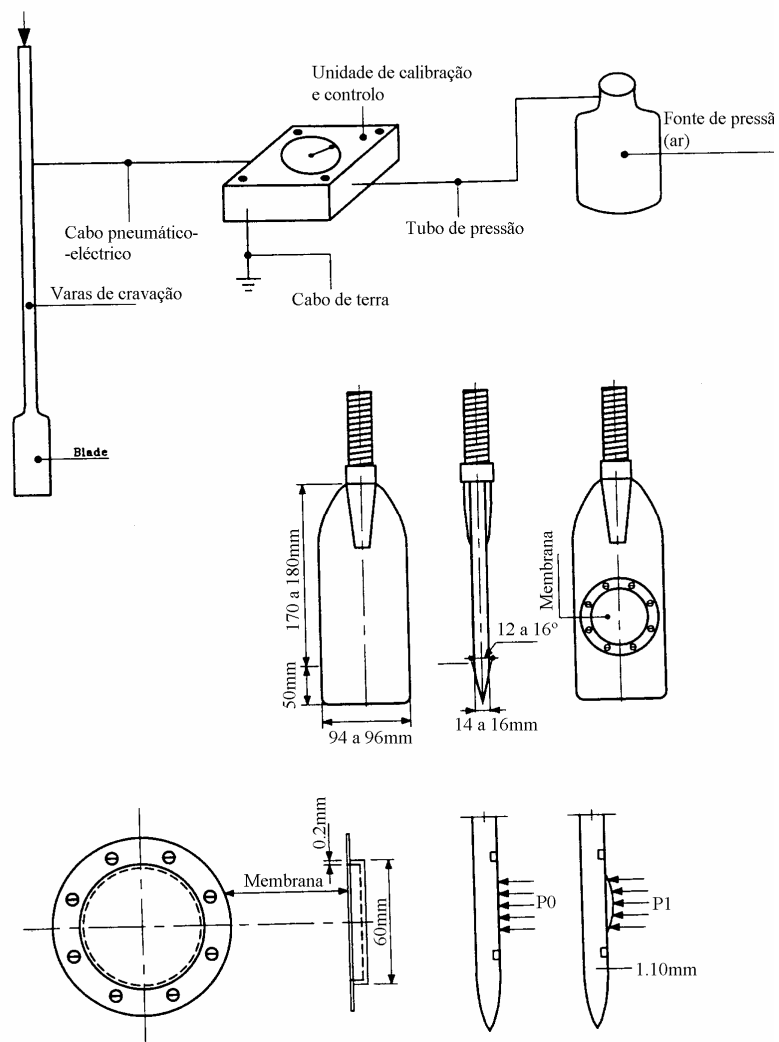


DILATÓMETRO DE MARCHETTI (DMT)

Desde o trabalho do criador do equipamento (Marchetti, 1975) e posteriores desenvolvimentos (Marchetti, 1980; 1985), que se tem desenvolvido metodologias interpretativas particularmente direccionadas para maciços do tipo sedimentar. Apresentam-se alguns desvios grosseiros para materiais estruturalmente ligados (caso dos solos com cimentação inerente, resultante de alteração de rochas ou solos antigos). Algum trabalho vem sendo realizado no nosso país para a sua adaptação aos solos residuais.

Descrição e princípios do ensaio

O ensaio consiste essencialmente num penetrómetro com uma lâmina biselada, com uma membrana circular inserida numa das faces que, sendo flexível e instrumentada, permite um controlo das deformações quando expandida sob pressão de gás. O avanço de penetração estática entre cada ponto do ensaio (de 20 em 20cm, convencionalmente) é feito na cadência normal para o CPT (2cm/seg).



O ensaio tem as vantagens dos ensaios in situ de maior simplicidade operacional e pequena mobilização tecnológica e as potencialidades de um ensaio que, envolvendo uma resposta de tensão-deformação a partir de um estado de “pseudo-repouso”, fornece os parâmetros indispensáveis ao projecto (estado de tensão em repouso, deformabilidade e resistência).

As limitações do ensaio residem nalguma restrição da gama de materiais ensaiáveis pois está condicionado à cravação estática de uma lâmina a partir da superfície (embora seja possível conjugá-lo com préfuração). São, por isso, excluídos do estudo de maciços muito resistentes ou de grande heterogeneidade, nomeadamente os de natureza residual com graus de alteração mais baixos. Este ensaio foi, no entanto, aplicado nos últimos anos a uma gama muito vasta de materiais.

Parametrização do solo a partir dos resultados do DMT

Dos valores das pressões correspondentes ao início da expansão (p_0) e a um deslocamento do centro da face circular de 1,1mm (p_1), deduzem-se os três parâmetros típicos do ensaio, que são o **índice do material**, o **índice de tensão lateral** (horizontal) e o **módulo dilatométrico**:

$$I_D = (p_1 - p_0) / (p_0 - u_0)$$

$$K_D = (p_0 - u_0) / \sigma'_{v0}$$

$$E_D = 34,7 \cdot (p_1 - p_0)$$

Tipo de solo

Classificação de tipos de solos a partir do DMT (Marchetti, 1980)

Tipo de Solo	Argilas		Siltes			Areias	
	Sensíveis	Siltosas	Argilosos	Puros	Arenosos	Siltosas	Puras
I_D	0,10	0,35	0,60	0,90	1,2	1,8	3,3

Resistência ao corte

Em solos arenosos ou com comportamento granular é **aconselhável complementar o índice K_D (DMT) com parâmetros de penetração como o q_c (CPT)**. Campanella e Robertson (1991) integram os parâmetros K_D e q_c no **ábaco original de Marchetti (1985)** representado na Figura. Apresentam uma relação entre aqueles parâmetros:

$$q_c / \sigma'_{v0} = 33 \cdot K_D$$

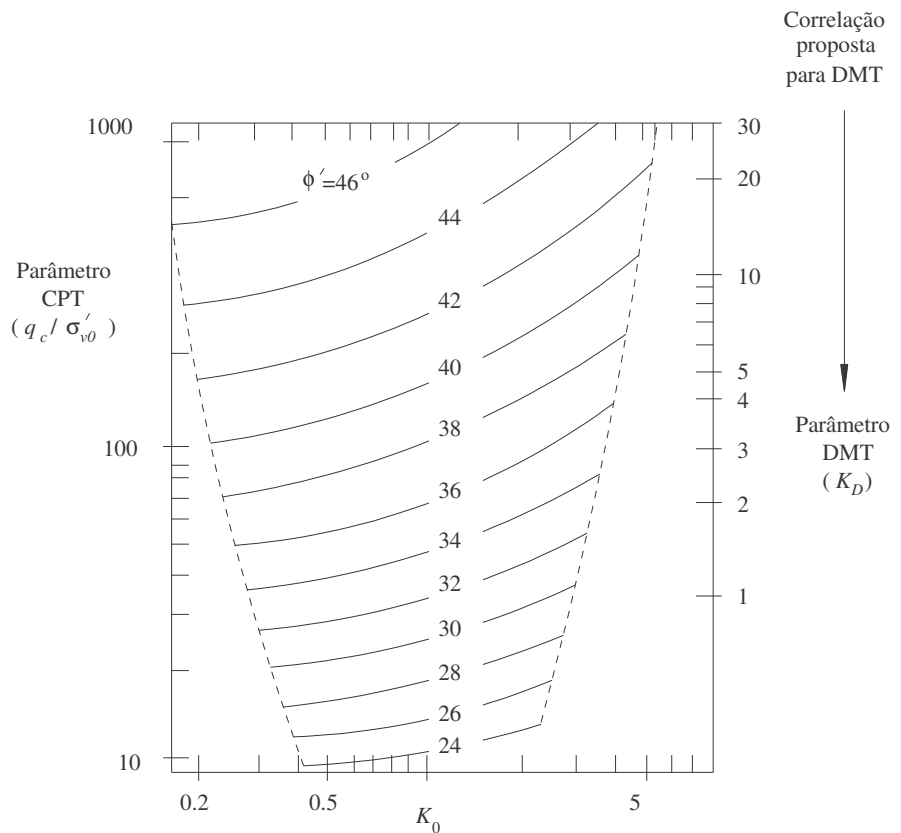
O ângulo de atrito deduzido do ábaco de Campanella e Robertson (1991) corresponde a condições de deformação plana sendo necessário corrigir o seu valor para condições axissimétricas pela expressão por Schmertmann (1988):

$$\phi' = \phi'_{ax} = \phi'_{ps} - \left[\frac{\phi'_{ps} - 32}{3} \right] ; \phi'_{ps} \leq 32^\circ \Rightarrow \phi'_{ax} = 32^\circ$$

com ϕ' em ($^\circ$), ϕ'_{ax} o ângulo de atrito interno em condições de compressão axissimétrica e ϕ'_{ps} o ângulo de atrito interno em condições de deformação plana.

História de tensões - coeficiente de impulso e repouso

A proposta inicial de Marchetti (1980) correlaciona K_D com o OCR deduzido de edométricos mas **só é reconhecidamente aplicável a materiais não cimentados e com $I_D < 1,2$** , sendo o coeficiente de impulso em repouso dado por



$$K_0(OC) = C_1 + C_2 \cdot D_D + C_3 \cdot (q_c / \sigma'_{v0})$$

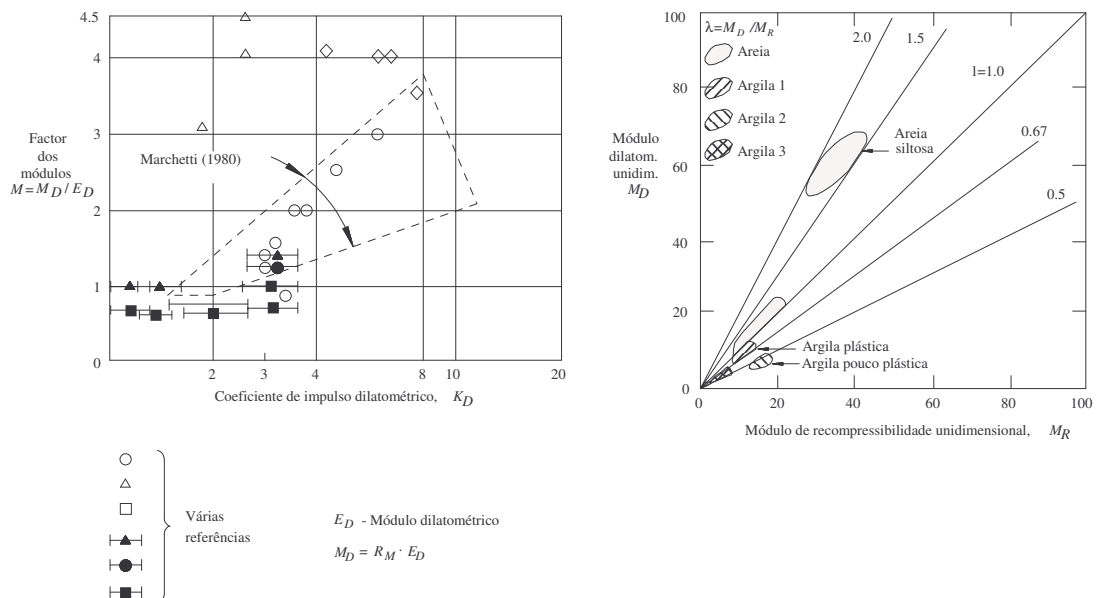
com C_1 , C_2 e C_3 determinados experimentalmente para solos recentes por Baldi *et al.* (1986) e correspondendo a, respectivamente, **0,376**, **0,095** e **-0,00172**.

Uma limitação evidente da avaliação de K_0 a partir de K_D resulta do facto da introdução da lâmina poder induzir ao solo tensões para além do seu estado de repouso. K_D traduzirá inevitavelmente um valor intermédio de K_0 e K_p .

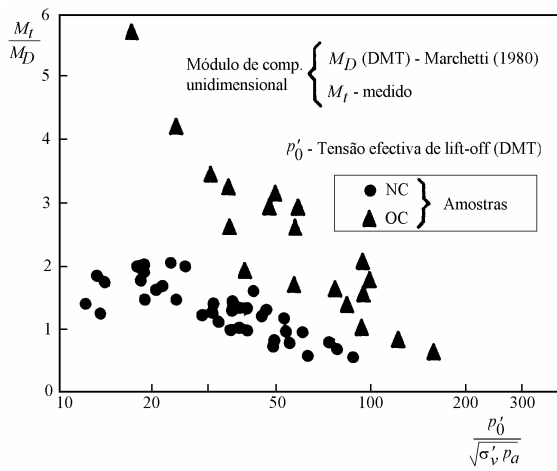
Deformabilidade

Hoje propõe-se correlacionar o módulo de descarga e recarga no DMT com o módulo de deformabilidade unidimensional em recarga (M_R) e sequencialmente avaliar do M_D (compressibilidade virgem) – Lacasse & Lunne (1988).

Outra opção consiste na correlação de E_D com E_s (módulo de deformabilidade secante, a 25%, por exemplo). Baldi *et al.* (1989) propõem os ábacos adimensionais de $(E_s / E_D)_{NC/OC}$ versus a tensão de repouso adimensional ($p_{0N} = p'_0 / \sqrt{\sigma'_{v0} \cdot p_a}$) - Figura.

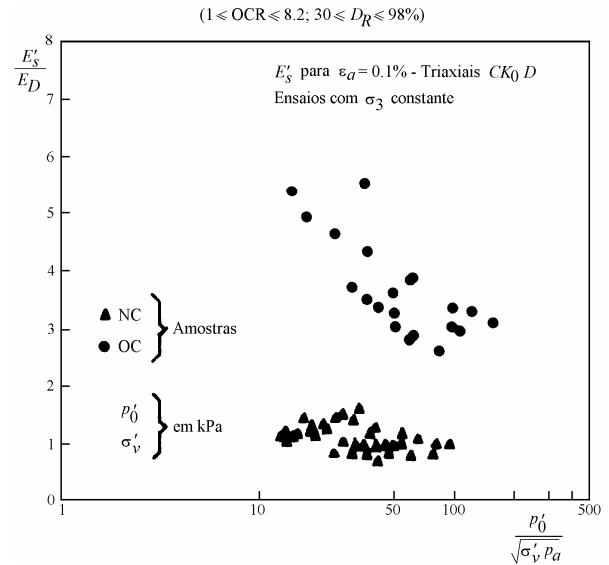


Dedução de M_D e M_R a partir de K_D (DMT) (Lacasse e Lunne, 1988).



a)

Módulos de deformabilidade do DMT em câmaras de calibração, areia (Baldi *et al.*, 1991): a) unidimensional; b) de Young.



b)

No cálculo de fundações, o módulo de deformabilidade (ou módulo de Young) tem sido relacionado com $E_{iD}(\text{DMT})$. No Quadro apresenta-se resultados da bibliografia do coeficiente de correlação (F) entre aquele módulo e o módulo secante em relação a q_f e com o módulo de deformabilidade tangente inicial (E_i).

Factor de correlação: $F = E/E_D(\text{DMT})$ (Lutenegger, 1988).

Tipo de solo	Módulo	F	Referência
Solos coesivos □ Areias □ A reias □ Areias N.C. □ Areias O.C.	$E_i \square E_i \square E_{25} \square E_{25} \square E_{25}$	$10 \square 2 \square 1 \square 0,85 \square 3, 5$	Robertson <i>et al.</i> (1988) Robertson <i>et al.</i> (1983) Campanella <i>et al.</i> (1986) Baldi <i>et al.</i> (1986) Baldi <i>et al.</i> (1986)

Assentamentos em fundações superficiais a partir do DMT

Métodos de Schmertmann (1986) e Leonards e Frost (1988)

Baseados em formulações derivadas da Teoria da Elasticidade, consideram a variação do módulo dilatométrico em profundidade e um diagrama de influência das deformações verticais do tipo dos propostos por Schmertmann (1970, 1978).

A expressão proposta por Leonards e Frost (1988) é uma generalização da de Schmertmann (1986) e apresenta-se como se segue:

$$s_j = C_1 \cdot C_2 \cdot q_{\text{efect } j} \left(\sum_0^{H_i} I_{z_{ij}} \cdot \Delta z_i \left[\frac{R_z(\text{OC})_i}{E_z(\text{OC})_i} + \frac{R_z(\text{NC})_i}{E_z(\text{NC})_i} \right] \right)_j$$

sendo:

- C_1 - correcção para encastramento (=1, para fundações à superfície);
- C_2 - correcção do factor tempo (=1, para análises imediatas);
- $q_{\text{efect } j}$ - tensão efectiva transmitida à base da sapata;
- H_i - profundidade de influência, semelhante à proposta por Schmertmann (1978);
- $I_{z_{ij}}$ - factor de influência das deformações (Schmertmann, 1978);
- Δz_i - espessura das subcamadas (20 cm - intervalos do ensaio DMT);
- $R_z(\text{OC})_{ij}$ - razão do incremento de tensões da parcela sobreconsolidada (OC);
- $R_z(\text{NC})_{ij}$ - idem, para porção normalmente consolidada; com as expressões seguintes:

$$R_z(\text{OC}) = \left(\frac{\sigma'_p - \sigma'_{v0}}{\sigma'_f - \sigma'_{v0}} \right); \quad R_z(\text{NC}) = \left(\frac{\sigma'_f - \sigma'_p}{\sigma'_f - \sigma'_{v0}} \right)$$

com os significados correntes e σ'_f a tensão efectiva vertical total final após consideração de $q_{\text{efect } j}$ (σ'_{v0} e $\Delta\sigma'_v$ calculados pela teoria da elasticidade);

$E_{z_{iD}}(\text{OC}); E_{z_{iD}}(\text{NC})$ - valores apropriados do módulo de deformabilidade correspondentes às parcelas sobreconsolidada e normalmente consolidada, respectivamente, do incremento de tensões na camada i para a carga $q_{\text{efect } j}$, e deduzidos das correlações entre $E_s(n\%)$ e $E_{D,DMT}$.

No Quadro resumem-se as relações obtidas em câmaras de calibração e confrontadas com valores de $E_s(0,1\%)$ em ensaios triaxiais de compressão sobre solos recentes (Berardi et al., 1991).

OCR	$E_s(0,1\%) / E_{D,DMT} \pm \text{desvio}$	(Berardi et al., 1991)
1 □ 1,4 - 8,8	$0,99 \pm 0,19 \square 3,25 \pm 0,71$	Módulos de deformabilidade (DMT) versus triaxiais de areias siliciosas recentes

FUNDAÇÕES EM ROCHAS

CARGAS ADMISSÍVEIS

Métodos preconizados (Folque, 1979)

As rochas sãs são consideradas como os mais favoráveis terrenos de fundação, o que não significa que uma fundação em rocha não deva ser cuidadosamente estudada; certas condições desfavoráveis podem ocorrer, associadas com rochas alteradas ou com fracturas, que determinam eventualmente situações bastante perigosas, acarretando assentamentos muito elevados ou mesmo colapso súbito da estrutura.

Os métodos para fixar tensões admissíveis em rochas podem sistematizar-se de acordo com a qualidade destas conforme se indica no Quadro.

Qualidade da rocha	Método preconizado
Rocha sã e rocha fracturada com espaçamento entre fracturas muito largo a largo.	Exame directo da rocha (estudos preliminares)
Rochas com fracturas fechadas e com espaçamento médio a largo	Resistência determinada em testemunhos
Rochas alteradas e muito alteradas de resistência baixa a muito baixa; descontinuidades com espaçamento apertado a muito apertado	Métodos próprios da Mecânica dos Solos

Fundações em rocha sã

Para as finalidades deste documento considera-se **rocha sã** aquela que apresenta uma **resistência à compressão simples superior a 1 MPa e cujas descontinuidades têm um espaçamento superior a 1m.**

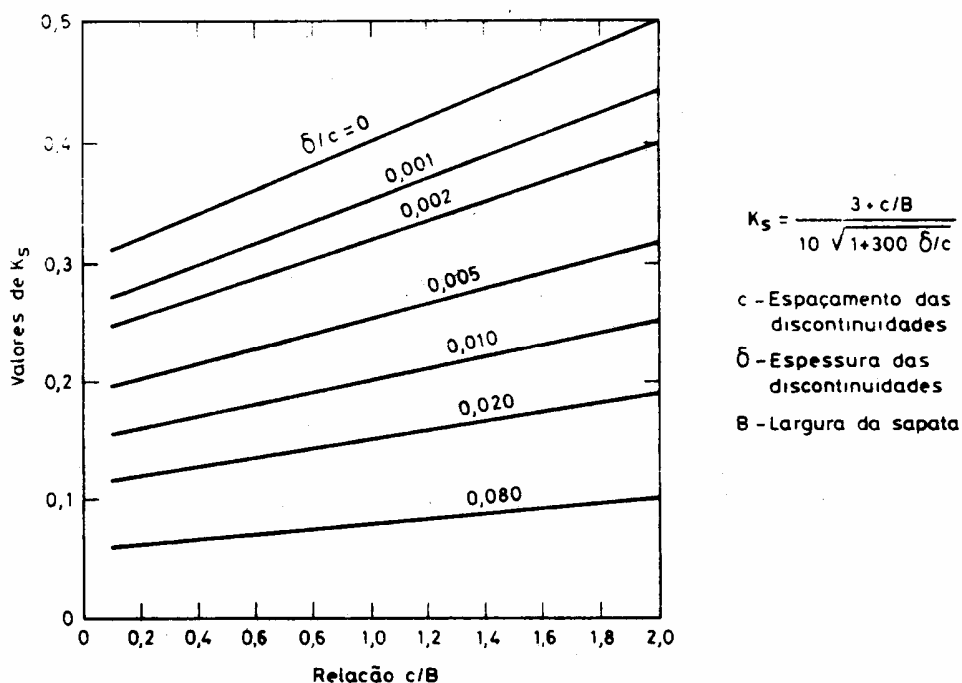
Quando a rocha é sã a capacidade de carga excede em regra largamente a tensão que é necessário transmitir no contacto fundação-terreno, contanto que as descontinuidades estejam fechadas e não se apresentem com orientação desfavorável. **Por isso o reconhecimento deve concentrar-se nos seguintes tópicos:**

- **identificação e cartografia** de todas as **descontinuidades** existentes na zona interessada pela fundação incluindo a averiguação da espessura das mesmas;
- avaliação das **características mecânicas das descontinuidades**: resistência ao corte, deformabilidade do material de enchimento;
- identificação e avaliação da **resistência do próprio material rochoso**.

A decisão final sobre a carga admissível será principalmente determinada pelas características das descontinuidades. Para os casos em que estas características sejam favoráveis, isto é, em que as descontinuidades estejam bastante espaçadas e em que a sua orientação seja perto da perpendicular à superfície da rocha, não havendo portanto solicitações tangenciais importantes ao longo das descontinuidades, a carga admissível pode ser determinada a partir da expressão:

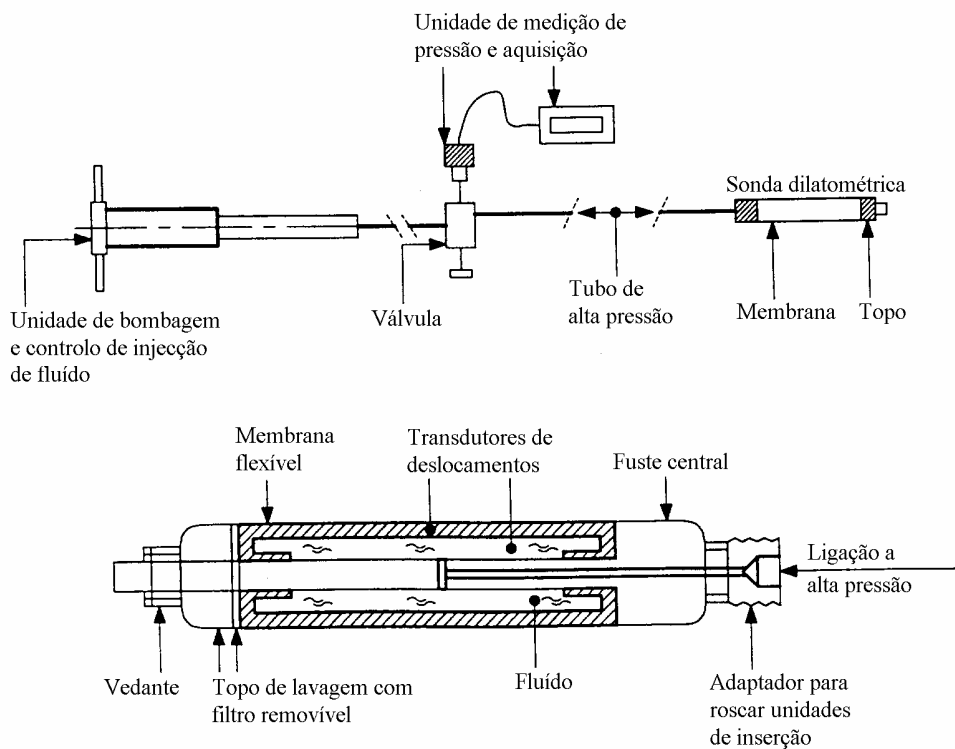
$$q_a = k_s q_{ut}$$

em que q_{ut} é a **resistência à compressão simples determinada em testemunhos** e k_s um **coeficiente que depende das dimensões da fundação, espaçamento das descontinuidades e a sua espessura**. Valores de k_s estão na figura. com coeficiente de segurança de 3.



DEFORMABILIDADE - DILATÓMETRO CILÍNDRICO

Este ensaio visa a determinação da deformabilidade *in situ* de maciços rochosos inalterados ou pouco alterados e procede em termos muito semelhantes aos pressiómetros pré-furantes antes descritos. Na Figura esquematiza-se o aparelho.



Principais componentes do dilatômetro cilíndrico para rochas

Formulação e parametrização do maciço rochoso

Dos resultados deste ensaios podem obter-se os seguintes parâmetros:

- a dilatância do furo sob acção da pressão;
- a pressão de repouso (p_s);
- o coeficiente de Poisson radial (ν_r);
- a curva de resposta: pressão (p_i)-dilatação (ΔD): p_i versus ΔD ;
- o módulo dilatométrico de elasticidade em rochas não fracturadas (E_d) – é geralmente deduzido do ramo rectilíneo da curva anterior;
- o módulo dilatométrico secante (E_{di}).

Ambos os valores anteriores se definem pela expressão: $E = (1 + \nu_r) \cdot D \cdot (\Delta p / \Delta D)$.

Interpretação dos resultados

As propriedades de deformabilidade e de fluência de maciços rochosos (supostos pouco alterados e não influenciados por descontinuidades) podem ser deduzidas destes ensaios. Em casos de rochas argilosas e fracturadas ou com juntas fechadas e na eventualidade de se não poder recolher amostras representativas par serem ensaiadas em laboratório, este ensaios pode fornecer um log indicial expedito das deformabilidade relativas (em profundidade, por exemplo). As curvas obtidas – devidamente corrigidas de ajustes de origem – permitem obter os módulos secantes que geram os valores derivados dos módulos a usar no cálculo de assentamentos de estruturas em condições de serviço (admitindo que o maciço está longe de plastificar).

FORMULAÇÕES EMPÍRICAS

É frequente não se deter informação directa como a providenciada pelo dilatómetro cilíndrico, dados os seus custos e complexidade, pelo que se delineiam formulações empíricas.

Das mais consagradas tentativas de definir o módulo de deformabilidade para cálculo de fundações e outras obras geotécnicas afins, reconhece-se a de Serafim & Pereira (1983) é uma das mais consagradas e testadas, apresentando-se sob a forma:

$$E_m = 10^{\frac{(RMR-10)}{40}}$$

sendo **RMR** o designado **Rock Mass Rating**, que é um índice que traduz um conjunto de factores determinantes no comportamento das massas rochosas, a saber:

- a **resistência do material rochoso intacto**: deduzido por via dos ensaios de *point load* ou de *compressão simplse (uniaxial)*;
- do **RQD** (*Rock Quality designation*);
- das condições das **descontinuidades**:
 - **espaçamento**;
 - condição (**rugosidade, separação, continuidade e preenchimento**);
 - **nível da água e fluxo**.

Outras propostas têm sido apresentadas mais adaptadas a obras específicas (ex: túneis), revertendo-se o leitor para a bibliografia da especialidade (ex: Hoek & Brown, 1980).