

# **AVALIAÇÃO DA DEFORMABILIDADE DE FUNDAÇÕES ROCHOSAS DE BARRAGENS. ANÁLISE DE RESULTADOS OBTIDOS NA FUNDAÇÃO DE UMA BARRAGEM DE ENROCAMENTO\***

Evaluation of the deformability of dam foundations in rock masses. Analysis of results obtained at a rockfill dam foundation

L. RIBEIRO E SOUSA\*, A. NAKAMURA\*\*, Y. YAMAGUCHI\*\* e M. KAWASAKI\*\*

RESUMO – Neste trabalho, procura-se sintetizar a experiência do LNEC na caracterização da deformabilidade de fundações de maciços rochosos, sendo dado especial ênfase às técnicas *in situ* habitualmente utilizadas. Refere-se, ainda, a experiência japonesa na utilização de ensaios de carga com placa. Efectua-se, em seguida, uma análise de ensaios de deformabilidade efectuados para uma barragem de enrocamento, no Japão.

SYNOPSIS – In this article, LNEC's experience related to the characterization of the deformability of rock masses is presented, special emphasis is made to the *in situ* characterization techniques usually used. The Japanese experience with plate loading tests is also reported. An analysis is made on deformability tests carried out for the foundation of a rockfill dam, Japan.

## **1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS**

Na análise do comportamento de barragens, o conjunto da barragem e sua fundação e, para alguns problemas, o conjunto da barragem, sua fundação e albufeira deve ser considerado. No projecto estrutural e na observação do comportamento das fundações de barragens, exigem-se, de acordo com a sua importância e o tipo de barragem, isto é, barragens de betão ou de alvenaria, de terra ou de enrocamento, níveis de informação geotécnica diferenciados para as propriedades da rocha e do maciço rochoso. As principais propriedades a determinar estão relacionadas com a deformabilidade, a resistência, a permeabilidade e a durabilidade.

A determinação dos parâmetros característicos da deformabilidade do maciço rochoso reveste-se de grande importância no caso de fundações de barragens. No entanto, devido à natureza descontínua, heterogénea e muitas vezes anisotrópica dos maciços rochosos, a sua determinação é largamente influenciada pela dimensão dos volumes ensaiados.

As características de deformabilidade de um maciço rochoso são, em regra, determinadas por intermédio de ensaios *in situ* e em laboratório, em que uma carga é aplicada numa determinada direcção e de forma específica conforme o tipo de ensaio e se medem as correspondentes deformações. Para tal, são executados variados tipos de ensaio para o material rochoso, para as superfícies de descontinuidade e para o próprio maciço, o que permite obter um conhecimento satisfatório do comportamento do maciço rochoso, durante e após a execução das obras.

---

\* Investigador Coordenador do LNEC, Lisboa

\*\* Investigador do PWRI – Public Work Research Institute, Tsukuba, Japão

Nalguns casos, os maciços rochosos são somente homogêneos a grande escala, pelo que não é recomendável, do ponto de vista económico, efectuar ensaios envolvendo um volume considerável do maciço rochoso. Os problemas originados pela insuficiência do volume de ensaio situam-se no domínio do efeito de escala (Cunha e Muralha, 1990).

A influência do efeito de escala na determinação da deformabilidade dos maciços pode ser facilmente explicada com o apoio da teoria da estatística (Grossmann, 1993). Na realidade, quando um maciço rochoso se deforma, a deformação global numa dada direcção resulta da soma de um grande número de pequenas deformações individuais aleatórias, na mesma direcção, dos diferentes elementos constitutivos do maciço rochoso. Utilizando as leis da estatística, a deformação global tem uma distribuição normal, cuja média é independente do número de deformações individuais. Por consequência, se os ensaios efectuados forem escolhidos com uma localização aleatória, os resultados experimentais devem apresentar a mesma deformabilidade média, sendo o desvio padrão proporcional à raiz quadrada do comprimento significativo do volume ensaiado.

Com base nestas considerações, é possível afirmar que os resultados dos ensaios de deformabilidade obtidos em testes envolvendo pequenos volumes de maciço são muito mais variáveis do que os resultados obtidos em testes a grande escala. Por consequência, estes ensaios devem ser efectuados em maior número de forma a compensar a sua grande variabilidade.

Os ensaios para determinação da deformabilidade da fundação devem ser efectuados antes da construção da barragem. Durante a construção ou durante o primeiro enchimento do reservatório, é possível obter a resposta do conjunto barragem-fundação por intermédio da sua observação e comparar os resultados observados com os valores previstos por modelos numéricos. A fiabilidade dos modelos depende, fundamentalmente, dos parâmetros que governam o comportamento dos materiais envolvidos no corpo da barragem e na sua fundação. Nestas etapas da vida das obras, é, então, importante o uso de técnicas de retro-análise (identificação de sistemas estruturais) de forma a ser possível reavaliar os parâmetros de deformabilidade do maciço rochoso, tendo em consideração os resultados obtidos pela observação da obra e os ensaios *in situ* previamente executados (Castro et al., 1993 e Castro e Sousa, 1995).

Neste artigo, procura-se apresentar uma breve descrição de ensaios “*in situ*” habitualmente efectuados para caracterização da deformabilidade de fundações de barragens. Dá-se especial ênfase aos problemas que surgem da aplicação das várias técnicas de ensaio, referindo-se, em especial, as desenvolvidas pelo LNEC, bem como técnicas japonesas seguidas nos ensaios de carga com placa. Estas considerações são tidas em conta na interpretação dos resultados de ensaios de deformabilidade efectuados para a fundação de uma barragem de enrocamento, localizada no norte do Japão. São, ainda, apresentadas considerações finais relacionadas com o efeito de escala na determinação da deformabilidade, com a metodologia considerada mais adequada para determinação da deformabilidade em fundações rochosas de barragens e com a interpretação global dos ensaios efectuados na fundação de uma barragem de enrocamento.

## 2 - ENSAIOS EM FUIROS

### 2.1 - Introdução

Os ensaios *in situ*, efectuados em pequena escala em fundações de barragens, são executados, habitualmente, em furos de sondagem. Tratam-se de ensaios relativamente pouco dispendiosos, de fácil execução e, em geral, efectuados em furos já executados para prospecção

do próprio maciço de fundação. Não necessitam, em regra, de requisitos especiais na preparação das paredes do furo, onde se pretende efectuar o ensaio.

Os ensaios de deformabilidade em furos de sondagem podem agrupados nos seguintes tipos (Pinto, 1986; Wittke, 1990 e Grossmann, 1993):

- i) A carga é aplicada por uma membrana flexível completamente adaptada às paredes do furo por intermédio de uma pressão axissimetricamente distribuída (ensaio dilatométrico e pressiométrico).
- ii) A carga é aplicada por intermédio de placas rígidas deslocáveis actuando contra as paredes do furo em dois arcos da circunferência utilizando macacos hidráulicos (ensaio com macacos para furos).

No primeiro tipo de ensaios, consideram-se os ensaios pressiométricos nos quais, em regra, é medida uma deformação volumétrica. São utilizados em solos ou em rochas muito deformáveis e têm algumas limitações na sua precisão, ao medirem volumes e não deslocamentos, não sendo apropriados para todos os tipos de formações rochosas. Pertencem a este tipo de aparelhos o pressiómetro de Ménard, o pressiómetro da ASTM e os pressiómetros auto-perfuradores (Briaud, 1992).

No Japão, o desenvolvimento de pressiómetros começou na década de 50. Foi então desenvolvido um tipo de pressiómetro monocelular, designado *Public Work Research Institute K Vale Tester*. Esta versão foi subsequentemente melhorada com a versão designada LLT – aparelho de carga lateral (Ohya et al., 1986).

Outros equipamentos que se podem integrar no primeiro tipo de ensaios são os ensaios dilatométricos, com sistemas de medida que permitem medir deformações em direcções radiais. Os dilatómetros são geralmente utilizados em todos os tipos de rocha, podendo, ainda, ser aplicados em solos consolidados.

O segundo tipo de ensaio referido corresponde a uma situação mais complexa do ponto de vista de aplicação da carga ao furo de sondagem. A carga pode ser aplicada numa direcção qualquer, o que pode constituir vantagem para fins geotécnicos especiais, como por exemplo na determinação da força necessária para abrir uma fenda com orientação bem determinada, ou estudar a deformabilidade numa direcção particular previamente escolhida (Pinto, 1986). Os macacos podem ser rígidos, como é o caso do designado macaco de Goodman, cuja robustez quando comparado com o dilatómetro justifica ainda o seu uso (Wittke, 1990), ou flexíveis.

De acordo com a experiência do LNEC, julga-se que os ensaios dilatométricos são, de maneira geral, os ensaios *in situ* em furos de sondagem mais adequados para a caracterização da deformabilidade de maciços rochosos. Daí que, na secção seguinte, seja feita uma referência especial a este tipo de ensaios e, em particular, ao equipamento dilatométrico desenvolvido no LNEC.

## 2.2 - Ensaio dilatométrico

O dilatómetro BHD (BoreHole Dilatometer) desenvolvido no LNEC é constituído por um cilindro metálico, muito rígido, em cujo interior se situa o sistema eléctrico de medição, envolvido por uma camisa cilíndrica de borracha, que se adapta ao furo de sondagem e solicita as paredes na zona onde se pretende quantificar a deformabilidade do maciço. Foi projectado para furos de sondagem NX (diâmetro de 76mm), permitindo a sua operação até cerca de 150m de profundidade (Figura 1). Introduzindo água por intermédio de uma bomba de água no espaço entre o cilindro e o interior da camisa, até uma pressão máxima de cerca de 200MPa, provoca-se a deformação do maciço rochoso na zona envolvente. A deformação é medida ao

longo de quatro diâmetros, desfasados de 45° entre si, com a ajuda de quatro pares de sensores, que estão conectados com transdutores diferenciais (Rodrigues, 1983 e Pinto, 1993).

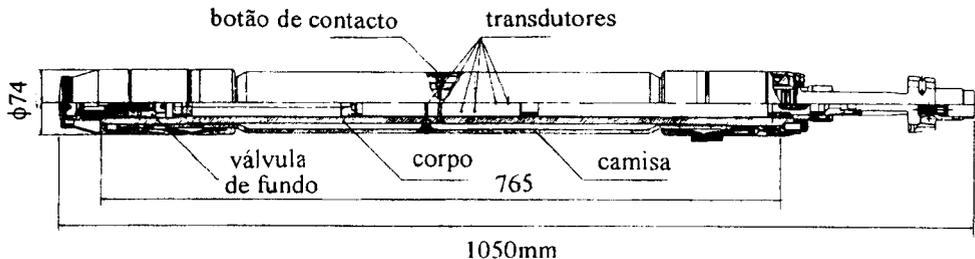


Figura 1 - Dilatômetro BHD

O módulo de deformabilidade  $E_d$ , também designado de módulo dilatométrico, é quantificado admitindo as hipóteses de meio contínuo, homogêneo, isotrópico e de comportamento elástico linear, de acordo com a fórmula da Teoria de Elasticidade para um furo de comprimento infinito submetido a uma pressão uniforme nas paredes do furo, por intermédio da fórmula:

$$E_d = (1 + \nu) \phi \frac{\Delta p}{\Delta \delta} \quad (1)$$

onde  $\nu$  é o coeficiente de Poisson,  $\phi$  o diâmetro do furo,  $\Delta p$  a variação de pressão e  $\Delta \delta$  a variação de diâmetro originada pela variação de pressão  $\Delta p$ .

Como consideração final, refere-se que estes ensaios são de fácil execução, sendo, no entanto, os volumes ensaiados de cerca de 0,5 a 1m<sup>3</sup>, em regra afastados do volume físico elementar representativo do maciço rochoso de fundação.

Existem outros aparelhos similares, nomeadamente o desenvolvido pela empresa Yachiyo Engineering Company com um diâmetro de 297mm, o elastómetro OYO 200 concebido para furos de 64mm e os aparelhos desenvolvidos por um instituto russo utilizáveis em furos de 46 e 76mm (Pinto, 1986).

### 2.3 - Interpretação de resultados de ensaios dilatométricos

A interpretação dos ensaios dilatométricos reveste-se de grande dificuldade, devido à variação do comportamento do maciço rochoso durante os ensaios. A fórmula referida em (1), derivada da Teoria da Elasticidade, é apenas válida se as tensões perimetrais nas paredes do furo após a aplicação da pressão permanecerem em compressão. Em geral, as componentes do estado de tensão inicial no maciço de fundação são de pequena magnitude, podendo as tensões de tracção na direcção perimetral aplicadas às paredes do furo, devidas à pressão uniformemente distribuída ao longo do furo, serem superiores à tensão perimetral instalada nas paredes do furo devido ao estado de tensão inicial do maciço. Daí que o módulo de deformabilidade obtido com o apoio na fórmula (1) não traduz, em geral, o módulo do meio equivalente contínuo, isotrópico e homogêneo, com a mesma deformação radial medida durante o ensaio para a mesma carga aplicada.

Várias hipóteses são assumidas durante os ensaios BHD, dependendo do estado de tensão inicial e da resistência à tracção do maciço rochoso. Pinto (1993) apresentou as fórmulas teóricas que podem ser utilizadas para cálculo do verdadeiro módulo de deformabilidade, para as situações em que a expressão anterior deixa de ser válida. Contudo os diagramas obtidos pelos ensaios "in situ" não são geralmente similares aos diagramas teóricos obtidos pelas fórmulas referidas, posto que os efeitos mencionados estão misturados com outros, de difícil

distinção. Por consequência, o fecho de descontinuidades, a heterogeneidade, as descontinuidades, a fluência, etc., podem alterar significativamente a evolução dos diagramas. Somente um registo contínuo desde o início dos ensaios pode apresentar todo o detalhe das curvas. Por vezes, verifica-se uma certa dificuldade na adaptação da camisa de borracha do dilatómetro às paredes do furo de que resulta pouca precisão na obtenção de leituras do aparelho para pressões baixas.

Para cada nível de carga aplicada, o ensaio dilatométrico permite obter resultados em 4 direcções diametrais num plano normal ao eixo do furo. Estes resultados podem ser influenciados pela anisotropia do maciço rochoso, sendo no entanto afectados pela presença de algumas descontinuidades aleatórias que ocorrem na proximidade da zona de ensaio. Sendo assim, a informação respeitante à anisotropia do maciço rochoso pode ser obtida a partir dos ensaios dilatométricos, considerando os resultados médios para uma dada direcção de todos os ensaios executados numa zona do maciço considerada como homogénea (Rodrigues, 1983 e Grossmann, 1993).

De acordo com a experiência e os desenvolvimentos teóricos referidos previamente, verifica-se que os módulos de deformabilidade obtidos a partir da fórmula (1) são, em regra, menores do que os obtidos em ensaios a grande escala (Graça, 1980 e Sousa, 1994).

### 3 - ENSAIOS A GRANDE ESCALA

#### 3.1 - Generalidades

Os ensaios de deformabilidade a grande escala são em regra divididos nos seguintes grupos:

- i) Ensaios à superfície em que a carga é aplicada na superfície do terreno ou na superfície de uma galeria.
- ii) Ensaios com macacos planos em que a carga é aplicada nas paredes de um ou mais rasgos abertos no maciço rochoso.
- iii) Ensaios hidromecânicos em galerias.
- iv) Ensaios *in situ* uniaxiais ou triaxiais.
- v) Ensaios sísmicos de refração entre furos ou galerias

Os ensaios sísmicos permitem a determinação do módulo de elasticidade dinâmico por intermédio de medições das velocidades de ondas P e S. Os módulos dinâmicos são diferentes dos estáticos devido à diferença da duração de aplicação dos níveis de tensão. Em regra, apresentam valores mais elevados para o módulo de deformabilidade devido à pequena influência das propriedades das superfícies de descontinuidade, ao contrário do que acontece nos ensaios estáticos. Os ensaios sísmicos envolvem um grande volume de ensaio, que depende da distância entre furos de sondagem ou galerias, podendo os módulos de elasticidade dinâmica ser correlacionados com os valores estáticos.

Os ensaios *in situ* uniaxiais e triaxiais raramente são usados, devido aos custos envolvidos na sua realização, podendo ser efectuados em provetes prismáticos ou cilíndricos (Pinto, 1986).

Os ensaios hidromecânicos em galerias consistem em aplicar uma pressão uniformemente distribuída na superfície de galeria, medindo, em regra, deformações diametrais da mesma e no interior do maciço, que dependem da instrumentação utilizada (Martins, 1985 e Lamas, 1993). Permitem, ainda, avaliar as propriedades hidromecânicas do maciço rochoso.

Os dois primeiros grupos de ensaios são habitualmente utilizados na caracterização da deformabilidade dos maciços rochosos de fundações de barragens. Por conseguinte, apenas estes dois tipos de ensaio de deformabilidade serão analisados mais em detalhe nas secções

seguintes, procurando-se transmitir a experiência japonesa na utilização de ensaios de carga com placa.

### 3.2 - Ensaios de carga com placa

Nestes ensaios, a carga é aplicada sobre superfícies do maciço rochoso preparadas para o efeito, podendo a carga ser transmitida ao terreno por intermédio de placas metálicas rígidas, em regra circulares, ou por intermédio de placas deformáveis.

A sua principal desvantagem reside no facto de que a resposta do maciço rochoso às cargas aplicadas é influenciada pela zona superficial do maciço rochoso perturbada pela libertação superficial de tensões. Por vezes, para evitar essa situação, só é medida a deformação que ocorre a uma certa distância da superfície carregada, pelo que, neste caso, as deformações medidas são menores e, por consequência, os resultados podem não ser suficientemente rigorosos.

Segundo a experiência japonesa de projecto de barragens, é sempre necessário remover uma parte de terreno superficial, em regra alterada, o que se torna numa desvantagem para estes métodos.

De acordo com as normas japonesas de projecto de barragens, a deformabilidade da fundação é avaliada a partir de ensaios *in situ*, sendo recomendado o uso de ensaios de carga com placa (River Bureau, 1986).

Para quantificação da deformabilidade, são determinados três módulos distintos, isto é, módulo de deformabilidade  $D$ , módulo de deformabilidade tangente  $E_t$  e módulo de deformabilidade secante  $E_s$ , utilizando valores experimentais conforme indicado na Figura 2, que ilustra uma curva típica de ensaio, pressão versus deslocamento, e considera-se um diagrama de carga no tempo, conforme ilustrado na Figura 3.

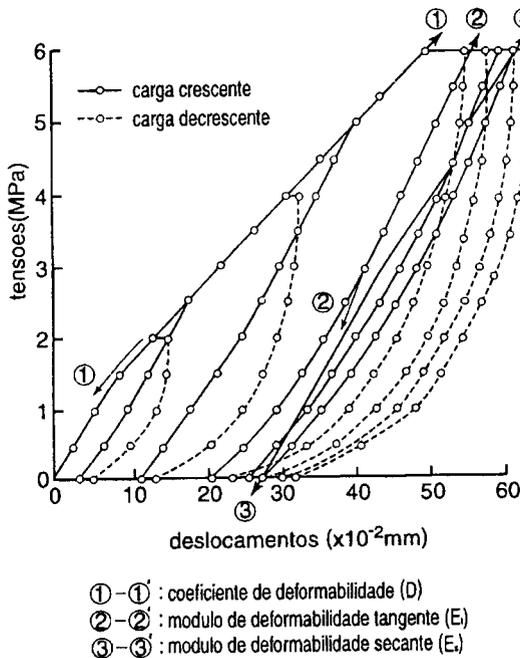
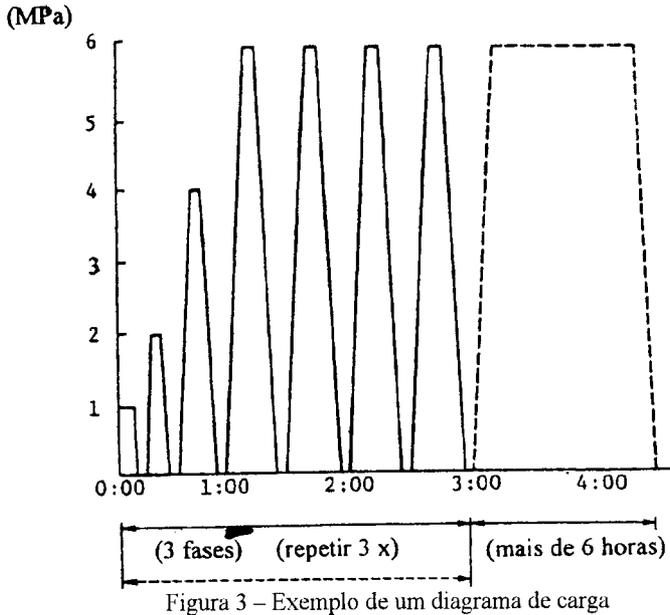


Figura 2 – Exemplo de curvas pressão versus deslocamento num ensaio de carga com placa (River Bureau, 1986).



O cálculo dos referidos módulos é obtido do seguinte modo (River Bureau, 1986):

- i) Se a placa é do tipo rígido, com o propósito de obter um comportamento deformacional uniforme, o módulo de deformabilidade é obtido pela fórmula:

$$E_r = \frac{(1 - \nu^2)(F_2 - F_1)}{2\alpha(W_2 - W_1)} \quad (2)$$

em que  $\nu$  é o coeficiente de Poisson do maciço rochoso,  $\alpha$  o raio da placa,  $F_2$  e  $F_1$  os valores da carga em dois pontos da curva carga versus deslocamento e  $W_2$  e  $W_1$  os valores de deslocamentos correspondentes às forças  $F_2$  e  $F_1$ .

- ii) Se a carga é aplicada por intermédio de um macaco com o propósito de obter uma distribuição uniforme de pressões, isto é, com placa deformável, o módulo de deformabilidade é obtido pela fórmula:

$$E_r = \frac{2(1 - \nu^2)(r_2 - r_1)(P_2 - P_1)}{W_2 - W_1} \quad (3)$$

em que  $r_2$  e  $r_1$  são os raios interiores e exteriores do diafragma,  $P_2$  e  $P_1$  os valores da pressão em dois pontos da curva pressão versus deslocamentos e  $W_2$  e  $W_1$  os valores de deslocamentos correspondentes às pressões  $P_2$  e  $P_1$ .

O LNEC tem, também, uma experiência importante no uso deste tipo de ensaios, no entanto, a partir da década de 70, têm sido mais usados os macacos planos de grande área para maciços rochosos pouco deformáveis, continuando-se, porém, a utilizar o ensaio de carga com placa em rochas brandas.

Na Figura 4, apresenta-se, a título de exemplo, um esquema de ensaio utilizado pelo LNEC com duas placas aplicada nas paredes de uma galeria, sendo a área de aplicação da carga de  $1\text{m}^2$  (Rocha, 1981).

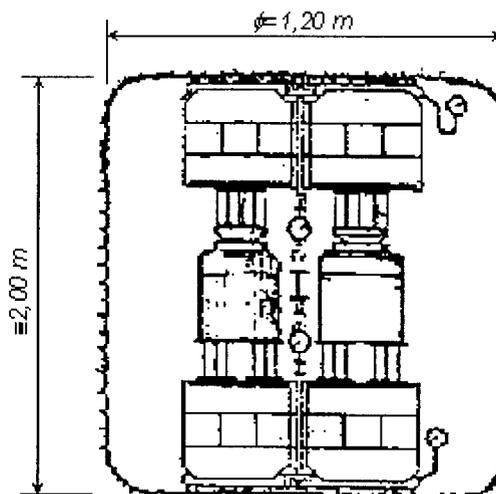


Figura 4 - Arranjo de um esquema de ensaio de placa utilizado pelo LNEC

### 3.3 - Ensaio com almofadas planas

Neste tipo de ensaios, a carga é aplicada às paredes de um ou mais rasgos de forma a permitir obter a deformabilidade de um volume considerável de maciço no caso do uso de almofadas de grande área, sem perturbar significativamente o maciço rochoso. Constituem, na nossa opinião, os ensaios mais significativos para quantificação da deformabilidade em grande escala dos maciços rochosos.

Um exemplo deste tipo de ensaios é o ensaio LFJ (Large Flat Jack) desenvolvido no LNEC e frequentemente utilizado por esta instituição nos seus ensaios de campo e que também pode ser aplicado em maciços rochosos de grande deformabilidade com módulos variando entre 120MPa e 2000MPa (Rocha, 1981; Pinto, 1981 e Rodrigues, 1983).

A principal vantagem deste tipo de ensaio em comparação com outros ensaios de almofadas planas reside no facto de que os rasgos são abertos por serras diamantadas com 1m de diâmetro. As superfícies dos rasgos são geralmente lisas e os macacos podem ser aplicados directamente nas superfícies rochosas. Cada macaco plano contém quatro defómetros, com extensómetros eléctricos, que permitem medir a variação da abertura do rasgo. Estes macacos podem ser colocados em rasgos abertos lado a lado e ser ensaiados simultaneamente ou em diferentes combinações, permitindo o ensaio envolver um volume de maciço suficientemente grande para ser representativo da deformabilidade do mesmo. A Figura 3 apresenta um arranjo de três almofadas planas.

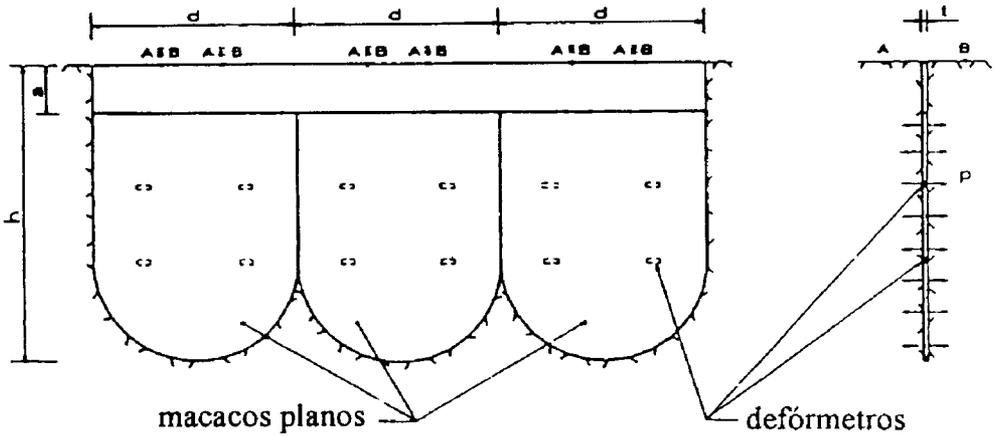


Figura 5 - Arranjo de almofadas planas de grande área

A interpretação destes ensaios é feita usualmente recorrendo à fórmula da Teoria da Elasticidade para um meio espaço, submetido a uma carga normal distribuída:

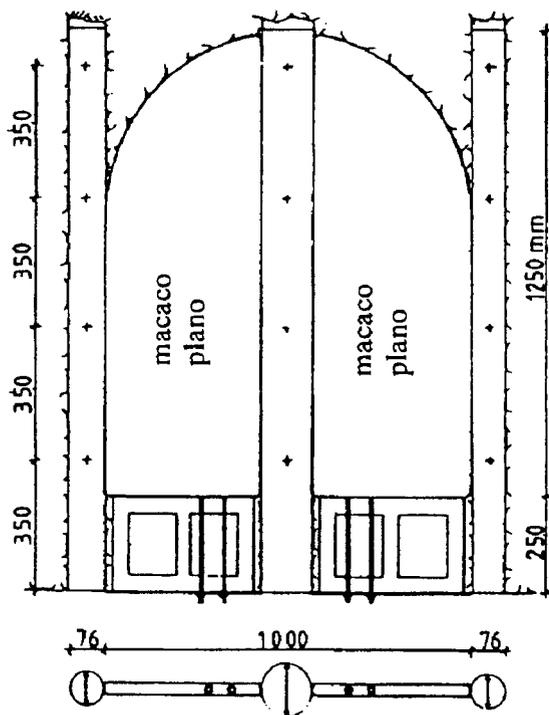
$$E_{LFJ} = (1 + \nu^2) K \frac{\Delta p}{\Delta \delta} \quad (4)$$

onde  $E_{LFJ}$  é o módulo de deformabilidade,  $\nu$  o coeficiente de Poisson,  $K$  uma constante a ser determinada,  $\Delta p$  a variação de pressão e  $\Delta \delta$  a variação de deformação originada por  $\Delta p$ .

A constante  $K$  pode ser calculada por intermédio de métodos numéricos em função do número de almofadas LFJ utilizadas, do defórmetro escolhido e da profundidade de uma fenda que frequentemente se desenvolve no plano do rasgo, durante os ensaios, devido à ocorrência de tensões que aí se desenvolvem (Pinto, 1981).

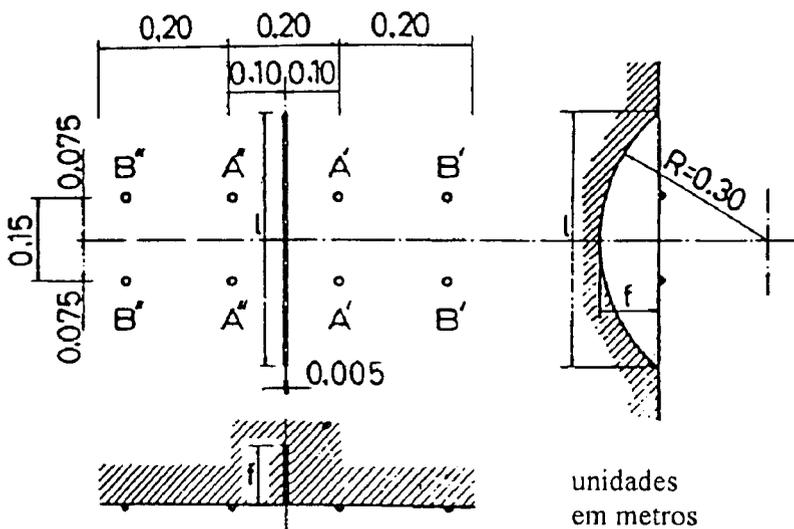
Recentemente, Pinto (1993) propôs um novo equipamento LFJ, em que cada rasgo contém dois macacos de cerca de metade da dimensão dos anteriores, cada um em cada lado de um furo central com 168mm de diâmetro (Figura 6). Os defórmetros situam-se, agora, em três colunas de medida independentes, instaladas no furo central e em dois furos NX laterais. As vantagens do novo equipamento residem, no essencial, em que: i) o tempo de ensaio é diminuído; ii) o preço dos ensaios é reduzido; iii) os ensaios permitem obter informação mais fiável; iv) o número de defórmetros é multiplicado por três; e v) os ensaios de fluência a longo prazo podem ser executados mais facilmente.

Uma outra técnica desenvolvida no LNEC é o método SFJ (Small Flat Jack), que permite a utilização de almofadas de pequena área, principalmente utilizado para medição de tensões *in situ* em maciços rochosos e em estruturas de betão, conforme assinalado na Figura 7.



+ ponto de medida

Figura 6 - Novo equipamento LFJ



unidades  
em metros

Figura 7 - Geometria de um rasgo de um ensaio SFJ.

Estes ensaios permitem determinar, para além da tensão normal instalada no plano do rasgo, a deformabilidade do maciço rochoso utilizando uma fórmula obtida a partir de resultados obtidos em modelos de cálculo tridimensionais por elementos finitos, considerando o maciço rochoso quer como meio contínuo isótropo, quer como meio anisótropo (Martins, 1985). Para o caso de meio isótropo, o módulo de deformabilidade é obtido pela fórmula:

$$E_{SFJ} = K \frac{\Delta p}{\Delta \delta} \quad (5)$$

onde  $E_{SFJ}$  representa o módulo de deformabilidade, K uma constante obtida por intermédio de modelo por elementos finitos (Martins e Sousa, 1987),  $\Delta p$  a variação de pressão e  $\Delta \delta$  a variação de deformação originada por  $\Delta p$ . O valor do módulo pode ser obtido directamente a partir de ábacos, como o ilustrado na Figura 8 para uma almofada plana, habitualmente utilizada, com uma flecha de 24cm.

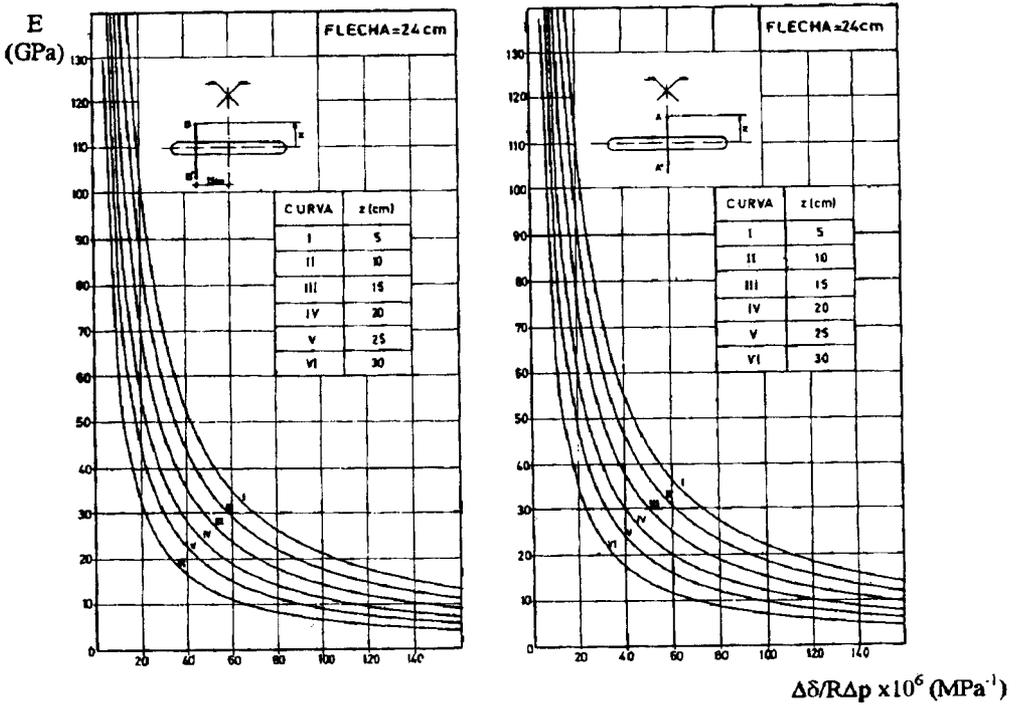


Figura 8 – Curvas de  $E_{SFJ}$  versus  $\Delta\delta/R\Delta p$  para uma almofada com flecha de 24cm

#### 4 - ENSAIOS DE DEFORMABILIDADE NA FUNDAÇÃO DE UMA BARRAGEM DE ENROCAMENTO

##### 4.1 - Introdução

Foi conduzido um estudo para quantificação da deformabilidade da fundação rochosa de uma barragem de enrocamento, localizada na região norte da ilha de Honshu, Japão.

De acordo com a informação disponível, foi escavada uma galeria com cerca de 80m, com a designação de TA-3. Nessa galeria, foi executado um ramal TA-3', com eixo normal a TA-3, conforme assinalado na Figura 9. Neste ramal, foram efectuados vários ensaios de deformabilidade *in situ*, de que se salientam ensaios de carga com placa rígida com dois diâmetros distintos, e ensaios pressiométricos a pequena escala. Foram, ainda, realizados ensaios de laboratório, que incluíram ensaios de compressão uniaxial com determinação do módulo de deformabilidade, da resistência à compressão uniaxial, medições de velocidades de ondas de propagação e determinações de peso específico. Efectuaram-se, ainda, ensaios com martelo Schmidt nos locais onde se realizaram os ensaios *in situ*.

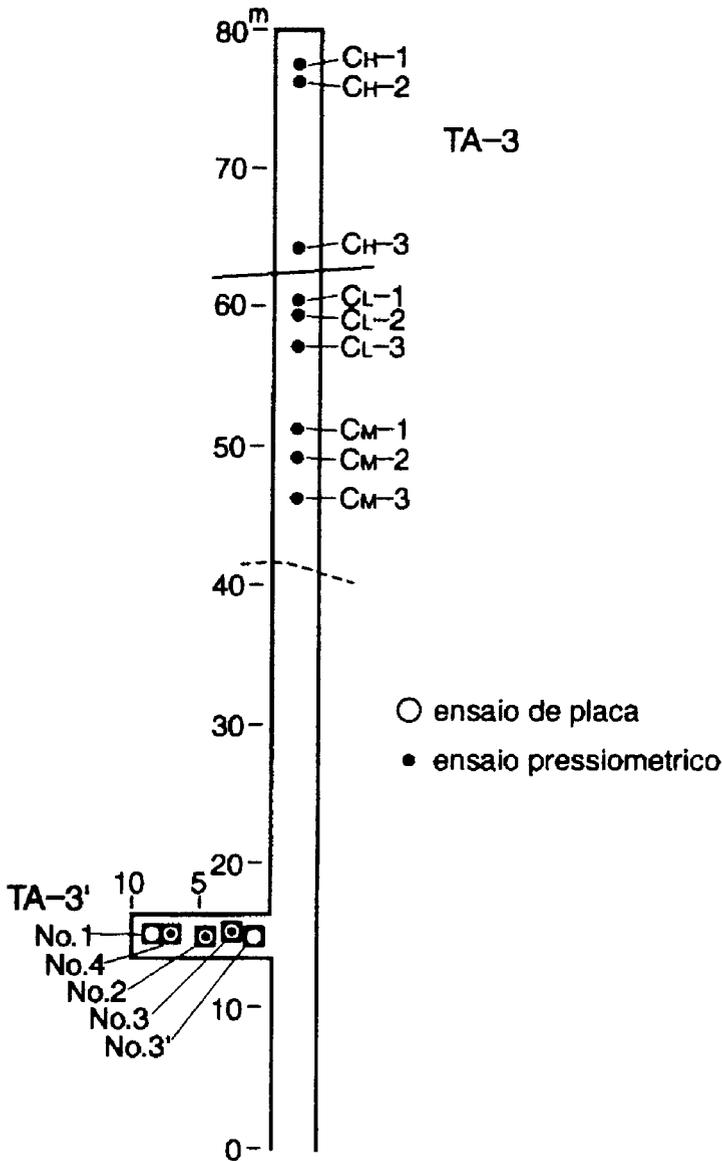


Figura 9 – Galerias TA-3 e TA-3'. Localização dos ensaios *in situ*

O maciço rochoso consiste em tufos lapilli e em aglomerados, tendo nas primeiras formações sido apenas realizados ensaios *in situ* pressiométricos, enquanto que, nos aglomerados, se efectuaram ensaios de carga com placa e pressiométricos.

#### 4.2 - Ensaios de carga com placa efectuados

Os ensaios de carga com placa foram efectuados na galeria de ensaio TA-3', tendo sido realizados 10 ensaios com placas rígidas de 30 e 60cm de diâmetro. Os ensaios com os dois tipos de placa, de diferente diâmetro, foram concretizados em 5 locais distintos, designados, respectivamente, de 1, 2, 3, 3' e 4 (Figura 10).

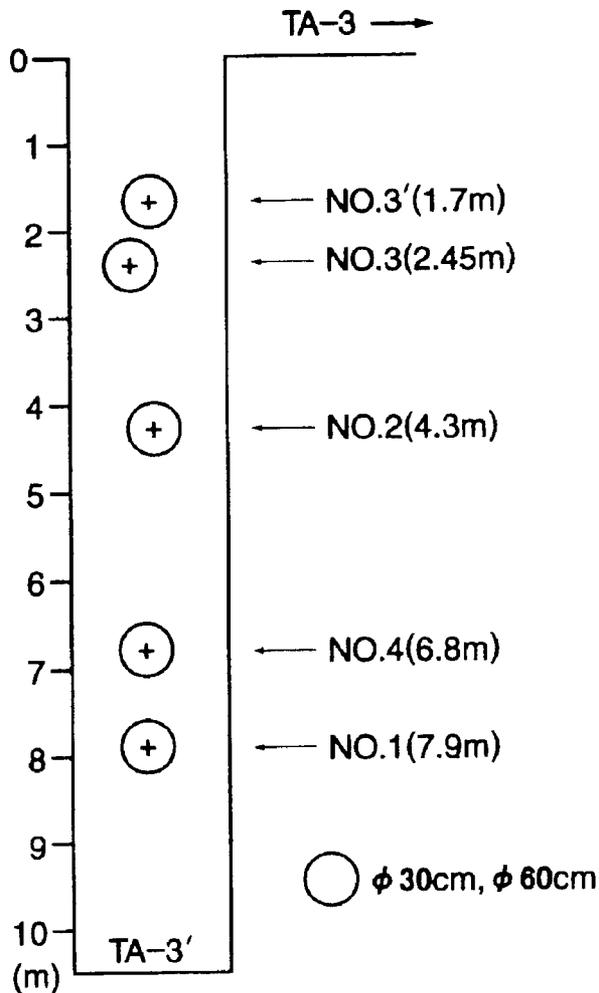


Figura 10 - Galeria TA-3'. Localização dos ensaios de carga com placa.

O diagrama de aplicação de carga seguido em cada ensaio foi similar ao preconizado no manual japonês de projecto de barragens, conforme ilustrado na Figura 2 (River Bureau, 1986), isto é, considerando 4 incrementos de carga para 0,8, 1,6, 3,2 e 4,8MPa, seguido de 4 ciclos repetidos para a última carga, sendo o último ciclo de carga de fluência com cerca de 6 horas

(Figura 11). Em cada placa rígida, existiam 4 pontos de medida localizados na fronteira circunferencial. O módulo de deformabilidade  $D$ , o módulo de deformabilidade tangente  $E_t$  e o módulo de deformabilidade secante  $E_s$  foram calculados de acordo com o referido manual japonês de projecto de barragens e conforme a fórmula (2).

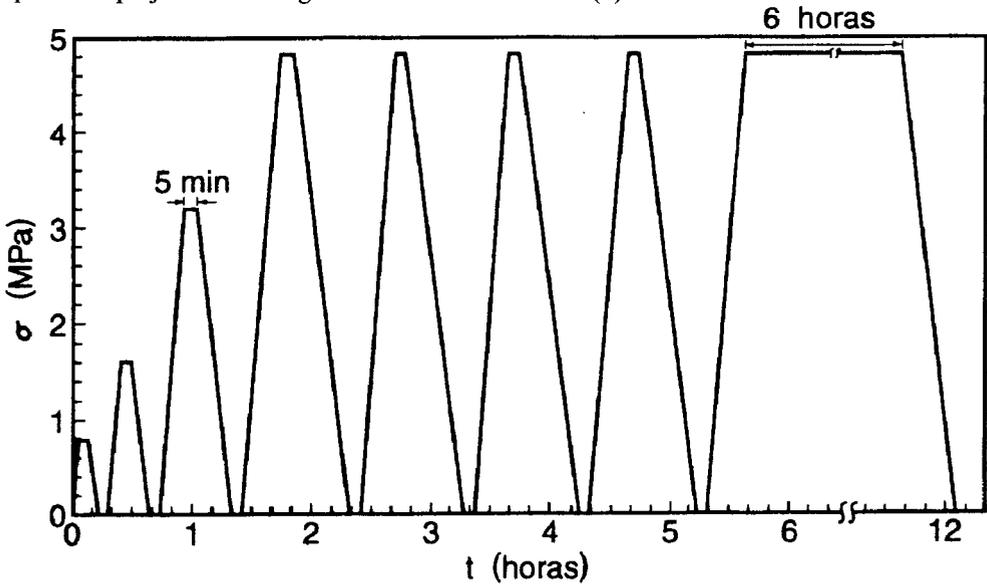


Figura 11 – Padrão de ensaio seguido nos ensaios de carga com placa

A Figura 12 ilustra as formações envolvidas nos diferentes ensaios de placa, que permite visualizar a heterogeneidade do maciço à escala dos volumes envolvidos pelos diferentes ensaios de placa realizados.

No Quadro 1, apresenta-se uma síntese dos resultados obtidos, sendo os valores dos módulos de deformabilidade expressos em MPa. Para cálculo do módulo de deformabilidade  $D$ , a variação de pressão considerada foi de 2MPa (ensaio nº 2), 2,2MPa (ensaios nºs 3, 3' e 4), ou 2,4MPa (ensaio nº 1), até 4,8MPa (em todos os ensaios). O módulo de deformabilidade tangente  $E_t$  foi calculado para uma pressão inferior entre 1,0 e 2,8MPa e para uma pressão superior entre 4,0 e 4,8MPa. O módulo de deformabilidade secante foi sempre determinado para uma variação de pressão entre 0-4,8MPa.

Ilustra-se, na Figura 13, resultados de um ensaio realizado com placa de 60cm para o ensaio nº 3, que evidenciou maior deformabilidade, e onde se assinalam os pontos adoptados para cálculo dos módulos de deformabilidade.

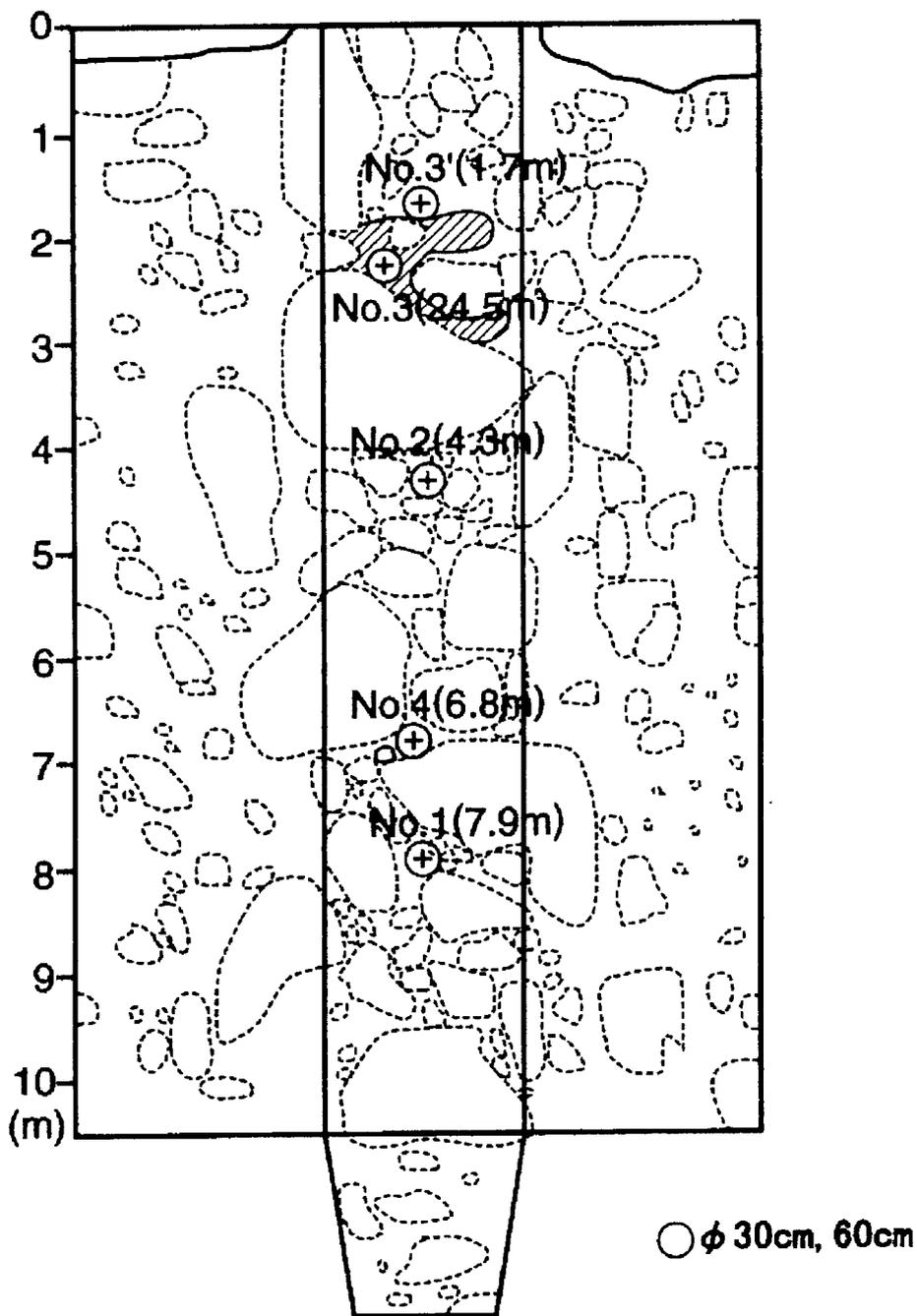


Figura 12 – Heterogeneidade da formação rochosa envolvendo o local dos ensaios de carga com placa

Quadro 1 - Resultados de ensaios de placa

Ensaio	Placa de 30cm			Placa de 60cm		
	D	$E_t$	$E_s$	D	$E_t$	$E_s$
n° 1	578	1014	818	886	1307	906
n° 2	413	898	639	736	1159	789
n° 3	47	439	410	487	953	641
n° 3'	634	1119	852	914	1413	931
n° 4	736	1225	1019	1243	1667	1511

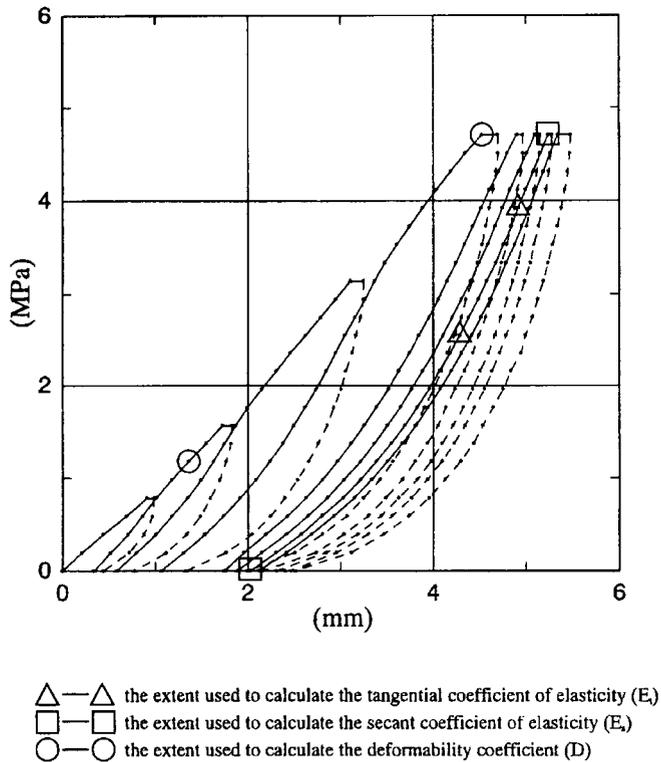


Figura 13 – Diagrama tensões-deslocamentos para o ensaio n° 3 com placa de 60cm de diâmetro

#### 4.3 - Ensaio pressiométricos

Vários ensaios pressiométricos foram efectuados em furos com diâmetro de 66mm, sendo 6 ensaios em tufo lapilli, as regiões CM e CH na galeria TA-3, e mais 6 ensaios no maciço com aglomerados, sendo 3 no mesmo local dos ensaios de carga com placa n°s 2, 3 e 4 (galeria TA-3'), e os restantes 3 ensaios na região CL, entre as regiões CH e CM, na galeria TA-3 (Figura 9).

No Quadro 2, apresentam-se alguns resultados globais.

Quadro 2 – Resultados de ensaios pressiométricos

Ensaio	Região	D (MPa)	E <sub>t</sub> (MPa)
CL1	CL	30	210
CL2	CL	350	890
CL3	CL	60	300
CM1	CM	1260	3890
CM2	CM	2160	6900
CM3	CM	1730	2770
CH1	CH	1870	13000
CH2	CH	2890	5200
CH3	CH	2590	8650
n° 2	CL	220	1240
n° 3	CL	130	540
n° 4	CL	690	1200

Em relação aos ensaios incluídos na região CL, em aglomerado, os módulos de deformabilidade foram os seguintes: i) para o módulo D – valor médio de 247, máximo de 690 e mínimo de 30MPa; ii) para o módulo tangente E<sub>t</sub> – valor médio de 730, máximo de 1240 e mínimo de 210MPa.

Em relação aos ensaios incluídos nas regiões CM e CH, em tufo lapilli, os valores médios dos módulos de deformabilidade D e E<sub>t</sub> foram consideravelmente mais elevados, sendo respectivamente de: i) para CM – 1717 e 4520MPa; ii) para CH – 2450 e 8950MPa; e iii) para CM+CH – 2083 e 6735MPa.

#### 4.4 - Ensaio de laboratório

Como foi mencionado foram efectuados ensaios em laboratório. Os ensaios uniaxiais permitiram obter o módulo de deformabilidade e a resistência à compressão simples do material rochoso. No Quadro 3, apresentam-se resultados.

Quadro 3 – Resultados de ensaios de compressão uniaxial

Ensaio	Prof. (m)	σ <sub>c</sub> (MPa)	E (MPa)
n° 2	0,45-0,55	1,3	159
n° 2	0,65-0,85	1,3	304
n° 3	1,40-1,55	2,0	294
n° 3	1,70-1,80	1,6	98
n° 3	1,80-1,95	0,9	139

As amostras foram retiradas dos locais onde se efectuaram ensaios de carga com placa, tendo sido obtido, para o módulo de deformabilidade, um valor médio de 199MPa, com um máximo de 304 e um mínimo de 98MPa. Consta-se que os módulos de deformabilidade obtidos são geralmente inferiores aos valores obtidos com os correspondentes ensaios de carga com placa.

Para a resistência à compressão uniaxial foi obtido um valor médio de 1,4MPa.

#### 4.5 - Análise global dos resultados dos ensaios

Os diferentes resultados de módulos de deformabilidade obtidos para a mesma formação rochosa (aglomerados da região CL) estão sintetizados no Quadro 4.

Quadro 4 - Módulos de deformabilidade para os aglomerados

Ensaio	Coefficientes de deformabilidade	Mínimo (MPa)	Médio (MPa)	Máximo (MPa)
Placa (60cm)	D	1243	853	487
	$E_t$	1667	1300	953
Placa (30cm)	D	736	482	47
	$E_t$	1225	939	439
Pressiómetro	D	690	247	30
	$E_t$	1240	730	210
Comp. Uniaxial	E	304	199	98

Uma primeira análise do Quadro 4 permite tirar algumas conclusões imediatas, como seja o facto de que os módulos de deformabilidade D e  $E_t$  diminuam com a redução dos volumes de ensaio no que respeita aos ensaios de campo. Deve-se, no essencial, ao facto de que os ensaios foram efectuados em zonas do maciço onde se esperavam módulos de deformabilidade mais baixos, justificando-se tal procedimento por razões de segurança (Figura 12). Na realidade, quando o volume de ensaio aumenta, como acontece com os ensaios de carga com placa de 60cm de diâmetro, a influência de blocos mais rígidos dos aglomerados é mais marcante. Conclui-se, pois, que, para as diferentes escalas de ensaio utilizadas nos ensaios de placa, o maciço rochoso não pode ser considerado como homogéneo.

Uma análise comparativa mostra que os ensaios in situ efectuados com uma placa de pequeno diâmetro não podem representar adequadamente o maciço rochoso, se for utilizado um modelo conceptual representativo do maciço em que se usa a aproximação de meio contínuo. Daí que os valores obtidos com ensaios de carga com placa de maior diâmetro serão mais representativos do valor médio da deformabilidade do maciço rochoso na zona ensaiada, que, provavelmente, apresentará, ainda, um valor médio inferior.

Efectuaram-se comparações de resultados de ensaios in situ, tendo sido encontradas correlações razoáveis entre os vários módulos de deformabilidade. Na Figura 14, comparam-se os módulos de deformabilidade D, onde estão representados os pares de valores obtidos com o ensaio de placa rígida com 30cm de diâmetro versus resultados dos correspondentes módulos em ensaios pressiométricos ( $D_{30}/D_d$ ), os pares de valores com o ensaio de placa rígida de 60cm de diâmetro versus ensaios pressiométricos ( $D_{60}/D_d$ ) e os pares de valores com ensaio de placa rígida de 60cm de diâmetro versus ensaios com placa de 30cm de diâmetro ( $D_{60}/D_{30}$ ). Foram ajustadas rectas de regressão, tendo sido obtidas as seguintes correlações:

$$\begin{aligned}
 D_{30} &= 1,12 D_d \\
 D_{60} &= 2,00 D_d \\
 D_{60} &= 1,61 D_{30}
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

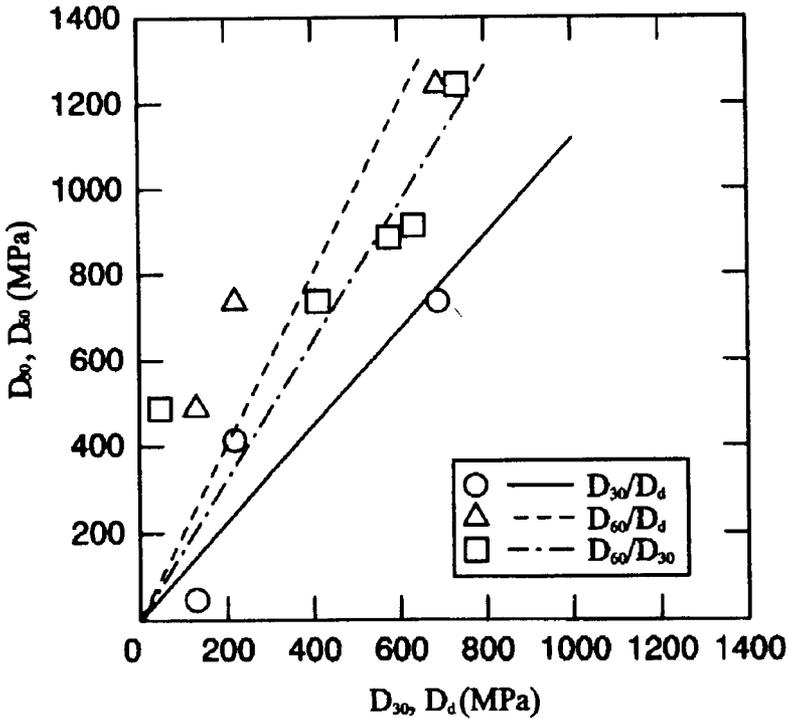


Figura 14 - Comparação entre módulos de deformabilidade D

Na Figura 15, comparam-se os módulos de deformabilidade tangencial  $E_t$ , utilizando os correspondentes pares de valores referidos na Figura anterior. As correlações calculadas para este módulo de deformabilidade foram as seguintes:

$$\begin{aligned}
 E_{t30} &= 0,86 E_{td} \\
 E_{t60} &= 1,21 E_{td} \\
 E_{t60} &= 1,34 E_{t30}
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

## 5 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

### 5.1 - Efeito de escala

Os maciços rochosos podem ser, em geral, descritos como meios não homogêneos e descontínuos, em que as suas propriedades mecânicas dependem quer do material rochoso, quer das superfícies de descontinuidade que o compartimentam. Contudo, em casos extremos de maciços rochosos muito deformáveis, como foi o caso estudado da fundação de uma barragem de enrocamento, a influência das superfícies de descontinuidade nas propriedades mecânicas do maciço rochoso, como por exemplo a deformabilidade e a resistência, não é tão relevante, sendo determinante a heterogeneidade do maciço (Rodrigues, 1983).

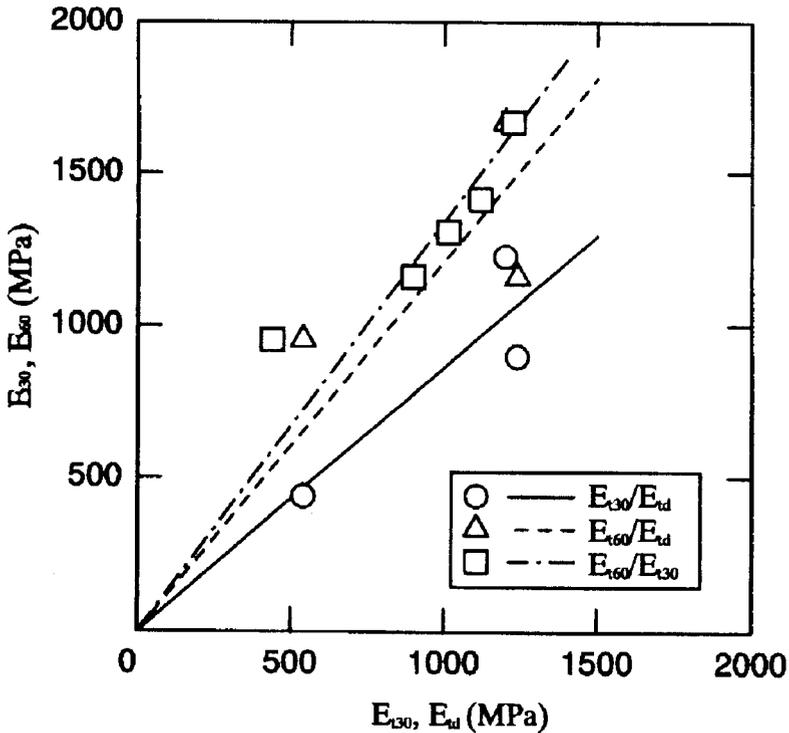


Figura 15 - Comparação entre módulos de deformabilidade  $E_i$

Assim, devido à natureza heterogênea e descontínua dos maciços rochosos, a avaliação das suas características mecânicas é influenciada pela dimensão dos volumes ensaiados. Os problemas levantados pela insuficiência dos volumes de ensaio foram analisados no âmbito da Comissão sobre Efeito de Escala da Sociedade Internacional de Mecânica das Rochas.

Nas secções precedentes, foram analisadas diferentes técnicas para determinação dos parâmetros característicos da deformabilidade dos maciços rochosos. De acordo com a experiência do LNEC (Cunha e Muralha, 1990), é possível ter uma ideia aproximada dos volumes de ensaio envolvidos em cada tipo de ensaio e, por consequência, saber qual o tipo de ensaio mais representativo do meio em análise uma vez conhecido o volume físico elementar representativo do maciço (conceito de volume REV), isto é, o volume de maciço para o qual a aproximação de meio contínuo pode ser adoptada. No Quadro 5, indicam-se volumes associados, em regra, a cada tipo de ensaio.

O problema fundamental de efeito de escala na determinação da deformabilidade foi referido nas Considerações Iniciais. Se for utilizada uma localização aleatória para os locais de ensaio, os resultados devem apresentar o mesmo valor médio caso o número de ensaios seja suficiente e a sua interpretação seja adequada. Os resultados a pequena escala apresentam, no entanto, maior variabilidade nos módulos de deformabilidade que os ensaios a grande escala. Por consequência, devem ser realizados em maior número para compensar a sua variabilidade. Contudo, em grande número de casos e tendo presente considerações do lado da segurança, os ensaios são realizados em zonas do maciço onde se esperam valores mais baixos para a deformabilidade, o que explica a obtenção, em certas situações, de valores mais baixos da deformabilidade para ensaios a pequena escala, quando comparados com correspondentes ensaios a maior escala.

Quadro 5 – Volumes envolvidos em ensaios de deformabilidade

Tipo de Ensaio	Volume ensaiado (m <sup>3</sup> )	Observações
Deformabilidade em amostras de rocha	$\approx 20 \times 10^{-3}$	-
Ensaio SFJ (Small Flat Jack)	$\approx 50 \times 10^{-3}$	depende da profundidade do rasgo
Ensaio STT (Stress Tensor Tube)	$\approx 10^{-2}$	-
Ensaio dilatométricos	0,5-1	-
Ensaio de carga com placa	0.2-5	depende do diâmetro da placa
Ensaio LFJ (Large Flat Jack)	10-30	depende do número de rasgos

Quando se trata de fundações de barragens em maciços rochosos, os problemas de segurança dizem, também, respeito a problemas de resistência. A principal diferença neste caso, quando comparados com a deformabilidade da fundação, reside no facto de que o comportamento do maciço rochoso depende, no essencial, das propriedades dos elementos mais fracos, enquanto que a deformabilidade depende da contribuição dada por todos os elementos (Grossmann, 1993). Então, de acordo com as leis da estatística, reconhece-se que, em regra, quanto maior as dimensões de ensaio, menos resistente pode o maciço rochoso vir a ser.

## 5.2 - Metodologia a adoptar para determinação da deformabilidade

Devido aos custos elevados, o número de ensaios *in situ* a grande escala é mantido em numerosas situações num valor mínimo, verificando-se mesmo que o número de ensaios *in situ* a pequena escala e ensaios laboratoriais é reduzido, por vezes abaixo de um nível que pode ser considerado como razoável. Assim, o conhecimento das propriedades da deformabilidade do maciço rochoso é, em regra, afectado por uma amostragem inadequada. Como consequência, uma análise estatística dos resultados da deformabilidade não pode ser efectuada devido a um número insuficiente de dados, e, por vezes, a uma localização dos ensaios longe de um processo de escolha aleatório.

Isto significa que deve ser adoptada uma metodologia adequada para determinação da deformabilidade de um maciço rochoso de fundação, de modo a que se obtenham conclusões sólidas acerca da deformabilidade destes meios (Graça, 1980).

Devido a estas dificuldades, pode ser escolhida a seguinte metodologia para avaliação da deformabilidade de um maciço rochoso de fundação:

### i) Zonamento do maciço rochoso

A primeira fase consiste em efectuar um zonamento da fundação rochosa, tendo em consideração a informação geológica disponível, o tipo de formação rochosa e o seu grau de alteração e o sistema de compartimentação do maciço. Cada zona pode ser considerada como homogénea e os seus parâmetros de deformabilidade serão avaliados, principalmente, por intermédio de ensaios *in situ*.

## ii) Ensaio de deformabilidade a pequena escala

Em cada zona, devem ser efectuados vários furos de sondagem de forma a ser possível amostrar o maciço e possibilitar a execução de alguns ensaios de deformabilidade nos referidos furos, para diferentes profundidades, sem um aumento significativo no custo nos trabalhos de caracterização geotécnica. Os ensaios em furos, dilatométricos ou pressiométricos, devem ser conduzidos num número significativo de casos, em regra mais de 10 para cada zona geotécnica. A distribuição desses ensaios deve obedecer a dois critérios distintos: os ensaios podem ser conduzidos de uma forma aleatória de forma a obter-se um valor médio significativo; ou os ensaios podem ser efectuados em locais onde se espera obter valores de módulos de deformabilidade mais baixos para o maciço rochoso. Na interpretação dos resultados, deve-se, pois, ter presente o critério utilizado para a sua localização.

## iii) Ensaio de deformabilidade a grande escala

Os ensaios a grande escala serão efectuados de acordo com os valores médios obtidos em cada zona. Assim, é possível distinguir três situações, conforme se ilustra no Quadro 6. Para a situação III, que representa o caso de maciços rochosos com grande deformabilidade, é necessário executar ensaios a grande escala, com grande precisão, envolvendo um volume de ensaio da ordem do volume REV. Para a situação II, de deformabilidade média, estes ensaios são considerados necessários, enquanto que, para a situação I, maciços de baixa deformabilidade, os ensaios a grande escala são apenas considerados recomendáveis. No mesmo volume onde se efectuam os ensaios a grande escala, devem ser planeados ensaios a pequena escala, em regra em furos de sondagem. Os resultados obtidos pelos ensaios a pequena escala e a grande escala devem ser correlacionados para cada zona do maciço rochoso, considerada como homogénea, de forma a permitir que os resultados dos ensaios a pequena escala possam posteriormente vir a ser corrigidos do correspondente factor obtido.

Quadro 6 – Ensaio a grande escala para avaliação da deformabilidade

Situação	E (MPa)	Ensaio a grande escala
I	$E \geq 10\,000$	aconselháveis
II	$5\,000 \leq E < 10\,000$	necessários
III	$100 \leq E < 5\,000$	necessários com grande precisão

### 5.3 - Interpretação de resultados na fundação de uma barragem de enrocamento

No caso da fundação de uma barragem de enrocamento, foi obtido um importante efeito de escala no que respeita à deformabilidade do maciço rochoso, que resultou principalmente do facto da escolha dos locais de ensaio obedecer a critérios de localização do lado da segurança e não a critérios de escolha aleatória. Os resultados obtidos com ensaios de carga com placa de 60cm de diâmetro parecem ser mais adequados do que os resultados de ensaio com placa de menor dimensão, sendo por conseguinte mais próximos do valor real da deformabilidade média do maciço rochoso. Contudo, de acordo com a informação geotécnica disponível, não é possível dizer que estes resultados estão associados a um volume para além do volume físico elementar do maciço.

Considerando que estes ensaios *in situ* são representativos da deformabilidade do maciço rochoso, ou considerando outros ensaios efectuados a uma escala maior, é possível aplicar a metodologia proposta na secção anterior (5.2).

Assumindo, então, as correlações determinadas entre os módulos de deformabilidade obtidos com placas de maior de dimensão e os correspondentes ensaios pressiométricos ( $D_{60}=2,00D_d$  e  $E_{t60}=1,21E_{td}$ ), é possível corrigir os valores obtidos pelos ensaios pressiométricos executados para a zona CL. Assim, o valor médio obtido para os módulos de deformabilidade será inferior, isto é,  $D=494\text{MPa}$  e  $E_t=883\text{MPa}$ , do que os valores médios obtidos com os ensaios de placa de grande dimensão. Para as outras zonas, CM e CH em tufos lapilli, não é possível aplicar as correlações obtidas porque dizem respeito a aglomerados. Daí que, de forma a ser possível uma melhor caracterização do maciço rochoso, deveriam ter sido executados, nestas zonas, ensaios de deformabilidade a grande escala e ensaios em furos de sondagem no mesmo local, de forma a ser possível estabelecer correlações entre os dois tipos de ensaios nesta formação rochosa.

## 6 -AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao PWRI – Public Works Research Institute, Tsukuba, Japão, autorização para permitirem a publicação de resultados de ensaio referentes ao estudo da fundação de uma barragem de enrocamento.

O presente trabalho foi financeiramente apoiado pelo projecto de investigação PRAXIS/2/2.1/CEG/42/94 – “Geotecnia nas Infra-estruturas de Transporte e Energia. Novos Desenvolvimentos”, subsidiado pelo Programa PRAXIS XXI.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BRIAUD, J.L. – *The Pressumeter*. Ed. Balkema, Roterdão, 1992.
- CASTRO, A.T.; LEMOS, J.V.; PINA, C. e SILVA, H.H. – *Identification of the deformability of an arch dam*. Simpósio Internacional da ISRM EUROCK'93, Lisboa, 1993.
- CASTRO, A.T. e SOUSA, L.R. – *Interpretation of the monitored behaviour of a large underground powerhouse using back-analysis techniques*. Conferência Intenacional sobre 'Engineering Mechanics Today', Hanoi, 1995.
- CUNHA, A.P. e MURALHA, J. – *Scale effects in the mechanical behaviour of joints and rock masses*. LNEC, Memória nº 763, Lisboa, 1990.
- GRAÇA, J.C.- *O ensaio dilatométrico e a deformabilidade de maciços rochosos*. LNEC, Relatório, 1980.
- GROSSMANN, N.F. – *New developments in the situ determination of rock mass parameters*. LNEC, Curso sobre 'Dam Foundations in Rock Masses', Lisboa, 1993.
- LAMAS, L.N. – *Contributions to understanding the hydromechanical behaviour of pressure tunnels*. Tese de Doutoramento, Imperial College, Londres, 1993.
- MARTINS, C.S. – *Contribuição para o estudo de estruturas subterrâneas associadas a empreendimentos hidroeléctricos*. LNEC. Tese para Especialista, Lisboa, 1985.
- MARTINS, C.S. e SOUSA, L.R. – *Recent advances in the interpretation of the small flat jack method*. 6º Congresso da ISRM, Montreal, 1987.
- PINTO, J.L. – *Determination of the deformability modulus of weak rock masses by means of large flat jacks (LFJ)*. Simpósio Internacional da ISRM sobre 'Weak Rocks', Tóquio, 1981.
- PINTO, J.L. – *Deformabilidade dos maciços rochosos. Síntese dos conhecimentos actuais*. LNEC, Relatório, 1985.

- PINTO, J.L. – *Determination of the deformability and state of stress in rock masses*. Simpósio Internacional da ISRM EUROCK'93, Lisboa, 1993.
- RIVER BUREAU – *Manual for river works in Japan*. Design of dams. Minister of Construction, Tóquio, 1986.
- ROCHA, M. – *Mecânica das Rochas*. LNEC, Lisboa, 1981.
- RODRIGUES, J.P. – *Desenvolvimentos recentes no domínio da Mecânica das Rochas*. LNEC, Curso especializado, Lisboa, 1983.
- OHYA, S.; IMAI, T. e NAGURA, M. – *Recent developments in pressurimeter testing, in-situ stress measurement and s-wave velocity measurement*. Simpósio Internacional sobre 'Recent Developments in Laboratory and Field Tests and Analysis of Geotechnical Problems', Banguécoque, 1986.
- SOUSA, L.R. – *Observação das obras de reforço de potência do escalão de Miranda*. *Ensaio de caracterização geotécnica do maciço rochoso*. LNEC, Relatório, 1994.
- WITTKÉ, W. – *Rock Mechanics. Theory and applications with case histories*. Ed. Springer-Verlag, Berlim, 1990.