

EFEITO DE ESCALA NA DETERMINAÇÃO DE CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS DE FRACTURAS E MACIÇOS ROCHOSOS FRACTURADOS *

Scale Effects in the Determination of Mechanical Properties of Joints and Rock Masses

por

A. PINTO DA CUNHA**

RESUMO — Sendo os maciços rochosos meios essencialmente heterogéneos e descontínuos, os resultados dos ensaios laboratoriais e in situ para determinação das suas características mecânicas evidenciam uma dependência das dimensões dos volumes ensaiados, que se designa por efeito de escala.

Na comunicação são analisados, do ponto de vista do efeito de escala, elementos relativos à caracterização mecânica de descontinuidades e de maciços rochosos, correspondentes a diferentes locais, visando-se o estabelecimento de leis empíricas relacionando os resultados de ensaios a diferentes escalas.

ABSTRACT — Rock masses are essentially inhomogeneous and discontinuous media. Hence, the results of the laboratory and in situ tests for the determination of its mechanical properties show a dependency on the specimen size which is called scale effect.

The Scale Effect concept is presented with a few clarifying remarks. Attention is drawn on factors that may disturb the understanding of actual scale effects, like sampling bias or disturbances, and the change of testing techniques, load conditions and sample geometries.

Data regarding the determination of rock, joint and rock mass mechanical properties for different rock engineering projects are reviewed from the point of view of the influence of the sample size on the determination of the deformability and strength properties (mean values and scattering parameters). Attempts to establish significant site specific links among results at different scales are made as well.

1 — O CONCEITO DE EFEITO DE ESCALA

Os maciços rochosos são meios essencialmente descontínuos e heterogéneos. As descontinuidades são uma realidade que se inicia à escala das microfissuras inter e intracristalinas e que se continua à escala macroscópica, fundamentalmente por diaclases e falhas, das mais variadas dimensões.

A heterogeneidade é um conceito que resume a variação aleatória do número, dimensão, propriedades e distribuição espacial dos diferentes elementos minerais no seio da massa rochosa.

* Versão portuguesa do trabalho apresentado ao 7.º Congresso da Sociedade Internacional de Mecânica das Rochas, Aachen, 1991.

** Eng.º Civil, Investigador Principal do LNEC.

Em sentido lato, e à escala dos maciços rochosos, a heterogeneidade pode ser sinónimo não apenas de variações litológicas mas também de modificações da intensidade de fracturação ou do grau de alteração.

Como consequência de tal natureza descontínua e heterogénea, quando se efectuam ensaios com vista à determinação das propriedades dos maciços rochosos, e à medida que o volume envolvido aumenta, tais ensaios passam a interessar sucessivamente a rocha intacta, a rocha fissurada e o próprio maciço rochoso fracturado. Mesmo que os ensaios sejam teoricamente homotéticos e respeitem as mesmas formações, os seus resultados deverão naturalmente ser diferentes, por envolverem diferentes padrões de heterogeneidade e fracturação. Uma variação dos valores médios e ou da dispersão desses resultados com a dimensão dos volumes ensaiados deverá consequentemente ser registada.

Com efeito, tem sido experimentalmente verificado que amostras geometricamente homotéticas da mesma rocha, descontinuidade ou maciço rochoso, quando sujeitas a solicitações respeitando as mesmas condições de semelhança, apresentam características que não são constantes, mas função do volume ensaiado. Tal variação é designada efeito de escala. Mais precisamente, conjuntos de amostras de um mesmo universo, com dimensões diferentes, apresentam distribuições estatísticas com parâmetros diferentes, para a mesma propriedade em análise (definição da Comissão sobre Efeitos de Escala da ISRM).

Uma definição de efeito de escala em termos essencialmente estatísticos nada tem de surpreendente, já que a própria Mecânica das Rochas é também ela uma disciplina fundamentalmente estatística, em que as propriedades dos materiais devem ser determinadas sobre um número suficiente de amostras e descritas por um valor médio ou valor mais provável e por medidas de dispersão, que definam a variação dos resultados em torno dos valores médios.

No que respeita aos potenciais efeitos de escala, a análise estatística pode ser afectada, na prática, por distorções e perturbações de amostragem, ou pela modificação das condições experimentais, no que respeita às técnicas de ensaio ou geometria das amostras. De facto, existe tendência para amostragem das zonas de pior qualidade dos maciços ou das menos inacessíveis e, por razões tecnológicas e económicas, o número de ensaios decresce, em regra, de forma notória, quando nos deslocamos da escala das amostras laboratoriais de rocha intacta ou de descontinuidades individuais para a dos ensaios "in situ" interessando volumes significativos do maciço rochoso (Cunha, 1990). Para complicar ainda mais as coisas, quer a deformabilidade quer os modos de ruptura dos maciços rochosos dependem não só das propriedades dos blocos (dimensão, fraquezas da rocha e características das juntas limítrofes) mas também dos níveis de tensão e da relação entre a escala da obra e a escala do bloco natural (Barton, 1990). Tais factos acentuam as dificuldades de seleccionar a escala apropriada dos ensaios para um dado problema e de extrapolar os resultados dos mesmos para a escala das obras executadas nos maciços rochosos (Bandis, 1990). A realidade da maior parte dos projectos é tal que apenas um muito pequeno número de ensaios de grande dimensão pode ser efectuado, e, apesar de todos os cuidados, difícil se torna garantir a sua representatividade face às variações espaciais das propriedades das formações rochosas. Esta variação pode mesmo verificar-se, em termos de heterogeneidade, a uma taxa superior àquela que uma campanha de ensaios devidamente programada e economicamente exequível permite acompanhar.

O problema fundamental consiste pois no estabelecimento de relações fiáveis entre os resultados dos ensaios a diferentes escalas, relativamente a cada maciço rochoso e cada propriedade. A importância de uma extrapolação correcta dos resultados de ensaios mais ou menos económicos e expeditos, sobre volumes reduzidos, para a escala do maciço real, heterogéneo e descontínuo — substituindo assim os coeficientes de segurança desconhecidos envolvidos no chamado julgamento correcto do engenheiro por um conhecimento probabilístico da representatividade dos ensaios a diferentes escalas —, não necessita de ser sublinhada (Cunha, 1990).

Convém todavia salientar, desde já, que uma análise de potenciais efeitos de escala exclusivamente baseada em valores médios, isto é, esquecendo a problemática da evolução das dispersões com a dimensão dos volumes ensaiados, peca por incompleta e pode conduzir a conclusões erradas. De facto, em vários casos existe evidência experimental de uma tendência decrescente de tal dispersão com o aumento do volume ensaiado, mesmo que os valores médios se não mostrem sensíveis à escala dos ensaios. Como consequência convirá que à medida que a dimensão dos volumes testados diminui, o número de ensaios a realizar aumente, a fim de garantir significado e fiabilidade equivalentes em termos de análise estatística.

Com base em estudos experimentais tem sido possível concluir que, para um dado maciço rochoso e, pelo menos para certas propriedades relevantes do mesmo, é possível a identificação de um volume para além do qual, em termos práticos, os resultados dos ensaios deixarão de ser afectados pela escala dos mesmos. Tal volume, o menor que pode ser considerado representativo, para uma dada propriedade, do comportamento do maciço rochoso, ou, por outras palavras, o menor volume intermutável de uma zona geotecnicamente homogénea, é designado por volume elementar representativo (REV). O REV deverá corresponder a volumes diferentes para propriedades diferentes, no mesmo maciço rochoso, e variar significativamente, em relação a uma dada propriedade, de maciço para maciço.

É oportuno comentar que pode parecer confuso escrever acerca de efeitos de escala em relação com propriedades dos materiais. Com efeito, em mecânica pura, uma verdadeira propriedade de um material deve ser independente das condições de ensaio, quaisquer que elas sejam: geometria da amostra, condições de carga, dimensão da amostra, etc. Não há todavia uma contradição insuperável entre a mecânica pura e a aplicada, no caso vertente a mecânica das rochas. Aqui, lida-se com materiais geotécnicos naturais, cujas características variam espacialmente. Os conceitos fundamentais da mecânica teórica têm de conservar-se, todavia, como vigas mestras de uma estrutura conceptual, embora algumas concessões de ordem prática hajam que ser feitas: uma propriedade, de natureza eminentemente pontual em mecânica teórica, tem de ser determinada sobre um volume de dimensão finita, o infinitesimal reconvertido num domínio macroscópico, as derivadas calculadas como diferenças finitas. Consequentemente, a hipótese de que as propriedades permanecem inalteradas qualquer que seja a escala do ensaio utilizado para a sua determinação só pode ser válida se o próprio material permanecer inalterado para todas essas escalas. Ora, à medida que varia a escala do teste, na maior parte dos casos o material varia também e, portanto, também os resultados dos ensaios, mesmo que as condições experimentais fossem mantidas inalteradas. Um efeito de escala surge, como consequência, afectando a representatividade dos ensaios e, por inerência, o julgamento das características geotécnicas dos maciços rochosos que nesses mesmos ensaios tem de basear-se.

Entre as questões em aberto acerca da importante problemática do efeito de escala, para as quais se abre um vasto e promissor espaço de investigação, podem destacar-se as seguintes:

- Definição de leis, locais e gerais, adequadas à descrição da variação dos valores médios e das dispersões das propriedades das rochas, descontinuidades e maciços rochosos com a dimensão dos volumes ensaiados.
- Determinação das dimensões a partir das quais os resultados dos ensaios se podem considerar isentos de efeito de escala (estabelecimento dos volumes representativos).
- Estabelecimento de relações entre os resultados dos ensaios laboratoriais e "in situ" no sentido de otimizar a sua utilização para a determinação das propriedades dos maciços rochosos fracturados, tendo em consideração o efeito de escala.

Uma melhor compreensão destas questões permitirá uma mais correcta selecção da dimensão, tipo, localização e número de ensaios a efectuar, os parâmetros geotécnicos a utilizar nos modelos de análise serão estabelecidos com maior rigor, nomeadamente com base probabilística, e a solução dos problemas de engenharia dos maciços rochosos poderá tornar-se mais económica e segura.

2 — EFEITOS DE ESCALA NA DETERMINAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DE DESLIZAMENTO DE FAMÍLIAS DE DESCONTINUIDADES

2.1 — Generalidades

Em numerosos problemas de engenharia, envolvendo taludes rochosos, fundações de barragens ou estruturas subterrâneas, a importância das características mecânicas das superfícies de descontinuidade para o comportamento global dos maciços rochosos sobrepõe, em muito, a da matriz rochosa.

No que respeita à descrição da resistência ao corte das descontinuidades, a consideração de uma envolvente linear de Coulomb tem constituído uma ferramenta matemática simples e útil, correspondendo de forma muito satisfatória aos dados experimentais, desde que os níveis de tensões normais envolvidos não sejam muito baixos. É conhecida, contudo, desde os trabalhos pioneiros de Patton (1966) a existência de dois mecanismos diferentes no processo de deslizamento — galgamento e corte das asperezas — que conduzem a envolventes de resistência não lineares, para cuja descrição, nas duas últimas décadas, numerosas formulações têm sido propostas. Entre elas tem merecido grande aceitação a escola de Barton e Bandis (1977, 1980) baseada nos parâmetros JRC e JCS, correlacionados respectivamente com a rugosidade dos bordos e a resistência do material rochoso que limita a junta. Esta formulação tem o mérito de haver dado o devido relevo à influência da dimensão da amostra sobre a determinação das propriedades mecânicas das descontinuidades, isto é, ao efeito de escala.

A análise do comportamento estrutural dos maciços rochosos implica necessariamente o conhecimento das características mecânicas das suas descontinuidades. Salvo, porém, casos de espécie, de descontinuidades particularmente relevantes, como certas falhas de desenvolvimento

significativo, que carecem de consideração individual, as descontinuidades devem em regra ser consideradas no âmbito das respectivas famílias de compartimentação, cujas propriedades medianizadas e afectadas por coeficientes de segurança adequados são introduzidas nos modelos.

Esta a razão por que se consagra o presente capítulo à análise do efeito de escala na determinação do comportamento mecânico de famílias de descontinuidades, tema acerca do qual se dispõe de muito pouca informação. Para o efeito procede-se à interpretação de ensaios laboratoriais e "in situ", envolvendo áreas entre 25 cm² e 5000 cm², e relativos a dois locais distintos.

2.2 — Fundação da barragem de Corgas

Para o estudo da fundação de uma barragem gravidade (LNEC, 1989) procedeu-se à caracterização laboratorial da resistência ao deslizamento e rigidez tangencial de 24 descontinuidades, por meio de amostras envolvendo áreas no intervalo 25-171 cm².

A representação da resistência ao deslizamento em função da área, para 10 diaclases pertencendo a uma mesma família sub-horizontal H, é apresentada na Fig.1, para quatro tensões normais distintas, mantidas constantes em deslizamentos sucessivos. Indicam-se entre parêntesis os valores de JRC para cada descontinuidade e apresentam-se uma lei linear e uma lei exponencial, para descrição da função $\delta = f(A)$ a partir dos valores experimentais. As relações não lineares utilizadas são do tipo $\delta = c + ae^{-bA}$ onde a , b e c são constantes, assumindo a última o significado de valor mínimo da resistência ao corte obtido nos ensaios.

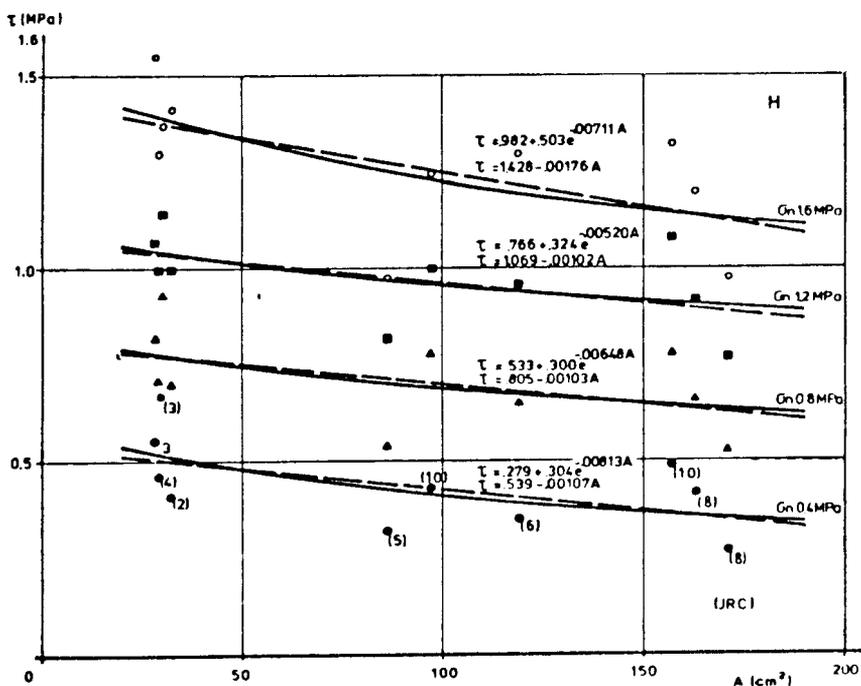


Fig. 1 — Resistência ao deslizamento em função das áreas para uma família de descontinuidades

A análise da figura permite concluir da existência de um efeito de escala, no que respeita à resistência da família de diaclases, a qual diminui quando aumenta a dimensão das amostras. Tal facto não pode ser imputável simplesmente a padrões de rugosidade distintos, dado que no caso vertente as amostras menos rugosas são precisamente as de menor área (JRC 2 – 4), que revelam as resistências máis altas, enquanto as amostras de maior dimensão, mais rugosas (JRC 8 – 10) apresentam precisamente as resistências ao deslizamento mais baixas.

A mesma conclusão não é extrapolável, porém, para a rigidez tangencial, como demonstra a Fig. 2, onde se observa uma grande dispersão de valores que não permite o estabelecimento de uma correlação entre K_T e as áreas. Relativamente a este parâmetro de rigidez deve concluir-se que a influência da rugosidade sobreleva a do efeito de escala, nesta gama restrita de áreas em que às amostras de menor área correspondem menores rugosidades. Tal conclusão deve contudo assumir-se como de carácter local, não susceptível de generalização sem outros estudos da mesma índole relativamente a outros maciços e locais.

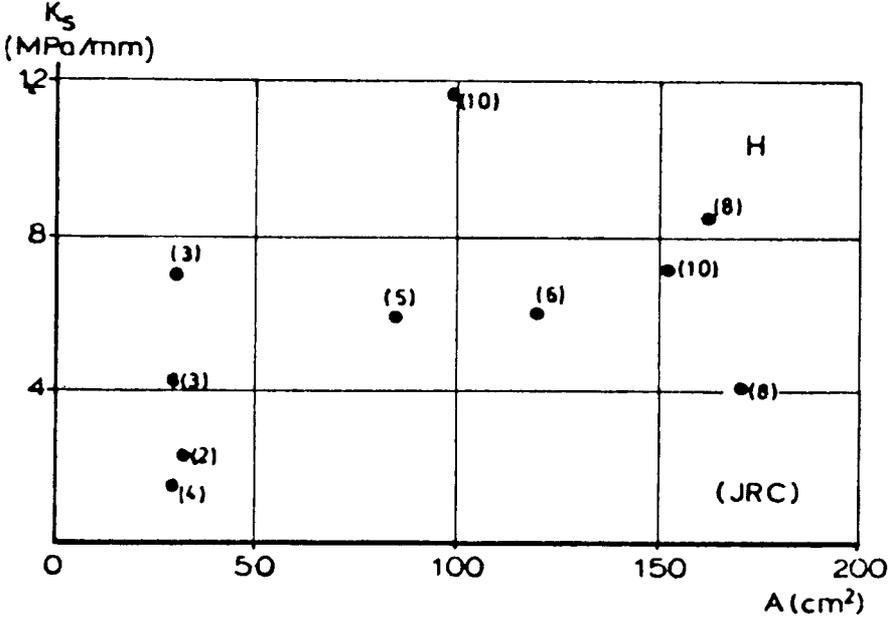


Fig. 2 — Rigidez tangencial em função das áreas — influência da rugosidade

2.3 — Fundação da barragem de Foz-Côa

Para a fundação xistosa de um barragem abóbada de 145 m de altura (LNEC, 1980) com três famílias de diaclases ortogonais, realizaram-se 3 ensaios "in situ" e 41 laboratoriais para determinação das características mecânicas das descontinuidades, envolvendo áreas entre 200 e 5000 cm².

Para os três ensaios "in situ", todos pertencentes à família sub-horizontal H, os valores de K_T foram os menores dos 44 ensaios realizados, revelando a existência de um efeito de escala sensível no que respeita àquele parâmetro. A Fig. 3, onde é feita a comparação entre um ensaio

laboratorial e outro "in situ", correspondentes a duas amostras da mesma descontinuidade, serve de prova à conclusão expandida, já que a amostra menor apresenta claramente maior resistência e rigidez. Também o deslocamento necessário para se atingir a resistência máxima é menor para as amostras menores.

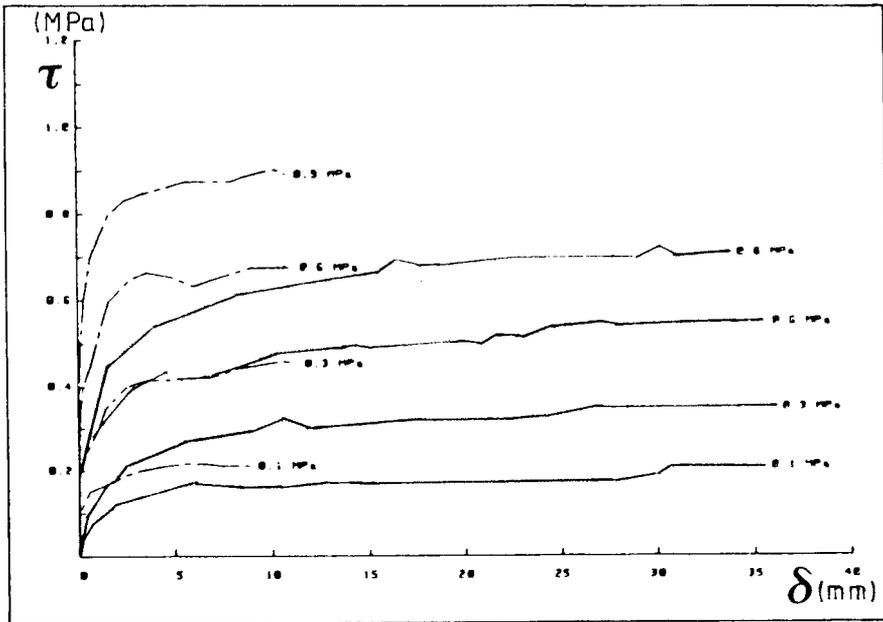


Fig. 3 — Comparação entre ensaios laboratorial e "in situ" da mesma descontinuidade — efeito de escala

Uma representação do efeito de escala no que respeita à resistência ao corte é apresentada na Fig. 4, onde para a família H se apresenta a variação de δ com a área deslizada, para diferentes níveis de tensão normal, usando escala semilogarítmica. Do gráfico pode concluir-se:

- A existência de um nítido efeito de escala na resistência das diaclases de uma mesma família, cujo valor médio decresce monotonicamente com o aumento das áreas deslizadas.
- A representação da função $\delta = f(A)$ por uma recta em escala semilogarítmica, monotonicamente decrescente com o aumento da área, adapta-se satisfatoriamente aos resultados experimentais.
- Com o aumento da tensão normal (e a repetição dos deslizamentos) verifica-se um incremento geral da dispersão das resistências ao corte.
- A análise dos coeficientes angulares das rectas permite concluir que o decréscimo das médias das resistências, com a área deslizada, para uma dada família de diaclases, se torna tanto mais rápido quanto maior é a tensão normal aplicada.

Foi verificado que as resistências médias da família, calculadas sobre amostras da mesma área e a diferentes tensões normais, se ajustavam bem a rectas no diagrama $\delta - \sigma$. Tal facto proporcionou a elaboração da Fig. 5 onde as envolventes lineares de Coulomb relativas a áreas de 10, 100 e 1000 cm² foram obtidas da Fig. 4 e as restantes ($A = 1, 10, 500 \text{ m}^2$) por extrapolação sobre as mesmas relações logarítmicas. A análise da Fig. 5 demonstra cabalmente a importância do efeito de escala na caracterização da resistência ao corte. Como os maiores ensaios de deslizamento "in situ" são efectuados sobre áreas que não excedem poucos metros quadrados, a estimativa das resistências para áreas muito maiores, como as correspondentes a algumas descontinuidades naturais ocorrentes à escala das obras, tem de reconhecer-se como ousada. Haverá contudo que notar que a severíssima redução das características resistentes com a área (para 500 m², $\phi = 12,8^\circ$, $c = 0$) retratada pela Fig. 5, obtida por mera extrapolação matemática, poderá não ser válida para tais dimensões se uma ondulação de grande comprimento de onda estiver presente, fazendo com que a rugosidade que comanda a resistência, a estas duas escalas diferentes, seja também diferente. Neste caso, a resistência para famílias de descontinuidades de grande extensão poderá surgir acrescida em função do ângulo de ondulação e a problemática da resistência ao deslizamento ser muito menos dramática do que a análise anterior permite sugerir.

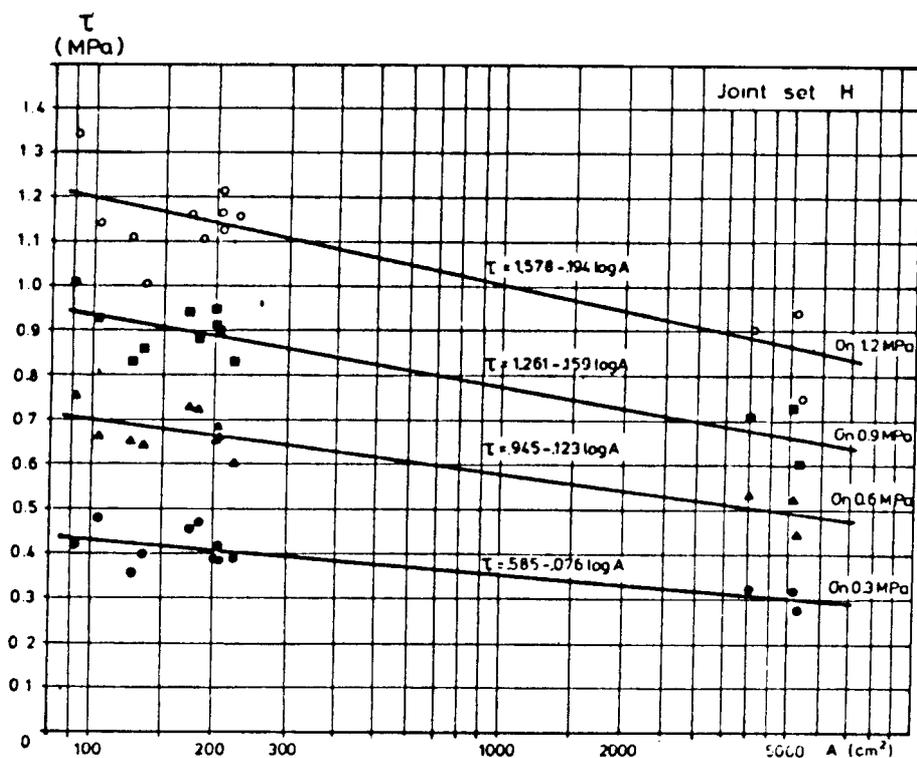


Fig. 4 — Decréscimo da resistência ao deslizamento com o aumento da área para uma família de descontinuidades

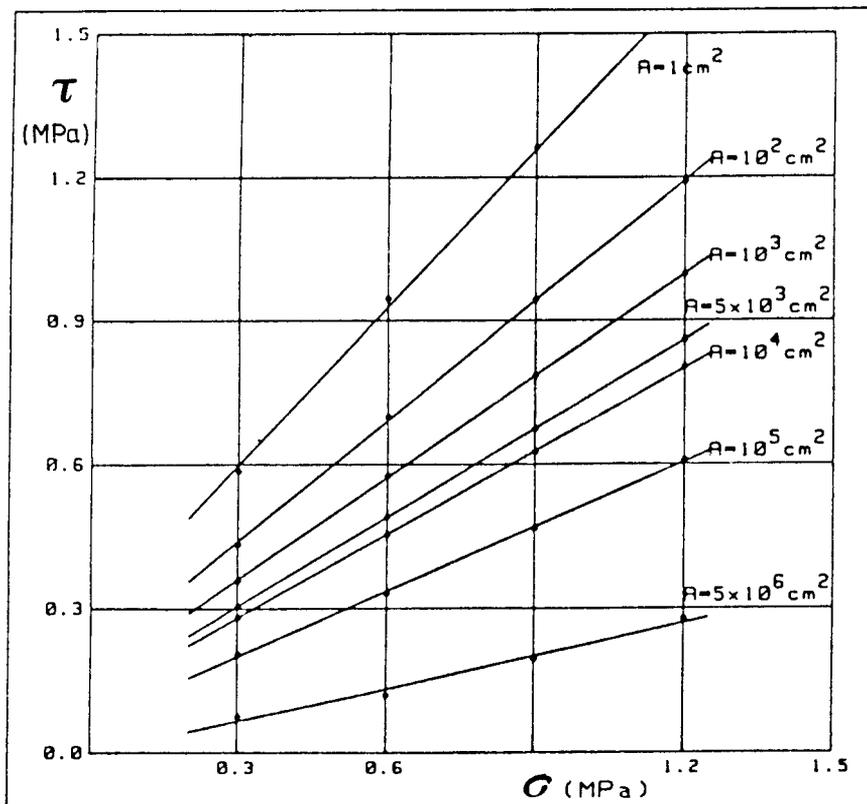


Fig. 5 —Extrapolação das resistências ao deslizamento para áreas crescentes de descontinuidades

3 — INFLUÊNCIA DA DIMENSÃO TRANSVERSAL NA RESISTÊNCIA AO DESLIZAMENTO DE FAMÍLIAS DE DESCONTINUIDADES — EFEITO DE ESCALA

3.1 — Generalidades

No capítulo anterior fez-se a análise do efeito de escala em função das áreas das amostras de diaclases sujeitas ao deslizamento, independentemente das dimensões, longitudinal ou transversal que variavam, o que correspondia à assunção de uma variação homotética das dimensões. Porém, vários estudos, sugerem uma responsabilidade específica da dimensão paralela ao deslizamento sobre resistência ao corte, rigidez tangencial, deslocamento de pico e dilatância. Pelo contrário, a influência da dimensão transversal não tem merecido a mesma atenção, razão pela qual um conjunto de 25 amostras de diaclases naturais foram sucessivamente decompostas em amostras com 1/2, 1/3 e 1/4 da área inicial, por corte paralelo à direção de deslizamento, e sujeitas a deslizamentos sucessivos sob tensões normais crescentes. O lote inicial de 25 amostras, com áreas entre 16 e 250 cm², correspondia às três famílias de compartimentação

fundamentais de um local de barragem (LNEC, 1989b) e foi seleccionado por forma a eliminar as diaclases cuja superfície apresentasse maiores sinais de desgaste devido aos deslizamentos iniciais. Neste caso em que a rocha constituinte dos bordos apresentava elevada resistência à compressão uniaxial (da ordem dos 200 MPa) tal desiderato não foi difícil de alcançar.

A decisão de usar fracturas naturais em vez de réplicas dessas fracturas, obtidas por moldagem, como tem sido referido por outros autores em investigações relativas ao comportamento de juntas, teve em consideração que numerosas obras de engenharia induzem fenómenos cíclicos de carga e descarga, produzindo deslocamentos e desgaste acumulados de fracturas, o que converte a metodologia de deslizamentos sucessivos utilizada num processo próximo das condições efectivas a que essas mesmas juntas ficam sujeitas em obra.

Num relatório preliminar (Muralha e Cunha, 1990a) foi feita uma análise estatística global dos potenciais efeitos de escala na caracterização da resistência ao deslizamento e rigidez tangencial, associados à redução das áreas iniciais (25 amostras) respectivamente para 1/2 (50 amostras), 1/3 (25 amostras) e 1/4 (50 amostras), correspondendo a uma gama de áreas entre 30 e 250 cm². Na presente comunicação as diaclases são associadas por famílias — X (13), H (7) e V (5) — e a análise estatística dos valores médios e das dispersões conduzidas para cada família.

3.2 — Análise do efeito de escala

Para cada amostra inicial e final determinaram-se os valores de JRC por comparação visual com os perfis-referência de rugosidades, seguindo a metodologia proposta pela ISRM. Os valores médios por famílias são apresentados na Fig. 6 e permitem concluir por uma tendência para o crescimento dos valores estimados de JRC com a redução da dimensão transversal. Uma análise individualizada das sequências das amostras é apresentada também na Fig. 7 onde o mesmo símbolo gráfico é usado para todas as amostras correspondentes por participação a uma amostra inicial comum. Tornou-se patente que sendo JRC fundamentalmente um parâmetro global de rugosidade, sempre que não existe um padrão homogéneo de rugosidade na superfície da amostra inicial, as amostras subsequentes obtidas por partição podem apresentar diferentes tipos de rugosidade e portanto diferentes valores de JRC. O contrário se passa quando a rugosidade da amostra inicial apresenta uma morfologia homogénea. Embora a repetição de deslizamentos possa propiciar o corte ou esmagamento de algumas asperezas e a conseqüente redução dos valores JRC, na Fig. 7 é visível a mesma tendência para o acréscimo de JRC com a redução da dimensão transversal da amostra.

No que respeita à resistência das famílias, a Fig. 8 apresenta os valores experimentais em função das áreas, para as várias tensões normais aplicadas (0,5 — 1,0 — 1,5 — 2,0 MPa). Valores médios e desvios padrões são também incluídos, o que permite verificar genericamente para as famílias em apreço:

- i) aumento da dispersão com o aumento da tensão normal;
- ii) nenhuma tendência consistente de acréscimo ou decréscimo da resistência média ou dos desvios padrões com a redução da área das amostras.

Também no que respeita à rigidez tangencial (Fig. 9) nenhuma tendência definida de variação dos valores médios e das dispersões com a área foi identificada.

Estas conclusões acerca da não existência de um efeito de escala associado à redução das áreas por variação da dimensão transversal, mantendo constante a dimensão segundo a direcção do deslocamento, deve, no estado actual, ser considerada como local, não extrapolável a outros locais ou litologias sem uma investigação mais aprofundada. Deve contudo notar-se, desde já, que tal ausência de um claro efeito de escala pode resultar de uma mútua compensação de dois efeitos antagónicos: a redução de áreas, que tenderia a provocar o aumento da resistência e rigidez tangencial, e a repetição dos deslizamentos que, pelo corte e esmagamento das asperezas, tenderia a reduzir simultaneamente aqueles parâmetros.

Família	Áreas relativas		
H	5.6	9.4	9.8
X	4.4	6.1	6.6
V	3.8	5.0	4.4
TOTAL	4.6	6.8	7.0

Fig. 6 — Variação dos valores médios de JRC com as áreas, por famílias de discontinuidades

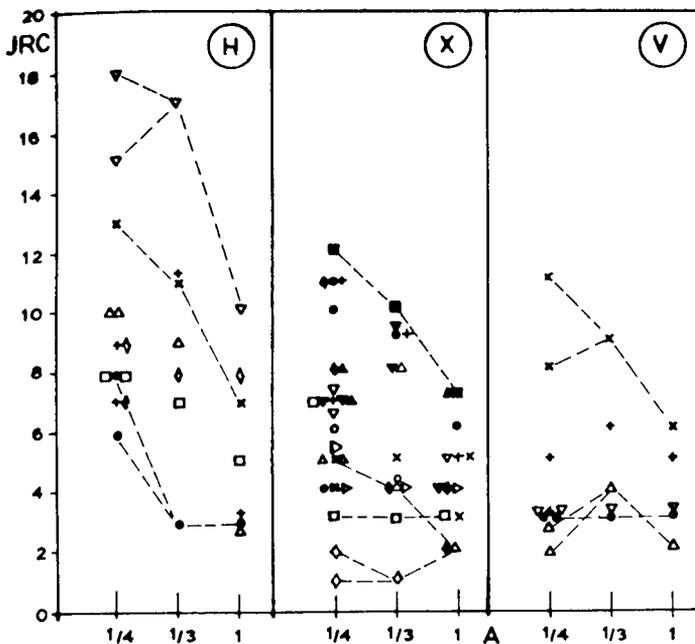


Fig. 7 — Valores de JRC para as várias seqüências, por famílias de discontinuidades

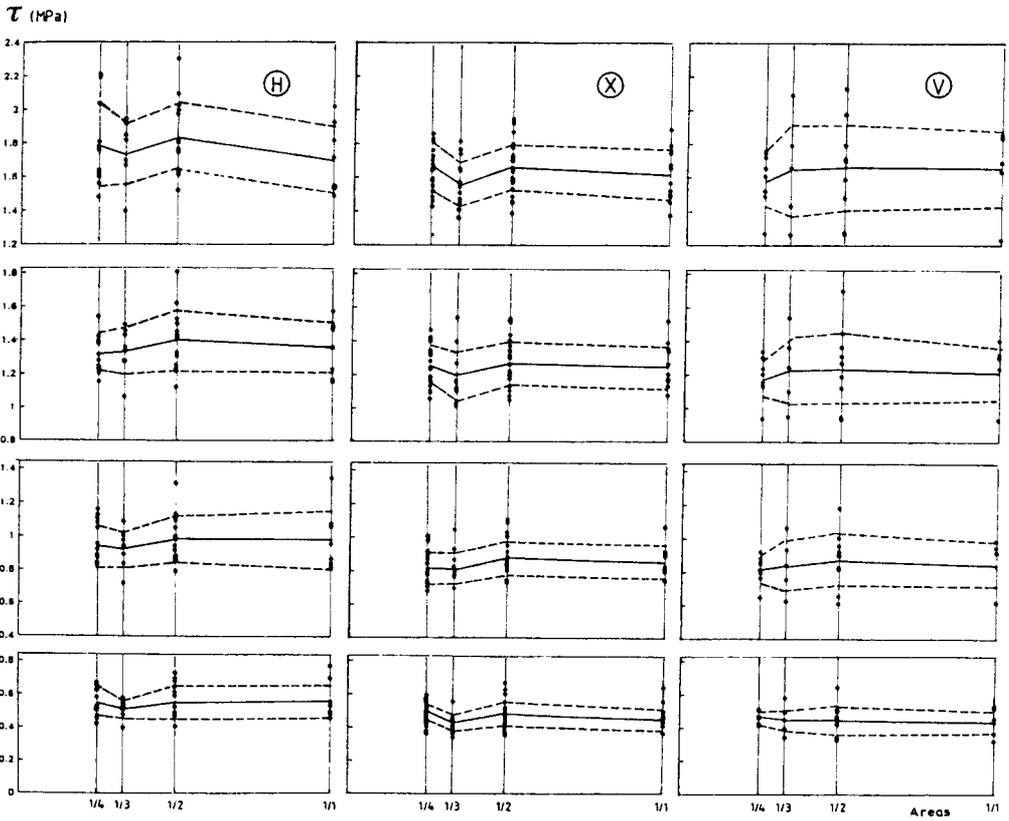


Fig. 8 — Resistência ao deslizamento para as diferentes partições (por família e tensão normal aplicada)

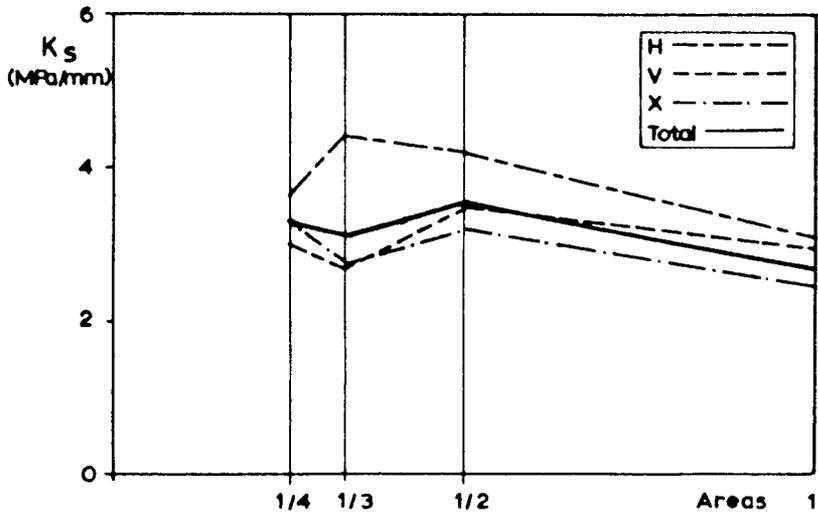


Fig. 9 — Rigidez tangencial média das famílias de diaclases para diferentes áreas

4 — EFEITO DE ESCALA NA CARACTERIZAÇÃO DA DEFORMABILIDADE DE MACIÇOS ROCHOSOS

4.1 — Generalidades

Uma longa experiência na caracterização da deformabilidade de maciços rochosos por meio de ensaios "in situ" e laboratoriais permitiram ao LNEC a reunião de um vasto património de informação, que tem vindo a ser analisado tendo em vista o esclarecimento da influência da dimensão dos volumes ensaiados sobre os resultados obtidos. Um relato preliminar foi apresentado por Cunha e Muralha (1990) em Loen. Neste capítulo novos elementos são aduzidos e analisam-se certos aspectos que o autor entende carecerem de reavaliação.

4.2 — Fundação da barragem de Karum

Para uma barragem fundada num complexo de formações cretácicas constituído por alternâncias de camadas de calcários, argilitos e margas, procedeu o LNEC (1969) a um conjunto de estudos de caracterização da deformabilidade em galerias com macacos planos de grande área (LFJ), utilizados em conjuntos de um, dois ou três em cada local, deste modo duplicando ou triplicando os volumes envolvidos (da ordem dos 10 m³ por almofada).

Os módulos de deformabilidade "in situ" calculados para as diferentes tipologias e locais de ensaio são apresentados na Fig. 10, conjuntamente com os determinados em laboratório por compressão uniaxial de amostras de 168 mm de diâmetro, obtidas na vizinhança dos ensaios LFJ e carregadas na mesma direcção.

Local	Rocha	Macaco	Número de macacos carregados						Labor.
			1 Méd.		2 Méd.		3 Méd.		
A	Calcário	A1	34,3						49,2
		A2	57,0	45,6					70,0
B	Calcário	B1	10,6					8,8	52,0
		B2	8,5					7,6	50,0
		B3	10,3	9,8				9,3 8,6	
C	Calcário	C1	51,0		46,0				74,0
		C2	29,0	40,0	30,0	38,0			78,5
D	Calcário	D1	36,0		39,2				
		D3	45,0	40,5	43,5	41,3			
E	Filádio	Eh	7,2						11,5
		Ev	13,0	10,1					
F	Marga	Fh	31,6						39,0
		Fv	43,0	37,3					47,0
G	Calcário	G2	6,8		6,4				39,0
		G3	6,0	6,4	6,2	6,3			46,5

Fig. 10 — Módulos de deformabilidade (GPa) "in situ" e em laboratório

A análise dos valores expressos na figura permite concluir:

- i) Nos argilitos e margas os ensaios LFJ, realizados normalmente (Eh) e paralelamente (Ev) às camadas, definem um comportamento anisótropo daquelas formações.
- ii) Os ensaios laboratoriais da rocha conduziram a módulos E_r claramente superiores aos do maciço E_m . A relação E_r/E_m é significativamente dependente da intensidade de fracturação e da rigidez das fracturas. Sempre que o relatório geológico refere “juntas fechadas, maciço pouco fracturado” (casos A, C, D, E, F) a relação E_r/E_m mantém-se entre 1 e 2. Pelo contrário, nos casos B e G, em que a existência de juntas preenchidas com argila surge mencionada, um nítido aumento daquela relação é visível na figura, atestando claramente a influência da deformabilidade das juntas preenchidas sobre a deformabilidade do maciço.
- iii) Os módulos médios obtidos em cada local com uma, duas ou três almofadas, isto é, sobre volumes de maciços entre 10 e 30 m³, são da mesma magnitude, não evidenciando as diferenças registadas nenhuma tendência consistente quanto ao aumento ou diminuição dos valores com o volume ensaiado. Tal levaria à conclusão de que todos os ensaios se teriam processado a uma escala superior à do volume representativo daqueles maciços. Porém, uma leitura atenta da Fig. 11, onde se apresentam em ordenadas os módulos experimentais E em função do módulo médio E correspondente ao ensaio envolvendo, em cada câmara, o maior número de macacos planos e portanto o maior volume, mostra claramente que a dispersão dos módulos diminui com o aumento do volume, o que é uma manifestação de efeito de escala. Conclui-se pois que à medida que a dimensão da amostra diminui o número de ensaios a efectuar deve aumentar se se pretende manter a mesma representatividade estatística dos resultados.

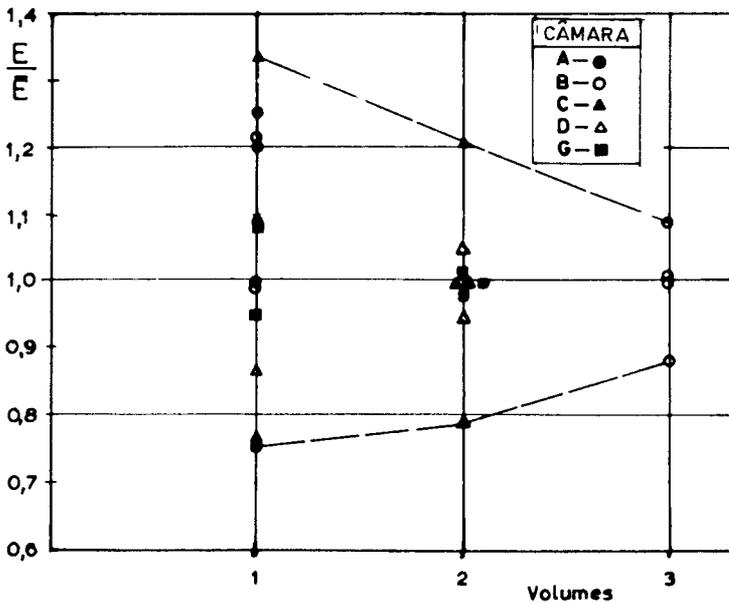


Fig. 11 — Variação da dispersão dos módulos de deformabilidade com os volumes ensaiados

4.3 — Fundação da barragem de Foz-Côa

O estudo da deformabilidade da fundação em epígrafe (LNEC, 1980) envolveu:

- i) Oito ensaios com LFJ, normal e paralelamente à xistosidade, usando um par de almofadas por rasgo (área carregada de 2,3 m² e volume carregado de cerca de 20 m³).
- ii) Ensaios de compressão uniaxial sobre amostras extraídas dos furos centrais dos rasgos LFJ, sendo os módulos de deformabilidade avaliados nas mesmas direcções ortogonais.
- iii) Determinação "in situ" dos módulos dinâmicos com ensaios sísmicos de pequena base entre furos situados nas mesmas zonas dos ensaios LFJ.

Os valores máximos, médios e mínimos dos módulos de deformabilidade normal e paralelo à xistosidade são apresentados na Fig. 12, denunciando claramente a anisotropia do maciço, já que todos os módulos extremos e médios paralelos à xistosidade são superiores aos seus homólogos normais àquele plano.

	Comp. Uniax.		LFJ		Dinâmicos	
		⊥		⊥		⊥
Máximo	99,2	65,4	70,2	62,5	55,3	40,4
Médio	78,7	40,7	30,6	25,3	42,1	21,0
Mínimo	57,4	11,2	5,2	1,6	26,7	8,8

Fig. 12 — Módulos de deformabilidade (GPa) "in situ" e em laboratório (valores extremos e médios)

Para análise da problemática do efeito de escala, aplicou-se uma formulação desenvolvida por Peres Rodrigues (1990) que define o módulo de deformabilidade médio E_m de um maciço rochoso com uma família de compartimentação, carregado perpendicularmente a esta, como uma função da deformabilidade E_r da rocha, da intensidade de fracturação I e da rigidez normal média das fracturas (ou do seu inverso, a deformação normal específica)

$$E_m = \frac{E_r}{1 + D E_r I}$$

A expressão, correspondente a uma hipérbole equilátera, evidencia que o módulo de deformabilidade ao maciço decresce com o aumento da deformabilidade da rocha, intensidade da fracturação e da deformabilidade das fracturas, satisfazendo às condições $E_{mr} = E_r$ ($I = 0$) e $E_{mr} \cong 0$ ($I \rightarrow \infty$).

Um estudo completo do sistema de fracturação tinha previamente conduzido à identificação de três famílias, uma horizontal (H), uma vertical (V) e outra paralela à xistosidade (X), também vertical e perpendicular às outras duas. Foi esta circunstância que permitiu a utilização da expressão anterior, já que para os ensaios de carga normais ou paralelos à xistosidade constituía uma aproximação razoável a consideração da rigidez normal e intensidade de

fracturação de apenas uma das famílias de compartimentação, a normal em cada caso à direcção de carregamento (X para os ensaios normais à xistosidade, e V para os paralelos).

Admitindo a hipótese de que os valores médios dos ensaios laboratoriais eram representativos do comportamento médio da rocha intacta (correspondendo a $I = 0$) e que os ensaios com pares de LFJ (correspondendo a uma intensidade de fracturação representativa do espaçamento médio do maciço: $I = 1$) eram representativos da deformabilidade do maciço, e resolvendo separadamente a expressão para os ensaios paralelos e os normais à xistosidade, considerando os espaçamentos médios das famílias de descontinuidades relevantes em cada caso, respectivamente V ($I = 9$ fracturas por metro) e X ($I = 11$ fracturas por metro), construíram-se os gráficos da Fig. 13. Estes representam a variação dos módulos de deformabilidade médios do maciço com a intensidade de fracturação respectivamente paralela e normal à xistosidade, para valores de I no intervalo 0-20 fracturas por metro. Na mesma figura reproduzem-se também os valores dos resultados experimentais (compressão uniaxial e LFJ).

No que respeita à relação entre os módulos de elasticidade e os volumes V, apenas para a escala dos ensaios laboratoriais e dos ensaios LFJ se pode estabelecer uma correspondência directa entre as variáveis I e V.

Convém notar que os espaçamentos de uma família de descontinuidades não são nem uniformes nem sequer têm uma distribuição normal, antes uma distribuição não simétrica de tipo exponencial em que ocorrem pequenos e grandes espaçamentos, os primeiros mais frequentes que os últimos. Os gráficos da Fig. 13 permitirão assim por interpolação a avaliação da deformabilidade média do maciço para uma qualquer intensidade de fracturação em duas direcções ortogonais, para qualquer ponto de uma zona geotecnicamente homogénea.

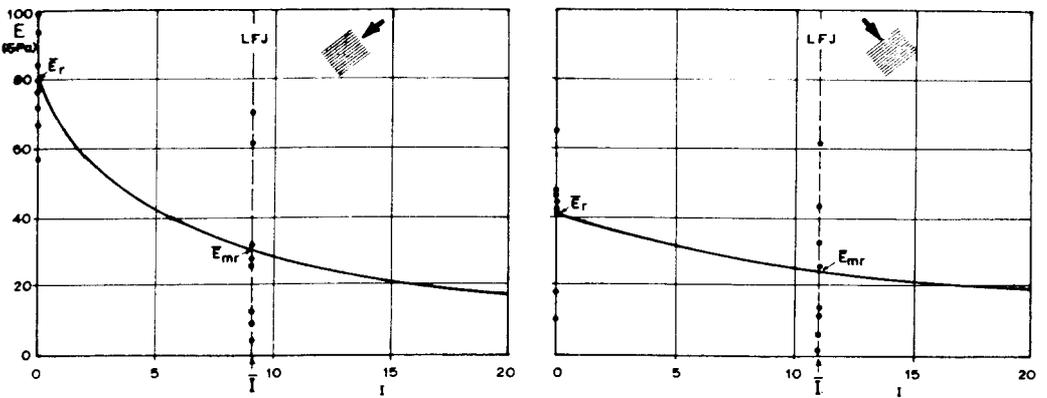


Fig. 13 — Variação da deformabilidade do maciço com a intensidade de fracturação

Como para cada família de compartimentação a distribuição real dos espaçamentos é conhecida, a probabilidade de ocorrência de um qualquer valor de I pode ser estabelecida, e consequentemente a descrição do espectro de valores de E , igualmente em termos probabilísticos, usando as curvas $E(I)$.

Finalmente, tendo em conta que diferentes ensaios "in situ" realizados num mesmo local sobre diferentes volumes envolverão consequentemente um número diferente de descontinuidades, os mesmos gráficos podem permitir prever a descrição probabilística da deformabilidade em termos dos volumes envolvidos desde que o efeito da variação das condições de ensaio, inerente à variação dos volumes testados, seja devidamente considerado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BANDIS, S.C. — *Experimental studies of scale effects on shear strength and deformation of rock joints*. Ph. D. Thesis, Univ. Leeds 1980.
- BANDIS, S. C. — *Scale effects in the strength and deformability of rocks and rock joints. Special lecture*. Int. Workshop on Scale Effects in Rock Masses, Loen. Balkema 1980.
- BARTON, N.; CHOUBEY, V. — *The shear strength of rock joints in theory and practice*. Rock Mechanics nº 10, 1977.
- BARTON, N. — *Scale effects or sampling bias*. Closing lecture. Int. Workshop on Scale Effects in Rock Masses, Loen. Balkema 1990.
- CUNHA, A. P. — *Constitutive proposal of a ISRM Commission on Scale Effects in Rock Mechanics*. Lisbon, Portuguese Society for Geotechnique, 1988.
- CUNHA, A. P. — *Scale effects in Rock Mechanics*. Opening lecture, Int. Workshop on Scale Effects in Rock Masses, Loen. Balkema 1990.
- CUNHA, A.P.; MURALHA, J. — *About LNEC experience on scale effects in the deformability of Rock Masses*. Int. Workshop on Scale Effects in Rock Masses, Loen. Balkema 1990.
- LNEC — *In situ tests at the Reza Shah Kabir dam site (Karun river)*. Lisboa 1969.
- LNEC — *Estudo do maciço de fundação da barragem de Foz-Côa*. Lisboa 1980.
- LNEC — *Características do betão e do maciço rochoso de fundação da barragem de Corgas*. Lisboa 1989 a.
- LNEC — *Estudo da fundação da barragem do Fridão*. Lisboa 1989 b.
- MURALHA, J.; CUNHA, A. P. — *Analysis of scale effects in joint mechanical behaviour*. Int. Workshop on Scale Effects in Rock Masses, Loen. Balkema 1990a.
- MURALHA, J.; CUNHA, A. P. — *About LNEC experience on scale effects in the mechanical behaviour of joints*. Int. Workshop on Scale Effects in Rock Masses, Loen 1990b.
- PATTON, F. D. — *Multiple modes of shear failure in rock and related materials*. Ph. D. Thesis, Univ. Illinois, 1966.
- PERES-RODRIGUES, F. — *About LNEC experience on scale effects in the deformability of rocks*. Int. Workshop on Scale Effects in Rock Masses, Loen. Balkema 1990.