

CARACTERIZAÇÃO DE ATERROS PROBLEMÁTICOS COM BASE NO ENSAIO DMT

Nuno Cruz¹, Carin Mateus² e Diana Marques³

¹MOTA-ENGIL/Univ. de Aveiro, Travessa das Lages, Zona Industrial de S. Caetano 4405-194 Gaia, Portugal
email: nunocruz@mota-engil.pt <http://www.mota-engil.pt>

² MOTA-ENGIL, Travessa das Lages Zona Industrial de S. Caetano 4405-194 Gaia, Portugal

³ MOTA-ENGIL, Travessa das Lages Zona Industrial de S. Caetano 4405-194 Gaia, Portugal

Sumário

Na presente comunicação apresenta-se um caso de um aterro em que se manifestaram diversas patologias de assentamentos e de rotura, provenientes de deformações excessivas ocorridas tanto no corpo do aterro como no terreno de fundação, ilustrando a importância que o comportamento mecânico dos materiais localizados abaixo das camadas nobres da estrutura rodoviária pode ter na performance dos pavimentos rodoviários, sobretudo nas fases de operação e manutenção. A avaliação da situação e a definição da solução de estabilização baseou-se numa campanha de ensaios com Dilatómetro de Marchetti (DMT), procurando tirar partido não só da sua elevada qualidade na definição dos módulos de deformabilidade, como também pela informação que fornece relativamente à resistência, história de tensões (OCR), peso volúmico e estratigrafia dos solos. Os resultados obtidos permitem realçar as alternativas que o ensaio pode fornecer, relativamente aos métodos tradicionais.

Palavras-chave: DMT; Aterros; Controlo de Compactação; Resistência; Deformabilidade.

1 INTRODUÇÃO

O caso de estudo aqui apresentado consiste na aplicação de um método promissor em trabalhos de controlo de aterros baseando-se na caracterização geotécnica de um aterro que sofreu assentamentos significativos com consequências gravosas ao nível dos pavimentos e da estabilidade de taludes. O aterro em causa localiza-se no trecho de ligação do Nó de Oliveira do Bairro – Centro aos Paços do Concelho, da variante à EN235 entre Oliveira do Bairro e Sangalhos. A zona em estudo localiza-se na bacia Meso-Cenozóica Ocidental, composta fundamentalmente por depósitos originados na fase de orogenia alpina. A geomorfologia regional é marcada por uma sucessão de grabben e horsts em que encaixa a rede de drenagem natural. À escala local, o terreno de fundação é constituído por depósitos Cretácicos consolidados, nomeadamente arenitos e conglomerados, que mais superficialmente se encontram num estado solto a medianamente compacto ($5 < N_{SPT} < 30$). O problema corresponde a um aterro em solos com base assimétrica a variar entre 6,0m e 4,5m de altura, com cerca de 150m de extensão cruzando uma linha de água através de uma passagem hidráulica que, à data do estudo, se encontrava a funcionar eficientemente.

Algumas semanas antes da sua abertura ao tráfego, foram detectadas patologias associadas a movimentos em torno da passagem hidráulica, plataforma e bermas e desenvolvimento de fendas de tracção na crista dos taludes, evidenciando uma instabilidade generalizada em torno do aterro. Após uma análise preliminar, suspeitou-se que as causas expectáveis poderiam estar relacionadas com a compressibilidade quer dos aterros quer da fundação, embora a informação disponível de ensaios realizados durante a execução do aterro (frequência relativamente baixa), indicasse compactações relativas da ordem de 97%. Face a estes desenvolvimentos, efectuou-se uma campanha preliminar que constou de 8 ensaios com Penetrómetro Dinâmico Ligeiro (DPL), sobretudo para uma auscultação da rigidez de aterros e fundação e delimitar as zonas críticas a caracterizar com maior detalhe. A localização destes ensaios e os respectivos resultados apresentam-se na Figura 1. Os resultados destes ensaios evidenciam uma parte superior caracterizada por uma compacidade solta a muito solta, com número de pancadas em geral inferior a 5, claramente inferiores ao que seria expectável para um aterro bem compactado. Na

seqüência desta análise, foi estabelecida uma campanha principal que constou de 5 ensaios com Dilatómetro de Marchetti (igualmente localizados na Figura 1), bem como alguns poços para recolha de amostra dos aterros e da fundação destinada a caracterização laboratorial (ensaios de identificação). A razão para a eleição do ensaio DMT assentou sobretudo na possibilidade que o ensaio oferece de obter um registo contínuo de perfis de resistência e deformabilidade, bem como do peso volúmico e tipo de solo das unidades atravessadas. A experiência acumulada em Portugal com o ensaio, tanto em solos sedimentares como em aterros [1] dava garantias de uma resposta adequada à avaliação do problema, fornecendo também dados de elevada qualidade (resistência e deformabilidade) para dimensionamento da solução de estabilização.

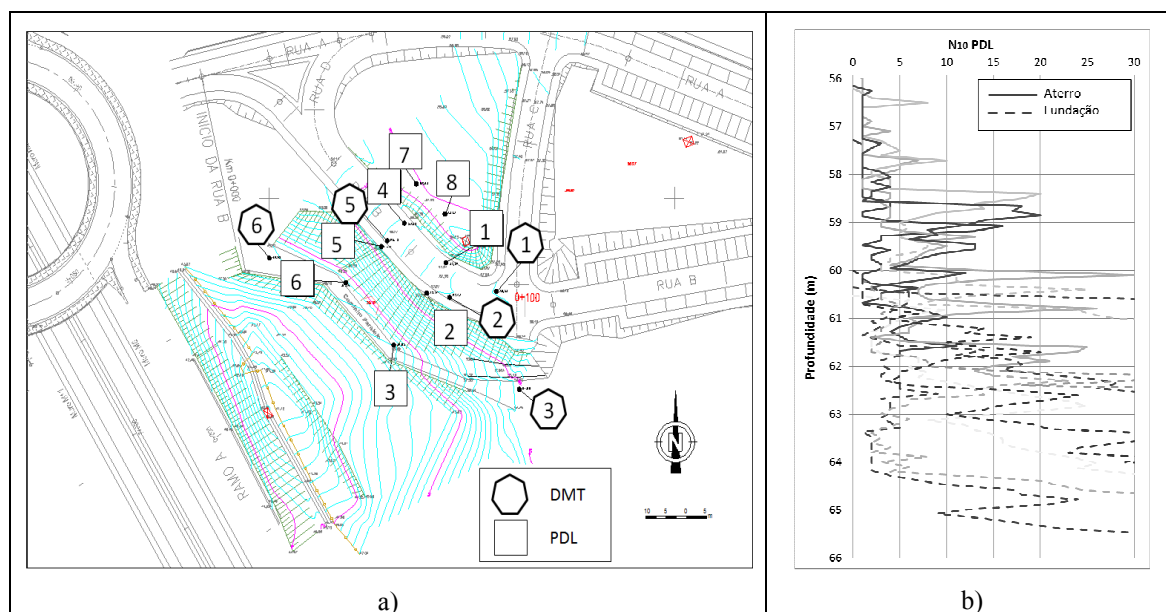


Fig.1. a) Localização dos ensaios realizados; b) Resultados dos ensaios PDL .

2 O ENSAIO COM DILATÓMETRO DE MARCHETTI

O equipamento do DMT (Figura 2) é constituído por uma lâmina de aço plana, biselada na sua extremidade inferior, com 14mm de espessura, 96 mm de largura e 220mm de comprimento. A lâmina possui uma membrana de aço flexível, de 60 mm de diâmetro, expansível numa das faces. O ensaio consiste na medição de pressões de expansão e descarga em cada intervalo de 20 cm de profundidade. Em cada posição, a membrana é expandida com auxílio de um gás pressurizado, determinando as pressões necessárias para deslocar o seu centro em 0,05 mm (leitura A) e 1,1 mm (leitura B) e, de novo 0,05mm em fase de descarga (leitura C). Esta expansão é efectuada através do dispositivo de medida, ligado a uma buzina e a um galvanómetro. O modelo teórico associado assenta na teoria de expansão de cavidades semi-esféricas [2].

Os resultados directos (leituras A, B e C) são tratados de forma a introduzir as correcções associadas à rigidez da membrana, obtendo-se as pressões corrigidas P_0 , P_1 e P_2 . Com base nestas pressões, na tensão efectiva vertical de repouso, σ'_{v0} , e na pressão hidrostática, u_0 , determinam-se os parâmetros intermédios do ensaio, nomeadamente Índice de Material (I_D), Módulo Dilatométrico (E_D), Índice de Tensão Horizontal (K_D) e Índice de Tensão Neutra (U_D), os quais se encontram relacionados com os parâmetros geotécnicos de referência. Nos Quadros 1 e 2 apresentam-se as fórmulas de cálculo associadas apenas aos parâmetros com interesse neste documento. Pormenores mais detalhados podem ser encontrados em [2] e [3], entre outros documentos de referência.

A razão da elevada qualidade de resultados das correlações com os parâmetros geotécnicos residem na semelhança dos parâmetros intermédios em relação aos parâmetros geotécnicos com que se comparam, conforme sumariamente se discute neste capítulo.

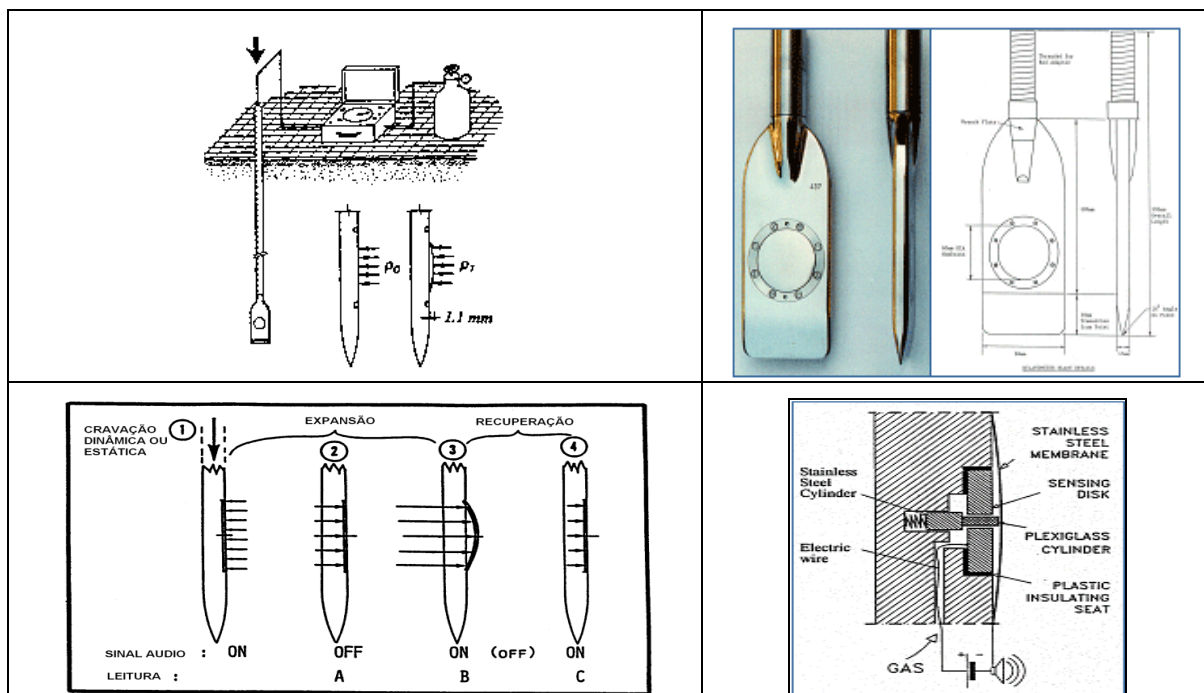


Fig.2. Sistema de medição do ensaio DMT.

O Índice de Material, I_D , é um índice extremamente versátil devido à sua capacidade para identificar os solos através de um valor numérico, o que permite a introdução da variável “tipo de solo” nas expressões de cálculo associadas à dedução dos parâmetros geotécnicos. Conforme referido por Marchetti [2], I_D não é o resultado de uma análise granulométrica, mas identifica o solo pelo seu comportamento mecânico, reflectindo consequentemente não só a quantidade de finos como a sua plasticidade. De um modo simples, I_D pode ser visto como “*influenciómetro da acção dos finos*” no contexto do comportamento mecânico [3]. A experiência acumulada em Portugal confirma o elevado nível de precisão quando comparado com a classificação triangular de base granulométrica, seja em solos transportados, solos residuais e aterros [4]. Neste contexto, solos SM-SC, A-1, A-2 (de acordo com as classificações Unificada e AASHTO, respectivamente) enquadram-se por valores variando em geral entre 1.8 e 4.0, valores de I_D superiores a 4 representam solos arenosos mal graduados, solos com percentagens de finos superiores a 20%, com baixa plasticidade, enquadram valores de I_D entre 1.0 e 1.8 e valores de I_D inferiores a 1.0 revelam solos com elevada percentagem de finos e plasticidade moderada a elevada.

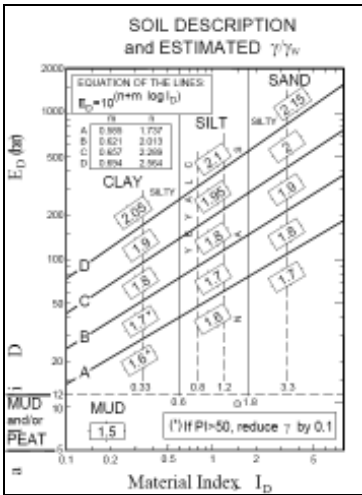
O Índice de Tensão Neutra [5] é um parâmetro relacionado os efeitos da poro-pressão em tudo semelhante ao conceito desenvolvido nos ensaios CPTu com o parâmetro normalizado B_q . No caso particular deste estudo, o parâmetro tem menor importância, uma vez que a avaliação é efectuada em ambientes não saturados, pelo que a sua discussão não será aqui apresentada.

O Índice de Tensão Horizontal, K_D , [2] pode ser visto como um coeficiente de impulso em repouso, K_0 , amplificado pelos efeitos da penetração da lâmina. Além disso, a forma da sua curva típica evidencia uma semelhança notável com a curva OCR, pelo que o parâmetro reflecte tanto o estado como a história de tensões. Esta realidade permite explorar com sucesso as relações *história de tensões-resistência não drenada* de solos argilosos e *coeficiente de impulso-ângulo de resistência ao corte* de solos arenosos, sendo naturalmente usado nas avaliações de resistência [3]. No caso de solos arenosos, a avaliação da resistência ao corte assenta na relação que existe entre este parâmetro quer com a densidade relativa (que pode ser vista como OCR destes solos) quer com o estado de tensão. A utilização da formulação de Marchetti [6] tem-se revelado ajustada à realidade dos solos portugueses, quando comparada com os resultados obtidos de outros ensaios, nomeadamente com SPTs, CPTu e triaxiais [1]. Finalmente, deve ainda notar-se que este parâmetro pode e tem vindo a ser utilizado com sucesso na avaliação da presença de estruturas de cimentação ([2] e [6] e da respectiva magnitude [3].

Quadro 1. Parâmetros básico e intermédios

Designação	Expressão numérica	Referencia
Pressão inicial de expansão	$P_0=1.05 \times (A+\Delta A)-0.05 \times (B-\Delta B)$	[2]
Pressão final de expansão	$P_1=B-\Delta B$	[2]
Pressão na descarga	$P_2=C-\Delta A$	[2]
Índice de Material	$I_D = (P_1 - P_0) / (P_0 - u_0)$	[2]
Índice de Tensão Horizontal	$K_D = (P_0 - u_0) / \sigma'_{v0}$	[2]
Módulo Dilatométrico	$E_D = 34.7 \times (P_1 - P_0)$	[2]
Índice de Tensão Neutra	$U_D = (P_2 - u_0) / (P_0 - u_0)$	[5]

Quadro 2. Parâmetros Geotécnicos deduzidos do ensaio DMT

Designação	Expressão numérica	Referencia
Módulo de Deformabilidade Confinado (E = 0.8M)	$M_{DMT} = R_M E_D$ $R_M = 0.14 + 2.36 \log K_D$, para $I_D \leq 0.6$ $R_M = R_{M0} + (2.5 - R_{M0}) \log K_D$, para $0.6 < I_D < 3.0$ $R_M = 0.5 + 2 \log K_D$, para $I_D \geq 3.0$ $R_M = 0.32 + 2.18 \log K_D$, para $K_D \geq 10$ $R_{M0} = 0.14 + 0.36 (I_D - 0.6) / 2.4$ R_M sempre superior a 0.85.	[2]
Grau de Sobreconsolidação	$OCR = (0.5 \times K_D)^{1.56}$ se $I_D \leq 1.2$ $OCR = (0.67 \times K_D)^{1.91}$ se $I_D \geq 1.2$ $OCR = ((0.5 + 0.1 \times ((I_D - 1.2) / 0.8)) \times K_D)^{1.56 + 0.35 \times ((I_D - 1.2) / 0.8)}$ se $1.2 < I_D < 2$	[7]
Ângulo de resistência ao corte	$\phi = 28 + 14.6 \times \log_{10}(K_D) - 2.1 \times (\log_{10}(K_D))^2$ se $I_D > 1.2$	[6]
Peso Volúmico e Identificação de solos		[7], [2]

A avaliação da deformabilidade a partir do ensaio DMT, é talvez a potencialidade de maior qualidade que o ensaio pode fornecer, em resultado de a medição do deslocamento inerente ao ensaio ser feita à custa de um dispositivo de precisão muito elevada (idêntica àquela apresentada pelos equipamentos do ensaio de carga em placa), conforme apresentado em seguida [6]:

- a) O ensaio é do tipo deslocamento controlado e, por consequência, as extensões impostas aos solos são sempre semelhantes;
- b) A membrana é apenas um separador passivo (solo-gás) e por consequência a precisão na medida das pressões é idêntica à dos manómetros (0,05 bar, no caso do ensaio DMT);
- c) Os deslocamentos são determinados através de um sistema que assegura uma precisão de 0,01mm.

Por seu lado, o Módulo Dilatométrico, E_D , é deduzido com base na Teoria de Elasticidade [8], considerando que a expansão da membrana contra o solo envolvente pode ser comparado com o carregamento de uma área circular de um espaço elástico e assim o movimento de expansão do centro da membrana por acção de uma pressão normal (Δp) pode ser calculado por:

$$s_0 = (2 D \Delta p / \pi) * (1 - \nu^2) / E \quad (1)$$

em que s_0 é o deslocamento (1,05mm) na direcção normal ao plano da membrana, D é o seu diâmetro (60mm), Δp a pressão diferencial, ν o coeficiente de Poisson e E o módulo de Young, o que se traduz por:

$$E_D = E / (1 - \nu^2) = 34.7 \Delta p \quad (2)$$

Partindo desta expressão Marchetti [2] propõe a introdução de um factor de correcção, R_M , para determinação do módulo de deformabilidade confinado, M (equivalente ao módulo edométrico, E_{oed} , i.é, $1/m_v$), que se justifica pelas perturbações na fase de penetração, pela direcção do carregamento ser horizontal enquanto M é um módulo vertical e pela variação da história de tensões, presença de estruturas de cimentação e o tipo de solo terem de ser considerados. A introdução dos parâmetros K_D e I_D , para além de E_D , nas expressões de cálculo do módulo asseguram a sua consideração. Por seu lado, como é sabido, a definição de módulo de deformabilidade está intimamente associada a um determinado nível de extensão axial, que no caso do ensaio DMT se enquadra num nível intermédio (0.01 a 1%), conforme [3], [9] e [10], entre outros.

Finalmente, importa ainda lembrar que partindo do módulo confinado é possível obter o módulo de Young e o módulo distorsional, aplicando a Teoria da Elasticidade. Para o caso de um valor do coeficiente de Poisson igual a 0,25 obtém-se $E_{DMT} \approx 0.8 M$ e $G_{DMT} \approx M/3$.

A elevada qualidade dos resultados destes parâmetros é amplamente reconhecida pela comunidade internacional, o que é igualmente confirmado pela experiência em Portugal [1] e [3].

O peso volúmico dos solos encontra-se subjacente à determinação de K_D e a vários parâmetros geotécnicos, pelo que a sua avaliação numérica é fundamental. A sua determinação [7] é efectuada com base na combinação dos parâmetros intermédios I_D e E_D (isto é do tipo de solo e da sua rigidez) conforme expresso no Quadro 2. Cruz et al. [1] confirmam a tendência descrita na bibliografia, com variações em torno da referência (laboratorial) raramente superior $\pm 1 \text{ kN/m}^3$. Neste contexto é igualmente importante salientar que um estudo efectuada no âmbito da determinação da propagação de erros [11] e [12], permitiu avaliar que o erro relativo máximo resultante de erros efectuados na medição em aterros compactados seria inferior a 5%, com medianas da ordem de 1%.

3 ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

De modo a efectuar caracterização mecânica do aterro, foram realizados 5 ensaios DMT, em que 3 ensaios (DMT1, DMT2 e DMT5) atravessaram todo o aterro e penetraram dentro do terreno de fundação até esgotar a capacidade de carregamento. Os restantes foram executados directamente sobre o terreno natural fora da influência do carregamento provocado pelo aterro (DMT3 e DMT6). Os resultados obtidos com interesse para a análise do problema são apresentados no Quadro 3, nomeadamente a classificação dos solos atravessados e o respectivo intervalo de valores do Índice de Material, o peso volúmico, o grau de sobreconsolidação, o ângulo de resistência ao corte e o módulo de deformabilidade confinado (M) deduzidos a partir das expressões apresentadas na Secção 2

Quadro 3. Resultados dos Ensaios DMT

DMT	Prof. (m)	Tipo de Solo	I_D	γ (kN/m ³)	OCR	M (MPa)	ϕ (°)
1	1.0-4.2	Silte a areia siltosa*	0.5-1.8	16-18	1 – 5	10-15	27 – 34
	4.2-5.5	Areia siltosa a areia **	2.0-5.0	17-19	1 – 2.5	5-15	30 – 33
	>5.5	Areia siltosa a areia **	2.0-5.0	19-20	2.5 – 7	80-110	33 - 36
2	1.0-3.0	Silte a areia siltosa *	0.5-2.0	16-18	1 – 10	5-10	30 - 34
	3.0-4.5	Areia siltosa *	2.0-5.0	18-20	2 – 7	20-60	26 – 35
	4.5-5.2	Areia*	7.0-8.0	18-19	1 – 2	10-30	29 – 30
	>5.2	Areia siltosa a areia **	2.0-8.0	18-19	1 - 6	10-30	27 - 32
3	0.0-3.5	Areia siltosa a areia **	2.0-6.0	17-19	2 – 15	15-40	35 – 38
	3.5-4.5	Areia **	3.5-6.5	17	1 – 6	18-22	30 – 35
	> 4.5	Areia **	4.0-7.0	19-20	>15	60-200	37 - 38
5	1.0-3.0	Areia siltosa *	1.5-2.5	19	10 – 50	60-80	38 – 41
	3.0-4.5	Silte a areia siltosa *	0.7-2.0	16-17	2 – 8	10-25	29 – 35
	>4.5	Silte a areia siltosa **	1.5-2.0	18-19	2,5 – 6.5	30-40	35 - 37
6	0.0-3.5	Areia siltosa a areia **	1.5-6.5	17-19	5 - 20	20-40	30 – 35
	>3.5	Areia **	3.0-6.0	17-20	1 - 20	20-200	38 - 39

* - Aterro; ** - Fundação

3.1 Identificação de Solos e Peso Volúmico

Na Figura 3 apresentam-se os perfis de I_D e dos pesos volúmcicos resultantes dos ensaios realizados a partir dos aterros, nos quais o contacto com o terreno de fundação se encontra a cerca de 4,5m de profundidade.

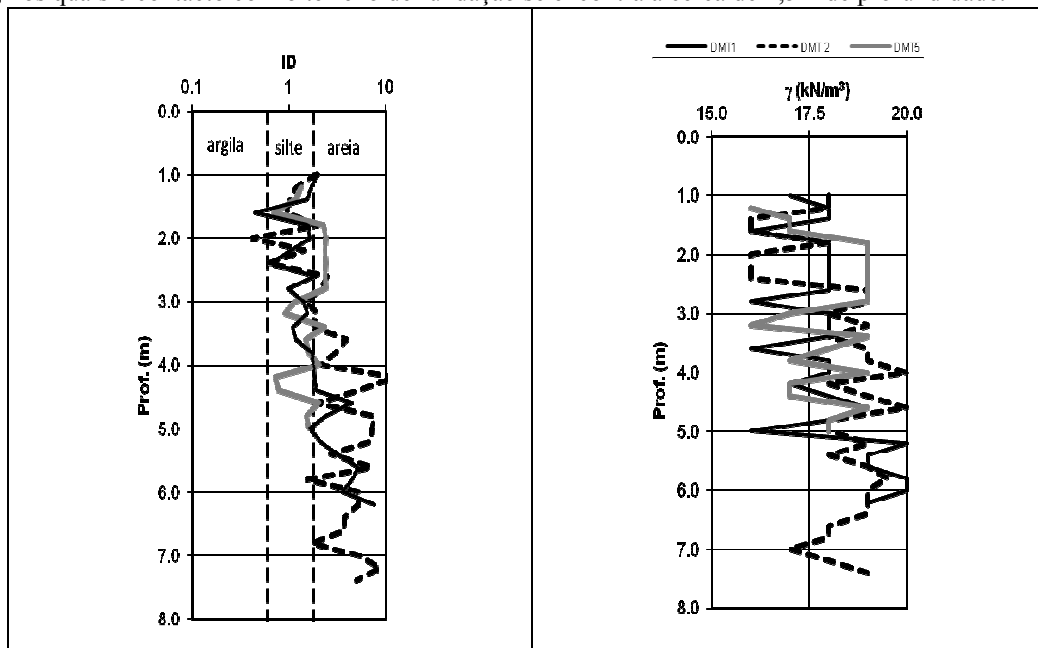


Fig.3. Perfis de I_D e do peso volúmico total nos aterros

Esses perfis evidenciam que o Índice de Material nos aterros é com frequência inferior a 1.8 (silte arenoso), sobretudo nos 3-4 m superiores. Neste contexto, os solos atravessados são classificados globalmente como siltosos (pontualmente com fracção argilosa) a areno-siltosos, de algum modo indicando uma presença de finos elevada sobretudo para uma parte superior do aterro. Esta avaliação viria a ser confirmada através dos ensaios de identificação de 5 solos recolhidos nesses locais que evidenciaram percentagens de finos entre 25% e 40%, com índices de plasticidade inferiores a 12%, globalmente classificados como ML, de acordo com a classificação unificada. No que respeita ao terreno de fundação, os resultados reflectem bem a natureza granular, algo grosseira, dos solos de fundação, evidenciando valores de I_D enquadrados entre 2.0 e 8.0.

Por seu lado, os resultados do peso volúmico obtidos a partir dos resultados dos ensaios evidenciam valores baixos (16 a 19 kN/m³) para o expectável num aterro compactado, sugerindo alguma ineficiência nos processos de compactação eventualmente influenciada pela significativa percentagem de finos referida no parágrafo anterior.

3.2 Ângulo de resistência ao corte

Considerando a natureza essencialmente granular não cimentada dos materiais de aterro, a sua resistência é traduzida pelo ângulo de resistência ao corte, cujos resultados parecem confirmar a baixa compactidade observada no ponto anterior, com valores a variar globalmente entre 27 e 34°, com maior incidência entre 30 e 32°, apresentando-se coerentes com as instabilidades verificadas ao nível dos taludes (de geometria de 1:1,5).

Por seu lado, no terreno de fundação distingue-se uma camada mais superficial com espessuras que podem variar entre 1 e 3m, com valores característicos enquadrados entre 30 e 35°, abaixo da qual a ordem de grandeza sobe para valores superiores a 35°.

3.3 Rigidez do aterro

A avaliação rigidez das camadas compactadas através do ensaio DMT pode ser conseguida através do *módulo dilatométrico*, E_D , e do *índice de tensão horizontal*, K_D (este último passível de ser correlacionado com o nível de compactação). Com efeito, Briaud & Miran [13], compilando informação de vários ensaios (50) realizados antes e após compactação de aterros de diferentes naturezas, verificaram o incremento de E_D , K_D com a compactação e a estabilidade do parâmetro I_D , o que viria a ser confirmado por Cruz et al. [4] em estudo do mesmo tipo realizado em aterros Portugueses. No entanto, verifica-se que a sensibilidade paramétrica cresce significativamente quando em vez daqueles dois parâmetros intermédios se utilizam os parâmetros geotécnicos que lhe estão associados, nomeadamente o grau de sobreconsolidação, OCR (função de I_D e K_D), e o módulo de deformabilidade confinado, M (função de E_D , I_D e K_D), conforme evidenciado na Figura 4 através do exemplo dos perfis obtidos no ensaio DMT2. No entanto, embora os dois parâmetros pareçam fornecer o mesmo nível de sensibilidade, a verdade é que o índice K_D , tende a ser sobreavaliado para pequenas profundidades em consequência das baixas tensões de confinamento e dos efeitos de sobreconsolidação superficial. Invariavelmente, os perfis K_D (e OCR) evidenciam um decréscimo inicial acentuado até estabilizar, enquanto os valores de M tendem a apresentar-se mais estáveis desde o início. Por essa razão e pelo facto de M representar um módulo de deformabilidade (parâmetro fundamental no dimensionamento de estruturas rodoviárias e ferroviárias), a utilização preferencial deste é recomendada [6]. No caso presente, os resultados globais no aterro evidenciam valores de M que variam globalmente entre 5 e 15 MPa (Módulo de Deformabilidade, E , variando entre 4 a 12 MPa), o que é compatível com as avaliações dos restantes parâmetros apresentadas anteriormente, justificando uma vez mais as instabilidades verificadas.

Por outro lado, em condições correntes de compactação a rigidez imposta pela passagem de um cilindro compactador traduz-se num perfil de rigidez variável com a profundidade, atingindo o seu valor máximo a cerca de 20-30cm abaixo da cota de passagem do cilindro compactador. Esta realidade é adequadamente identificada através dos dois parâmetros DMT, conforme fica bem expresso na alternância de picos visíveis nos perfis da Figura 4, que aliás já tinha sido assinalada por Marchetti et al. [15], no caso do parâmetro M . Desta realidade, resulta que o intervalo entre picos, tanto nos perfis de OCR como de M , traduzirá a espessura das camadas de compactação, o que em aterros controlados à posteriori é de enorme utilidade [4].

De acordo com o exposto, a análise dos resultados obtidos nos aterros (Figura 5) evidencia os perfis típicos com alternância de picos de rigidez, que em média distam de 60 a 80cm, bastante superior às definições preconizadas no projecto de execução (30cm). Esta interpretação ajuda a explicar o facto de os resultados do controlo com

gama densímetro fornecerem valores elevados ($CR > 97\%$), o que parecia estar em desacordo com a situação de instabilidade verificada no aterro. Com efeito, o controlo de compactação com o gamadensímetro é efectuado no topo da camada compactada, reflectindo apenas a rigidez mais superficial, ficando “cego” para a base de camadas de maior espessura. Nos perfis da mesma figura, pode ilustrar-se o efeito na rigidez de camadas (adequadamente) compactadas com espessuras de 20 a 30cm, nos resultados obtidos no ensaio DMT5 (linha cinzenta) entre 1,5 e 3m de profundidade, onde a evolução dos picos é mais suave, traduzindo-se por valores de M (estáveis) a rondar os 70 MPa (Módulo de Deformabilidade, E , de cerca de 55 MPa).

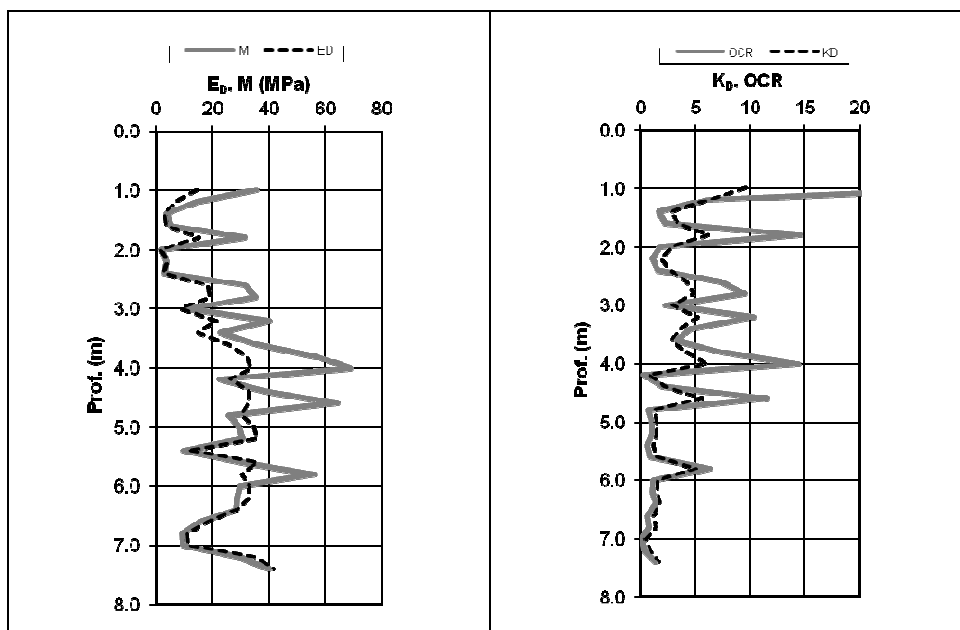


Fig.4. Perfis de E_D vs M e K_D vs OCR no ensaio DMT2

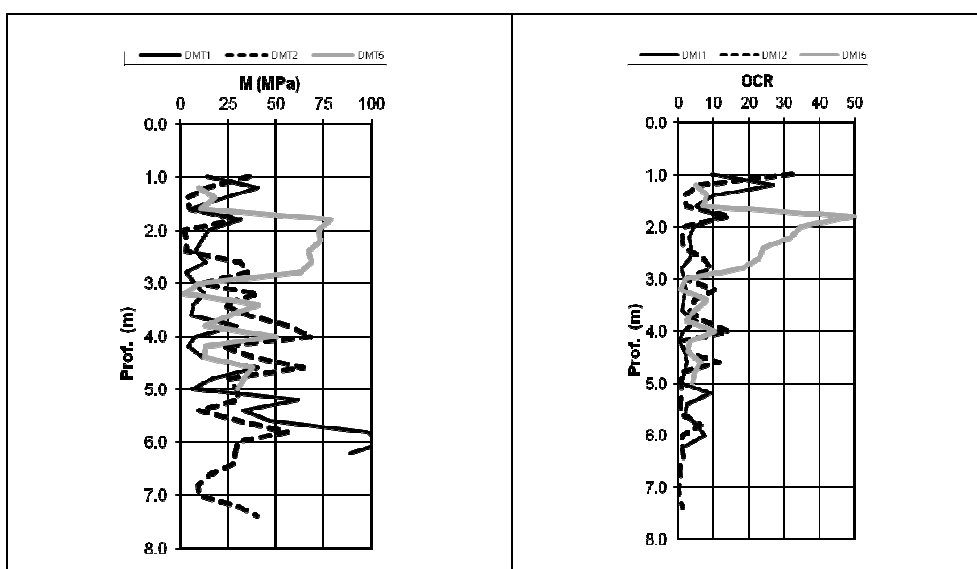


Fig.5. Perfis de M e OCR nos aterros

3.4 Simulações numéricas

Os resultados discutidos acima foram utilizados nas simulações de estabilidade de taludes e de assentamentos efectuadas com recurso aos programas de cálculo automático Slide 5.0 (RocScience) e Phase2 (elementos finitos, RocScience), respectivamente. Os resultados dessas simulações (Figura 6) confirmaram a eficiência da parametrização efectuada a partir dos ensaios DMT, convergiram fortemente para as ocorrências verificadas no aterro, embora no caso da deformabilidade essa comparação seja de carácter mais qualitativo, uma vez que o trabalho assentou sobretudo no desenvolvimento de soluções de recuperação e estabilização da plataforma e não propriamente na avaliação exaustiva do estrago.

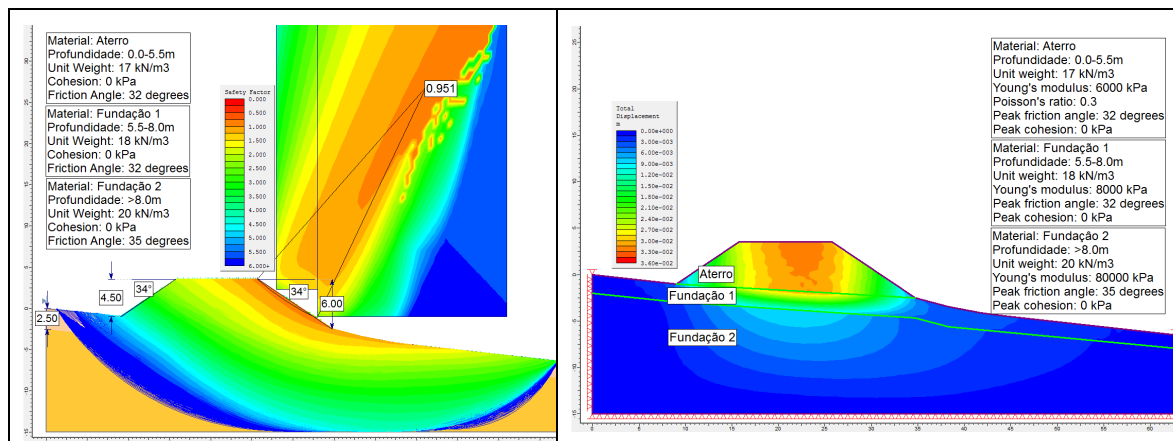


Fig.6. Diagramas dos cálculos com Slide 5.0 e Phase2

4 CONCLUSÕES

O presente caso de estudo permitiu identificar o ensaio DMT como uma alternativa aos métodos tradicionais no controlo de compactação e da rigidez dos aterros, podendo aplicar-se tanto durante a sua execução, como em aterros controlados à posteriori onde o controlo tradicional é de execução mais complexa. Do estudo realizado ressalta o seguinte conjunto de considerações com interesse na sua aplicação:

- A execução do ensaio é rápida e permite a determinação simultânea de vários parâmetros, nomeadamente os relacionados com a definição dos perfis estratigráficos dos solos (de forma numérica), peso volúmico e parâmetros de história e estado de tensão, resistência e deformabilidade; em consequência podem constituir uma alternativa eficaz ao controlo através de ensaios de carga com placa e com gamadensímetro;
- O conjunto de medições (de 20 em 20cm) efectuadas no decurso de cada ensaio, oferece a possibilidade de estabelecer perfis quasi-contínuos de rigidez e assim detectar eventuais anomalias localizadas no interior dos aterros, que escapam aos ensaios de carga em placa cuja realização é pontual e limitada a zonas mais superficiais; para além disso, geram ainda quantidades de dados estatisticamente significativas, permitindo uma superior optimização dos parâmetros geotécnicos representativos de todo o volume envolvido numa determinada anomalia; finalmente, podem ainda ser fundamentais em avaliações abaixo do nível de água, onde é impossível a realização dos ensaios de carga com placa;
- Confirmando estudos anteriores em aterros, o presente estudo revelou a possibilidade de algum controlo sobre composição granulométrica dos solos, através de I_D , e do peso volúmico natural;
- O módulo de deformabilidade confinado obtido através do ensaio DMT (que pode ser recalculado em módulo de deformabilidade ou módulo distorsional em função do coeficiente de Poisson) é globalmente reconhecido pela comunidade internacional como de elevada sensibilidade a variações de rigidez tanto em solos naturais (argilosos muito moles a duros e arenosos muito soltos a medianamente compactos), como em solos residuais e aterros e encontra-se adequadamente indexado a um intervalo de extensão axial de referência (0,01 a 0,1%); em consequência, exibe um grande potencial para ser utilizado directamente no controlo da compactação e da rigidez dos aterros;

- e) A evolução do módulo de deformabilidade deduzido do ensaio evidencia potencial para a avaliação das espessuras das camadas de compactação em problemas de verificação à posteriori; embora com menor nível de eficiência, o grau de sobreconsolidação (OCR) deduzido a partir do ensaio pode igualmente fornecer indicações no mesmo sentido;
- f) No caso de utilização deste ensaio no controlo durante a execução, a realização de ensaios em aterro experimental com as características preconizadas nos cadernos de encargos permite definir um perfil tipo de rigidez, o qual pode vir a ser utilizado como referência na comparação com resultados “in situ” de forma equivalente ao controlo tradicional através dos pesos volúmicos; neste caso, o controlo através de um parâmetro de deformabilidade tem obviamente vantagens em situações de dimensionamento com base em modelos numéricos;
- g) No presente estudo, os parâmetros geotécnicos deduzidos do ensaio conduziram a resultados convergentes com a situação real.

5 REFERÊNCIAS

1. Cruz, N., Devincenzi, M. & Viana da Fonseca, A. (2006b). “DMT experience in Iberian transported soils”. *Proc. 2nd International Flat Dilatometer Conference*, Washington, D.C., pp. 198-204.
2. Marchetti, S. (1980). “In-situ tests by flat dilatometer.” *J. Geotechnical. Eng. Div. ASCE*, 106, GT3, 299-321.
3. Cruz, N. 2010. *Modelling Geomechanics of Residual Soils With DMT Tests*. PhD thesis. Porto. Porto University.
4. Cruz, N. Viana da Fonseca, A. Santos, J. (2006). “Compaction control and stiffness evaluation of earthfills, by DMT”. *Geotechnical Luso-Brazilian Conference*. Curitiba, Brasil.
5. Lutenecker, A. J., Kabir, M. G. (1988). “Dilatometer C-reading to help determine stratigraphy”. *Proc. of Int. Symposium on Penetration Testing, ISOPT-1*, Orlando, FL, Vol. 1, pp. 549-554.
6. Marchetti, S., Monaco, P., Totani, G., Calabrese, M. (2001). “The flat dilatometer test (DMT) in soil investigations”. *Technical Committee 16. International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE)*.
7. Marchetti, S. and Crapps, D. K. (1981). “Flat Dilatometer Manual.” *Internal report of GPE Inc., distributed to purchasers of DMT equipment*.
8. Gravesen, S. (1960). “Elastic semi-infinite medium bounded by a rigid wall with a circular hole”. *Laboratoriet for Bygningsteknik, Danmarks Tekniske Hojskole, Meddelelse No. 10*, Copenhagen.
9. Monaco, P., Marchetti, S.; Totani, G.; Marchetti, D. (2009). “Interrelationship between small strain modulus G_0 and operative modulus”. *International Conference on Performance-Based Design in Earthquake Geotechnical Engineering*, Tokyo.
10. Sabatini, P.J., Bachus, R.C., Mayne, P.W., Schneider, J.A. & Zettler, T.E. (2002). “Evaluation of soil and rock properties”. *Technical Manual. FHWA-IF-02-034*. Federal Highway Admin., Washington.
11. Mateus, C., Machado, L., Cruz, N. & Cruz, M. 2012. Determination of error propagation of in-situ tests resulting from its measuring accuracy. *4th International Conference on Site Characterization*. Recife, Brasil.
12. Cruz, N.; Mateus, C.; Cruz, M. (2009). “Determinação dos erros de medição associados a ensaios “in-situ”. O caso do ensaio DMT”. *Congreso de Métodos Numéricos en Ingeniería 2009*. Barcelona, España.
13. Briaud, J.L., Miran, J. (1992). “The Flat Dilatometer Test”. Report nº FHWA-SA-91-044. *Federal Highway Administration*. Washington D.C.