COMPARAÇÃO DE RESULTADOS DE ENSAIOS PARA AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DE CONSTRUÇÃO DE CAMADAS DE ATERROS PARA LINHAS FÉRREAS DE ALTA VELOCIDADE

COMPARISON OF PERFORMANCE BASED TEST METHODS TO EVALUATE QUALITY CONSTRUCTION OF RAILWAY EMBANKMENTS AND RAILTRACK LAYERS FOR HIGH SPEED TRAINS

Gomes Correia, António, *Universidade do Minho, Guimarães, Portugal, agc@civil.uminho.pt*
Martins, João, *Universidade do Minho, Guimarães, Portugal, jpmartins@civil.uminho.pt*
Caldeira, Laura, *LNEC, Lisboa, Portugal, laurac@lnec.pt*
Maranha das Neves, Emanuel, *Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal, emn@civil.ist.utl.pt*
Delgado, João, *REFER, Lisboa, Portugal, jcdelgado@refer.pt*

RESUMO

No presente artigo estabelecem-se correlações entre módulos de deformabilidade determinados "in situ" num aterro experimental com recurso a diferentes tipos de ensaios. Estes ensaios integram os ensaios de controlo de compactação pontual, nomeadamente, o ensaio de carga estático com placa *(ECP*), o deflectómetro de impacto ligeiro *(DIP)* e o "Geogauge" *(SSG)* e ensaios de controlo de compactação em contínuo, com o medidor de capacidade de suporte de contínuo *(MCSC)* ou "Portancemètre". O ensaio de carga estático com placa foi usado como ensaio de referência. Neste artigo descreve-se o plano experimental adoptado, a teoria que está na base de cada ensaio e são apresentados alguns resultados e correlações entre ensaios.

ABSTRACT

In this paper are established correlations between modulus resulting from different "in situ" tests methods done on a trial embankment using different apparatus. These tests used in compaction control are spot tests, namely, static plate loading test *(ECP)*, light falling weight deflectometer *(DIP)*, soil stiffness gauge *(SSG)*, and continuous test with "Portancemètre" equipment. The static plate loading test was used as reference test. In this paper is described the experimental plan adopted, presented the theory for each test method, some results obtained and proposed some correlations.

1. INTRODUÇÃO

No âmbito de um projecto de investigação nacional POCI/ECM/61114/2004, intitulado "Interacção solo-via-férrea para comboios de alta velocidade", financiado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia, estabeleceu-se um protocolo entre a Rede Ferroviária Nacional (REFER) e quatro instituições nacionais de ensino e investigação (UM, LNEC, IST, FCT-UNL), para o desenvolvimento do conhecimento no âmbito da metodologia de construção e controlo de aterros para vias férreas e das camadas da plataforma da via com recurso a diferentes ensaios pontuais e contínuos.

Para tal executou-se uma campanha de ensaios num aterro experimental construído para o efeito. O aterro foi executado junto à Linha de Évora, a cerca de 2,5 km da estação do Monte das Flores, e a campanha de ensaios decorreu entre Outubro e Novembro de 2006.

No presente artigo faz-se uma descrição das características do aterro e do plano experimental adoptado e dos diferentes tipos de ensaios realizados para determinação do módulo de

deformabilidade “in situ”, apresentam-se alguns resultados dos parâmetros de compactação e estabelecem-se correlações entre os resultados dos diferentes ensaios mecânicos.

2. ATERRO EXPERIMENTAL E PLANO DE TRABALHOS

De forma a cumprir os objectivos estabelecidos, foi executado um aterro experimental e elaborado um plano de trabalhos que contemplou diversos tipos de ensaios, de forma a caracterizar as propriedades físicas e mecânicas dos materiais em estudo.

Na construção do aterro experimental utilizaram-se materiais semelhantes aos aplicados num trecho do aterro da nova linha-férrea de Évora. Os materiais de construção das várias camadas foram: solo, nas camadas de aterro, e agregado britado de granulometria extensa *(ABGE)*, para a camada de sub-balastro. No entanto, no presente artigo apenas serão apresentados alguns dos resultados para o solo de aterro.

O aterro em solo foi construído sobre duas camadas de 0,30 m cada, em contacto com a fundação. No Quadro 1 faz-se uma síntese das características e da geometria adoptada na construção das camadas do aterro experimental.

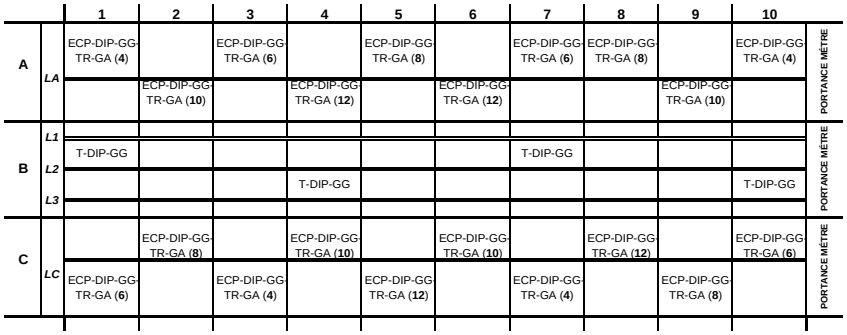
Quadro 1 – Síntese das características e geometria adoptada na construção do aterro experimental

Tipo de Material	Teor em água (%)	Espessura (m)	Dimensões em planta da camada (m)	Executada sobre camada de
Solo de Aterro	w_{opt} -2	0,30	50 x 6	Fundação
		0,40	25 x 6	0,30m com w_{opt}-2%
		0,50	50 x 6	Fundação
	w_{opt}	0,40	50 x 6	Fundação
	w_{opt} +2	0,40	50 x 6	0,30 m com w_{opt}-2%

Nota: w_{opt} refere-se ao valor do teor em água óptimo do Proctor modificado.

O plano de trabalhos foi composto por diferentes tipos de ensaios, nomeadamente: garrafa de areia, método radioactivo, deflectómetro de impacto portátil (*DIP*), "geogauge”, ensaios de carga com placa e medidor de capacidade de suporte em contínuo – “Portancemètre”.

Para a execução do plano de trabalhos cada camada foi dividida em faixas de 2 metros (A, B e C) e colunas com 5 metros de largura (1 a 10). As faixas A e C destinaram-se à execução de todo o tipo de ensaios, ao passo que na faixa B apenas se realizaram ensaios não destrutivos (Figura 1). Refira-se, no entanto, que se efectuaram passagens do “Portancemètre” nas faixas A e C após a realização dos ensaios de carga com placa. Foram efectuados ensaios para níveis de energia correspondentes a 4, 6, 8, 10 e 12 passagens do cilindro vibrador.



Simbologia:
GA – garrafa de areia;
TR – método radioactivo (Troxller);
DIP – deflectómetro de impacto portátil;
GG – “geogauge”;
ECP – ensaio de carga com placa

Figura 1 – Esquema do plano de ensaios adoptado para cada camada

3. ENSAIOS REALIZADOS – PROCEDIMENTOS E NORMAS

3.1. Deflectómetro de Impacto Ligeiro (*DIP*)

O deflectómetro de impacto ligeiro *(DIP)* é um equipamento portátil utilizado para determinar o módulo de deformabilidade dinâmico, E_{DIP}. O funcionamento deste equipamento consiste na queda de uma massa móvel, a partir de uma altura definida, sobre uma placa circular rígida, cujo impulso dinâmico aplicado pela massa é medido por uma célula de carga e o deslocamento da placa é medido através de, pelo menos, um geofone colocado no centro desta. O módulo de deformabilidade dinâmico, E_{DIP}, é assim calculado através da carga aplicada e do respectivo deslocamento da placa.

O equipamento utilizado no aterro experimental foi o *Prima 100 LWD* fabricado pela *Carl Bro Pavement Consultants* (Figura 2a). Pesa aproximadamente 26 kgf e possui uma massa de 10 kg, que, quando cai sobre a placa, transmite um impulso através de um cilindro oco e de uns amortecedores de borracha. O geofone, localizado no centro da placa, mede o deslocamento da placa provocado pelo impacto da massa móvel na placa. Durante o ensaio, a massa móvel cai sobre a placa, produzindo um impulso de 1 a 15 kN em cerca de 15–20 ms. O deslocamento da placa, medido no seu centro, é utilizado para calcular o módulo de deformabilidade dinâmico através da solução de Boussinesq de acordo com a expressão seguinte:

$$E_{DIP} = \frac{k \cdot (1-\nu)^2 \cdot \sigma \cdot R}{\delta_c} \tag{1}$$

onde k é igual a $\pi/2$ ou 2, para placas rígidas ou flexíveis, respectivamente, δ_c é o deslocamento no centro da placa, σ é a tensão aplicada e R é o raio da placa.

O diâmetro da placa utilizado neste estudo foi 300 mm.

3.2. "Geogauge" ou Soil Stiffness Gauge (*SSG*)

O equipamento *Humboldt Stiffness Gauge* (Figura 2b) é um instrumento para realizar ensaios "in situ" não destrutivos, com o qual é possível medir a rigidez da camada e conhecer o módulo de deformabilidade, E_{SSG}. Este equipamento pode ser utilizado em solos, agregados e materiais tratados utilizados em obras de terraplenagens. Com um peso de aproximadamente 10 kgf, o equipamento possui um tamanho compacto, com uma altura de cerca de 0,25 m por 0,28 m de diâmetro. O aparelho repousa sobre a superfície da camada a ensaiar por meio de um anel rígido, cujo diâmetro exterior é de 114 mm e o interior de 89 mm.

O aparelho contém um vibrador electromecânico, que produz vibrações num intervalo de frequências entre 100 a 196 Hz, com incrementos de 4 Hz, produzindo 25 diferentes frequências e gerando forças de cerca de 9 N. O registo da força e da deflexão é efectuado através de sensores incorporados no equipamento. A grandeza dos deslocamentos verticais induzidos na interface solo-anel rígido é geralmente inferior a $1{,}27 \times 10^{-6}$ m. Um microprocessador calcula a rigidez, k, da camada para cada uma das 25 frequências de vibração e apresenta o valor médio para esses 25 registos, assim como o desvio padrão (Alshibli et al., 2005). A rigidez, k, pode ser convertida no módulo de deformabilidade, E_{SSG}, usando a seguinte expressão:

$$E_{SSG} = \frac{k \cdot (1-\nu)^2}{1{,}77 \cdot R} \tag{2}$$

onde E_{SSG} é o modulo de elasticidade do solo, k é a rigidez fornecida pelo "geogauge", ν é o coeficiente de Poisson e R é o raio do anel rígido.

a) b)

Figura 2 – a) Deflectómetro de impacto portátil *(DIP)*; b) Humboldt Stiffness Gauge *(SSG)*

A profundidade interessada no ensaio é cerca de duas vezes o diâmetro exterior do anel rígido (cerca de 0,23 m).

3.3. Ensaio de carga estático com placa de acordo com a AFNOR NF P94-117-1

Este ensaio tem por objectivo a determinação do módulo de deformabilidade sob carregamento estático aplicado numa placa sobre uma plataforma. O ensaio consiste em aplicar, após uma pré carga, dois ciclos de carregamento sucessivos através de uma placa de diâmetro e rigidez normalizados. Ao primeiro carregamento deverá corresponder uma tensão média sob a placa de 0,25 MPa, devendo esta tensão ser mantida durante o tempo necessário à estabilização do deslocamento da placa. No segundo ciclo de carregamento deverá ser atingida uma força tal que traduza uma tensão média sob a placa de 0,20 MPa. A descarga só deverá ser efectuada após a estabilização da deflexão, à semelhança do primeiro ciclo de carregamento. Nos ensaios realizados foi utilizada uma placa de 600 mm.

O módulo de deformabilidade, E_{v2}, é calculado para o segundo ciclo de carregamento, através da solução de Boussinesq, utilizando o método secante (Figura 3a), de acordo com a equação 1 para placas rígidas.

3.4. Ensaio de carga estático com placa de acordo com a DIN 18134

Assim como para o ensaio de carga com placa segundo a norma *AFNOR*, este ensaio tem por objectivo conhecer as características de deformação do solo e determinar o respectivo módulo de deformabilidade, E_v. O ensaio consiste em aplicar, após a pré carga, dois ciclos de carregamento sucessivos. No primeiro ciclo de carregamento a carga deverá ser aplicada em pelo menos seis estágios, com valores de incremento aproximadamente iguais, até a carga máxima ser atingida. A descarga deverá ser efectuada em estágios correspondendo a 50% e 25% da carga máxima atingida. O segundo ciclo de carregamento deverá ser efectuado até à carga correspondente ao penúltimo estágio do primeiro ciclo.

Poderá utilizar-se placas de 300, 600 e 762 mm. Para determinar o módulo de deformabilidade, Ev, a carga deverá ser aumentada até um assentamento de 5, 8 ou 13 mm ou ser atingida uma tensão normal sob a placa de 0,50, 0,25 ou 0,20 MPa, respectivamente. No caso em que a deformação de 5mm é atingida em primeiro lugar, a tensão máxima medida nesta fase deverá ser tomada como a tensão máxima. Nos ensaios realizados foi utilizada uma placa de 300 mm.

O módulo de deformabilidade, E_{v2}, é calculado para o segundo ciclo de carregamento, utilizando o método tangente, de acordo com a equação 3.

$$E_{V2} = \frac{1{,}5 \cdot r}{a_1 + a_2 \cdot \sigma_{0\max}} \tag{3}$$

onde r é o raio da placa, σ_{0max} é a tensão sob a placa atingida no primeiro ciclo de carregamento e a_1 e a_2 são os coeficientes, determinados a partir do ajuste de um polinómio de segundo grau aos pontos correspondentes ao segundo ciclo de carregamento (Figura 3b).

3.5. Medidor de Capacidade de Suporte em Contínuo (MCSC) ou "Portancemètre"

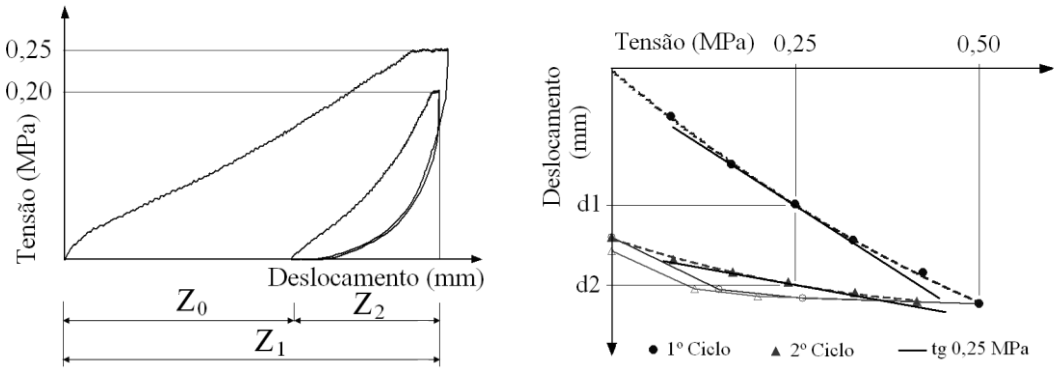
O "portancemètre" é um equipamento desenvolvido pelo "Center d'Études Techniques de l'Équipment" (CETE) em França. Este equipamento solicita a superfície a ensaiar através de uma roda vibrante, que aplica uma força ao solo, a uma frequência de 35 Hz, enquanto se desloca a uma velocidade de 1 m/s. O equipamento dispõe de instrumentação interna, que permite medir a componente vertical da aceleração das massas vibrantes e suspensas, a frequência de vibração e o ângulo de fase entre a amplitude vertical de vibração e a força centrífuga aplicada à roda pela massa excêntrica. (Figura 4). Um algoritmo associado calcula a força aplicada ao solo e a respectiva deflexão. A componente vertical da força aplicada pela roda vibrante é calculada pela seguinte expressão (Quibel, 1999):

$$FTA = M1 \cdot g + M0 \cdot \Gamma_{V1} + (M1 - M0) \cdot \Gamma_{V2} + me \cdot \omega^2 \cdot \cos\varphi \qquad (4)$$

onde $M1 \cdot g$ é o peso total do conjunto, $M0 \cdot \Gamma_{V1}$ é a força de inércia da massa vibrante, sendo Γ_{V1} a aceleração vertical dessa massa, $(M1\text{-}M0) \cdot \Gamma_{V2}$ é a força de inércia do chassis, sendo Γ_{V2} a aceleração vertical das massas suspensas e $me \cdot w^2 \cdot \cos\varphi$ é a componente vertical da força centrífuga produzida pela massa excêntrica.

O deslocamento da roda vibrante é calculado através de um processo de dupla integração da aceleração vertical medida. A média dos valores medidos, da força e da deflexão, em 30 períodos consecutivos, permite traçar a curva que relaciona aquelas duas grandezas. A deformabilidade da camada é calculada, aproximadamente, em cada metro de percurso, recorrendo à regressão linear sobre os valores que se situam entre 30% e 90% da força vertical máxima aplicada. A velocidade de translação do conjunto é medida por meio de um radar de efeito *Doppler*, o qual permite também determinar a distância percorrida e, consequentemente, situar o local de medição no perfil longitudinal.

O domínio de aplicação deste equipamento é para camadas compactadas de solos ou agregados (naturais ou tratados) com valores de módulo de deformabilidade equivalente, E_{v2}, medidos à superfície, em ensaios de carga com placa (de 600 mm de diâmetro) a variar entre 30 e 300 MPa. A profundidade interessada pelo ensaio é da ordem de 0,60 m.



a) b)

Figura 3 – Interpretação do ensaio de carga estático com placa segundo as normas: a) AFNOR NF P94-117-1; b) DIN 18134

a) b) c)

Figura 4 – "Portancemètre": a) aspecto geral; b) detalhe da roda vibrante; c) esquema de funcionamento

Um conjunto de ensaios realizados com o Portancemètre em estruturas construídas com diferentes materiais (agregados, solos e materiais tratados) cujos valores do módulo de deformabilidade equivalente, E_{v2}, medidos à superfície em ensaios de carga estática com placa de 600 mm de diâmetro, variam entre 20 e 500 MPa, permitiram concluir que existe uma boa correlação entre os valores determinados por ambos os ensaios. Assim, é possível relacionar a rigidez, *K*, obtida com o "Portancemètre" com o módulo de deformabilidade equivalente obtido com o ensaio de carga estática com placa, $E_{v2,}$ de 600 mm de diâmetro (AFNOR NF P94-117-1), pela seguinte expressão (Quibel, 1999):

$$E_{v2} = 5 \cdot k \tag{5}$$

com *k* em kN/mm e E_{v2} em MPa

4. RESULTADOS

4.1. Parâmetros de compactação

Verificou-se uma grande heterogeneidade no teor em água do solo e na compacidade das camadas compactadas, pese embora a homogeneização prévia do solo. Contudo, a relação entre estas grandezas segue a tendência normal (Figura 5)

4.2. Correlações entre os resultados dos diferentes ensaios mecânicos

O controlo de compactação foi realizado com recurso a vários ensaios, entre os quais se salientam os de determinação de módulos de deformabilidade, nomeadamente, o ensaio de carga estático com placa *(ECP)* realizados segundo as normas AFNOR NF P94-117-1 e DIN 18134, o deflectómetro de impacto ligeiro *(DIP)*, o "geogauge" e o "portancemétre".

No caso do "portancemètre", tratando-se de um ensaio em contínuo, os resultados deste ensaio foram objecto de um tratamento estatístico para o estabelecimento de correlações com os demais ensaios. Este tratamento consistiu no cálculo da média dos valores registados em cada quadrícula (5x3 m^2) e do respectivo intervalo de confiança.

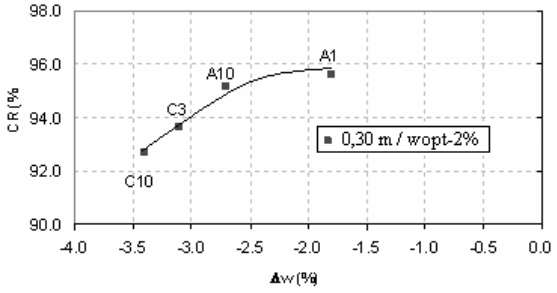
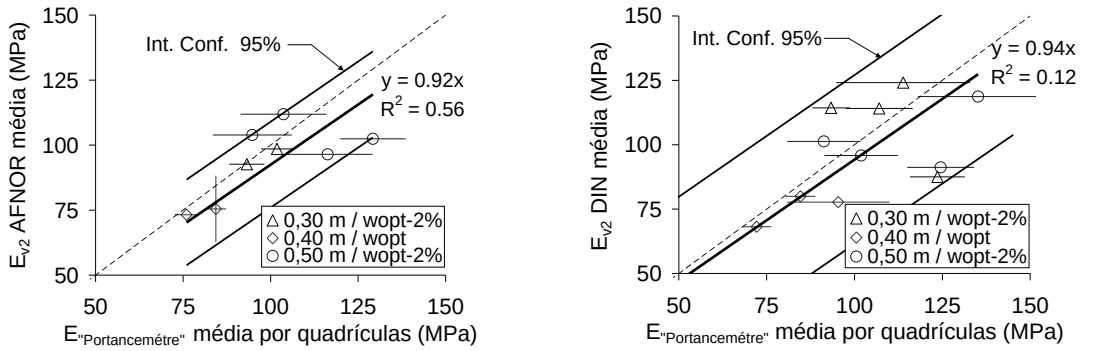


Figura 5 – Variação da compactação relativa com o desvio do teor em água para 4 passagens do cilindro vibrador na camada de 0,30 m e com w_{opt}-2%

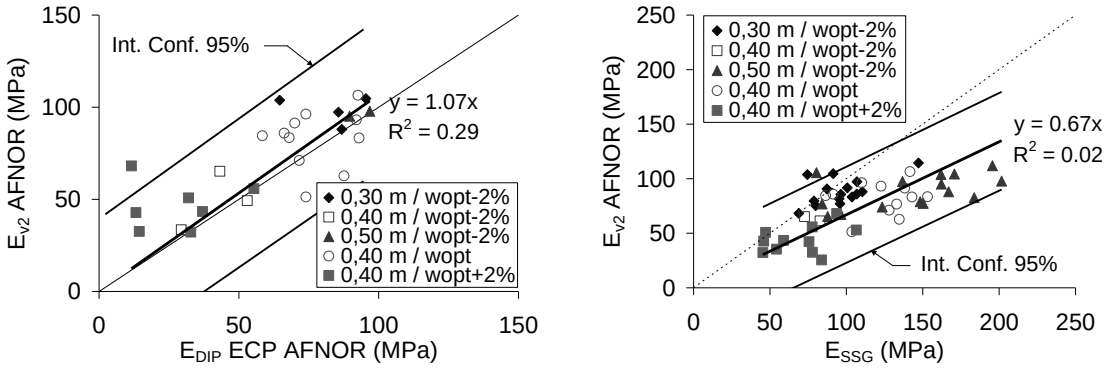
Para o solo estudado observaram-se correlações próximas da unidade entre o módulo de deformabilidade obtido através do "portancemètre" e o módulo de deformabilidade, E_v, para o ensaio de placa segundo ambas as normas, para o nível de energia correspondente às doze passagens do cilindro vibrador, como se pode verificar na Figura 6. Verifica-se uma boa correlação com o ensaio de carga com placa realizado segundo a norma AFNOR (R^2=0,56). Para o ensaio de carga com placa realizado segundo a norma DIN observou-se maior dispersão dos resultados, o que conduziu a uma fraca correlação com os resultados do "Portancemètre" (R^2=0,12). Estes resultados demonstram a vantagem da utilização de uma placa de maior diâmetro para o ensaio de carga com placa.

Ainda para o solo e no que se refere à correlação entre o ensaio *ECP* e *DIP*, verificou-se uma correlação traduzida por um coeficiente de correlação de R^2=0,29, o qual é ainda menor para a correlação entre os ensaios *ECP* e "geogauge" (R^2=0,02), como demonstra a Figura 7. Anote-se que, para a correlação entre os ensaios *ECP* e *DIP*, os resultados correspondem a ensaios realizados no mesmo ponto, e entre os ensaios *ECP* e "geogauge" correspondem a ensaios realizados na mesma quadrícula. Para as correlações referidas, os resultados resultam de ensaios realizados para diferentes camadas e diferentes níveis de energia de compactação. Apesar da dispersão dos resultados, a Figura 7 revela uma correlação próxima da unidade entre os ensaios *ECP* e *DIP*, enquanto que os resultados do "geogauge" tendem a ser 30% superiores ao ensaio de carga com placa. Atendendo às vantagens de execução do ensaio *DIP* no controlo de compactação, estas correlações assumem grande importância. Para as correlações entre "portancemètre" e os ensaios *DIP* e "geogauge" verificou-se grande dispersão dos resultados.



a) b)

Figura 6 – Correlação entre os valores dos módulos E_v obtidos às 12 passagens do cilindro vibrador através do "portancemètre" e do *ECP* segundo a norma: a) AFNOR; b) DIN



a) b)

Figura 7 – Correlação entre os módulos E_v, para diferentes camadas e diferentes níveis de energia, obtidos com o ensaio *ECP* segundo a norma AFNOR e com o: a) *DIP*; b) "geogauge"

5. CONCLUSÕES

A partir dos resultados dos vários ensaios de deformabilidade foi possível estabelecer algumas correlações e verificar calibrações dos equipamentos utilizando como referência o ensaio de carga com placa.

Para o solo de aterro verificou-se que a correlação entre os módulos E_{v2} dos *ECP* e o "portancemètre" é próxima da unidade, ou seja, os valores obtidos por ambos os ensaios são aproximadamente iguais. Estes resultados validam a calibração usada para este tipo de solo e atestam a grande potencialidade deste equipamento numa auscultação quase contínua da rigidez de plataformas de terraplenagens.

Constatou-se também que a correlação entre o ensaio *DIP* e o ensaio de carga com placa se aproxima da unidade, embora a dispersão de resultados do ensaio *DIP* seja maior. Tal facto, revela igualmente a utilidade prática deste tipo de ensaio, de fácil manuseamento, embora com a desvantagem em relação ao "portancemètre" de ser um ensaio pontual. No que diz respeito ao "geogauge", verificou-se, para além de uma maior dispersão dos resultados, que os valores do módulo de deformabilidade obtidos são, em média, aproximadamente 30% superiores em relação aos valores dados pelo ensaio de placa. Este ensaio, também pontual como o ensaio *DIP*, parece requerer um maior cuidado de utilização, particularmente de calibração.

AGRADECIMENTOS

A presente comunicação foi realizada no âmbito do protocolo de colaboração entre a REFER - Rede Ferroviária Nacional e a Tecminho – Associação Universidade Empresa para o desenvolvimento enquanto representante do consórcio UM/LNEC/IST/FCT-UNL no sentido de desenvolver o conhecimento no âmbito da metodologia de construção e controlo de aterros para vias férreas e das camadas da plataforma da via, parte integrante do projecto POCI/ECM/6114/2004 – "Interacção solo-via férrea para comboios de alta velocidade".

No âmbito deste trabalho agradece-se a colaboração das empresas: REFER, MOTA-ENGIL e GEOCONTROLE.

REFERÊNCIAS

Alshibli, K. A.; Abu-Farsakh , M.; Seyman, E. (2005). Laboratory Evaluation of the Geogauge and Light Falling Weight Deflectometer as Construction Control Tools. *Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE*, September/October, 560-569.

DIN 18134 (2001). *Determining the deformation and strenght characteristics of soil by plate loading test*. Deutsches Institut für Normung.

NF P 94-117-1 (2000). *Sols: reconnaissance et essais. Portance des plates-formes. Partie 1: Module sous chargement statique à la plaque (EV2)*. Association Française de Normalisation.

Quibel, A. (1999). New in situ devices to evaluate bearing capacity and compaction of unbound granular materials. *Unbound Granular Materials. Laboratory Testing, In-situ Testing and Modelling*. Gomes Correia A. (ed.), A.A. Balkema, Rotterdam,141-151.