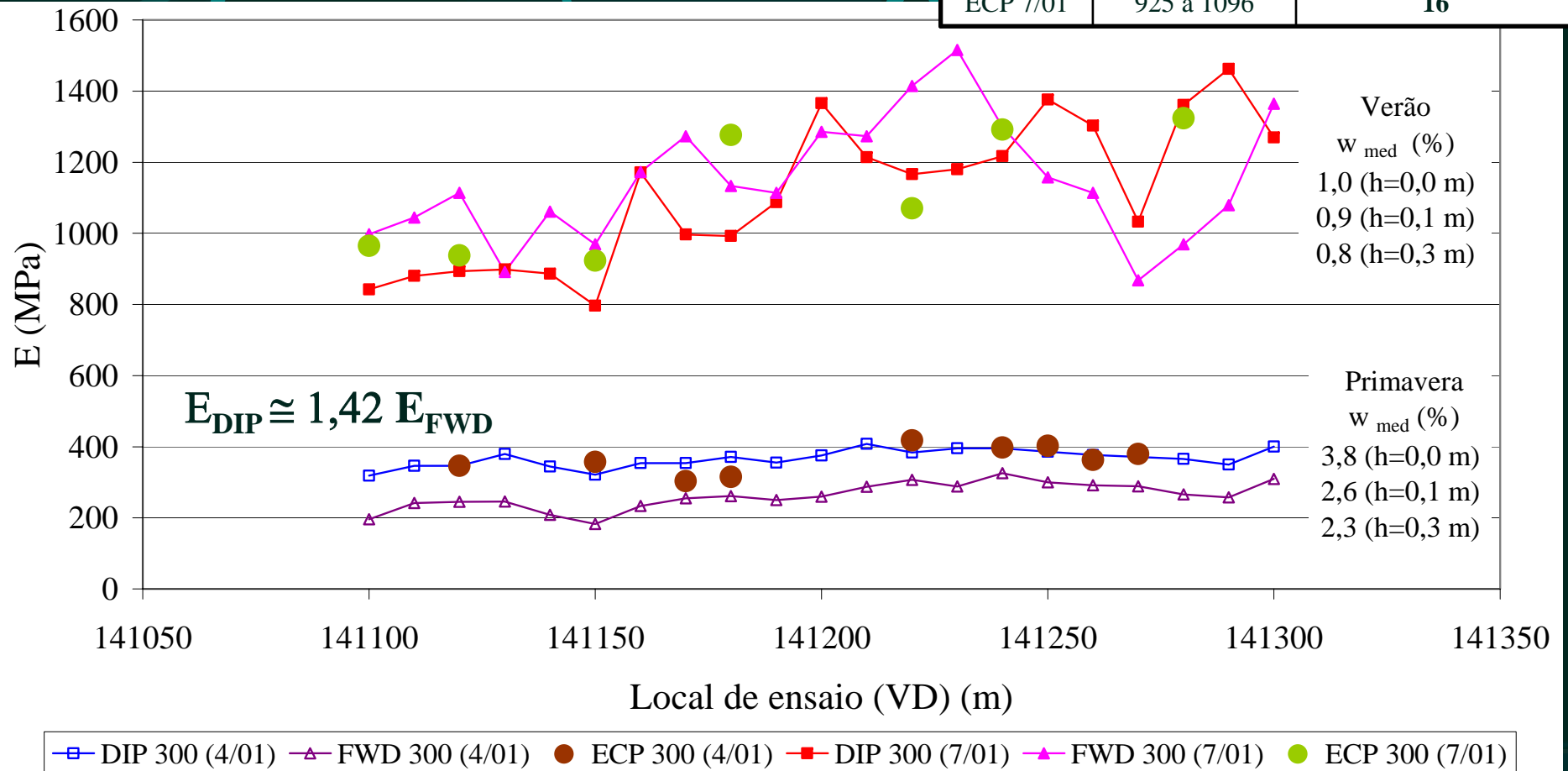
- $125 < EV_2 \text{ (MPa)} < 260$



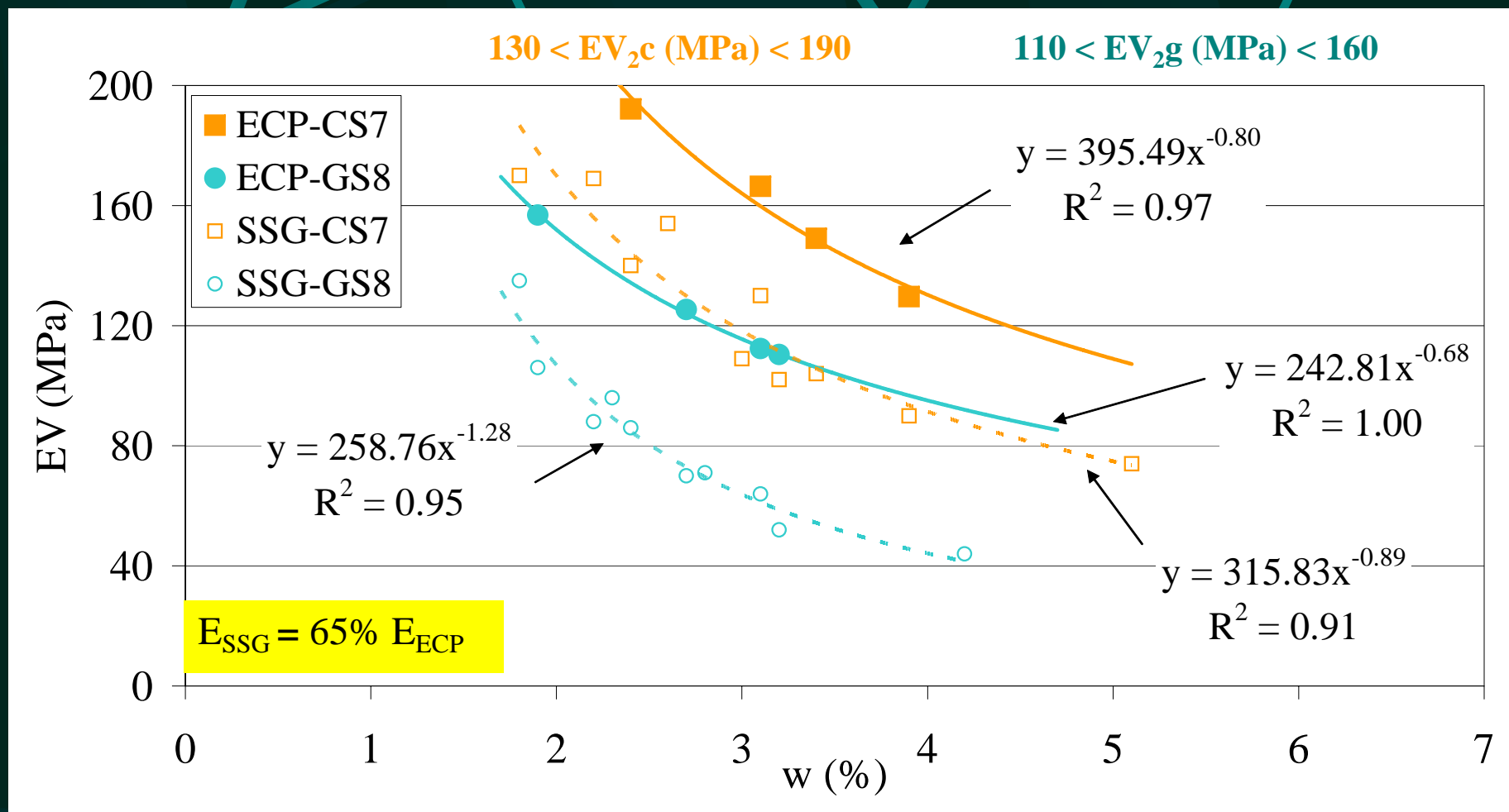
FWD/DIP/ECP Sub-balastro da subestrutura na zona B

Intervalos dos valores médios e coeficientes de variação do módulo de deformabilidade equivalente para uma probabilidade de 95%

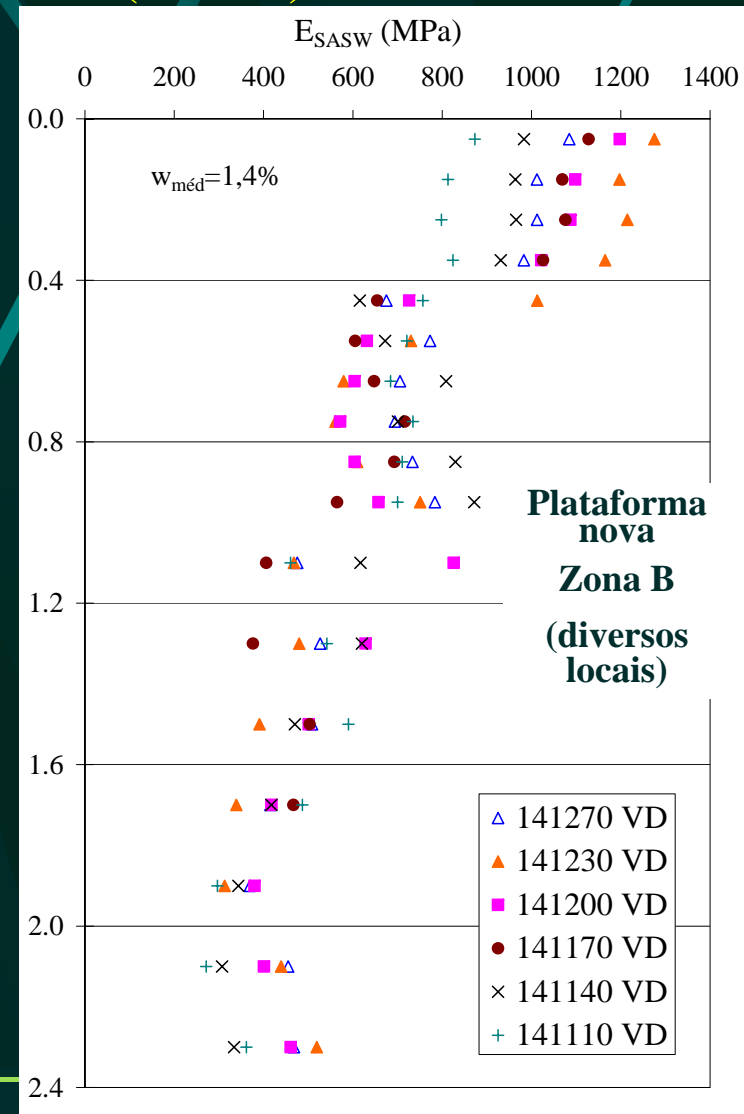
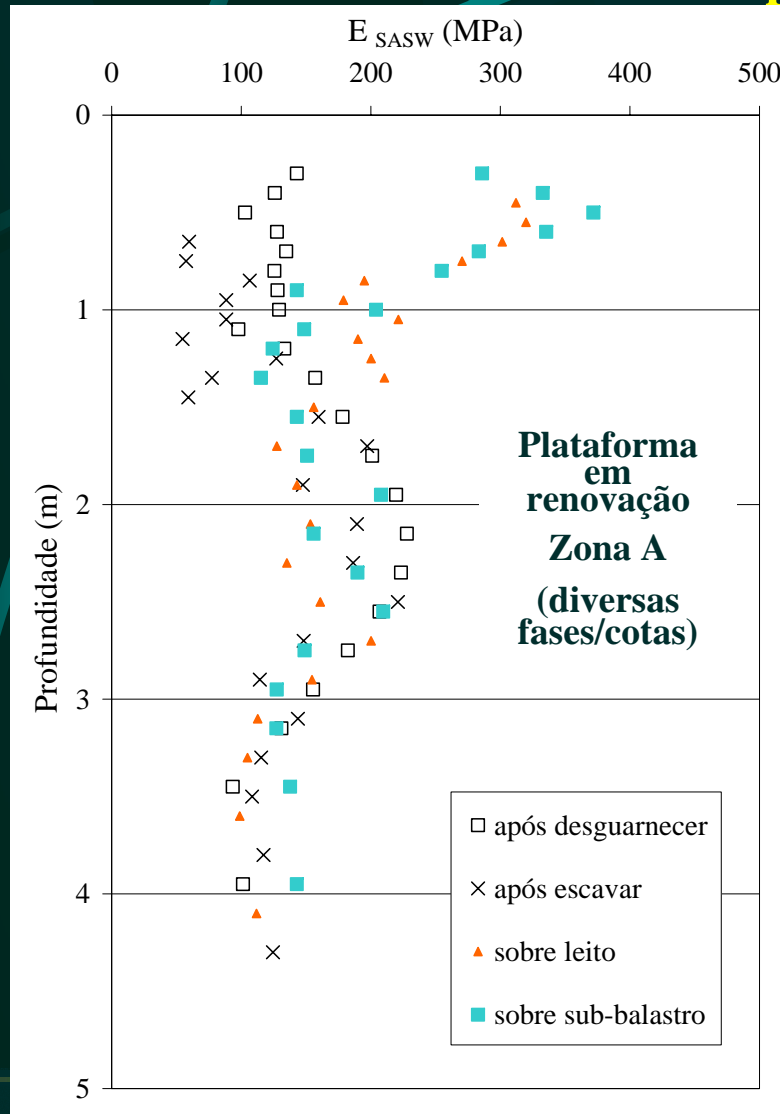
Série	E médio (MPa)	Coef. de variação (%)
DIP 4/01	353 a 369	7
FWD 4/01	235 a 258	15
ECP 4/01	332 a 373	11
DIP 7/01	1120 a 1226	15
FWD 7/01	1091 a 1189	14
ECP 7/01	925 a 1096	16



ECP e SSG sobre camadas de sub-balastro em ABGE calcário (CS7) e granito (GS8) colocados sobre uma camada de balastro calcário misturado com solos.



Caracterização da plataforma com métodos das ondas sísmicas superficiais (SASW)



Características gerais dos equipamentos utilizados:

- ensaios não destrutivos
- grande mobilidade
- fácil colocação em obra e fácil operação
- conhecimento das grandezas em análise em tempo real
- elevado rendimento => muitos dados => tratamento estatístico
- pouca perturbação da obra

Em particular:

- MCSC – análise em contínuo e fácil detecção de zonas de comportamento distinto
- SASW/CSW – permite a caracterização a elevadas profundidades
- SSG e o DIP – grande portabilidade, facilidade de operação e baixo custo

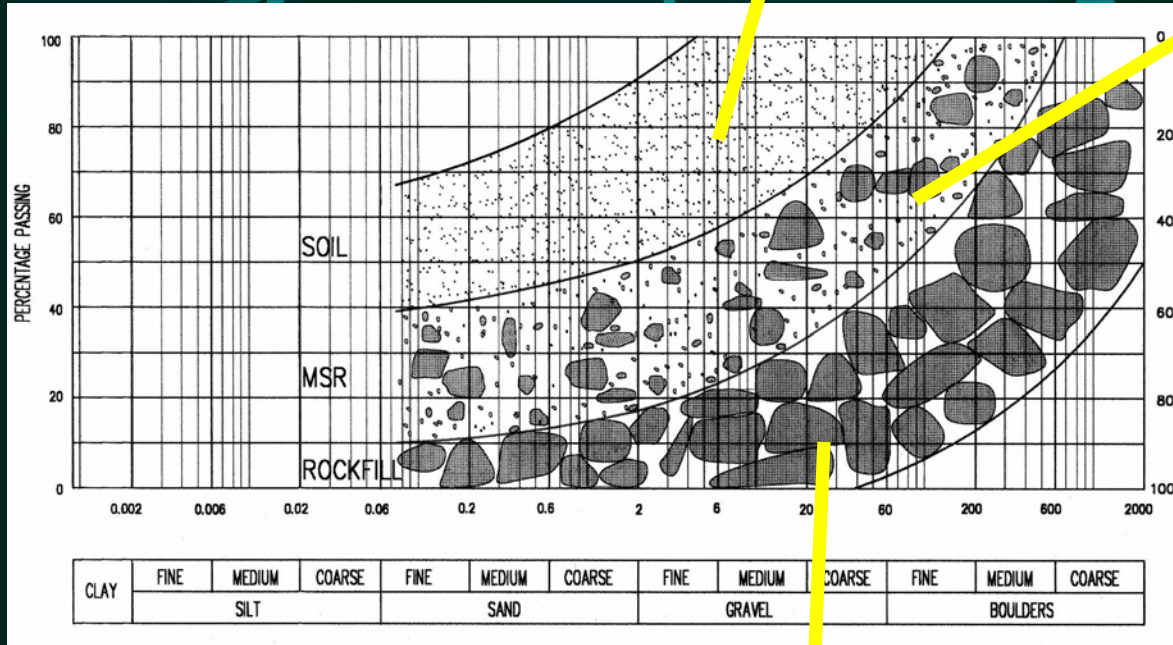
Dificuldades:

- distintas solicitações, distintas deformações, distintas áreas de influência
- dificuldade em alterar condições de ensaio (estado dos materiais e tensões aplicadas)
- exigência de mão-de-obra muito especializada e de equipamentos e programas de cálculo automático sofisticados em particular o SASW

EM CONCLUSÃO:

- ✓ é desejável que o controlo de compactação das camadas de apoio das infra-estruturas de transporte, além de recorrer a especificações de produto, passe a recorrer também a especificações baseadas no desempenho;
- ✓ o valor do módulo de deformabilidade equivalente das camadas de apoio das infra-estruturas de transporte é um dos bons indicadores de desempenho e existem actualmente métodos que permitem fazer a sua determinação de forma sistemática;
- ✓ o valor do módulo de deformabilidade equivalente pode ser muito influenciado pelo teor em água dos materiais que constituem as camadas das subestruturas; assim, a caracterização destas camadas deve ser feita nas condições mais adversas, nomeadamente para valores do teor em água próximos do máximo que os materiais poderão exibir durante a exploração da infra-estrutura; no caso das vias férreas esses valores não deverão ser muito distintos do valor do teor em água óptimo utilizado na compactação das camadas;
- ✓ os valores do módulo de deformabilidade equivalente obtidos em diferentes condições de ensaio e com diferentes equipamentos podem ser muito distintos;
- ✓ a prática vai permitir estabelecer valores de referência a obter com os diferentes equipamentos.

Garrafa de areia



Ensaio macro



A. Gomes Correia (agc@civil.uminho.pt)
 Eduardo Fortunato (efortunato@Inec.pt)



IV Congresso Rodoviário Português – Abril 2006