

**ESTUDO DAS CONDIÇÕES DE APLICAÇÃO DO GEOGAUGE E DO DEFLECTÓMETRO DE IMPACTO PORTÁTIL NO CONTROLO DA COMPACTAÇÃO**

**STUDY OF APPLICATION CONDITIONS OF THE GEOGAUGE AND THE PORTABLE FALLING WEIGHT DEFLECTOMETER IN COMPACTION CONTROL**

Conde, Maria do Carmo, *ISEL, Lisboa, Portugal, mcarmo@dec.isel.ipl.pt*

Caldeira, Laura, *LNEC, Lisboa, Portugal, laurac@lnec.pt*

Lopes, Maria da Graça, *ISEL, Lisboa, Portugal, glopes@dec.isel.ipl.pt*

**RESUMO**

A compactação de solos é um dos aspectos críticos na construção de estradas, aeroportos, aterros e fundações. Este controlo é tradicionalmente realizado através da aferição dos valores do teor em água e peso volúmico do solo compactado, que para além da morosidade não avaliam directamente as propriedades de desempenho pretendidas. Assim está em desenvolvimento um programa de investigação com o objectivo de averiguar a possibilidade de desenvolver especificações para o controlo da compactação baseadas na rigidez dos aterros. Nesta comunicação pretende-se mostrar o desempenho do *geogauge* e do deflectómetro de impacto portátil (*DIP*), no controlo da compactação de camadas de aterro de uma barragem em construção, mostrando as correlações obtidas com o teor em água e o peso volúmico do solo obtidos pelos métodos tradicionais.

**ABSTRACT**

Soil compaction is a critical point in the construction of highways, airports embankment and foundations. The current specifications address embankment compaction in terms of density and moisture content. However, achieving a certain density and moisture content does not guarantee acceptable performance. So, a comprehensive experimental testing program is under development, on compacted layers to investigate the feasibility of developing a stiffness-based specification for embankment soil compaction quality control. In this paper the output of the *geogauge* and the P-FWD devices correlation with *in situ* density and moisture content measured in a construction dam by traditional methods are presented and discussed.

**1. INTRODUÇÃO**

O controlo da compactação dos geomateriais constitui um aspecto essencial sempre presente na construção de aterros de vias de comunicação, de aeroportos ou de barragens de aterro, com vista à obtenção de infra-estruturas com um desempenho adequado, em termos de deformabilidade, de resistência mecânica e, em alguns casos, de permeabilidade.

Este controlo é tradicionalmente realizado pontualmente, através de métodos destrutivos, com base em ensaios de campo (de determinação do peso volúmico e do teor em água) e de laboratório (de compactação do tipo Proctor normal ou modificado), admitindo-se que as condições de compactação de campo são óptimas quando correspondem a valores de índices físicos próximos dos obtidos no ensaio de compactação. Os referidos ensaios são muito morosos

e pouco numerosos, devido às condições de execução, e não avaliam directamente as propriedades de desempenho pretendidas, sendo estas deles inferidas.

Recentemente têm sido disponibilizados equipamentos, de fácil utilização, que permitem, de uma forma não destrutiva, em determinadas condições, a avaliação directa da rigidez dos aterros. Adicionalmente, possibilitam que o controlo da compactação se efectue de um modo muito mais rápido e muito mais eficaz, dado que permite o ensaio de um conjunto significativamente superior de pontos da camada de aterro num tempo consideravelmente inferior. No entanto, a experiência com estes equipamentos ainda é limitada, sendo necessário avaliar as condições da sua aplicabilidade para cada um dos tipos de geomateriais, bem como proceder à sua aferição e calibração, com base no saber acumulado com os métodos tradicionais.

Para avaliar a aplicabilidade do *geogauge* e do deflectómetro de impacto portátil (*DIP*) no controlo da compactação de aterros, foram realizados ensaios durante a construção dos aterros de uma barragem no Alentejo, cujos resultados e as respectivas conclusões são apresentadas na presente comunicação.

## 2. TRABALHO EXPERIMENTAL

Para avaliar as condições de aplicação do *geogauge* e do deflectómetro de impacto portátil no controlo da compactação de camadas de aterro, foram realizados ensaios com estes equipamentos sobre camadas de aterro de uma barragem em construção.

Realizaram-se 11 séries de ensaios em diferentes locais do maciço de montante e 6 séries em diferentes zonas do maciço de jusante. Em cada um dos locais foi recolhida uma amostra para a determinação do teor em água do solo, por secagem no micro-ondas ( $w_{MO}$ ) e o peso volúmico do solo, através do método da garrafa de areia ( $\gamma_{GA}$ ). Complementarmente, recorreu-se ao gamadensímetro (equipamento muito utilizado no controlo da compactação de aterros rodoviários, mas excluído na aplicação em barragens) para a determinação dos mesmos índices físicos ( $w_{GM}$  e  $\gamma_{d GM}$ ).

Foram também recolhidas amostras para proceder à sua caracterização laboratorial.

### 2.1. Ensaio de Laboratório

Os ensaios de laboratório incluem ensaios índice e ensaios de compactação Proctor. Na Figura 1 e no Quadro 1 apresentam-se, de uma forma resumida, os resultados da caracterização laboratorial dos materiais e os referentes à sua compactação.

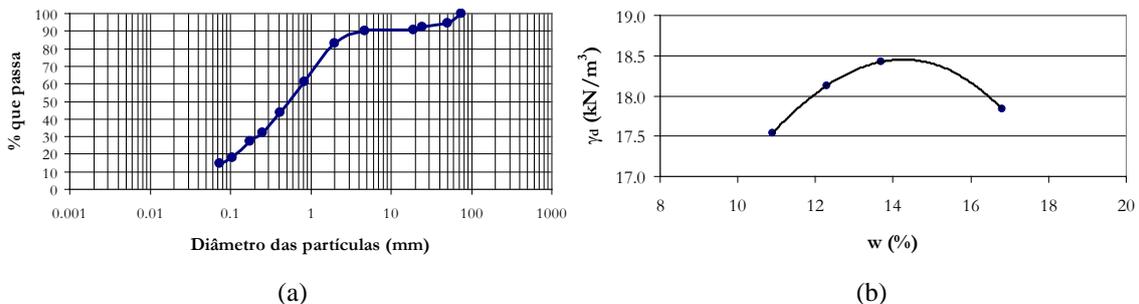


Figura 1 – Curva Granulométrica (a) e Curva de Compactação (b) do Solo dos Maciços Estabilizadores

Quadro 1 – Resultados da Caracterização Laboratorial

Localização	Ensaio Proctor normal			w <sub>L</sub> (%)	IP (%)	Classif. AASHTO	Classif. Unificada
	Peso volúmico seco máximo (kN/m <sup>3</sup> )	Teor em água óptimo (%)	% finos				
Maciços estabilizadores	18,32	14,5	14,86	N/P	N/P	A-1-b (0)	SM

**2.2. Ensaio de Campo**

Os ensaios de controlo foram efectuados de acordo com a malha, representada na Figura 2, constituída por 6 linhas (2 no maciço de montante, 1 no núcleo e 3 no maciço de jusante), com cerca de 15 m de largura, e 7 colunas (A a G), com cerca de 35 m de largura. Nesta figura pode também observar-se a localização das diferentes séries de ensaio. Em cada um dos locais, no ponto central, foi realizado um ensaio com a garrafa de areia, e em pontos localizados, segundo as direcções montante – jusante e margem esquerda – margem direita, a uma distância de cerca de 0,40 m do ponto central, realizados ensaios com o *geogauge*, com o deflectómetro de impacto portátil e com o gamadensímetro (ver Figura 3).

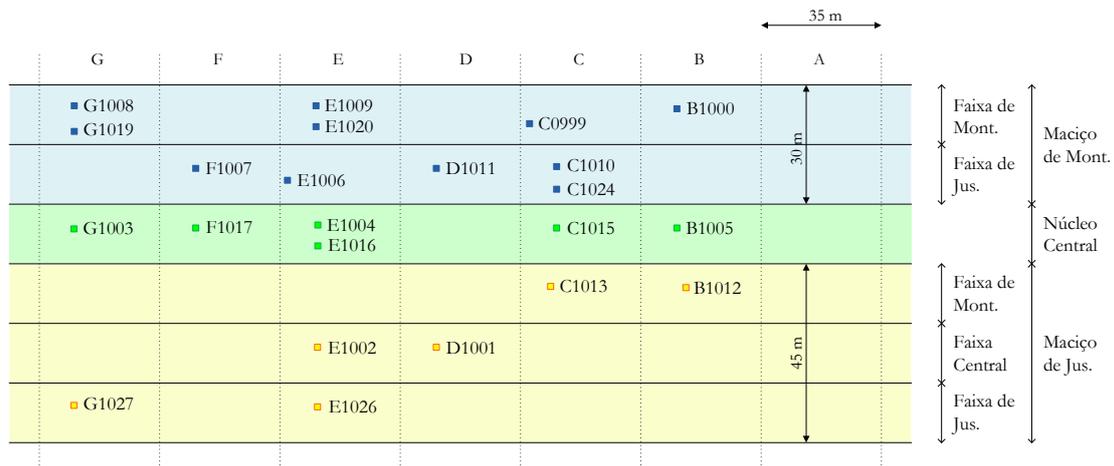
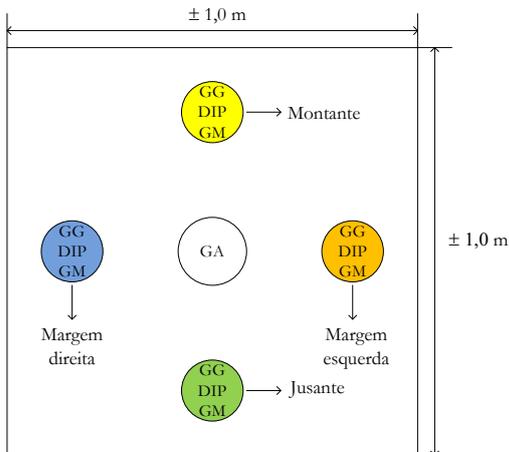


Figura 2 – Localização das Diferentes Séries de Ensaio



GG – Geogauge  
 DIP – Deflectómetro de Impacto Portátil  
 GM – Gamadensímetro

Figura 3 – Conjunto e Disposição dos Ensaio de Cada Série

2.2.1. Aplicação do Gamadensímetro

Em cada um dos locais, na determinação do peso volúmico seco e do teor em água, foi aplicado o gamadensímetro. Os resultados obtidos são, na Figura 4, comparados com os resultados das mesmas grandezas determinadas pelos métodos tradicionais (ensaio com garrafa de areia e secagem no microondas, de acordo com as normas de ensaio *ASTM D1556* e *ASTM D4643*).

Os valores do peso volúmico seco obtidos com o gamadensímetro são, em geral, superiores aos obtidos pela garrafa de areia, não se tendo contudo determinado uma boa correlação entre os dois tipos de resultados. Os valores do teor em água, determinados a partir do gamadensímetro são, em geral, inferiores aos determinados pelo microondas, principalmente no maciço de montante, compactado do lado húmido. O estudo realizado por Edil e Sawangsuriya (2005) corrobora estes resultados, referindo que o gamadensímetro subestima os valores do teor em água. Estes resultados revelam que o gamadensímetro não é apropriado para o controlo da compactação, especialmente do lado húmido, onde não revela a adequada capacidade para a detecção dos desvios do teor em água. A experiência nacional na construção de barragens de aterro tinha permitido chegar a conclusões idênticas, o que levou à exclusão deste tipo de equipamento no controlo da respectiva construção.

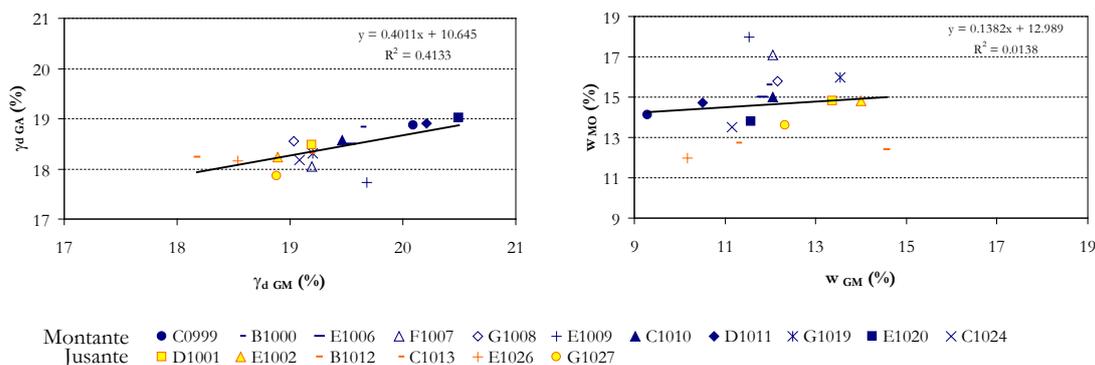


Figura 4 – Comparação dos Resultados do Gamadensímetro com os Obtidos pelos Métodos Tradicionais em Termos de Peso Volúmico Seco e Teor em Água

2.2.2. Aplicação do Geogauge

O *geogauge* (ver Figura 5), também conhecido por *Soil Stiffness Gauge (SSG)*, é um equipamento electro-mecânico que mede, *in-situ*, a rigidez de camadas compactadas de solo ou de agregados. O equipamento pesa cerca de 10 kgf e tem forma cilíndrica, com 0,280 m de diâmetro e 0,254 m de altura. O seu apoio sobre a superfície do terreno é feito a partir de uma base anelar metálica, com um diâmetro exterior de 0,114 m, um diâmetro interior de 0,089 m e uma espessura de 0,013 m.

O *geogauge*, após a sua colocação sobre a superfície da camada compactada, aplica uma força dinâmica, muito reduzida, com frequências variáveis incrementalmente (com incrementos de 4 Hz) entre 100 e 196 Hz (Alshibli *et al.*, 2005). Durante o ensaio, a força aplicada ( $F$ ) e o respectivo deslocamento ( $\delta$ ) são medidos para 25 diferentes frequências de vibração, varrendo a gama de valores anteriormente referidas. A força máxima produzida pelo *geogauge* corresponde a 9 N e os deslocamentos induzidos no solo não ultrapassam, em geral,  $1,27 \times 10^{-6}$  m (Alshibli *et al.*, 2005). Como resultado do ensaio o equipamento fornece o valor médio da rigidez determinado com base nos valores de rigidez ( $k_{GG} = F/\delta$ ) medidos para cada frequência. Geralmente, este valor está compreendido entre 3 e 70 MN/m (Fortunato, 2005). Cada ensaio tem uma duração aproximada de 1,5 minutos.



Figura 5 – Equipamento *Geogauge* com a Visualização do Resultado Obtido

A partir do referido valor da rigidez,  $k_{GG}$ , pode calcular-se o módulo de deformabilidade do solo a partir da seguinte expressão:

$$E_{GG} = k_{GG} \frac{(1-\nu^2)}{1,77 R} \quad [1]$$

onde  $E_{GG}$  é módulo de deformabilidade do solo (MPa),  $k_{GG}$  a rigidez medida pelo *geogauge* (MN/m),  $\nu$  o coeficiente de Poisson e  $R$  o raio do anel rígido (m).

Os ensaios foram realizados colocando o anel de apoio do equipamento directamente sobre a superfície do terreno, sem realizar alguma preparação especial dessa superfície. No posicionamento do equipamento foi exercida pressão e produzida uma rotação deste sobre a superfície, de modo a garantir que o contacto entre a base do equipamento e o terreno fosse, pelo menos, de 60%. Foram também realizados ensaios interpondo uma camada de areia fina e húmida. A colocação desta camada de areia teve como objectivo preencher os vazios, resultantes da existência à superfície de partículas de maiores dimensões, que pudessem dificultar o contacto entre a base do equipamento e a superfície do terreno.

A análise dos resultados permitiu verificar que não existem diferenças significativas nos valores de rigidez obtidos quando se utilizam os dois procedimentos alternativos, pelo que se conclui ser, no caso em estudo, a superfície de contacto suficientemente regular para manter um contacto adequado entre o solo e o equipamento, não influenciando os respectivos resultados. Sawangsurriya, A. *et al.* (2002) chegaram a conclusões idênticas quando determinaram a rigidez,  $K_{SSG}$ , de agregados britados.

### 2.2.3. Aplicação do Deflectómetro de Impacto Portátil (*DIP*)

O modelo do deflectómetro de impacto portátil usado na realização dos ensaios foi o *Prima 100*. Este equipamento é composto por: uma massa móvel, amortecedores, uma célula de carga, um geofone central e uma placa de carga (Figura 6). O geofone, instalado na parte central da placa de carga, mede a deformação na superfície do solo produzida pelo impacto da queda da massa móvel. Complementarmente, para possibilitar uma melhor interpretação dos ensaios, são colocados directamente sobre a superfície do solo dois geofones, respectivamente à distância de 0,30 e de 0,60 m.



Figura 6 – Deflectómetro de Impacto Portátil – *Prima 100*

O equipamento *Prima 100* permite que o operador mude a massa, a respectiva altura de queda e o diâmetro da placa (possibilitando o aumento ou a diminuição do efeito produzido na superfície do aterro pelo impacto da massa, isto é, a tensão dinâmica aplicada no terreno), bem como a configuração dos dados de memória usados no cálculo do módulo de deformabilidade. Adicionalmente, o número de amortecedores pode ser ajustado, de forma a alterar o tempo de impacto da carga aplicada.

O equipamento lê a evolução ao longo do tempo do valor da força aplicada e da deflexão produzida nos pontos de instalação dos geofones. Os dados são transmitidos a um computador portátil ou a um *PDA*, através de *bluetooth*. O *software*, além de permitir introduzir os dados do ensaio, como por exemplo, a altura de queda e o diâmetro da placa de ensaio, mostra e guarda os resultados obtidos em cada ensaio. Os resultados do ensaio incluem os valores máximos da força e da deflexão e também as curvas de evolução da força aplicada e das deflexões produzidas ao longo do tempo.

Os valores máximos da força e da deflexão são usados pelo *software* para calcular o módulo de deformabilidade,  $E_{DIP}$ . Para esta determinação é considerada a equação de Boussinesq:

$$E_{DIP} = \frac{f(1-\nu^2)\sigma R}{\delta_c} \quad [2]$$

onde  $f$  é um factor que depende da distribuição das tensões sob a placa, assumido igual a 2,0 (correspondente a placa flexível),  $\nu$  o coeficiente de Poisson, considerado igual a 0,35 (solo grosseiro),  $\sigma$  a tensão máxima aplicada à placa (kPa),  $R$  o raio da placa (igual a 0,15 m) e  $\delta_c$  o assentamento máximo da placa ( $\mu\text{m}$ ).

Nos primeiros ensaios, foram colocadas a placa de carga de 0,30 m de diâmetro e a massa de 15 kg e foi seleccionada a altura de queda de 0,80 m. Com esta configuração verificou-se que o equipamento se movimentava com o impacto da massa, afectando o valor da deflexão medida. Adoptou-se, então, uma nova configuração, reduzindo a massa para 10 kg e a altura de queda para 0,40 m. Esta alteração estabilizou o equipamento e produziu resultados de maior consistência e reprodutibilidade, tendo, por isso, sido adoptada a nova configuração na execução dos restantes ensaios.

Foram determinados os valores médios e o coeficiente de variação (*COV*) do módulo de deformabilidade,  $E_{DIP}$ , obtidos em cada série, para diferentes massas (10 e 15 kg) e diferentes alturas de queda (0,8 e 0,4 m) (Conde *et al*, 2009). Os valores obtidos do coeficiente de variação foram, em geral, relativamente reduzidos (variáveis entre 0,57% e 8,9%), diminuindo ainda mais (para o intervalo entre 0,57% e 7,3%) com a redução da massa (para 10 kg) e da altura de queda (para 0,40 m), confirmando, deste modo, a boa fiabilidade das determinações efectuadas. Na secção que se segue, apenas são considerados estes últimos resultados.

### 3. ANÁLISE DE RESULTADOS

#### 3.1. Variação de $k_{GG}$ e de $E_{DIP}$ com o Teor em Água e o Peso Volúmico Seco Determinados pelos Métodos Tradicionais

Para avaliar o desempenho destes equipamentos no controlo da compactação de camadas de aterro, numa primeira análise, analisa-se se os respectivos resultados apresentam sensibilidade a variações do teor em água e do peso volúmico seco dos geomateriais. Salienta-se que contrariamente aos materiais essencialmente granulares em que o controlo da compactação é baseado na variação do índice de vazios, a avaliação da qualidade da construção das camadas de aterro com as características aqui presentes (SM) baseia-se na determinação do desvio do teor em água e do grau de compactação.

A Figura 7 mostra a relação entre  $k_{GG}$  e o teor em água *in situ* ( $w_{MO}$ ). Os pontos obtidos revelam uma grande dispersão de valores, não sendo possível estabelecer uma correlação clara entre as duas grandezas. No entanto, como seria de esperar, verifica-se que, em termos médios,  $k_{GG}$  diminui exponencialmente com o aumento do teor em água, tanto no maciço de montante como no de jusante, registando, em geral, valores superiores a 80 MN/m para teores em água correspondente a uma compactação do lado seco.

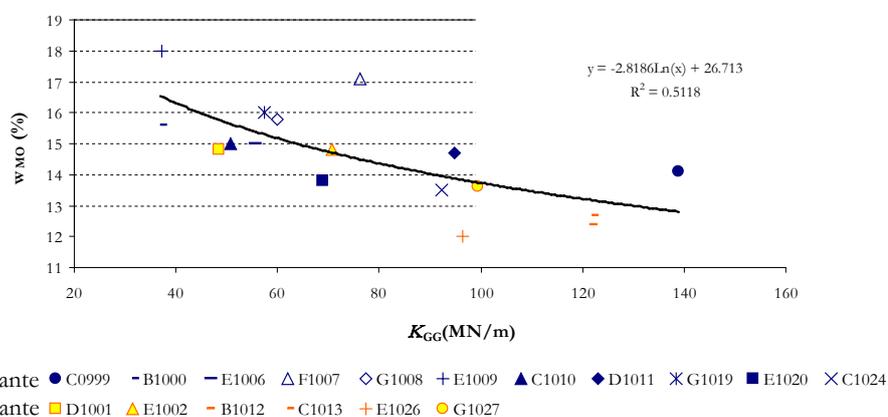


Figura 7 – Relação entre  $k_{GG}$  e o Teor em Água,  $w_{MO}$ , *in situ*

A relação entre  $k_{GG}$  e o peso volúmico seco *in situ* ( $\gamma_{d GA}$ ) apresenta uma dispersão significativa nos resultados obtidos na zona de montante (Figura 8), que poderá ser devida à presença de elementos mais grosseiros, bem como a corresponderem simultaneamente a determinações do lado húmido e do lado seco da curva de compactação (observe-se, na Figura 7, que o campo de variação do teor em água do maciço de montante (entre 13,5 e 18%) é muito superior ao correspondente do maciço de jusante (entre 12 e 14,8%).

Nos resultados obtidos no maciço de jusante regista-se alguma tendência para que  $k_{GG}$  diminua com o aumento dos valores do peso volúmico seco (Figura 8), o que poderá ser explicado pelo

facto do solo ter sido compactado do lado seco, aumentando a sua rigidez mais com a diminuição do teor em água do que com o aumento da sua compactidade.

A análise conjunta de ambas as Figuras permite concluir pela pequena e errática sensibilidade da rigidez obtida com o *geogauge* relativamente a pequenas variações do peso volúmico seco dos materiais ensaiados.

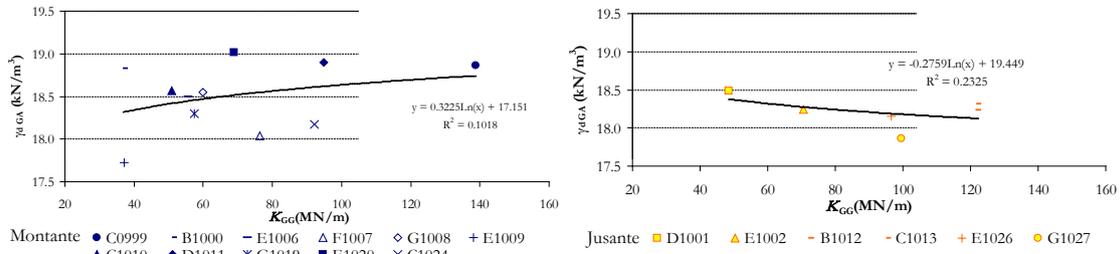


Figura 8 – Relação entre  $k_{GG}$  e o Peso Volúmico Seco,  $\gamma_{d GA}$ , *in situ*

Assim, o conjunto dos resultados obtidos com o *geogauge* para os materiais compactados parece indicar ter a variação do teor em água uma maior influência na rigidez dos solos do que o seu peso volúmico seco. Esta sensibilidade da rigidez a variações do teor em água foi também verificada num estudo realizado por Abu-Farsakh *et al.* (2004) em solos finos (silte argiloso e argila arenosa)

Apresentam-se, seguidamente, análises comparativas semelhantes para os resultados obtidos com o deflectómetro de impacto portátil.

Deste modo, a Figura 9 apresenta a relação entre  $E_{DIP}$  e o teor em água *in situ* ( $w_{MO}$ ). Verifica-se que os valores do  $E_{DIP}$  apresentam uma menor dispersão do que os obtidos com o *geogauge*, com uma tendência em tudo idêntica à anteriormente identificada para  $k_{GG}$ , diminuindo, de forma logarítmica, com o aumento do teor em água.

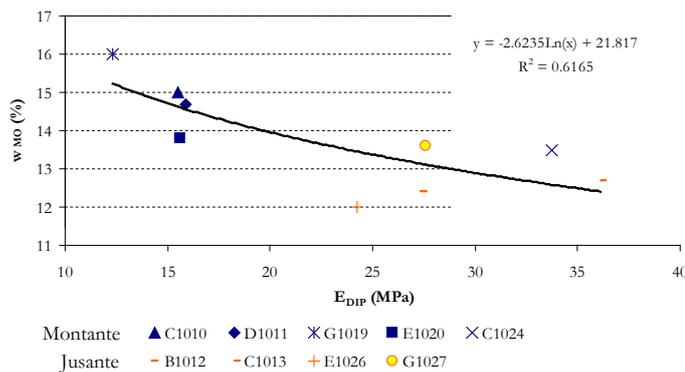


Figura 9 – Variação do Módulo de Deformabilidade,  $E_{DIP}$ , com o Teor em Água,  $w_{MO}$ , *in situ*

A Figura 10 mostra a relação entre  $E_{DIP}$  e o peso volúmico seco *in situ* ( $\gamma_{d GA}$ ). Verifica-se alguma dispersão nos resultados obtidos, mas uma tendência para que os valores do  $E_{DIP}$  diminuam quando os valores do peso volúmico seco aumentam, tal como se verificou para os valores obtidos com o equipamento *geogauge* para o maciço de jusante. No entanto, tal como referido anteriormente, a variação do peso volúmico seco foi muito pequena e a sensibilidade do módulo de deformabilidade é essencialmente relativa a variações do teor em água.

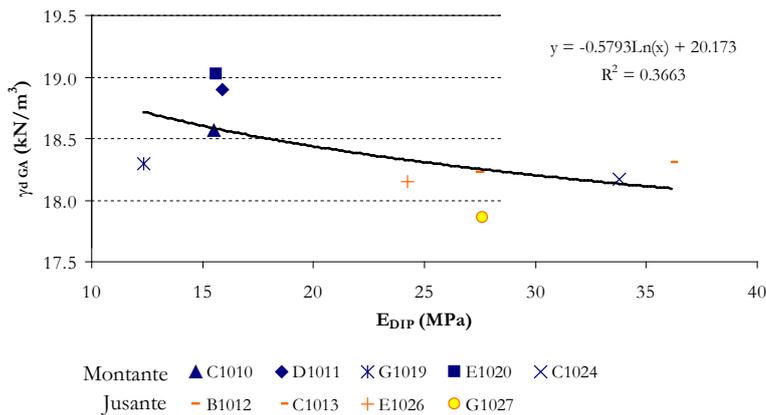


Figura 10 – Variação do Módulo de Deformabilidade,  $E_{DIP}$ , com o Peso Volúmico Seco,  $\gamma_{d GA}$  *in situ*

### 3.2. Relação entre os Resultados Obtidos com o Geogauge e com o DIP

Com base nas relações estabelecidas entre o teor em água e os valores da rigidez obtidos através do equipamento *geogauge*,  $K_{GG}$ , e os valores do módulo de deformabilidade,  $E_{DIP}$ , obtidos a partir do *DIP* (Figuras 9 e 10) é possível estabelecer uma relação, do tipo linear, entre estas duas grandezas:

$$k_{GG} = 4,1744E_{DIP} + 3,3308 \quad [3]$$

Por aplicação da equação [1], considerando um coeficiente de Poisson de 0,35, pode determinar-se do módulo de deformabilidade  $E_{GG}$ . A relação entre o módulo de deformabilidade  $E_{GG}$  e o módulo de deformabilidade  $E_{DIP}$  pode, deste modo, ser expressa pela seguinte equação:

$$E_{GG} = 36,20E_{DIP} + 28,89 \quad [4]$$

Pela análise das Figuras 9 e 10 pode ainda verificar-se que o maciço estabilizador de montante, com o teor em água e o peso volúmico seco mais elevados (compactado essencialmente do lado húmido), apresenta menores valores de  $k_{GG}$  e de  $E_{DIP}$ , do que os registados no maciço estabilizador de jusante (compactado com menor quantidade de água e com menor peso volúmico seco).

## 4. CONCLUSÕES

Com vista à determinação das condições de aplicação do *geogauge* e do deflectómetro de impacto portátil, estes equipamentos foram aplicados durante a construção dos aterros de uma barragem no Alentejo, para controlo da compactação dos maciços estabilizadores de montante e de jusante.

Os resultados obtidos após a sua comparação com os métodos de controlo da compactação tradicionais, permitiram tirar as seguintes conclusões:

- O gamadensímetro mostrou-se inadequado para o controlo da compactação, especialmente do lado húmido, onde não foi capaz de detectar apropriadamente os desvios do teor em água.

- Para melhorar o contacto entre o *geogauge* e solo foi interposta uma camada de areia. A comparação dos resultados obtidos, com e sem a interposição desta camada evidenciou, para os materiais ensaiados, ser dispensável a sua colocação.
- Os resultados obtidos com o deflectómetros de impacto portátil podem ser afectados pela estabilidade do equipamento durante a realização do ensaio, sendo necessário optar por configurações (em termos de massa, de altura e de amortecimento) que garantam a reprodutibilidade dos resultados.
- Os resultados dos ensaios efectuados, 4 ensaios em 23 locais, revelaram uma boa repetibilidade, tanto para os valores da rigidez do *geogauge*, como para o módulo de deformabilidade do *DIP*.
- Para as condições ensaiadas, as variações do peso volúmico eram pouco significativas, pelo que ambos os ensaios revelaram pequena sensibilidade a este parâmetro.
- Os valores de deformabilidade determinados, tanto pelo *geogauge* como pelo *DIP*, apesar de terem alguma dispersão, variam de forma exponencial com o teor em água, apresentando maior sensibilidade do lado seco do que lado húmido, sendo aplicáveis com vantagem nesse ramo da curva de compactação.
- Tal como seria de esperar, uma vez que se tratam de grandezas semelhantes, verifica-se a existência de proporcionalidade entre os valores da rigidez, obtida a partir do *geogauge*, e o módulo de deformabilidade, obtido a partir do *DIP*.

## AGRADECIMENTOS

Agradece-se à EDIA e à MONTE ADRIANO pela autorização e facilidades concedidas para a realização dos ensaios. Um agradecimento também aos técnicos do LNEC que fizeram os ensaios, Sr. Joaquim Timóteo da Silva, Sr. Rui Coelho e Sr. António Cardoso.

## REFERÊNCIAS

- Abu-Farsakh, M. Y., Alshibli, K.; Nazzal, M., and Seyman, E. (2004). *Assessment of In-Situ Test Technology For Construction Control of Base Courses and Embankments*. Technical Report n°FHWA/LA.04/385, Louisiana Transportation Research Center, Baton Rouge, LA. USA. 126p.
- Alshibli, K. A.; Abu-Farsakh, M., and Seyman, E. (2005). Laboratory Evaluation of the Geogauge and Light Falling Weight Deflectometer as Construction Control Tools. *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 17, n° 5, ASCE, September/October, 560-569.
- Conde, M. C; Lopes, M. G. and Caldeira, L. (2009). Stiffness methods for compaction control: the P-FWD device. *Proceedings of the 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Cairo, Egipto.
- Edil, T. B., and Sawangsuriya, A. (2005). *Investigation of the DCP and the SSG as Alternative Methods to Determine Subgrade Stability*. Technical Report 0092-01-05. Wisconsin Department of Transportation. Madison. USA.
- Fortunato, E. (2005). *Renovação de plataformas Ferroviárias. Estudos Relativos à Capacidade de Carga*. Tese de Doutoramento. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Sawangsuriya, A., Bosscher, P. J. and Edil, T. B. (2002). *Laboratory Evaluation of the Soil Stiffness Gauge*. Transportation Research Record 1808: 30-37.