

O ENSAIO DILATOMÉTRICO NO ESTUDO DA DEFORMABILIDADE DOS MACIÇOS ROCHOSOS*

Dilatometer Tests in the Study of Deformability of Rock Masses

por

JOSÉ GABRIEL CHARRUA GRAÇA**

RESUMO — Os ensaios com o dilatômetro dão resultados diferentes dos obtidos com outros ensaios, geralmente inferiores. Apontam-se as razões destas diferenças e sugere-se um método de realização do ensaio de molde a obter melhores resultados. Foca-se sobretudo o estudo de maciços de rocha fraca.

SYNOPSIS — Dilatometer tests give different results, usually lower than those obtained with other tests. The reasons for these differences are pointed out and a method in order to make the best use of such tests is suggested. Special reference is made to the study of weak rock masses.

O dilatômetro (BHD), Fig. 1. já descrito em numerosas publicações, é um aparelho projectado e construído pelo LNEC para ensaios de deformabilidade em furos de sondagem NX, cujo diâmetro pertença ao intervalo 75 a 81 mm.

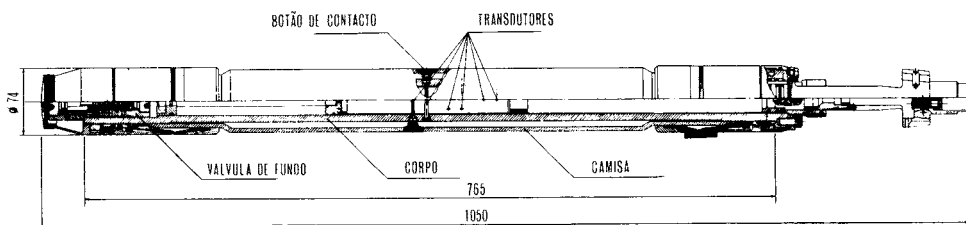


Fig. 1

* Trabalho elaborado com base numa comunicação ao 4.º Congresso da S.I.M.R. - 1979.

** Engenheiro Civil, Especialista do Núcleo de Fundações Rochosas do LNEC.

É constituído, na sua essência, por uma camisa cilíndrica de borracha — que se adapta ao furo de sondagem e carrega as paredes na região cuja deformabilidade interessa apreciar — e por um sistema eléctrico de medição de deformações, este último influenciado por palpadores fixos na camisa e em contacto com a parede do furo. A camisa envolve um cilindro metálico, muito rígido, ao qual se fixa pelas extremidade e é no interior deste cilindro que se situa o sistema eléctrico de medição.

Introduzindo água, sob pressão conhecida, no espaço limitado pelas superfícies exterior do cilindro e interior da camisa, provoca-se a deformação do maciço rochoso, na zona circundante. A maior dimensão da camisa foi estabelecida por forma que, na sua zona central, a deformação introduzida não se afaste, sensivelmente, da que seria observada num furo, totalmente carregado, atravessando um espaço não limitado. Tal deformação é acompanhada pela camisa e pelos palpadores que lhe são solidários, deslocando estes, consigo, núcleos de transdutores diferenciais de indução os quais constituem as extremidades sensoras do circuito eléctrico.

Os palpadores, em número de oito, encontram-se centrados em geratrizes da camisa, desfasadas de 45° entre si, localizando-se numa banda central do dilatómetro, por forma a que as medições correspondam, com bastante rigor, a um estado plano de deformação.

O emprego do ensaio dilatométrico tem-se generalizado rapidamente pela sua executabilidade mesmo em locais de acesso difícil a outros tipos de ensaio, como por exemplo pontos a grandes profundidades, locais subjacentes a leitos de rios, etc.

Foram realizados nos últimos anos alguns milhares de ensaios contando-se por cerca de duas dezenas as grandes obras em que o estudo da deformabilidade das fundações assenta em parte importante neste tipo de ensaio.

O número elevado de ensaios realizados permite que se estabeleça um juízo de valor sobre o método e que se disponha de uma melhor perspectiva da sua utilização.

Verifica-se assim, que os valores dos resultados obtidos com dilatómetro são em regra inferiores aos dos resultados obtidos com outros métodos. Foi também observado que as relações entre aqueles valores, nomeadamente na comparação com os de “Large Flat Jacks”, variavam bastante com a formação rochosa envolvida, notando-se porém para cada formação uma boa correlação entre os resultados de diversos ensaios com ambos os métodos [1].

Na Fig. 2 em que se comparam resultados colhidos com dilatômetros (E_d) e com "Large Flat Jacks" (E_A) em diversos locais, podem observar-se aquelas correlações.

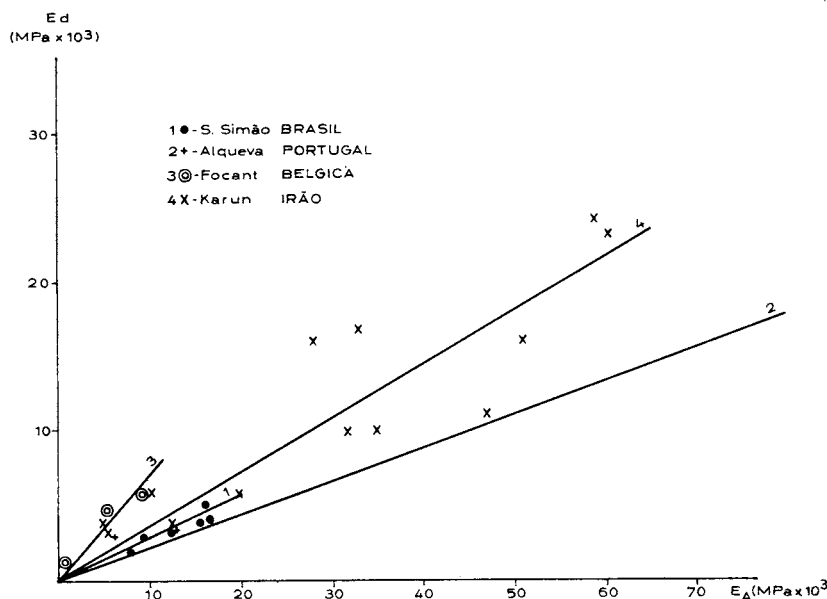


Fig. 2

Dado largos sectores técnicos ligados à problemática da mecânica das rochas não terem tido oportunidade de contacto com a experiência atrás referida, sucede que com frequência maior que desejável na programação dos trabalhos de caracterização da deformabilidade dos maciços se cometam erros que, mesmo se passíveis de correcção, acarretam em geral considerável agravamento do custo destes trabalhos, quando não originam uma informação bastante deformada. Assim, ocorrem programações que prevêem somente ensaios dilatométricos, que quando prevêem também outro tipo de ensaio não conjugam os dois tipos por forma a poder obter-se uma correlação entre os resultados de ambos, ou ainda dispõem em localização e número os ensaios de dilatômetro por forma menos feliz.

Julga-se que o esclarecimento das possibilidades e limitações do ensaio dilatométrico poderia contribuir para uma diminuição da frequência de deficiências na programação ou atenuar a sua gravidade.

2 — MÓDULO DILATOMÉTRICO

A constatação de que os resultados obtidos no ensaio dilatométrico diferiam dos obtidos por outros métodos levou a que se considerasse este resultado como um índice de qualidade [1] a que, para evitar naturais confusões, se vem designando cada vez mais frequentemente por módulo dilatométrico.

As razões da diferença dos resultados, que residem no próprio tipo de ensaio, podem sintetizar-se em duas principais.

2.1 — *Estado de tensão instalado pelo ensaio*

A generalidade dos ensaios de deformabilidade (Jacks, Large Flat Jacks) impõe ao maciço um estado triaxial de compressão que de certa forma se pode tomar como um ensaio em modelo reduzido. O ensaio dilatométrico instala uma compressão na direcção radial do furo, uma tracção da mesma ordem de grandeza na direcção normal a esta e existente no plano normal ao eixo do furo, e uma terceira tensão geralmente desprezável na direcção normal às duas anteriores. Caso se admita um comportamento aproximadamente linear do meio, a última tensão tornar-se-á nula tendo as outras duas valores absolutos iguais entre si.

Evidentemente que estados de tensão tão diferentes, como os aplicados pelos dois tipos de ensaio, originam num meio que não pode ser considerado de comportamento linear respostas diversas.

No entanto, mesmo que se considere o comportamento como linear, a tensão de tracção introduzida pelo ensaio dilatométrico poderá originar roturas que se desenvolverão em planos passando pelo eixo do furo e que originarão um acréscimo da deformação medida.

O problema desta fracturação foi estudado [1] [4] tendo-se obtido expressões que permitem corrigir o efeito referido, tendo em consideração a resistência à tracção da rocha constituinte. Admitiu-se para a obtenção destas expressões que sucessivas roturas radiais se processariam. Tal conceito parece pessimista, pois cálculos efectuados [1] mostram que após uma primeira fractura, e uma segunda aproximadamente normal, é improvável o aparecimento duma terceira bissectando-as, pois a redução entretanto verificada na tensão máxima de tracção é da ordem dos 80%. Assim mesmo podem observar-se deformações, no furo, da ordem do triplo das que seriam observadas se não existissem as fracturas.

Na Fig. 3 pode observar-se o efeito destas roturas. Na parte superior da figura podem ver-se as distribuições das tracções na parede do furo sujeito a uma pressão p , respectivamente no caso de não haver roturas (curva I), da existência duma rotura no plano OY com um desenvolvimento igual ao diâmetro do furo (curva II) e finalmente no caso de além da rotura anterior se produzir no plano OX uma segunda rotura de desenvolvimento também igual ao diâmetro do furo (curva III). Na parte inferior desta figura representa-se o aumento relativo de deformações com o desenvolvimento das roturas, expresso em diâmetros do furo, no caso de uma única (curva II) e de duas (curvas III) roturas.

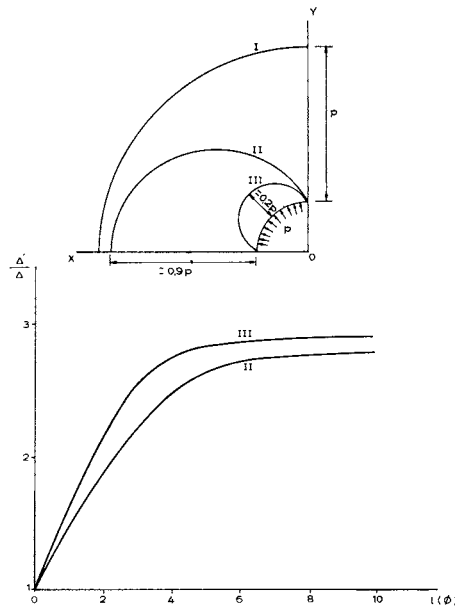


Fig. 3

2.2 — Diaclasamento do maciço

O efeito da fracturação existente no maciço não se fez sentir de forma uniforme nos diferentes tipos de ensaio.

Considerando que o diaclasamento dos maciços rochosos apresenta uma lei de distribuição de espaçamentos do tipo exponencial [2] e que a influência da existência de uma descontinuidade a uma certa distância da superfície carregada

se pode definir como aumento relativo do deslocamento da superfície através de uma lei hiperbólica que tem como um dos parâmetros a distância da descontinuidade à superfície carregada expressa na dimensão da superfície carregada, a esperança matemática do resultado do ensaio será o integral do produto das duas referidas leis. A existência do parâmetro referido traduz-se num tipo de efeito de escala que portanto diferencia ensaios interessando volumes de dimensão diversa.

Note-se ainda que um ensaio dilatométrico será essencialmente influenciado por toda a fracturação de orientação paralela ao eixo do furo enquanto num ensaio em que se proceda à carga duma superfície plana tem influência decisiva apenas a fracturação subparalela a essa superfície.

3 — CONVERSÃO DO MÓDULO DILATOMÉTRICO EM MÓDULO DE DEFORMABILIDADE

Conhecidos os factores expressos anteriormente é teoricamente possível transformar os resultados obtidos com o dilatômetro em valores correspondentes aos que se obteriam por meio de um ensaio de tipo diferente.

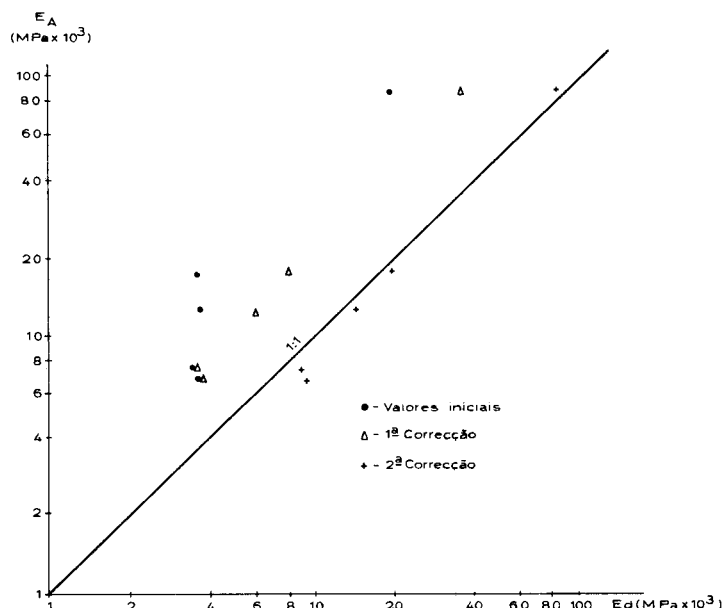


Fig. 4

Foi experimentada tal transformação em relação aos resultados observados no local da fundação da futura barragem de Alqueva em Portugal. Na Fig. 4 são apresentados os valores obtidos em vários pontos dessa fundação, com dilatômetro (Ed). Submetidos os valores obtidos pelo dilatômetro a duas sucessivas correções, a primeira tendo em atenção a influência do diaclasamento e a segunda o efeito de fracturação introduzido pelo ensaio, pode observar-se que se obteve uma boa equivalência entre os resultados obtidos pelos dois métodos.

Deve no entanto referir-se que este estudo [1] só foi possível por se dispor de uma vasta informação sobre a compartimentação do maciço baseada em amostras integrais, que permitiu estabelecer, com boa versosimilhança, as leis de distribuição das fracturas. Além disso, sendo a compartimentação bem definida foi possível isolar a influência das diferentes famílias de diaclases, e por fim, dispôs-se de uma razoável série de ensaios dos dois tipos, executados nos mesmos locais.

Não se pensa no entanto que seja esta via a aconselhável na generalidade dos casos, e o seu interesse reside essencialmente na confirmação dos conceitos atrás referidos. Crê-se que a via mais promissora será não uma melhor elaboração dos resultados dos ensaios com dilatômetro, mas uma política mais consequente da sua utilização.

4 — ESTRATÉGIA DE APLICAÇÃO DO DILATÓMETRO

O primeiro ponto que deve ser tido em consideração quando se programa a utilização do dilatômetro é que os valores dos resultados têm normalmente uma grande dispersão por o volume interessado no ensaio ser em geral muito pequeno à escala da heterogeneidade dos maciços. Em consequência dificilmente se poderá caracterizar mesmo qualitativamente, com um número reduzido de ensaios, uma zona considerada homogênea à escala da obra.

O número mínimo de ensaios a realizar depende portanto do grau de heterogeneidade do maciço em relação ao volume interessado no ensaio.

Como se tem verificado que o conjunto de resultados de ensaios conduzidos numa zona é bem representado por uma lei de distribuição do tipo lognormal, é possível, a partir de um número de ensaios da ordem da dezena, concluir se a dispersão dos seus valores é ou não aceitável.

Recomenda-se como método prático deste juízo o cálculo da distribuição lognormal mais provável e a aplicação de um teste de significância como por exemplo o de Kolmogorov-Smirnov. No caso de não aceitabilidade para um dado

nível de confiança deve aumentar-se o número de ensaios ou admitir que a zona em estudo não pode ser considerada globalmente como homogênea, por ser constituída, por exemplo, por zonas litologicamente distintas.

4.1 — *Zonamento do maciço rochoso*

A primeira fase da caracterização da deformabilidade corresponde ao zonamento do maciço [1], isto é, a uma divisão em zonas que se admitem diferenciadas em face da informação geológica disponível, pelo tipo de rocha ocorrente, pelo seu grau de alteração e sua fracturação. É preferível de início considerar um maior número de zonas e posteriormente verificar que várias delas pertencem ao mesmo domínio de deformabilidade, que o inverso, pois no primeiro caso toda a informação colhida pelo dilatômetro é integrável e não implica nova série de ensaios, o que poderá ocorrer na segunda hipótese.

Estabelecido portanto um primeiro zonamento, convém distribuir por cada zona considerada um número da ordem da dezena de ensaios com dilatômetro, utilizando os furos de sondagem executados para prospecção, no caso de se ter operado com os cuidados indispensáveis. Regra geral, os furos de sondagem são abertos sem grandes cuidados no que respeita a diâmetros externos e torna-se necessária a abertura de novos furos para o ensaio com dilatômetro o que constitui um agravamento de custos evitável.

Como caso que se considera exemplar de uma boa distribuição de ensaios pelas diversas zonas pode apontar-se o estudo efectuado na Rodovia dos Imigrantes (Brasil) em que se definiram 5 tipos característicos de terreno do ponto de vista de deformabilidade.

Rocha sã — (RS) — sem sinais visíveis de alteração

Rocha alterada dura — (RAD) — ligeiramente alterada, quebrável só com martelo

Rocha alterada mole — (RAM) — comunível manualmente

Solo de alteração — (S) — solo evidenciando ainda a estrutura original

Solo coluvial — solo sem coesão, transportado e depositado no local.

Previram-se cerca de duas dezenas de ensaios para cada um dos quatro primeiros tipos de terreno. Iniciados os ensaios, verificou-se que no solo de alteração se obtinham resultados muito semelhantes pelo que se admitiu como suficiente um número de ensaios inferior à dezena. Para a rocha sã a homogeneidade dos resultados levou a que se diminuísse em 50% o número de ensaios previstos,

observando-se a necessidade de aumentar o número em RAD devido à elevada dispersão dos resultados.

Após várias adaptações do programa inicial, em face dos resultados que se iam colhendo, e só possíveis devido à flexibilidade com que aquele programa fora estabelecido, distribuíram-se os ensaios pela seguinte forma

	S	RAM	RAD	RS
N.º de ensaios	8	21	44	10
% total	10	25	53	12

Dentro de cada zona a distribuição dos ensaios pode obedecer a duas ópticas distintas. Ou é feita de forma aleatória para obtenção de uma amostragem significativa da média, ou sistematicamente se ensaiam os locais que evidenciam piores características através dos testemunhos das sondagens. Ambas as hipóteses parecem aceitáveis, desde que na interpretação dos resultados se tenha em atenção o critério que presidiu à implantação dos ensaios.

A análise dos resultados dos ensaios com dilatómetro, sob a perspectiva de zonamento deve focar os dois aspectos principais.

- a) verificação da boa adaptabilidade, em cada zona, da distribuição dos valores dos resultados a uma lei lognormal
- b) verificação da possibilidade de adopção de lei com idênticos parâmetros a mais de uma zona. Este caso seria indicativo da possibilidade de agrupamento das zonas em causa.

4.2 — *Caracterização da deformabilidade de cada zona*

Para esta caracterização é o parâmetro valor médio da distribuição dos módulos dilatométricos na zona que tem principal importância.

Tendo em consideração a gama de coeficientes de correlação entre módulos dilatométricos e módulos de deformabilidade que tem sido observada, e a importância dos módulos de deformabilidade dos maciços rochosos no comportamento

das obras neles fundadas, em especial barragens [7], podem estabelecer-se as seguintes categorias de zonas do ponto de vista de deformabilidade.

I — Zonas em que o valor médio do módulo dilatométrico é superior a 1000 MPa

II — Zonas em que o valor médio se situa entre 5000 a 10000 MPa

III — Zonas em que o valor médio se situa entre 1000 a 5000 MPa

IV — Zonas em que o valor médio é inferior a 1000 MPa.

As zonas correspondentes à classificação I são zonas de muito boa qualidade em que em geral não se torna necessária a execução de ensaios interessando grandes volumes, pois embora não se tenha um conhecimento preciso da deformabilidade pode admitir-se que a sua influência no comportamento da estrutura é de importância reduzida.

As zonas correspondentes à classificação II já apresentam interesse numa mais cuidada caracterização, principalmente do ponto de vista de um limite superior de deformabilidade aceitado com certa probabilidade, pois existe a possibilidade de entrada na banda dos módulos de deformabilidade inferiores a 1/4 dos do betão da estrutura.

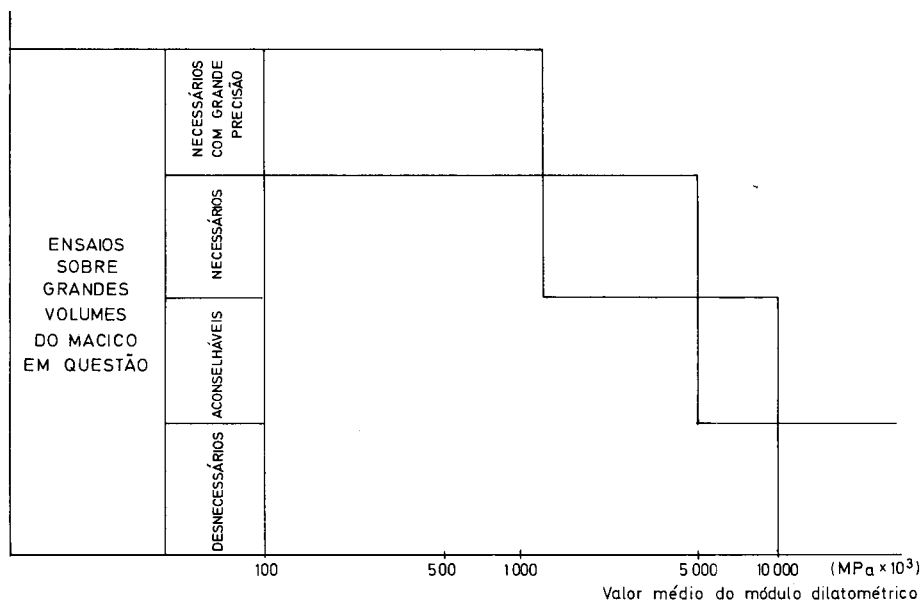


Fig. 5

Nas zonas correspondentes às classificações III e IV é de grande importância a atribuição correcta dum valor de módulo de deformabilidade, pelo que é indispensável a realização de ensaios envolvendo grandes volumes do maciço, exigindo mesmo a zona IV precisões elevadas na determinação pois os resultados têm importância decisiva.

A Fig. 5 ilustra as afirmações dos parágrafos anteriores.

Realizados os ensaios sobre grandes volumes, por natureza bons caracterizadores do módulo de deformabilidade, ainda os resultados obtidos com dilatómetro na fase de zonamento, porventura completados com nova série de ensaios distribuídos pela zona em causa quando tal for julgado necessário, deverão prestar valiosa informação sobre a validade de atribuição a toda a zona do valor encontrado pelos ensaios em grandes volumes.

Para tal, torna-se necessária a execução de pequeno número de ensaios dilatométricos (6 a 9) em locais no interior do volume afectado pelo bolbo de pressões dos ensaios sobre grandes volumes. Os resultados ali colhidos pelos dois métodos poderão ser directamente correlacionados, o que permitirá por extrapolação a todos os outros locais de ensaio dilatométrico na zona em estudo, verificar da representatividade do valor atribuído.

5 — UTILIZAÇÃO DO DILATÓMETRO EM MACIÇOS MUITO ALTERADOS

Em maciços muito alterados, um dos casos em que a necessidade da caracterização concreta das características de deformabilidade é mais premente os resultados obtidos com dilatómetro revestem-se de um significado ainda mais importante pois verifica-se que se aproximam mais do valor real do maciço.

Na Fig. 6 encontram-se representadas as correlações E_d/E_A em função de E_A para alguns locais, tendo-se tido o cuidado de quando se tratava de maciços com características anisotrópicas, se terem comparado módulos nas mesmas direcções não obstante o erro envolvido [1]. Como se pode ver na figura a relação que atinge cerca de 5 para um maciço de muito boa qualidade, decresce para valores muito próximos de 1 quando a qualidade do maciço baixa muito.

Deve-se no entanto observar que a aproximação da relação do valor unitário é mais acentuada nos maciços em que a baixa qualidade é devida essencialmente à má qualidade da rocha do que a intensa fracturação. Na realidade tem-se observado que a intensidade da fracturação provoca essencialmente um aumento da

dispersão dos resultados do dilatômetro, enquanto a alteração pelo contrário atenua esta dispersão e aproxima os resultados dos obtidos por outros métodos aplicados a grandes áreas como por exemplo os de LFJ.

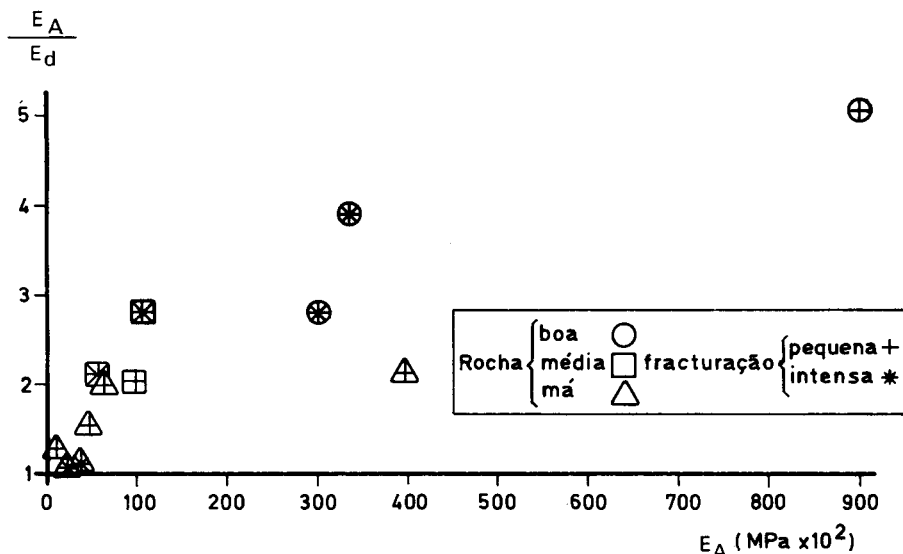


Fig. 6

6 — CONSIDERAÇÕES FINAIS

As características específicas do ensaio dilatométrico implicam na sua programação e na interpretação dos seus resultados alguns cuidados que por vezes não são observados.

É, assim, indispensável uma interpretação estatística dos resultados, carecendo de sentido uma análise individual de cada ensaio. Em consequência, um número muito reduzido de ensaios poderá conduzir a uma informação de muito má qualidade. Mesmo recorrendo à utilização da estatística dos pequenos números só será em geral possível o estabelecimento de bandas de confiança tão excessivamente largas que serão na prática inutilizáveis. É além disso aconselhável uma certa flexibilidade na programação por forma a que em qualquer ocasião a meio duma campanha se possa proceder à sua reformulação, em face dos resultados já obtidos, no sentido de se obter o tipo de informação mais conveniente.

Refira-se finalmente, que ensaios conduzidos em condições diversificadas ou em meios estranhos, como furos com bentonite, dificilmente poderão inserir-se numa análise de conjunto como a que se reputa indispensável para este tipo de ensaios.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- [1] CHARRUA-GRAÇA, J. G. — Estudo da deformabilidade dos maciços rochosos com dilatómetro, LNEC-1974.
- [2] CHARRUA-GRAÇA, J. G. — Dimensional characteristics of the system of fractures of the Portuguese mainland — III Int. Congr. of Int. Assoc. of Eng. Geolog., Madrid-1978.
- [3] HEUZE, F. E. — The design of room and pillar structures in competent jointed rock, Univ. Califórnia — Berkeley-1970.
- [4] ROCHA, M. and al. — Determination of the deformability of rock masses along boreholes — Mem. LNEC—1969.
- [5] ROCHA, M. — Mecânica das Rochas — LNEC-1971.
- [6] ROCHA, M. — Alguns problemas relativos à mecânica das rochas dos materiais de baixa resistência — Mem. — LNEC-1977.