

CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS DE SOLOS DEDUZIDAS DE ENSAIOS DE PENETRAÇÃO

por
JOSÉ FOLQUE*

1 – INTRODUÇÃO

Tem já longa tradição em Mecânica dos Solos a utilização de ensaios de penetração para colher informações que, com maior ou menor elaboração intermédia, e por vezes mesmo com aplicação imediata, servem para basear o cálculo de fundações, estabilidade de taludes e outras obras congêneres.

Alguns dos penetrómetros primitivos já foram hoje abandonados. Outros, embora com larga utilização nalgumas regiões, como é o caso de certos penetrómetros desenvolvidos na Suécia, não têm tido difusão universal. Há porém dois ensaios penetrométricos que são realizados praticamente em todo o mundo e dos quais se dispõe de numerosíssimos resultados: trata-se do ensaio de penetração normalizado – “standard penetration test” (SPT) – e do ensaio com penetrómetro holandês. A eles se limitará esta Nota Técnica.

São hoje extremamente numerosos os trabalhos em que se apresentam resultados, reflexões, críticas e correlações relativas a ensaios de penetração e suas aplicações. Esses trabalhos, por sua vez, encontram-se compilados e comentados nalgumas importantes obras de síntese. Merecem particular realce, pelo seu desenvolvimento e modernidade, as obras fundamentais:

- Sanglerat, “The penetrometer and soil exploration”, Elsevier, Amsterdam, 1972;
- Proceedings of the European Symposium on penetration testing, Estocolmo, Junho 1974

* Engenheiro investigador, Chefe da Divisão de Fundações do LNEC

Embora sejam obras largamente difundidas, e portanto de consulta acessível, apresentam uma minúcia e uma extensão que leva a tornar desejável poder dispor de um seu resumo. Afigurou-se assim que teria interesse apresentar uma condensação, propositadamente o mais possível abreviada, em que figurem as correlações actualmente consideradas como de maior validade para, dos ensaios penetrométricos, deduzir características mecânicas de solos.

2 - CORRELAÇÕES ENTRE SPT E ENSAIOS COM PENETRÓMETRO HOLANDÊS

As mais bem fundamentadas correlações de que se dispõe para, a partir de ensaios penetrométricos, deduzir características mecânicas, baseiam-se em ensaios com penetrómetro holandês. Acentua-se por isso muito a tendência, que será a seguida neste trabalho, de utilizar equivalências entre N (SPT) e os valores de resistência de ponta, R_p , obtidos com penetrómetro holandês, para depois

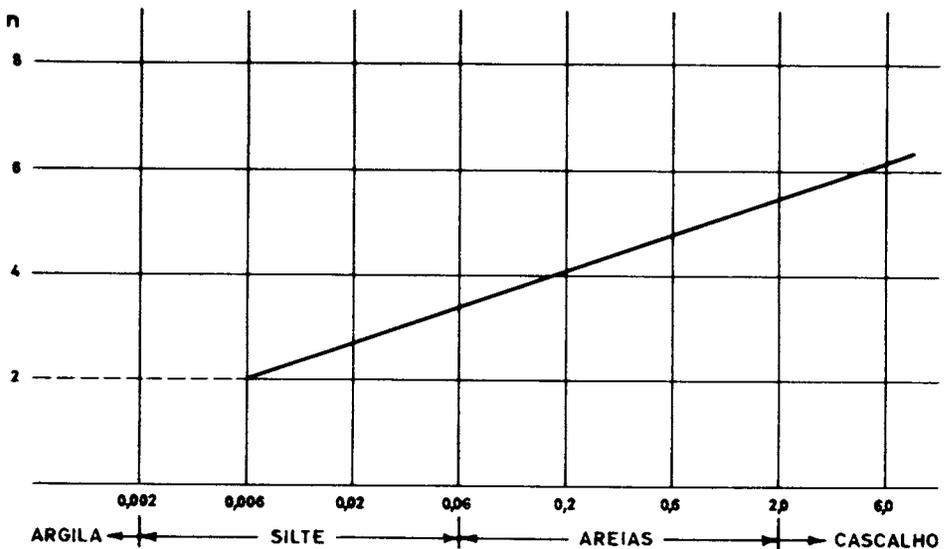


Fig. 1 - Relação R_p (kg/cm²) = $n.N$ (SPT)

usar as correlações existentes entre R_p e as diversas características mecânicas. Quer dizer, usa-se a via

$$N \rightarrow R_p \rightarrow \text{caract. mec.}$$

Surge portanto, como necessidade básica para utilizar esta via com boa adequabilidade, poder dispor de bem fundamentadas correlações entre N e R_p .

Na Fig. 1 apresenta-se uma correlação que tem actualmente larga aceitação. Foi baseada na ponderação de um número muito elevado de resultados experimentais (relato Inglaterra - Simp. Estocolmo).

3 - CLASSIFICAÇÃO DE SOLOS

Os penetrómetros tipo holandês de modelo mais aperfeiçoado medem a resistência lateral utilizando uma curta "manga", colocada logo acima da ponteira, que fornece o que se designa por "resistência lateral local". De passagem faz-se notar que se considera hoje pouco recomendável medir a resistência lateral ao longo de todo o trem de varas do penetrómetro; excepto em formações muito homogêneas o resultado - integral de resistências locais com largas variações - não é transportável para estacas protótipos nem facilmente pode ser interpretado em termos úteis.

Entre nós não é muito frequente utilizar penetrómetros com "manga". Impõe-se porém incrementar o seu uso, de muito interesse para aplicações imediatas: por exemplo, o cálculo de estacas directamente baseado nos resultados dos ensaios penetrométricos. Para além disso, no que se refere à caracterização das formações atravessadas, a relação entre a resistência de ponta, R_p , e a resistência lateral unitária, f_s , permite obter indicações muito úteis para classificação dos solos prospectados.

De acordo com o relato da Itália (Simp. Estocolmo) tem-se:

	R_p/f_s
- Turfas e argilas orgânicas	< 12
- Argilas de média a alta plasticidade	12 a 25
- Siltes e siltes arenosos	25 a 40
- Areias siltosas e areias finas	40 a 80

Relato da Grécia (Simp. Estocolmo)

- Argila	< 20
- Areia e areia argilosa	50 a 20
- Cascalho e areia	100 a 50

Relato da Inglaterra (Simp. Estocolmo)

- Areia	65
- Cascalho	100

École Céntrale de Lyon (Sanglerat - op. cit.)

- Turfas e argilas com $R_p < 10$	30 a 10
- Argilas	25 a 12
- Siltes, areias finas	100 a 25
- Areias	100 a 50
- Areias grossas e cascalhos	até 150

A Fig. 2 resume, em forma gráfica, os valores que ficaram atrás indicados:

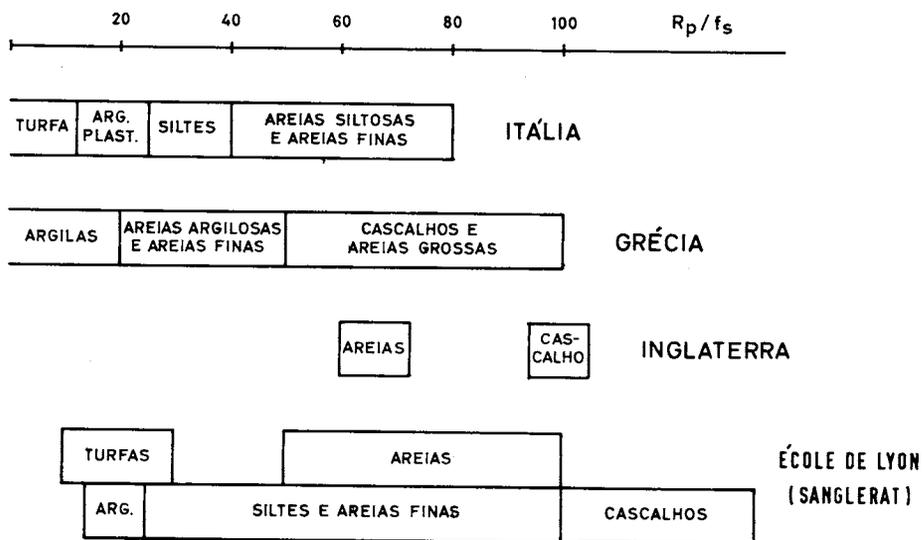


Fig. 2 - Classificação de solos

4 – CARACTERIZAÇÃO DE TERRENOS ARENOSOS

4.1 – *Deformabilidade de areias* – Desde os trabalhos clássicos de Buisman sobre a utilização de penetrômetros tipo holandês que se adoptam correlações empíricas entre R_p e o módulo de deformabilidade. Em termos de um módulo assimilável a um módulo de Young, E, Buisman preconizou:

$$E = 1,5 R_p \quad (\text{Fig. 3 – curva 1})$$

Ainda hoje esta correlação é recomendada (De Beer, relatos da Holanda e Inglaterra, Simp. Estocolmo).

Nota-se acentuada tendência para usar correlações mais optimistas (cf. relato de Inglaterra, Simp. Estocolmo). É, por exemplo, bastante usada a relação de Schmertmann:

$$E = 2 R_p \quad (\text{Fig. 3 – curva 2})$$

Aparecem também propostas para correlações não lineares do tipo da de Thomas, em que α é função de R_p (cf. relato de Portugal, Simp. Estocolmo):

$$E = \alpha R_p \quad \text{com } \alpha \text{ de 3 a 12} \quad (\text{Fig. 3 – curva 3})$$

No relato da URSS preconizam-se relações ainda mais optimistas (cf. Simp. Estocolmo):

$$E = 3 R_p \quad (\text{Fig. 3 – curva 4})$$

$$E = 3,4 R_p + 130 \quad (\text{Fig. 3 – curva 5})$$

São também propostas relações em função de N (SPT). É o caso do Japão (Simp. Estocolmo) que preconiza:

$$E = 6,78 N^{0,99}$$

Para tornar esta relação comparável com as anteriormente apresentadas haverá interesse, de acordo com o exposto no art.º 2, em reduzir N a valores equivalentes de R_p . Considere-se, por exemplo, o caso de uma areia média, em que se poderá adoptar $R_p = 4N$:

$$E \approx 1,7 R_p \quad (\text{Fig. 3 – curva 6})$$

Para o caso de uma areia fina, siltosa, com $R_p = 3N$:

$$E \approx 2,25 R_p \quad (\text{Fig. 3 – curva 6s})$$

Para areias grossas, com $R_p = 5N$:

$$E \approx 1,35 R_p \quad (\text{Fig. 3 - curva 6g})$$

Também a África do Sul (Simp. Estocolmo) propõe uma correlação em termos de N :

$$E = 5,37 (N + 15)$$

Exprimindo N em termos de equivalentes valores de R_p , virá para uma areia média, com $R_p = 4N$:

$$E = 1,35 R_p + 20 \quad (\text{Fig. 3 - curva 7})$$

Para uma areia fina com $R_p = 3N$:

$$E = 1,77 R_p + 28 \quad (\text{Fig. 3 - curva 7s})$$

Para areias grossas com $R_p = 5N$:

$$E = 1,07 R_p + 16 \quad (\text{Fig. 3 - curva 7g})$$

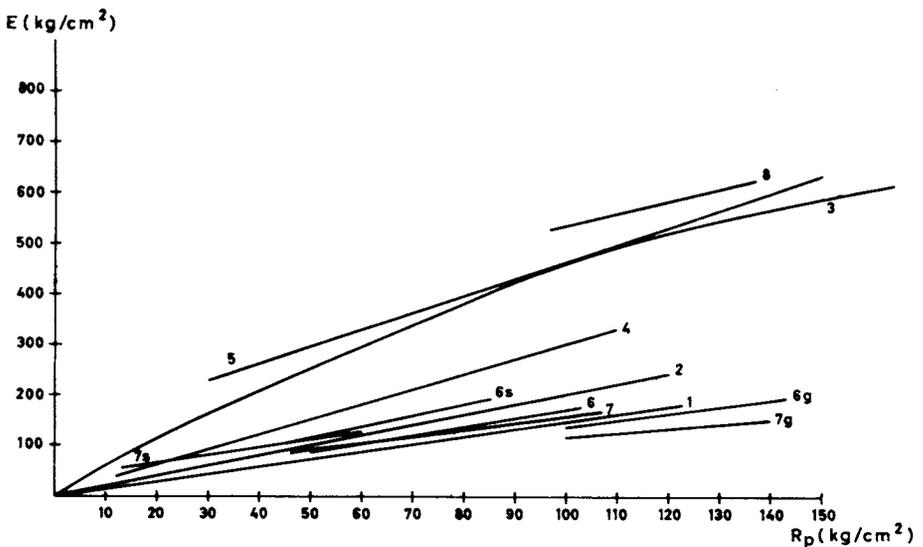


Fig. 3 - Correlação $R_p \rightarrow E$ (areias)

Considera-se ainda de interesse apresentar a relação proposta pela DEGEBO (Public. n.º 26, 1971), válida para a gama de R_p de 100 a 200 kg/cm^2 :

$$E = 265 + 2,8 R_p \quad (\text{Fig. 3 - curva 8})$$

4.2 - *Características de corte de terrenos arenosos* - Parece evidente que este é o domínio em que melhor suporte teórico poderá haver para estabelecer correlações de boa precisão.

A correlação $R_p \rightarrow \varphi$, é forçosamente função da profundidade, sendo porém importante notar que tem tido larga aceitação uma correlação proposta por Meyerhof e por ele retomada no seu Relato geral do Simpósio de Estocolmo, em que o factor profundidade não é considerado. Esta correlação, que está representada na Fig. 4, baseia-se numa medianização de um número relativamente elevado de resultados publicados (Kahl, Kerisel, Muhs e Weiss, Melzer).

De acordo com o relato da URSS (Simp. Estocolmo) devem usar-se correlações deduzidas de soluções do problema da penetração de um cone em meio plástico. Uma solução citada no mencionado relatório conduz a correlações, para um meio puramente friccional com plastificação obedecendo ao critério de Coulomb, obviamente dependentes da profundidade. No quadro seguinte apresentam-se alguns valores de φ para diversos valores de R_p e para duas profundidades. Na Fig. 4 estão representados em forma gráfica valores correspondentes a esta correlação.

R_p (kg/cm^2)	10	20	40	70	120	200	300
$\gamma H = 0,5 \text{ kg/cm}^2$	28	30	32	34	36	38	40
1,0	26	28	30	32	34	36	38

Correlações do mesmo tipo, isto é, baseadas também em soluções plásticas, são preconizadas nos relatos da Holanda e da Bélgica. Partem da equação básica $R_p = V_b' \sigma_o$ em que $\sigma_o = \gamma H$. V_b' é uma função de φ que se encontra determinada em trabalhos publicados por, entre outros, De Beer, Caquot e Koppejan (cf. relato geral de Begemann - Simp. Estocolmo). As soluções obtidas por estes três investigadores são bastante próximas. Tomando a solução de Koppejan, que é a que conduz a resultados intermédios, obtêm-se os valores

que se indicam no quadro seguinte. Valores desta mesma correlação estão, em forma gráfica, representados na Fig. 4.

R_p (kg/cm ²)	10	20	40	100	200	300	
$\gamma H = 0,2$ kg/cm ²	25	30	33	38	44	—	
0,4	—	25	30	35	38	44	
0,6	—	—	28	32	36	39	

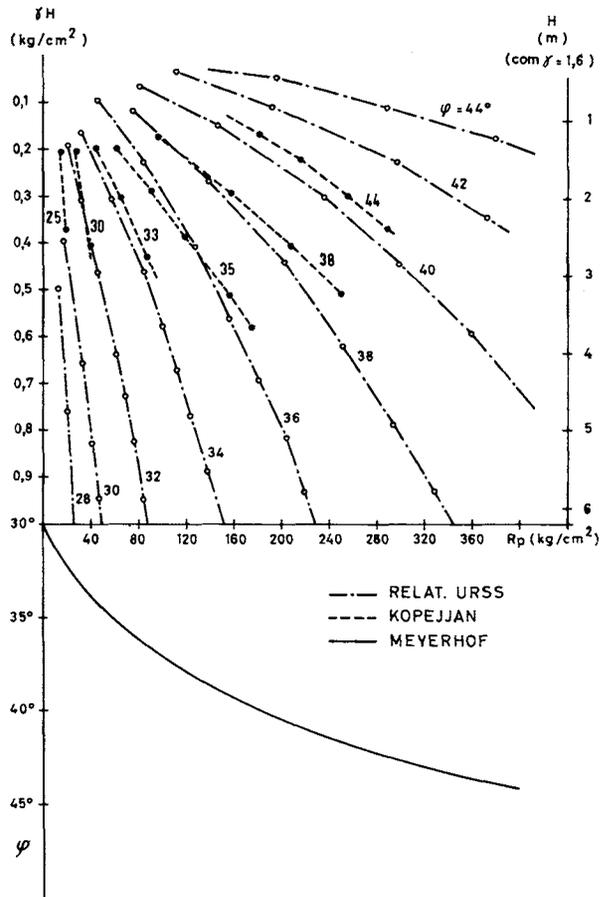


Fig. 4 - Correlação $R_p \rightarrow \varphi$ (areias)

5 – CARACTERIZAÇÃO DE SOLOS ARGILOSOS

5.1 – *Deformabilidade de solos argilosos* – São precárias as correlações entre R_p e qualquer módulo que sirva para medir a deformabilidade de solos argilosos. Há porém correlações que apresentam uma certa validade de 1.^a aproximação.

É clássica a relação proposta por Buisman:

$$C = \alpha \frac{R_p}{\sigma_0} \quad \text{em que } C \text{ é o módulo que figura em}$$
$$\frac{\Delta h}{h} = \frac{2,3}{C} \log \left(1 + \frac{\Delta \sigma}{\sigma_0} \right)$$

Para $\Delta \sigma$ pequeno é $C \cdot \sigma_0 = E$ e portanto

$$E = \alpha R_p$$

De acordo com Sanglerat (ponderação de numerosos resultados publicados, muitos deles obtidos na École Centrale de Lyon) a grandeza α exhibe valores da ordem dos que a seguir se indicam:

– argilas siltosas de baixa plasticidade (ML)

$$\begin{aligned} R_p < 20 \text{ kg/cm}^2 & \quad \alpha = 3 \text{ a } 6 \\ R_p > 20 & \quad = 1 \text{ a } 2 \end{aligned}$$

– argilas de baixa plasticidade (CL)

$$\begin{aligned} R_p < 7 \text{ kg/cm}^2 & \quad \alpha = 3 \text{ a } 8 \\ R_p = 7 \text{ a } 20 & \quad = 2 \text{ a } 5 \\ R_p > 20 & \quad = 1 \text{ a } 2,5 \end{aligned}$$

– solos argilosos e silto-argilosos de alta plasticidade (OH e MH)

$$\begin{aligned} R_p > 20 \text{ kg/cm}^2 & \quad \alpha = 2 \text{ a } 6 \\ R_p < 20 & \quad = 1 \text{ a } 2 \end{aligned}$$

Adoptando valores enquadrados nos indicados, para ter uma ideia de uma correlação que corresponda a valores médios, utilizáveis em 1.^a aproximação grosseira, virá:

$$\begin{aligned} R_p = 5 & \quad \alpha = 5 \\ R_p = 10 & \quad = 3 \\ R_p = 20 & \quad = 2 \end{aligned} \quad \text{(Fig. 5 – curva 1)}$$

No relato da URSS (Simp. Estocolmo) preconiza-se para argilas rijas

$$E = 7 R_p \quad (\text{Fig. 5 - curva 2})$$

e também

$$E = 4,9 R_p + 123 \quad (\text{Fig. 5 - curva 3})$$

No relato da África do Sul recomenda-se para areias argilosas

$$E = 5/3 (R_p + 1600) \text{ kN/m}^2 \quad (\text{Fig. 5 - curva 4})$$

Para argilas brandas indicam-se correlações por intermédio de q_u (resistência ao corte não-drenada), com as mediações:

$$E = (25 \text{ a } 80) q_u \quad \text{para argilas normalmente consolidadas}$$

$$E = (70 \text{ a } 120) q_u \quad \text{para argilas sobreconsolidadas}$$

com $q_u = R_p/A$, sendo A dependente da grandeza de R_p . Por exemplo, para $R_p = 15$ virá $A = 12$; para $R_p = 50$ virá $A = 37$. Como se vê é muito larga a faixa de correlação. Só para ter uma ideia de ordens de grandeza apresentam-se na Fig. 5 alguns valores médios para argilas sobreconsolidadas (curva 5) e para argilas normalmente consolidadas (curva 6).

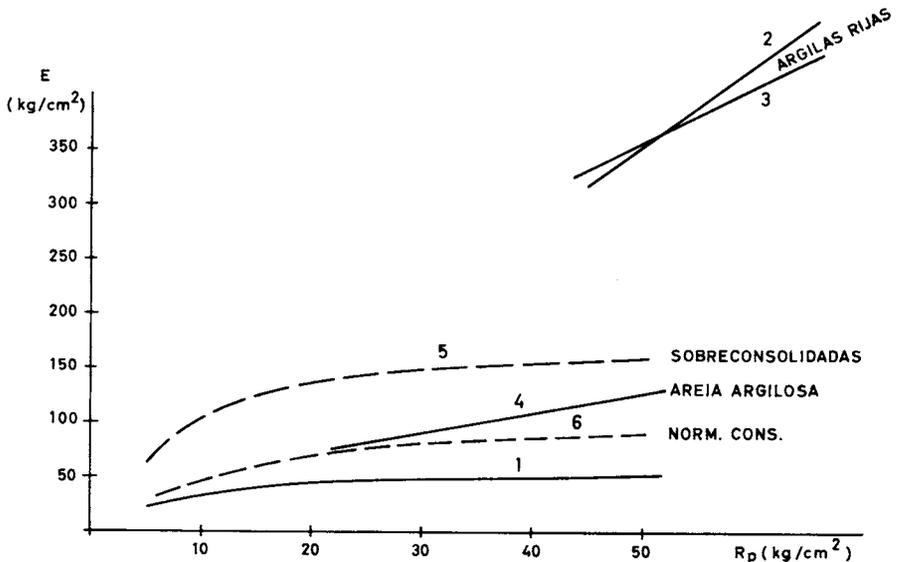


Fig. 5 - Correlação $R_p \rightarrow E$ (argilas)

5.2 – Resistência ao corte de solos argilosos – Como é evidente não é possível, usando um só penetrômetro e medindo R_p , determinar as duas grandezas c e φ . É teoricamente possível fazê-lo usando dois penetrômetros ou explorando a relação R_p/f_s , mas não tem havido estudos desenvolvidos sobre a matéria. O que se considera válido, e de boa adequação, é determinar q_u , resistência ao corte não drenada, por correlações do tipo

$$q_u = R_p/A$$

A seguir se indicam valores preconizados para A , de acordo com diversas fontes, todas referenciadas ao Simpósio de Estocolmo.

- Relato da Bélgica $A = 10$ a 20 (um valor médio de 15 é recomendado)
- Relato da Grécia $A = 15$ a 18
- Relato da Holanda $A = 15$
- Relato geral de Meyerhof $A = 10$ a 20
- Relato da Itália

$$q_u = (R_p - \sigma_o)/A \quad \text{com } A = 15 \text{ a } 25$$