

NÃO CONFIDENCIAL



# Laboratório Nacional de Engenharia Civil

**ESTUDO DA COMPARTIMENTAÇÃO  
DE MACIÇOS ROCHOSOS POR UMA  
TÉCNICA DE AMOSTRAGEM LINEAR  
E DOS BLOCOS FORMADOS PELAS  
DESCONTINUIDADES**

**Aplicação a Uma Galeria do Alto Lindoso**

**RELATÓRIO 172/89 – NOS**



*Luís Jamar - 89*

MINISTÉRIO DAS OBRAS PÚBLICAS, TRANSPORTES E COMUNICAÇÕES

## Laboratório Nacional de Engenharia Civil

**NÃO CONFIDENCIAL**

DEPARTAMENTO DE BARRAGENS

Núcleo de Obras Subterrâneas

Proc. 047/13/9249

---

### ESTUDO DA COMPARTIMENTAÇÃO DE MACIÇOS ROCHOSOS POR UMA TÉCNICA DE AMOSTRAGEM LINEAR E DOS BLOCOS FORMADOS PELAS DESCONTINUIDADES

Aplicação a Uma Galeria do Alto Lindoso

RELATÓRIO 172/89 - NOS

Lisboa, Setembro de 1989

---

Estudo subsidiado pelo PIDDAC

Copyright © LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL, I. P.  
AV DO BRASIL 101 • 1700-066 LISBOA  
e-mail: [lnec@lnec.pt](mailto:lnec@lnec.pt)  
[www.lnec.pt](http://www.lnec.pt)

Digitalizado no Setor de Divulgação Científica e Técnica do LNEC

2023

ESTUDO DA COMPARTIMENTAÇÃO DE MACIÇOS ROCHOSOS POR UMA TÉCNICA DE AMOSTRAGEM LINEAR E DOS BLOCOS FORMADOS PELAS DESCONTINUIDADES. APLICAÇÃO A UMA GALERIA DO ALTO LINDOSO.

STUDY OF ROCK MASS JOINTS USING A SCANLINE SAMPLING TECHNIQUE AND OF THE BLOCKS FORMED BY THE JOINTS. APPLICATION TO AN UNDERGROUND CHAMBER OF ALTO LINDOSO.

ETUDE DU DIACLASEMENT DE MASSIFS ROCHEUX PAR UNE TECHNIQUE D'ECHANTILLONNAGE LINEAIRE ET ETUDE DES BLOCS FORMES PAR LES DIACLASES. APPLICATION A UNE GALERIE DE ALTO LINDOSO.

#### RESUMO

Descreve-se sucintamente uma técnica para amostragem linear de descontinuidades em faces expostas de maciços rochosos e referem-se métodos para tratamento dos dados de campo com vista à definição de famílias de descontinuidades e caracterização de uma forma estatística da sua orientação, espaçamento e extensão. Apresentam-se os resultados obtidos para o caso de uma galeria subterrânea no aproveitamento hidroeléctrico do Alto Lindoso. Para as famílias de descontinuidade identificadas apresenta-se um estudo dos blocos tetraédricos que se poderão formar nas diferentes faces de rocha e analisam-se as suas condições de estabilidade.

#### SYNOPSIS

A scanline sampling technique of the discontinuities on free rock faces is described, as well as methods of treatment of field data for the definition of discontinuity sets and the statistical characterization of their orientation, spacing and extension. The results obtained for an underground chamber of the Alto Lindoso

hydroelectrical scheme are presented. For the discontinuity sets identified, an analysis is made of the tetrahedral blocks that may form in the different rock faces, and their stability is analysed.

#### RESUME

On décrit brièvement une technique d'échantillonnage linéaire de diaclases en faces exposées de massifs rocheux et on indique les méthodes de traitement des données de campagne ayant en vue la définition de familles de diaclases et la caractérisation, de façon statistique, de leur orientation, intervalle et étendue. On présente les résultats obtenus dans une galerie souterraine de l'aménagement hydroélectrique d'Alto Lindoso. Pour les familles de diaclases identifiées, on présente une étude des blocs tétraédriques qui peuvent se produire sur les différentes faces rocheuses et on analyse les conditions de stabilité.

## INDICE DO TEXTO

	pag.
1 - INTRODUÇÃO.....	1
2 - CARACTERIZAÇÃO DA COMPARTIMENTAÇÃO DE MACIÇOS ROCHOSOS.....	2
2.1 - Método de amostragem linear de superfícies de descontinuidade..	2
2.2 - Definição das famílias de descontinuidades.....	3
2.3 - Espaçamento das descontinuidades.....	7
2.4 - Extensão das descontinuidades.....	8
3 - ANÁLISE DOS BLOCOS TETRAEDRICOS FORMADOS PELAS DESCONTINUIDADES.	10
4 - CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	15
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	17

## INDICE DAS FIGURAS

Fig.

- 1 - Convenção para as atitudes das descontinuidades.
- 2 - Medição de semi-comprimentos.
- 3 - Diagramas de densidades de valores ponderados.
- 4 - Definição das famílias de descontinuidades.
- 5 - Histogramas de frequências para os espaçamentos das descontinuidades da família 1.
- 6 - Ilustração do uso de projecções estereográficas inclinadas.
- 7 - Projecções estereográficas inclinadas para: (a) tecto; (b) hasteal esquerdo; (c) hasteal direito; (d) frente.
- 8 - Tipos de movimento dos blocos tetraédricos.

## INDICE DOS QUADROS

Quad.

- 1 - Dados obtidos para as famílias de descontinuidades.
- 2 - Blocos tetraédricos para as diferentes faces de rocha.





# ESTUDO DA COMPARTIMENTAÇÃO DE MACIÇOS ROCHOSOS POR UMA TÉCNICA DE AMOSTRAGEM LINEAR E DOS BLOCOS FORMADOS PELAS DESCONTINUIDADES. APLICAÇÃO A UMA GALERIA DO ALTO LINDOSO.

## 1. INTRODUÇÃO

Em muitos problemas de Mecânica das Rochas, quer se trate de obras superficiais quer subterrâneas, a estabilidade das obras depende em grande medida das características geométricas e mecânicas das descontinuidades. Quando o material rochoso apresenta boas características mecânicas e os níveis de tensão no maciço não são muito elevados, são as descontinuidades que comandam o comportamento do maciço rochoso, podendo em alguns casos as deformações da rocha ser desprezadas quando comparadas com os movimentos ao longo das descontinuidades. A intersecção de planos de descontinuidade pode formar blocos ou cunhas de rocha, que poderão ser instáveis, e que constituem um dos mecanismos de rotura mais importantes a ter em consideração.

A importância das superfícies de descontinuidade e a incerteza associada à sua caracterização levaram a que diversos autores se tenham debruçado sobre o problema da sua descrição de uma forma estatística. Com efeito, modelos estatísticos têm sido propostos principalmente para as características geométricas das descontinuidades, tais como a atitude, o espaçamento e a extensão. Modelos estatísticos deverão também ser utilizados, sempre que possível, para descrição das características mecânicas.

Neste trabalho descreve-se sucintamente um método de amostragem linear das superfícies de descontinuidade ocorrentes numa face exposta de rocha e uma metodologia de tratamento dos resultados obtidos no campo, com vista à definição de famílias de descontinuidades e à sua descrição de uma forma estatística. Apresentam-se os resultados obtidos numa campanha de medição de descontinuidades realizada pelo LNEC numa galeria na zona da central subterrânea do Alto Lindoso (LNEC, 1988). Utilizando estes resultados é feita uma análise dos blocos tetraédricos que se poderão formar nas paredes e no tecto desta galeria por intersecção de superfícies de descontinuidade das diferentes famílias.

## 2. CARACTERIZAÇÃO DA COMPARTIMENTAÇÃO DE MACIÇOS ROCHOSOS

### 2.1. Método de amostragem linear de superfícies de descontinuidade

Vários métodos existem para determinação das características geométricas das descontinuidades com base em medições em faces expostas de rocha. Normalmente, as medições das descontinuidades ou são feitas numa determinada área da face exposta, ou ao longo de uma linha. O método que se vai descrever é um método de amostragem linear (designado na literatura de língua inglesa por "scanline sampling") e é descrito por diversos autores, entre os quais Priest e Hudson (1981) e Brady e Brown (1985). Com este método não se pretende efectuar o levantamento exaustivo de todas as descontinuidades ocorrentes numa dada face exposta de rocha, mas sim obter dados a partir dos quais se poderão extrapolar as características da compartimentação da zona em estudo.

Resumidamente, o método de amostragem linear consiste na instalação de uma fita graduada em faces expostas do maciço rochoso e no registo das características de todas as descontinuidades por ela intersectadas. Para cada descontinuidade medem-se, no mínimo, as seguintes grandezas:

- i) distância à origem da fita;
- ii) atitude;
- iii) semi-comprimento.

A atitude da descontinuidade é representada por dois ângulos,  $\alpha_d$  e  $\beta_d$ , respectivamente direcção e inclinação da linha de maior declive (Fig.1). Por semi-comprimento entende-se o comprimento visível da intersecção da descontinuidade com a face exposta de rocha, apenas para um dos lados da fita graduada (Fig. 2), sendo este lado sistematicamente o mesmo. Além destas grandezas é ainda útil registar outras características das descontinuidades, tais como a sua abertura e preenchimento, a natureza da sua terminação (que pode ser noutra descontinuidade, na rocha, ou não visível), fazer uma apreciação visual da curvatura e rugosidade (por exemplo numa escala de três pontos) e qualquer outra característica que se entenda relevante.

Para que as características de compartimentação possam ser extrapoladas com base nos valores medidos, o processo de medição deve

ser, feito com o máximo rigor, procurando-se que a amostra seja representativa do maciço e tenha uma dimensão suficiente, cuja ordem de grandeza não é normalmente inferior à das centenas de descontinuidades.

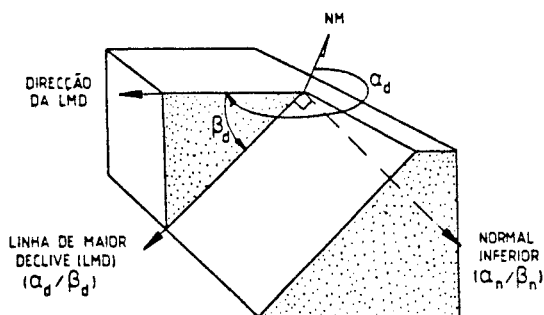


Fig. 1. Convenção para as atitudes das descontinuidades.

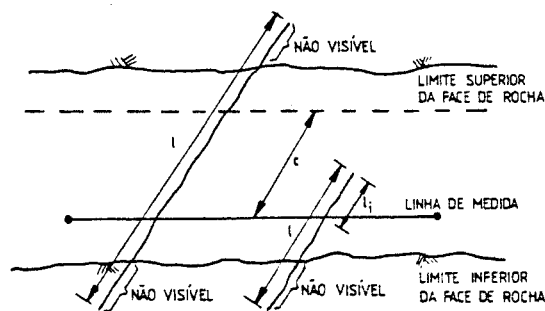


Fig. 2. Medição de semi-comprimentos

Devido ao carácter linear da amostragem efectuada por este processo, a amostra apresenta uma não uniformidade no que respeita à atitude das descontinuidades, na medida em que as que são perpendiculares à linha de medida têm probabilidade máxima de ser intersectadas, enquanto que as que a ela são paralelas têm probabilidade teoricamente nula. Embora os métodos que se apresentam nas próximas secções tenham este facto em consideração, é conveniente, na medida do possível, tentar fazer medições em linhas de medida com orientações diferenciadas, idealmente em três direcções ortogonais.

## 2.2. Definição das famílias de descontinuidades

Os valores das atitudes das normais das descontinuidades devem ser apresentados sob a forma gráfica, usando uma projecção estereográfica (equiangular) do hemisfério inferior. Esta projecção é preferida neste trabalho à equiárea por permitir um certo número de construções gráficas baseadas na propriedade de os ângulos se manterem, as quais vão ser utilizadas adiante.

Por observação directa desta primeira projecção das normais é já, por vezes, possível identificar zonas de concentrações de polos de descontinuidades, que corresponderão a famílias. No entanto, devido à não uniformidade da amostragem, a importância relativa das

diferentes descontinuidades representadas não é igual, podendo-se ser conduzido a uma imagem distorcida da compartimentação. A fim de tomar em consideração este facto, aplica-se uma metodologia de utilização simples, apresentada por Priest (1985). Esta metodologia, embora não tendo a sofisticação de outras, permite uma análise com um grau de rigor que é, na grande maioria dos casos, adequado ao que é possível obter para os dados de campo.

A cada descontinuidade é associado um factor de ponderação ou peso,

$$w_i = 1/\cos\delta_i$$

em que  $\delta_i$  é o ângulo entre a linha de medida e a normal ao plano de descontinuidade  $i$ . Desta forma, valores unitários correspondem a descontinuidades perpendiculares à linha de medida e valores elevados a  $\delta_i$  próximo de  $90^\circ$ . Seguidamente procede-se ao cálculo de um diagrama de densidades de ocorrência de polos em áreas circulares de 1% da área do círculo de projecção, mas em que cada polo é representado pelo seu peso. Somam-se, em cada área circular, os pesos dos polos que nele estão contidos, e as percentagens de ocorrência referem-se, logicamente, ao total dos pesos das descontinuidades.

A Fig. 3 é um diagrama de densidades assim obtido para os dados referentes à campanha de medição de descontinuidades atrás mencionada, na qual foram medidas 212 descontinuidades ao longo de 5 linhas de medida. Neste diagrama utilizou-se uma projecção equiárea para evitar as maiores distorções que nestes casos se obtêm com as projecções estereográficas.

Com base no diagrama da Fig. 3 é possível identificar as diversas zonas de concentração de polos e fazer uma primeira tentativa de os agrupar de forma a definir famílias. Nesta fase, existe um elemento de subjectividade importante, o qual pode ser útil por permitir introduzir um elemento ligado com a experiência pessoal e com a observação visual do maciço rochoso.

É necessário agora, para cada uma das hipotéticas famílias de descontinuidades, ter uma medida do seu grau de dispersão e um valor da atitude representativa da família. Para esse efeito, calcula-se

primeiramente, para cada família, o número de descontinuidades  $N$  e a soma dos seus pesos  $N_w = \sum w_i$ . Admite-se que a cada descontinuidade corresponde um vector  $\vec{n}_i'$  com o sentido da normal inferior e com um módulo dado por  $w_i N / N_w$ , e representa-se a soma vectorial dos  $\vec{n}_i'$  de cada família por  $\vec{R}_w = \sum \vec{n}_i'$ . A direcção deste vector resultante  $\vec{R}_w$  é considerada representativa da família e a sua atitude tomada como atitude média.

Com a finalidade de obter uma medida do grau de dispersão das descontinuidades de uma dada família, admite-se que as atitudes seguem uma distribuição isotrópica de Fisher em torno da média, determinando-se o valor da constante de Fisher  $K$ , que é uma medida da dispersão, e é dada por

$$K = (N-1)/(N-R_w)$$

Se a dispersão for pequena, isto é, se as descontinuidades forem aproximadamente paralelas, os valores de  $N$  e  $R_w$  são próximos e  $K$  é elevado. Para maiores dispersões  $K$  toma, portanto, valores mais baixos.

É ainda possível, de acordo com a metodologia proposta, determinar intervalos de confiança da atitude da média, assim como percentagens de descontinuidades cujas atitudes fazem com a média ângulos menores que um determinado valor. Estas determinações, no entanto, saem fora do âmbito deste trabalho.

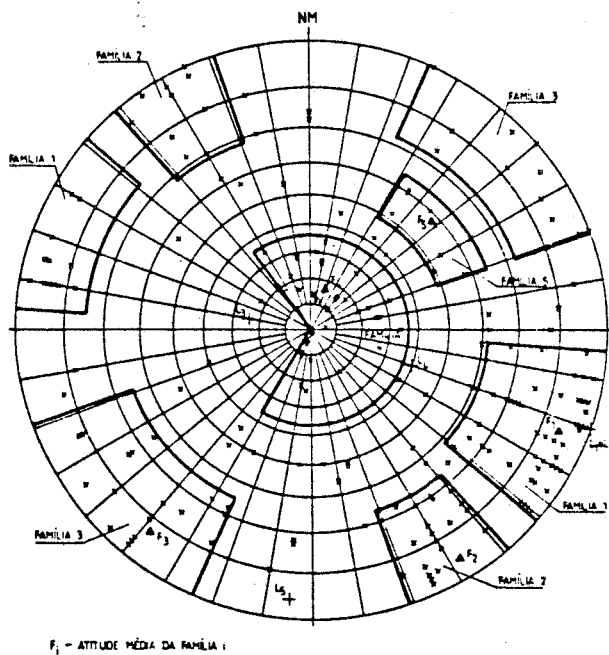
O processo até aqui descrito é adequado para ser programado em microcomputador, trabalhando de uma forma interactiva, permitindo ao utilizador tentar vários tipos de arranjos das descontinuidades em famílias, até se chegar a um agrupamento final.

As descontinuidades amostradas no Alto Lindoso foram agrupadas em 5 famílias, sendo cada família definida por valores máximos e mínimos quer da direcção quer da inclinação das normais. Na Fig. 4 apresenta-se uma projecção estereográfica das normais, indicando as zonas correspondentes a cada família e as suas atitudes médias ( $F_i$ ). Os seus valores ( $\alpha_n/\beta_n$ ), assim como os valores de  $N$ ,  $N_w$ ,  $R_w$  e  $K$  estão indicados no Quadro 1. Designou-se por família 6 o conjunto de

descontinuidades, de orientação aleatória, que não foram incluídas nas 5 famílias identificadas.



Fig. 3. Diagrama de densidades de valores ponderados.



F<sub>i</sub> - ATITUDE MÉDIA DA FAMÍLIA i

Fig. 4. Definição das famílias de descontinuidades

Neste caso, a utilização da metodologia apresentada permitiu constatar que nos dados provenientes das medições de campo havia uma sobrevalorização das descontinuidades das famílias 1 e 2 relativamente às das famílias 3 e 4, pois as primeiras fazem ângulos próximos de 90° com as duas maiores linhas de medida, enquanto que as últimas lhes são quase paralelas.

QUADRO 1. Dados obtidos para as famílias de descontinuidades.

Família	$\alpha_n/\beta_n$	N	$N_w$	$R_w$	K	$\bar{x}$ (m)	$\Omega$ (m <sup>-1</sup> )	$\bar{l}$ (m)
1	113/06	58	63,1	56,3	34,5	0,85	1,18	0,91
2	148/04	30	52,5	29,2	36,3	1,30	0,77	2,63
3	218/07	32	104,4	30,7	23,0	0,49	2,04	0,77
4	018/73	41	125,9	39,1	21,5	0,16	6,26	0,90
5	048/32	10	29,3	9,8	44,0	2,06	0,49	1,57
6	aleatória	41	---	---	---	1,39	0,72	1,18

### 2.3. Espaçamento das descontinuidades

Para cada família, o espaçamento é calculado por subtração das distâncias à origem da fita de medida das descontinuidades consecutivas. Como os valores que interessa conhecer são os espaçamentos na perpendicular à atitude média da família, os valores medidos devem ser multiplicados pelo cosseno do ângulo agudo entre a linha de medida e a normal à atitude média da família. Para as descontinuidades amostradas no Alto Lindoso, indicam-se no Quadro 1 os valores médios  $\bar{x}$  dos espaçamentos assim calculados para cada família, assim como os seus inversos, as frequências  $\Omega$ . Repare-se no baixo valor de  $\bar{x}$  obtido para a família 4, sub-horizontal, e no valor elevado obtido para a família 5. O conjunto de descontinuidades designado por família 6 tem um espaçamento médio de 1,39m, o que indica que a sua existência não pode ser desprezada.

É possível, a partir dos valores do espaçamento médio de cada família, do seu desvio padrão e do número de descontinuidades, por aplicação do Teorema do Limite Central, obter intervalos de confiança para o espaçamento médio (Priest e Hudson, 1981). A sua determinação sai fora do âmbito deste trabalho, mas refere-se como exemplo que para os limites  $(\bar{x} \pm \epsilon \bar{x})$  dos intervalos de confiança de 80%, se obtiveram valores de  $\epsilon$  variando de 23% para a família 1 a 52% para a família 5.

Os mesmos autores apresentam uma expressão teórica para o valor do RQD, em qualquer direcção, a partir das frequências de cada família,  $\Omega_s$ , nessa direcção, partindo da hipótese de que os espaçamentos seguem uma distribuição exponencial negativa. Esta suposição é muitas vezes verificada, tendo-se obtido no caso do Alto Lindoso uma concordância relativamente boa. Esta concordância é ilustrada para a família 1 na Fig.5, em que se apresenta um histograma de frequências dos espaçamentos e a curva teórica correspondente à distribuição exponencial negativa.

A expressão teórica do RQD é, então, dada por:

$$RQD = 100 \exp(-0,1\Omega_s) (0,1\Omega_s+1)$$

com

$$\Omega_s = \Sigma(\Omega_i \cos\delta_i) + \Omega_6$$

em que  $\delta_i$  são os ângulos entre a normal à família  $i$  e a direcção em que se pretende o RQD. A título exemplificativo, calculou-se o RQD em três direcções ortogonais, tendo-se obtido valores de 95,4 na horizontal segundo o eixo da galeria, 89,8 na horizontal perpendicular ao eixo da galeria e 83,1 na vertical. Destes valores pode-se concluir que a variação do RQD com a direcção em que é medido pode ser importante, devendo este facto ser tido em atenção quando se fazem medições do seu valor no campo, para que não sejam tomados como representativos de um maciço valores que apenas são válidos para uma determinada direcção.

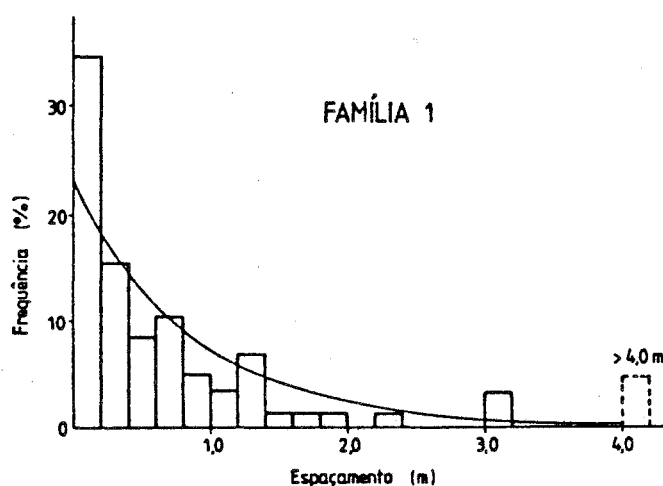


Fig. 5. Histogramas de frequências para os espaçamentos das descontinuidades da família 1.

#### 2.4. Extensão das descontinuidades

Segue-se também aqui um método de análise bidimensional apresentado por Priest e Hudson (1981). Para cada descontinuidade é medido o seu semi-comprimento tal como foi exposto em 2.1. Este procedimento justifica-se por muitas vezes as linhas de medida se situarem a pequena altura relativamente ao chão. Por outro lado, como normalmente as dimensões das faces expostas de rocha são limitadas, só é possível medir os semi-comprimentos até um valor máximo  $c$ , conforme indicado na Fig.2. No caso do Alto Lindoso foi necessário adoptar para  $c$  o valor de 4m.



Utilizando o método referido obtém-se, a partir dos semi-comprimentos, os valores dos comprimentos médios para cada família, eliminando as distorções impostas por: i) as descontinuidades mais extensas terem uma maior probabilidade de serem amostradas do que as menos extensas; ii) se medirem apenas semi-comprimentos; iii) haver um limite  $c$  para a medição dos semi-comprimentos.

Para calcular o valor médio dos comprimentos  $\bar{l}$ , a partir do valor médio dos semi-comprimentos de cada família  $l_i$ , é necessário assumir uma hipótese sobre o tipo de distribuição estatística seguido pelos comprimentos. No caso do Alto Lindoso admitiu-se, como é usual, que eles seguem uma distribuição exponencial negativa, obtendo-se a expressão

$$\bar{l} = l_i + c(n-r)/r$$

em que  $r$  é o número de descontinuidades medidas, em cada família, com um semi-comprimento menor que  $c$ . No Quadro 1 estão indicados os valores dos comprimentos médios  $\bar{l}$  obtidos para as diferentes famílias.

### 3. ANÁLISE DOS BLOCOS TETRAÉDRICOS FORMADOS PELAS DESCONTINUIDADES

O tipo de bloco mais simples que se pode formar pela intersecção de superfícies de descontinuidade é o tetraédrico, no qual estas formam normalmente 3 faces, sendo a outra a face exposta de rocha. Em taludes podem-se ter só 2 descontinuidades, sendo a terceira substituída pelo plano superior do talude. Blocos tetraédricos são encontrados com muita frequência em maciços rochosos com pelo menos três famílias de descontinuidades. Blocos com maior número de faces poderão também ser formados (Lamas, 1987), mas por serem de tratamento muito mais complexo não serão aqui abordados. É ainda admitido que as descontinuidades são planares e persistentes.

Priest (1985) apresentou um método para a análise da estabilidade de blocos tetraédricos, sob a acção de forças externas arbitrárias, utilizando o método gráfico das projecções estereográficas inclinadas. Neste método o plano de projecção não é um plano horizontal, como habitualmente, mas sim coincidente com o plano da face de rocha, e o hemisfério de projecção é dirigido para o exterior do maciço (Fig. 6). Esta projecção pode ser obtida da projecção estereográfica original, mediante rotações dos pontos e círculos representativos dos diversos planos, usando uma técnica que é descrita de uma forma muito completa por Priest (1980), pelo que não será aqui mais detalhada.

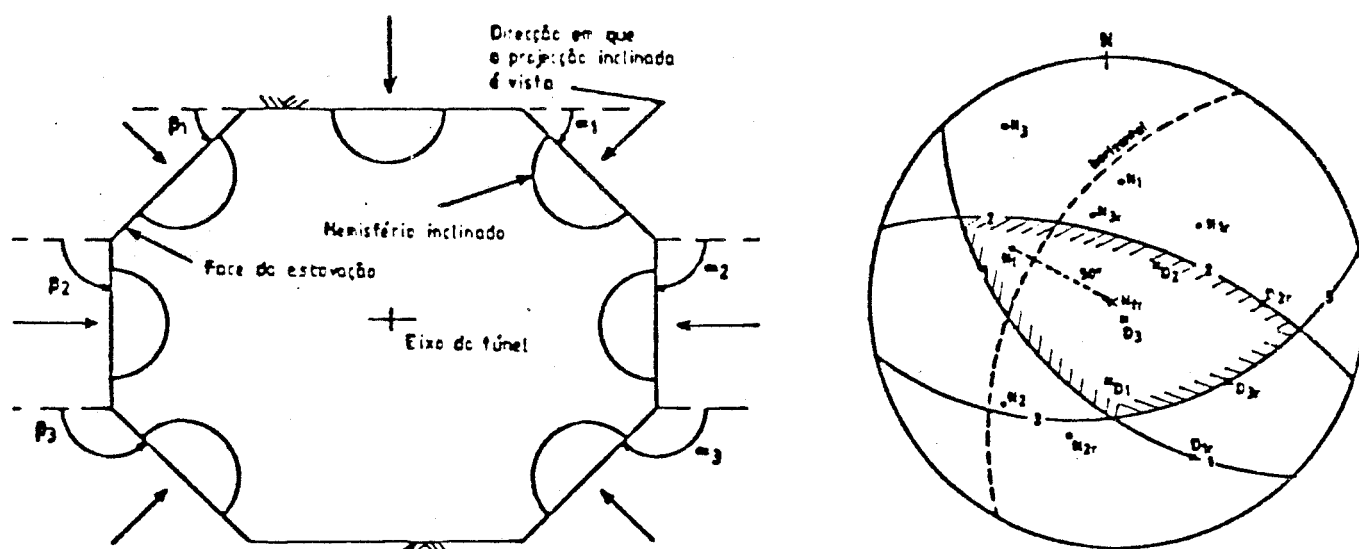


Fig. 6. Ilustração do uso de projecções estereográficas inclinadas.

Numa projecção estereográfica inclinada os blocos tetraédricos são definidos por áreas, com a formas de triângulos de lados curvos, delimitadas pelos três grandes círculos correspondentes às discontinuidades (Fig. 6).

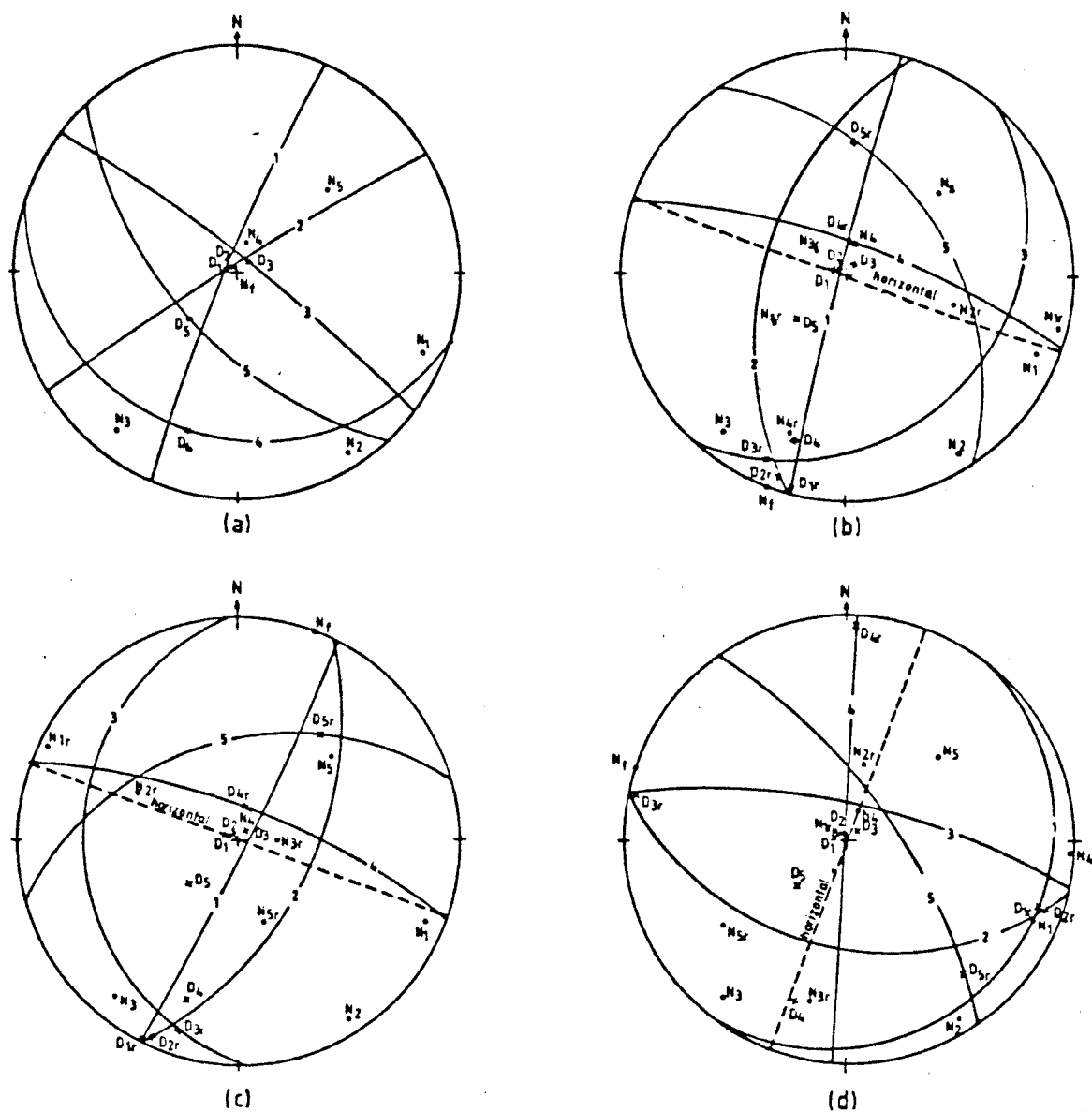


Fig. 7. Projecções estereográficas inclinadas para: (a) tecto; (b) hasteal esquerdo; (c) hasteal direito; (d) frente.

Na Fig. 7(a) apresenta-se uma projecção estereográfica do hemisfério inferior das atitudes médias das 5 famílias de discontinuidades identificadas no Alto Lindoso, representando-se os seus grandes círculos e a atitude da normal ( $N_i$ ) e da linha de maior declive ( $D_i$ ). A projecção estereográfica inclinada correspondente ao

tecto horizontal da galeria é, obviamente, coincidente com esta projecção. As Fig.s 7(b), (c) e (d) dizem respeito às faces expostas do hastecal esquerdo, do hastecal direito e da frente da galeria, respectivamente, sendo  $N_f$  a normal exterior à face exposta, e  $D_{ir}$  e  $N_{ir}$  a linha de maior declive e a normal das famílias, depois de sofrerem a rotação.

As 5 famílias de descontinuidades podem combinar-se de 10 formas diferentes formando outros tantos tipos de blocos. As condições de estabilidade de cada bloco sob a acção das forças gravíticas dependem, além das descontinuidades que o formam, da atitude da face exposta de rocha, e podem ser classificadas em 4 categorias:

N - o bloco é estável, não se podendo mover (Fig.8(a));

Dx - o bloco pode deslizar (Fig. 8(b)), se instável, ao longo de uma descontinuidade da família x;

Dxy - o bloco pode deslizar (Fig. 8(b)), se instável, ao longo da linha de intersecção de duas descontinuidades das famílias x e y;

V - o bloco é instável, caindo verticalmente (Fig. 8(c)) se não existirem medidas de suporte.

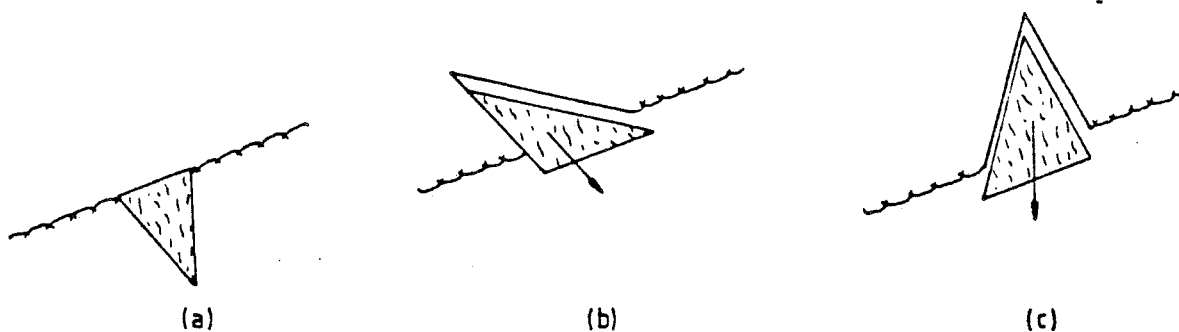


Fig. 8. Tipos de movimento dos blocos tetraédricos.

No Quadro 2 indicam-se os blocos que se podem formar no caso do Alto Lindoso, representando os três algarismos as famílias das descontinuidades que os formam. Indica-se também a categoria das condições de estabilidade dos blocos para as quatro faces expostas de rocha analisadas (em que  $\alpha_f/\beta_f$  é a atitude da normal exterior), assim como, para os blocos que podem deslizar, o ângulo  $\theta$  que a direcção do movimento potencial faz com a horizontal. Da análise deste Quadro podem-se tirar as seguintes conclusões:

QUADRO 2. Blocos tetraédricos para as diferentes faces de rocha.

Blocos	Tecto ( $B_f=90$ )		Hasteal esq. ( $\alpha_f/B_f=200/0$ )		Hasteal dir. ( $\alpha_f/B_f=20/0$ )		Frente ( $\alpha_f/B_f=290/0$ )	
	Categ.	$\theta(^{\circ})$	Categ.	$\theta(^{\circ})$	Categ.	$\theta(^{\circ})$	Categ.	$\theta(^{\circ})$
1-2-3	D2	86	D12	83	D23	83	D1	84
1-2-4	D12	83	D12	83	N	--	D12	83
1-2-5	D12	83	D12	83	N	--	D12	83
1-3-4	V	--	D4	17	D13	79	D1	84
1-3-5	D1	84	D15	57	D13	79	D1	84
1-4-5	D15	57	D15	57	N	--	D5	58
2-3-4	V	--	D4	17	D23	83	D24	13
2-3-5	D2	86	D5	58	D23	83	D25	57
2-4-5	D5	58	D5	58	N	--	D25	57
3-4-5	V	--	D45	10	D35	12	D35	12

i) Os blocos que se podem formar no tecto têm a possibilidade de deslizar em direcções muito inclinadas, ou de cair verticalmente, não sendo possível estabilizá-los pela simples consideração do atrito entre as faces das descontinuidades.

ii) No hasteal esquerdo todos os blocos têm condições para deslizar, mas em três deles bastará a mobilização de um ângulo de atrito de  $17^{\circ}$  para que se tornem estáveis.

iii) O hasteal direito apresenta as melhores condições de estabilidade, com quatro blocos que não se podem mover e um que se torna estável para um ângulo de atrito de  $12^{\circ}$ .

iv) Na frente, tal como no hasteal esquerdo, todos os blocos têm condições para deslizar, tornando-se dois deles estáveis para um ângulo de atrito de  $13^{\circ}$ . Estas são as duas faces verticais em que as condições de estabilidade parecem menos favoráveis.

v) Na grande maioria dos blocos o deslizamento potencial envolve as famílias 1 e 2. Devido à sua orientação, a família 3 só é envolvida no caso do hasteal direito. Os blocos cujo deslizamento pode ser estabilizado mediante a mobilização do atrito (com um ângulo de atrito máximo de  $17^{\circ}$ ) envolvem sempre as famílias 4 e 5.

Desta análise é já possível formar uma ideia sobre quais as

famílias de descontinuidade que maiores problemas de estabilidade irão pôr, e em que faces de rocha. É também possível, se tal for o caso, escolher as atitudes mais convenientes para as faces de rocha a escavar. Com base nos resultados assim obtidos para os diferentes blocos e conhecendo as dimensões das faces de rocha a escavar, é possível calcular os volumes dos maiores blocos que se poderão formar e a sua altura, o que pode, numa fase inicial do projecto, ser útil para contabilizar as forças a que terão que resistir os suportes, ou os comprimentos que terão que ter as ancoragens ou pregagens que eventualmente se venham a realizar.

#### 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os métodos de amostragem apresentados bem como o tratamento dos resultados de campo são de aplicação relativamente simples, tendo no entanto um grau de rigor que é na prática adequado ao rigor que é possível obter para os dados de campo. O processo de definição das famílias de descontinuidades é adequado para ser programado em microcomputador, de preferência com capacidades gráficas e de uma forma interactiva, e permite a introdução de um elemento de subjectividade que é em muitos casos importante. Uma vez definidas as famílias de descontinuidades, as suas características, tais como atitude média, espaçamento e extensão, são facilmente determinadas, e o valor do índice RQD do maciço pode ser calculado para as direcções que se pretender.

Os métodos gráficos para análise dos blocos tetraédricos formados pelas descontinuidades constituem uma maneira simples de o engenheiro avaliar, de uma forma preliminar, as condições de estabilidade de faces de rocha a projectar, assim como a influência da variação da sua orientação na estabilidade. Podem também ser usados, numa fase posterior, para analisar o comportamento de blocos definidos por descontinuidades expostas durante o processo de excavação.

Os métodos gráficos utilizados são facilmente substituíveis por métodos analíticos que podem ser usados em microcomputadores, sendo então possível o estudo do comportamento dos blocos sob a acção de outras forças que não gravíticas, como por exemplo forças que simulem elementos estabilizadores como ancoragens, forças correspondentes a acções dinâmicas, ou pressões de água nas descontinuidades. Mediante a incorporação de modelos de resistência ao deslizamento das descontinuidades é também possível a atribuição de factores de segurança aos diversos blocos.

#### NOTA FINAL

Agradece-se à Electricidade de Portugal - EDP por permitir a divulgação de resultados referentes à campanha de medições de descontinuidades realizada no Alto Lindoso.

VISTOS

AUTORIA

O Chefe do  
Núcleo de Obras Subterrâneas

*Manuel Barroso*

Manuel Gonçalves Barroso

*Luis Nolasco Lamas*

Luis Nolasco Lamas

Eng. Civil

Assistente de Investigação

O Chefe do  
Departamento de Barragens

*Carlos Alberto Henriques*

José Oliveira Pedro

O Subdirector

*Ricardo Oliveira*

Ricardo Oliveira



## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- BRADY, B. H. e BROWN, E. T. (1985) - "Rock Mechanics for Underground Mining". George Allen & Unwin, Londres.
- LAMAS, L. N. (1986) - "Statistical analysis of the stability of rock faces". Tese de Mestrado, Imperial College, Londres.
- LAMAS, L. N. (1987) - "Análise da estabilidade de faces de rocha em maciços fracturados". Congresso sobre Informática na Indústria da Construção, Lisboa.
- LNEC (1988) - "Observação das obras subterrâneas do empreendimento hidroeléctrico do Alto Lindoso - caracterização do maciço rochoso e determinação do estado de tensão in situ". Relatório interno, Lisboa.
- PRIEST, S. D. (1980) - "The use of inclined hemisphere projection methods for the determination of kinematic feasibility, slide direction and volume of rock blocks". Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 17, pag. 1-23.
- PRIEST, S. D. (1985) - "Hemispherical projection methods in Rock Mechanics". George Allen & Unwin, Londres.
- PRIEST, S. D. e HUDSON, J. A. (1981) - "Estimation of discontinuity spacing and trace length using scanline surveys". Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 18, pag. 183-197.







[www.lnec.pt](http://www.lnec.pt)

AV DO BRASIL 101 • 1700-066 LISBOA • PORTUGAL  
tel. (+351) 21 844 30 00  
lnec@lnec.pt [www.lnec.pt](http://www.lnec.pt)