

AVALIAÇÃO DE PARÂMETROS GEOTÉCNICOS PELO DMT EM SOLOS PORTUGUESES*

Evaluation of geotechnical parameters by DMT in Portuguese Soils

NUNO CRUZ **

A. VIANA DA FONSECA ***

J.L. LEMOS ****

PAULO COELHO *****

RESUMO - Apresentam-se as conclusões resultantes de três estudos experimentais realizados com base no ensaio com Dilatômetro de Marchetti (DMT) em depósitos aluvionares dos rios Vouga, Mondego e Tejo. Os resultados obtidos são comparados com ensaios de laboratório e *in situ* convencionais. Descreve-se ainda uma primeira tentativa de utilização deste ensaio em solos residuais, através de um estudo experimental realizado em solos residuais graníticos do Porto.

SYNOPSIS - Herein are presented the conclusions resulting from three experimental studies performed with Marchetti's dilatometer on alluvial deposits of three Portuguese rivers. The results are then compared with conventional laboratory and *in situ* tests. A first approach to the use of this equipment on residual soils, by means of a practical study performed on soils of granitic nature, is also described.

1- INTRODUÇÃO

O estudo que em seguida se descreve tem como objectivo a apresentação da primeira tentativa de caracterização de solos portugueses com base no ensaio com dilatômetro de Marchetti (DMT). Este estudo foi estabelecido de modo a avaliar a adequabilidade e eficácia do ensaio na obtenção das propriedades mecânicas tanto de solos transportados como de solos residuais.

O ensaio com dilatômetro de Marchetti consiste na cravação (preferencialmente estática) de uma lâmina que tem localizada numa das faces uma membrana flexível. A membrana é expandida a intervalos de profundidade regulares (normalmente 20 cm) através de um gás pressurizado, determinando-se as pressões necessárias para deslocar o seu centro em 0,05 mm (leitura A) e 1,10 mm (leitura B). Estas pressões são então corrigidas em função da rigidez da membrana, obtendo-se as pressões P_0 e P_1 , respectivamente.

Marchetti (1980) definiu os três parâmetros DMT que em seguida se apresentam:

$$\text{Módulo Dilatométrico, } E_D = E / (1 - \nu^2) = 34,7 (P_0 - P_1) \quad (1)$$

* Comunicação apresentada ao XIV Congresso da Sociedade Internacional de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Hamburgo, 1997.

** Resp. pelos Sectores de Sondagens e de Geotecnia de Fundações do Laboratório de Geotecnia e Materiais de Construção do CICCOPN. Assistente Convidado do Departamento de Engenharia Civil da FCTUC

*** Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da FEUP

**** Professor Associado do Departamento de Engenharia Civil da FCTUC

***** Assistente do Departamento de Engenharia Civil da FCTUC

$$\text{Índice de Material, } I_D = P_0 - P_1 / (P_0 - u_0) \quad (2)$$

$$\text{Índice de Tensão Horizontal, } K_D = (P_0 - u_0) / \sigma'_{v0} \quad (3)$$

Estes parâmetros tem vindo a ser correlacionados com a estratigrafia, baridade, história de tensões, resistência e deformabilidade dos solos transportados.

O principal objectivo a atingir com o estudo efectuado sobre os solos transportados consistiu na verificação da adequabilidade das correlações estabelecidas para os solos transportados portugueses. Para este efeito, foram realizados três estudos comparativos em depósitos aluvionares de três rios portugueses - Vouga, Mondego e Tejo.

No que respeita à utilização do ensaio DMT para caracterização de solos residuais, é muito escassa a informação disponível. A fim de se estabelecer algumas correlações específicas foi feita uma primeira tentativa baseada num estudo experimental realizado sobre solos residuais graníticos do Porto.

2 - SOLOS TRANSPORTADOS

Os ambientes geológicos das áreas estudadas são caracterizados por depósitos de espessuras consideráveis (superiores a 30 m) sobrejacentes a formações do Cretácico (Vouga e Mondego) e Miocénico (Tejo). Nos Quadros 1 e 2, apresentam-se os resultados de identificação e dos principais índices físicos dos solos.

A caracterização mecânica foi realizada com base em ensaios *in situ*, de corte rotativo (FVT), e em laboratório sobre amostras indeformadas, ensaios triaxiais CIU e CK₀U e ensaios edométricos. Os resultados foram comparados com os obtidos dos ensaios DMT realizados nos três locais. No Quadro 3 apresenta-se o resumo dos resultados destes últimos ensaios, expressos nos parâmetros I_D , E_D e K_D .

Quadro 1 - Ensaio de identificação em solos transportados

	Tejo	Mondego	Vouga
Granulometria			
% < 0,074 mm	95,0 - 98,0	72 - 81	---
% < 0,06 mm	---	70 - 80	70 - 82
% < 0,002 mm	---	20 - 30	6 - 10
Limite de Liquidez (%)	45 - 75	45 - 55	45 - 60
Limite de Plasticidade (%)	18 - 30	30 - 34	25 - 40
Classificação Unificada *	CH	OL - OH	OL - OH

*ASTM D2487 - 85: Classification of soils for engineering purposes

Quadro 2 - Caracterização física em solos transportados

	Tejo	Mondego	Vouga
Baridade (kN/m ³)	16,0 - 17,5	14,0 - 15,0	16,0 - 17,0
Teor em água (%)	50 - 70	60 - 100	50 - 70
Peso específico das part. sólidas (kN/m ³)	25,0 - 26,5	26,0 - 26,4	26,0 - 26,4
Índice de vazios	1,4 - 2,2	1,5 - 3,0	1,2 - 1,8
Matéria orgânica (%)	---	9 - 11	---

Quadro 3 - Resultados DMT em solos transportados

Vouga	I_D	E_D (MPa)	K_D
Areias e areias siltosas	1,5 - 4,0	5,0 - 15,0	2,0 - 4,5
Siltos arenosos	0,8 - 1,5	2,5 - 4,0	1,5
Argilas siltosas	0,3 - 0,8	1,0 - 2,0	1,8 - 3,0
Argilas	< 0,3	0,5 - 2,0	1,8 - 3,0
Mondego	0,25 - 0,40	0,9 - 1,2	1,3 - 1,8
Tejo	0,15 - 0,25	0,5 - 1,8	1,8 - 2,3

A comparação entre DMT e os ensaios convencionais referidos permitiu estabelecer as seguintes conclusões:

i) *estratigrafia* - o ensaio mostra concordância com os dados obtidos das sondagens e das análises granulométricas efectuadas;

ii) *baridade* - os resultados do DMT determinados com base na correlação de Marchetti e Crapps (1981) mostram-se convergentes com as determinações tradicionais apresentando variações de $\pm 1 \text{ kN/m}^3$;

iii) *estado de tensão in situ*, K_0 - não foi possível, no decurso deste trabalho, obter resultados de forma directa, nomeadamente com recurso a pressiómetros auto-perfuradores (SBPT); no entanto, os valores de K_0 determinados com base na correlação de Marchetti (1980) mostram-se concordantes com a correlação de Alpan, baseada no índice de plasticidade, conforme se pode verificar na Figura 1;

iv) *coesão não drenada*, c_u - os resultados DMT, com base na correlação de Roque (1988), parecem convergir razoavelmente para os valores de pico obtidos dos ensaios de corte rotativo após correcção de Bjerrum, conforme a Figura 2; por outro lado, verifica-se que as correlações de Marchetti (1980) e Lacasse *et al.* (1988) (note-se que as duas são muito próximas) conduzem a valores idênticos ao valor residual obtido no mesmo ensaio nos casos de solos em que o teor em água se encontra claramente acima do limite de liquidez respectivo (Figura 3); a razão para a discrepância referida parece estar relacionada com o facto de os critérios de base que permitiram o desenvolvimento de cada uma das correlações serem substancialmente diferentes; com efeito, as correlações de Marchetti e Lacasse *et al.* são estabelecidas com base em OCR, definindo-se como uma relação entre tensões efectivas, cujo parâmetro principal obtido do ensaio é P_0 , enquanto a correlação de Roque se baseia nas teorias de capacidade de carga, definindo-se como uma relação entre tensões totais (da mesma forma que a coesão não drenada), com P_1 como dado principal obtido do ensaio, o que a torna menos vulnerável à perturbação por acção da cravação da lâmina.

v) *módulo de deformabilidade confinado*, M - os resultados obtidos pela correlação de Marchetti (1980) apresentam-se convergentes com o módulo edométrico, E_{ed} , conforme Figura 4, confirmando as referências bibliográficas.

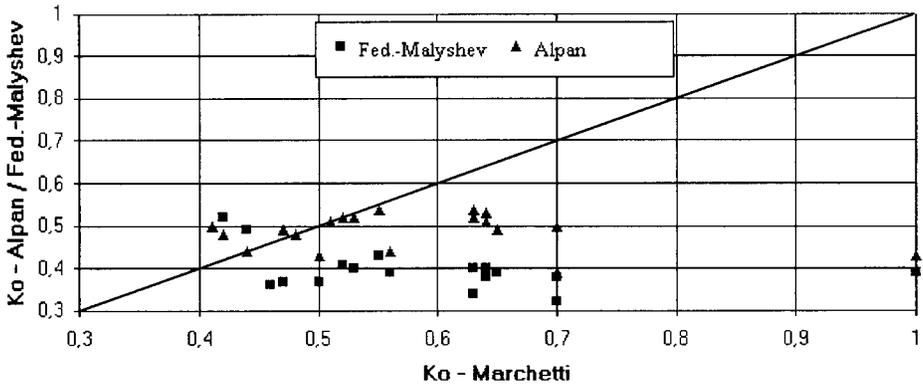


Figura 1 - Estudo comparativo dos resultados de K_0

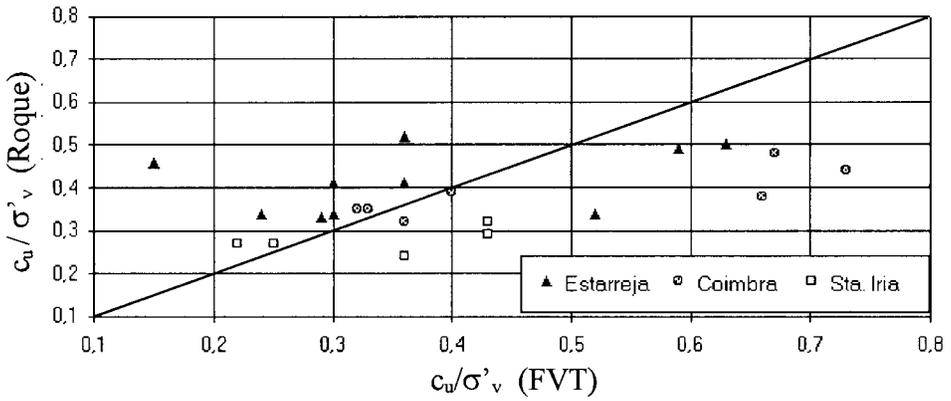


Figura 2 - Comparação Vane Test (pico) / DMT (Roque)

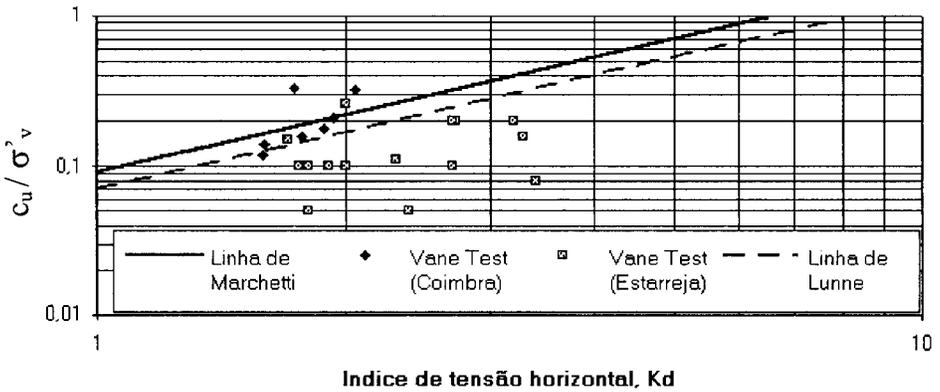


Figura 3 - Comparação Vane Test (residual) / DMT (Marchetti, Lunne)

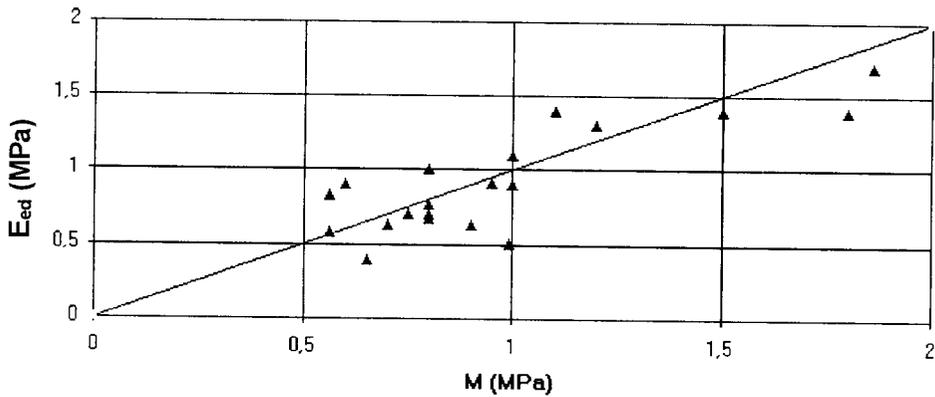


Figura 4 - Comparação entre M e E_{ed}

3 - SOLOS RESIDUAIS

O comportamento de solos residuais é dificilmente explicado pela mecânica dos solos clássica. Na realidade, a existência de uma estrutura de cimentação herdada conduz a relações tensão-deformação distintas das evidenciadas pelos solos transportados. Estas diferenças são essencialmente traduzidas pela presença de um valor de coesão, c' , que representa um incremento de resistência devido à cimentação, e pela existência de dois pontos de cedência correspondendo o primeiro à desestruturação e o segundo à cedência plástica generalizada do solo (Vaughan *et al.*, 1988).

Conforme era previsível, as correlações relativas ao DMT estabelecidas para solos transportados não se aplicam a solos residuais, exceptuando-se as relativas à definição estratigráfica e à baridade, as quais não são dependentes da estrutura de cimentação.

Esta problemática será discutida em seguida, baseando-se nos resultados obtidos numa campanha realizada sobre dois solos residuais graníticos pertencentes ao mesmo complexo (Granito do Porto), localizados no Porto e na Maia. Note-se que as correlações apresentadas baseiam-se num reduzido volume de resultados, necessitando por isso de confirmação noutros locais que traduzam diferentes ambientes geológicos e graus de alteração.

A identificação, índices físicos e características mecânicas dos solos estudados são apresentados nos Quadros 4, 5 e 6. As semelhanças entre os dois solos são por demais evidentes.

Quadro 4 - Ensaio de identificação em solos residuais

Granulometria (%)	Porto	Maia
< 0,074 mm	15,0 - 40,0	37,0 - 40,0
< 0,06 mm	15,0 - 35,0	---
< 0,002 mm	2,0 - 8,0	---
Limite de liquidez (%)	28 - 40	30 - 40
Limite de Plasticidade (%)	18 - 30	15 - 25
Class. Unificada	SC - SM	SC - SM

Quadro 5 - Caracterização física em solos residuais

	Porto	Maia
Baridade (kN/m ³)	18,0 - 20,0	18,0 - 19,5
Teor em água (%)	15 - 25	20 - 24
Peso específico das partíc. sólidas (kN/m ³)	26,2 - 26,6	26,6
Índice de vazios	0,60 - 0,80	0,70 - 0,75
Grau de saturação (%)	70 - 100	70 - 85

Quadro 6 - Resultados dos ensaios mecânicos

	Porto	Maia	Procedimentos de ensaio
Coef. de impulso em repouso	0,36 - 0,38 0,35 - 0,40	-- --	SBPT Triaxial com aneis de Bishop
Parâmetros de resistência (t.s efectivas) ϕ' (°) c' (kPa)	38 --	--	SPT(*) (N _i) 60
	44 - 45 --	42 - 44 --	CPT (*) q_c, σ'_{v0}
	40 - 47 --	-- --	SBPT (*) (areias)
	37 7	-- --	PLT (D=120;60;30cm)
	37 - 38 9 - 12	37 --	Ensaio triaxiais (CID;CK ₀ D) (100 mm)

*resultados obtidos com base em correlações para solos granulares

Quadro 7 - Resultados do DMT em solos residuais

	Porto	Maia 1	Maia 2
I _D	1,5 - 2,2	1,2 - 2,1	1,2 - 2,1
E _D (MPa)	20 - 30	10 - 30	20 - 30
K _D	7,0 - 11,0	5,5 - 7,0	4,5 - 8,0

3.1 - Estratigrafia e baridade

Os resultados da estratigrafia e baridade parecem ser correctamente determinados pelas correlações estabelecidas para os solos transportados.

3.2 - Coeficiente de impulso em repouso, K₀

A determinação de K₀ em solos granulares foi estabelecida, entre outros, por Baldi *et al.* (1986) usando ensaios DMT e CPT, de acordo com a expressão seguinte:

$$K_0 = C_1 + C_2 K_D + C_3 q_c / \sigma'_{v0} \quad (4)$$

em que $C_1 = 0,376$, $C_2 = 0,095$, $C_3 = -0,00172$, q_c representa a resistência de ponta medida no ensaio CPT e σ'_{v0} a tensão efectiva vertical *in situ*.

Campanella e Robertson (1991), baseando-se nas teorias de Durgunoglu e Mitchell (1975), apresentam outra forma de avaliar K_0 usando K_D , desde que conhecido o ângulo de atrito, ϕ' . O diagrama resultante, apresentado na Figura 5, evidencia a possibilidade de relacionar q_c / σ'_{v0} com K_D , através da expressão seguinte:

$$q_c / \sigma'_{v0} = 33 K_D \quad (5)$$

Os ensaios CPT e DMT realizados no Porto mostram resultados que diferem consideravelmente daquela proposta. Para este local a correlação pode ser escrita da seguinte forma:

$$q_c / \sigma'_{v0} = 8,4 K_D \quad (6)$$

Se a constante C_2 , afectada por esta variação, for modificada de forma proporcional ($C_2 = 0,095 \times 8,4 / 33 = 0,024$), os resultados K_0 enquadram-se no intervalo 0,35 - 0,5, mostrando-se consistente com os resultados obtidos dos ensaios SBPT e triaxiais.

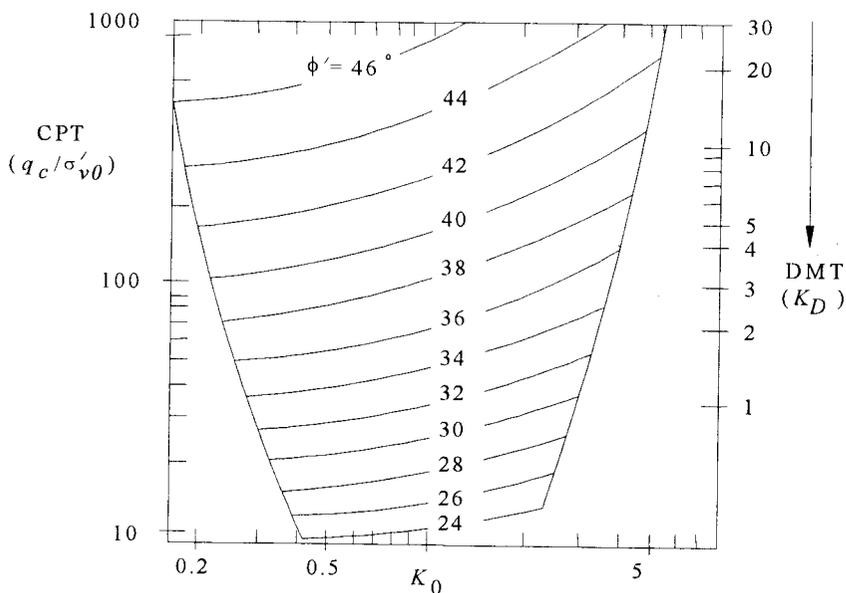


Figura 5 - Diagrama proposto para avaliação do ângulo de atrito a partir de DMT e/ou CPT (Campanella e Robertson, 1991)

O mesmo raciocínio foi aplicado no caso da Maia tendo-se obtido a relação entre q_c / σ'_{v0} e K_D igual a 12,5 conduzindo a um valor de C_2 de 0,035. Os resultados de K_0 enquadram-se num intervalo esperado (0,4 - 0,5), embora não tenha sido possível a confirmação correspondente.

3.3 - Coesão efectiva como reflexo da cimentação interparticular – estimativa por via do DMT

O Quadro 7 evidencia que I_D e E_D se apresentam enquadrados pelos mesmos intervalos enquanto K_D difere consideravelmente nos dois locais. Os ângulos de atrito correspondentes avaliados através do diagrama da Figura 5 (eixo K_D) encontram-se limitados por $40^\circ - 42^\circ$ (Porto) e $38^\circ - 40^\circ$ (Maia) enquadrando-se entre aqueles avaliados pelos ensaios SPT e CPT, próximos dos resultados SBPT e superiores aos resultantes dos ensaios triaxiais. Este facto, encontra uma resposta coerente se for considerado que K_D reflecte não apenas o ângulo de atrito mas também a coesão efectiva devida à estrutura de cimentação.

Nesta situação, dado que é possível determinar com precisão razoável o valor de ϕ' através do ensaio triaxial, desde logo se torna viável uma estimativa da resistência devida à estrutura de cimentação, propondo-se em seguida uma metodologia para esse efeito (Cruz, 1995):

- a) realização do ensaio DMT;
- b) determinação do ângulo de atrito pelo ensaio triaxial, $\phi'(t)$;
- c) avaliação de K_0 com base na correlação de Baldi *et al.* adaptada (ver 3.2)
- d) avaliação do valor de K_D (diagrama da Figura 1) que seria obtido se existisse apenas atrito, (K_{Deq})
- e) a diferença, K_{dc} , entre K_{Deq} e K_D (K_{dc}) reflectirá a resistência devida à cimentação.

Numa tentativa de estabelecer uma correlação, ainda que tendo a noção da escassez de dados, procurou-se relacionar o ângulo de atrito determinado com base em K_D , $\phi'(K_D)$, através da expressão seguinte, baseada no critério de rotura de Mohr-Coulomb:

$$\sigma' \text{tg } \phi'(K_D) = c' + \sigma' \text{tg } \phi'(t) \quad (7)$$

A regressão linear obtida entre K_{dc} e c' obtido da equação anterior pode ser observada na Figura 2, sendo a equação correspondente:

$$c' = 0,83 K_{dc} \quad (8)$$

Embora os dados não sejam estatisticamente significativos para determinar correlações definitivas, apresentam validade suficiente para orientar futuras investigações sobre a caracterização de solos residuais pelo DMT.

3.4 - Deformabilidade

É de reconhecimento geral que as correlações entre o módulo dilatométrico e o módulo de deformabilidade, E , a ser adoptado em projecto geotécnico depende principal e decisivamente nos níveis de tensão-deformação que interessam às condições de serviço, pelo que é comum estabelecer-se estas correlações com um módulo de referência, normalmente com o módulo de distorsão máximo, G_0 , (determinado com base em ensaios sísmicos Cross-Hole). Este módulo é indubitavelmente independente dos níveis de tensão e também de outros factores secundários como são o OCR e fábrica, exibindo apenas dependência do índice de vazios, tensão efectiva e estrutura interparticular (Jamiolkowski *et al.*, 1988; Jamiolkowski e Robertson, 1989; Baldi *et al.*, 1989). O objectivo deste estudo é apenas apresentar as correlações obtidas entre G_0 (CH) e E_D (DMT) introduzindo a dependência destes módulos de um parâmetro estado de tensão efectiva, estabelecido por Baldi *et al.* (1989) e traduzido pela expressão:

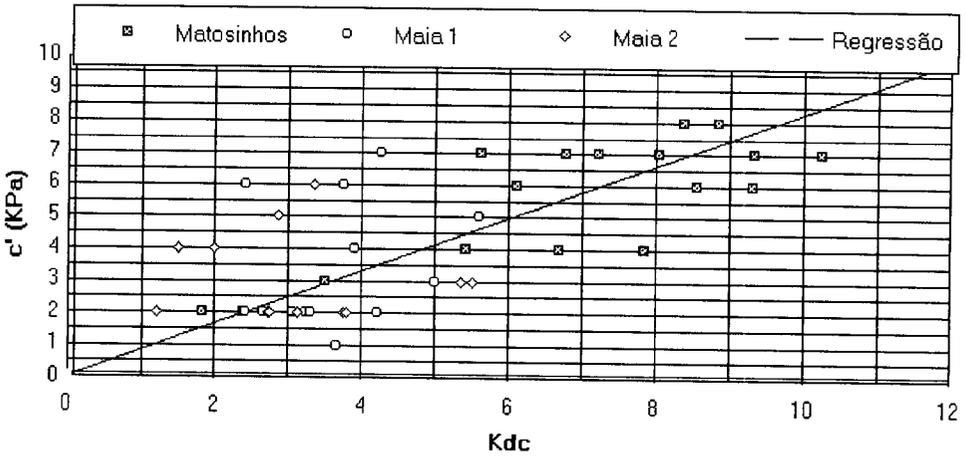


Figura 6 - Regressão c' - K_{dc} (Cruz, 1995)

$$p_{0N} = \frac{p_{0-DMT}}{\sqrt{\sigma'_{v0} \times p_a}} \quad (9)$$

sendo $p_a = 1$ kPa para adimensionalizar esse parâmetro de estado.

A Figura 7 mostra os valores obtidos e a correlação correspondente entre G_0 e E_{D-DMT} , enquadrando-os com as propostas de Baldi *et al.* (1989). As expressões que se representam na mesma figura foram deduzidas a partir dos pontos representados no gráfico do trabalho correspondente.

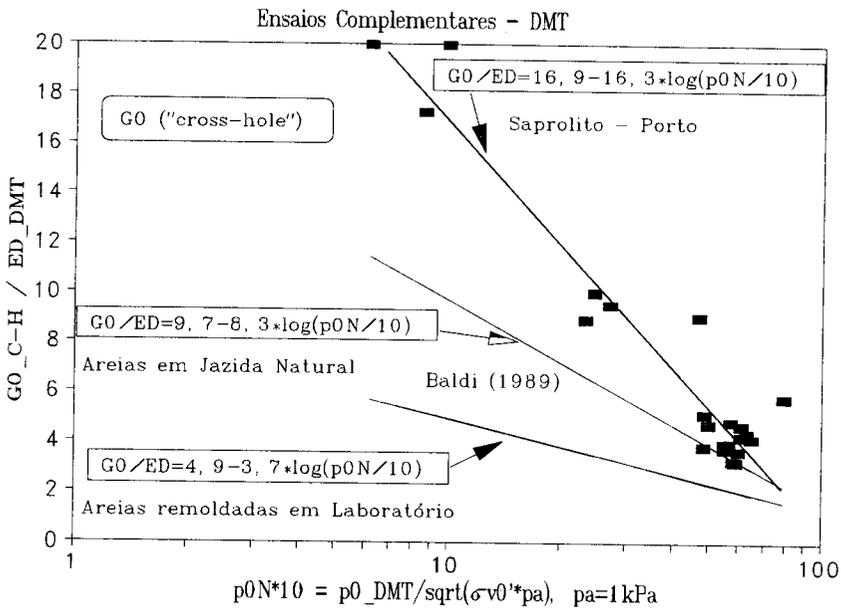


Figura 7 - Relações entre G_0 e E_{D-DMT}

Para os valores dos ensaios efectuados no campo experimental de Porto (Viana da Fonseca, 1996) a relação obtida tem a seguinte forma:

$$G_0 / E_D = 16,7 - 16,3 \log_{10} (p_{0N}) \quad (10)$$

apresentando um gradiente substancialmente maior do que os propostos por Baldi *et al.* (1989). O facto de os valores dessa razão se apresentarem substancialmente mais elevados para os níveis mais incipientes das pressões de expansão normalizada (p_{0N}) é uma consequência do forte grau de não linearidade da rigidez dos solos residuais. Ou seja, os elevados valores relativos da rigidez “elástica” para tensões de confinamento mais baixas (onde a estrutura de cimentação mais se faz sentir) têm notória influência na singularidade das relações obtidas para estes solos.

4 - CONCLUSÕES

1. As correlações paramétricas estabelecidas na bibliografia da especilidade para uso do DMT em caracterização de solos transportados parecem apropriadas aos solos portugueses do mesmo tipo.
2. Em algumas situações particulares, descritas nesta comunicação, é possível avaliar as resistências não drenadas de pico e residual.
3. A caracterização de solos residuais (saprolíticos) pelo ensaio DMT evidenciou possibilidades encorajadoras na avaliação do coeficiente de impulso em repouso bem como de parâmetros de resistência ao corte, principalmente no que se refere à coesão efectiva devida à estrutura de cimentação herdada da rocha-mãe, característica deste tipo de solos.

Para a avaliação da deformabilidade recomenda-se que as correlações sejam estabelecidas com um módulo de distorsão máximo de referência (G_0 , determinado em ensaios Cross-Hole, por exemplo) e com recurso a leis particularizadas às realidades destes materiais, sendo a não linearidade definida por outras vias.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BALDI, G.; BELLOTTI, R.; GHIONNA, V.; JAMIOLKOWSKI, M.; MARCHETTI, S.; PASQUALINI, E. - *Flat dilatometer tests in calibration chambers*. Proc. da IV Conferência sobre Use of in Situ Tests, ASCE, Blacksburg, Virginia, pp. 431-446, 1986.
- BALDI, G.; BELLOTTI, R.; GHIONNA, V.; JAMIOLKOWSKI, M.; LO PRESTI, D.C.F. - *Modulus of sands from CPT's and DMT's*. Proc. do XI ICSMFE, Ed. Balkema, vol.1, pp. 165-170, 1989.
- CAMPANELLA, R.G.; ROBERTSON P.K. - *Use and interpretation of a research dilatometer*. Canadian Geot. Journal, vol. 28, pp.113-126, 1991.
- CRUZ, N. - *A avaliação de parâmetros geotécnicos pelo dilatómetro de Marchetti*. Tese de Mestrado, Universidade de Coimbra, 1995.
- FERREIRA, H.N. - *Acerca do coeficiente de impulso em repouso*. Geotecnia nº 35, pp. 41-106, 1982.
- JAMIOLKOWSKI, M.; GHIONNA, V.; LANCELLOTE, R.; PASQUALINI, E. - *New correlations of penetration tests for design practice*. Proc. do ISOPT I, Florida. Ed. Balkema, vol.1, pp. 263-296, 1988.

- JAMIOLKOWSKI, M.; ROBERTSON, P.K. - *Future trends for penetrating testing*. Proc. Geot. Conf. Penetration tests in U.K., Thomas Telford, pp. 321-342, 1988.
- LACASSE, S.; LUNNE, T. - *Calibration of dilatometer correlations*. Proc. ISOPT-1, Florida. Balkema, vol.1, pp. 539-548, 1988.
- MARCHETTI, S. - *In situ tests by flat dilatometer*. Journal Geotech. Eng. Div., vol 106, GT3, pp. 299-321, 1980.
- MARCHETTI, S.; CRAPPS, D.K. - *Flat dilatometer manual*. Internal report of GPE inc., distributed to purchasers of DMT equipment, 1981.
- ROQUE, R.; JANBU, N.; SENNESET, K. - *Basic interpretation procedures of flat dilatometer*. Proc. ISOPT-1, Florida, Ed. Balkema, vol.1, pp. 577-587, 1988.
- SEED, H.B.; IDRIS, I.M. - *Soil moduli and damping factors for dynamic responses*. Earthquake Eng. Res. Center, Ref. EERC70-10, Univ. California. Berkeley, 1970.
- VAUGHAN, P.R.; MACCARINI, M.; MOKTHAR, S.M. - *Indexing the engineering properties of residual soil*. Journal of Engineering Geology, vol. 21, pp. 69-84, 1988.
- VIANA DA FONSECA, A.- *Geomecânica dos solos residuais de granito do Porto. Critérios de dimensionamento de fundações directas*. Tese de Doutoramento. Universidade do Porto, 1996.