

DESCRIÇÃO ESTATÍSTICA DE PARÂMETROS DE CORTE DE DESCONTINUIDADES*

Statistical description of shear parameters of joint sets

JOSÉ MURALHA **

RESUMO - Este trabalho trata da análise estatística de duas das mais importantes propriedades das descontinuidades dos maciços rochosos: a rigidez tangencial e a resistência ao deslizamento. Baseia-se em dados pertencentes a diversos grupos de ensaios efectuados no LNEC e cobrindo diferentes tipos de litologias (granito, xisto, corneana, etc.). Os resultados dos ensaios encontram-se processados numa base, o que permite o seu estudo estatístico. Sempre que possível, as descontinuidades são agrupadas em famílias de acordo com a sua atitude. Foram testadas algumas distribuições estatísticas bem conhecidas para a descrição da resistência ao deslizamento e da rigidez tangencial.

SYNOPSIS - This paper deals with the statistical analysis of two of the most important properties of rock joints: the shear stiffness and the shear strength. It is based on data belonging to different groups of tests performed at LNEC and covering various kinds of lithologies (granite, schist, hornfels, etc.). The results of the tests are kept in a data base, thus enabling statistical studies. Whenever possible, the joints are grouped in sets according to their attitude. For the description of the shear strength and shear stiffness some well-known statistical distributions were tested.

1 - INTRODUÇÃO

A Mecânica das Rochas é uma Ciência que requer a execução de estudos geotécnicos particulares antes que sejam definidos os modelos para a verificação da segurança da estrutura. Um dos principais campos de actividades refere-se à determinação dos parâmetros que são introduzidos nesses modelos. Apesar de os conhecimentos empíricos e a experiência de situações semelhantes ser sempre bem acolhida, eles só devem ser considerados como primeiras aproximações para a abordagem da questão da estimação em Mecânica das Rochas. As condições geológicas de cada empreendimento são, geralmente, bastante específicas e extremamente variáveis mesmo em locais pouco distantes, o que leva a que, somente em poucos casos muito particulares, deixe de ser necessária a realização de ensaios laboratoriais e/ou *in situ*. Como consequência, o desenvolvimento de ensaios e técnicas experimentais específicas sempre foi um dos principais domínios de investigação da Mecânica das Rochas e constituiu uma das razões para a sua evolução como uma Ciência distinta na área da Geotecnia.

(*) Comunicação apresentada ao 8º Congresso da Sociedade Internacional de Mecânica das Rochas, Tóquio, Setembro, 1995

(**) Engenheiro Civil, Laboratório Nacional de Engenharia Civil

Os estudos de Mecânica das Rochas, em regra, não são executados tomando em devida consideração a variabilidade das características da rocha e das descontinuidades. Usualmente, nas formulações analíticas que relacionam ações e resistências são considerados valores médios e introduzidos factores de segurança empíricos que reduzem as probabilidades de rotura de forma desconhecida. No próximo século os regulamentos e normas geotécnicos tenderão a ser baseados em conceitos de fiabilidade e em análises de risco (Eurocode 7, CEN 1994). Assim, um dos primeiros passos no sentido da utilização de abordagens probabilísticas deve ser a descrição estatística das propriedades das rochas, das descontinuidades e dos maciços rochosos.

Os parâmetros envolvidos num estudo de Mecânica das Rochas que pretende avaliar a segurança de uma dada obra podem ser diferenciados em duas categorias: os mecânicos e os geométricos. Os últimos, que definem as fronteiras, as formas e volumes, mas também, a posição das descontinuidades, desde sempre foram estudados de um ponto de vista estatístico (Baecher et al. 1977, Dershowitz 1984 e Grossmann 1990) e caminham para a geração topológica dos maciços rochosos com a definição dos blocos correspondentes e para a determinação dos intervalos de confiança dos parâmetros estatísticos mais relevantes das suas amostragens (Grossmann 1995).

Em particular, as duas últimas décadas foram caracterizadas pelo radical desenvolvimento e acessibilidade dos equipamentos de computação. Hoje em dia os nossos computadores pessoais (PC's) são superiores (mais rápidos, com maior capacidade e mais bem conectados) aos computadores centrais usados ainda há poucos anos atrás. Tal conduziu a um *status quo* onde programas de cálculo muito potentes e sofisticados estão facilmente acessíveis ao passo que, por vezes, os dados requeridos por essas ferramentas são de difícil determinação. Apontam-se algumas situações comuns: procedimentos numéricos sofisticados que precisam de parâmetros impossíveis de determinar experimentalmente (por exemplo, algumas das 21 constantes das relações tensões-deformações de um corpo anisotrópico), o uso indevido de programas cujas hipóteses básicas não são aplicáveis às condições em questão, o emprego de valores para parâmetros que não são determinados experimentalmente (por exemplo, 1 e 10 MPa/mm são os valores correntemente atribuídos, respectivamente, à rigidez normal e tangencial de descontinuidades). Assim, um esforço importante deve ser realizado no domínio da definição dos parâmetros para tentar acompanhar o desenvolvimento dos métodos e técnicas computacionais. Sob um ponto de vista distinto, refere-se que este desenvolvimento permite a execução de estudos de sensibilidade dos diversos parâmetros o que implica que estes devem ser descritos de uma forma estatística.

Em muitos casos, os estados limites últimos (rotura) e os estados limites de utilização (deformabilidade) são fortemente influenciados ou controlados pelas descontinuidades. Este trabalho trata da análise probabilística de duas das mais importantes propriedades das juntas rochosas - a rigidez e a resistência tangenciais. Será baseado em dados, recolhidos nas últimas décadas, pertencendo a diferentes conjuntos de ensaios executados no LNEC e que cobrem diferentes tipos de rochas e litologias (granito, xisto, corneana, etc.). Os resultados destes ensaios são mantidos numa base de dados e permitem, assim, a sua análise estatística. Sempre que possível, as descontinuidades são agrupadas de acordo com a sua atitude na família a que pertencem. Para a descrição da resistência e da rigidez tangenciais foram testadas algumas distribuições estatísticas bem conhecidas e usualmente aplicadas em Engenharia.

2 - DEFINIÇÕES

A análise estatística da resistência e da rigidez tangenciais baseia-se nos resultados de ensaios de deslizamento de descontinuidades. Para possibilitar a melhor comparação possível entre todos os resultados, os parâmetros estatísticos devem ser correctamente definidos e a sua determinação efectuada usando os mesmos procedimentos matemáticos. Os ensaios de deslizamento das descontinuidades foram todos realizados sob 4 tensões normais distintas e os gráficos tensões tangenciais vs deslocamentos tangenciais apresentam, na sua larga maioria, um aumento monotónico com uma assíntota horizontal. Para descrever este tipo de comportamento foi usado um modelo elasto-plástico bi-linear (Muralha 1990). Ele é formado por dois ramos: o primeiro é uma recta inclinada passando pela origem com um declive que define a rigidez tangencial K_s , este termina num troço horizontal que corresponde à tensão tangencial resistente τ independente do deslocamento tangencial. No que concerne a rigidez tangencial duas hipóteses podem ser formuladas: i) um valor de K_s é determinado para cada um dos diagramas correspondentes a cada uma das 4 tensões normais aplicadas, ii) a rigidez tangencial é independente da tensão normal e somente um único valor é calculado. Neste estudo, devido à extrema variabilidade deste parâmetro, unicamente a segunda premissa foi considerada.

Serão usados para descrever a variabilidade da tensão tangencial resistente e da rigidez tangencial alguns parâmetros estatísticos bem conhecidos. Como medidas de tendência central das diferentes amostras das variáveis x foram calculadas as seguintes estatísticas: as médias aritméticas \bar{x} e geométricas x_G das amostras e a mediana, ou seja, o 50º percentil x_{50} . As medidas de dispersão consideradas foram o desvio padrão das amostras, o seu coeficiente de variação C_{Vx} , a amplitude R_x e a distância inter-quartis R_{iqx} . Os coeficientes de ordem superior (assimetria C_{Sx} e de curtose C_{Kx}) são medidas da assimetria e da concentração, respectivamente, em torno da média das amostras experimentais.

Para a determinação destas estatísticas foram usados os seus estimadores não tendenciosos, que se apresentam em seguida.

$$s_x = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (1)$$

$$C_{Sx} = \frac{n}{(n-1)(n-2)} \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^3}{s_x^3} \quad (2)$$

$$C_{Kx} = \frac{n(n+1)}{(n-1)(n-2)(n-3)} \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^4}{s_x^4} - 3 \frac{(n-1)^2}{(n-2)(n-3)} \quad (3)$$

Este estudo baseia-se em 16 grupos (um dos quais foi subsequentemente subdividido) de ensaios de deslizamento de descontinuidades correspondentes a diferentes planos de prospecção de Mecânica das Rochas efectuados para diversos empreendimentos como barragens, túneis e escavações subterrâneas. Segue-se uma breve descrição de cada um destes grupos, acompanhada das correspondentes referências:

- **A** e **B** são dois grupos de ensaios de descontinuidades do mesmo projecto referentes a provetes de xisto verde e filádio; ambos os grupos são numerosos ($n=90$ e $n=56$, respectivamente) mas não existe qualquer distinção em função das atitudes das descontinuidades.
- Os grupos **C** e **F** correspondem, respectivamente, a 33 e 37 ensaios de deslizamento de descontinuidades das duas famílias mais importantes de um maciço rochoso granítico; **C** corresponde a descontinuidades da família sub-vertical e **F** à família sub-horizontal.
- No mesmo maciço, o conjunto **C** incluía 7 descontinuidades com preenchimento de material argiloso com espessuras compreendidas entre 1 e 6 mm; o grupo **E** refere-se a essas descontinuidades com enchimento e o grupo **D** às restantes 26 descontinuidades.
- Os grupos **G** a **I** correspondem às 3 principais famílias de diaclases de um maciço rochoso xistoso; o grupo **G** da família sub-horizontal apresenta 12 ensaios, o grupo **H** da família sub-vertical engloba 14 ensaios e o grupo **I** de uma família com outra atitude sub-vertical, paralela aos planos de xistosidade, compreende 15 ensaios.
- Os conjuntos **J** e **K** provêm do mesmo local; ambos englobam descontinuidades sem qualquer consideração pelas respectivas orientações; o grupo **J** corresponde a 27 descontinuidades em granito e o grupo **K** a 29 descontinuidades em corneana.
- O grupo **L** refere-se a 10 ensaios de deslizamento de descontinuidades de uma família particular de um maciço de fundação granítico.
- Os conjuntos **M**, **N** e **O** referem-se a ensaios de descontinuidades de um maciço rochoso xistoso e correspondem às famílias sub-horizontal, sub-vertical e paralela à xistosidade, respectivamente, que são as 3 famílias dominantes; o número de ensaios efectuados foi de 10 para o grupo **M** e de 7 para os outros dois.
- Os grupos **P**, **Q** e **R** também correspondem às 3 famílias principais de um outro maciço rochoso xistoso (famílias sub-horizontal, sub-vertical e paralela à xistosidade, respectivamente); os ensaios realizados neste caso foram de 16, 20 e 18, pela mesma ordem.

Como comentário final deve salientar-se que foram analisados os resultados de mais de 400 ensaios de deslizamento de descontinuidades.

3 - DESCRIÇÃO ESTATÍSTICA DA RESISTÊNCIA TANGENCIAL

Em qualquer campo da Engenharia, o primeiro passo numa investigação acerca de dados existentes é a descrição estatística dos conjuntos de resultados. A Tabela 1 apresenta alguns parâmetros estatísticos descritivos da resistência tangencial dos grupos referenciados anteriormente. Apesar de esta apresentação não pretender ser mais que unicamente uma primeira abordagem, podem retirar-se algumas conclusões interessantes.

A relação entre a tensão tangencial resistente e a tensão normal é bem definida por um critério de rotura linear (envolvente de Coulomb), especialmente se não for necessário efectuar extrapolações para tensões normais baixas.

Tabela 1 - Parâmetros estatísticos da resistência ao deslizamento

Descrição	n	50	G	s	V	R	R _{iq}	C _S	C _K	
	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(%)	(MPa)	(MPa)	(-)	(-)	
Grupo A	0,25	0,382	0,376	0,372	0,0873	22,8	0,555	0,087	0,405	2,024
Xisto verde	0,50	0,596	0,580	0,584	0,1180	19,8	0,683	0,132	0,334	1,216
	1,00	1,009	0,991	0,986	0,2129	21,1	1,166	0,234	0,342	0,872
n=90	1,50	1,382	1,372	1,349	0,2994	21,7	1,616	0,375	0,191	0,544
Grupo B	0,25	0,289	0,285	0,281	0,0745	25,8	0,436	0,070	0,797	2,101
Filádio	0,50	0,433	0,420	0,415	0,1055	24,3	0,600	0,101	1,283	3,382
	1,00	0,707	0,671	0,686	0,1829	25,9	0,968	0,178	1,348	2,800
n=56	1,50	0,957	0,945	0,930	0,2373	24,8	1,173	0,274	0,907	1,308
Grupo C	0,25	0,267	0,301	0,249	0,0904	33,9	0,308	0,152	-0,384	-1,139
Granito	0,50	0,453	0,489	0,423	0,1544	34,1	0,540	0,275	-0,259	-1,111
Família V	1,00	0,798	0,856	0,750	0,2538	31,8	0,984	0,439	-0,471	-0,779
n=33	1,50	1,133	1,236	1,073	0,3427	30,2	1,277	0,556	-0,495	-0,781
Grupo D	0,25	0,293	0,309	0,281	0,0763	26,0	0,308	0,064	-0,835	0,357
Família V, sem ench.	0,50	0,498	0,497	0,480	0,1273	25,6	0,478	0,185	-0,442	-0,364
	1,00	0,878	0,918	0,854	0,1953	22,3	0,807	0,205	-0,595	0,379
n=26	1,50	1,245	1,273	1,214	0,2657	21,3	0,994	0,342	-0,627	-0,083
Grupo E	0,25	0,169	0,154	0,160	0,0714	42,3	0,209	0,038	2,318	5,780
Enchimento	0,50	0,283	0,252	0,264	0,1303	46,1	0,390	0,077	2,152	5,106
Argiloso	1,00	0,500	0,439	0,465	0,2315	46,3	0,689	0,217	1,873	3,999
n=7	1,50	0,719	0,720	0,678	0,2798	38,9	0,864	0,273	1,361	2,651
Grupo F	0,25	0,362	0,376	0,355	0,0691	19,1	0,328	0,075	-0,482	0,690
Granito	0,50	0,594	0,597	0,583	0,1110	18,7	0,520	0,126	-0,413	0,947
Família H	1,00	1,037	1,037	1,023	0,1579	15,2	0,743	0,186	-0,769	1,589
n=37	1,50	1,478	1,459	1,458	0,2347	15,9	1,039	0,300	-0,314	0,429
Grupo G	0,30	0,381	0,397	0,367	0,0949	24,9	0,296	0,068	-1,388	1,219
Xisto	0,60	0,621	0,656	0,605	0,1306	21,0	0,426	0,075	-1,675	2,040
Família H	0,90	0,837	0,890	0,814	0,1825	21,8	0,630	0,102	-1,500	1,743
n=26	1,20	1,070	1,130	1,047	0,2066	19,3	0,742	0,086	-1,486	1,974
Grupo H	0,30	0,406	0,387	0,394	0,1023	25,2	0,375	0,123	0,149	-0,286
Xisto	0,60	0,635	0,633	0,623	0,1172	18,5	0,456	0,162	-0,719	1,133
Família V	0,90	0,866	0,888	0,854	0,1409	16,3	0,527	0,173	-0,940	0,991
n=14	1,20	1,078	1,070	1,068	0,1470	13,6	0,548	0,126	-0,653	0,750
Grupo I	0,30	0,311	0,312	0,307	0,0468	15,1	0,167	0,044	0,345	0,331
Xisto	0,60	0,524	0,525	0,521	0,0607	11,6	0,213	0,098	-0,504	-0,343
Família X	0,90	0,723	0,722	0,721	0,0642	8,9	0,240	0,086	-0,518	0,268
n=15	1,20	0,918	0,932	0,914	0,0913	9,9	0,295	0,153	-0,459	-0,753
Grupo J	0,25	0,354	0,339	0,337	0,1093	30,9	0,478	0,135	0,610	0,775
Granito	0,50	0,566	0,591	0,544	0,1532	27,1	0,707	0,234	-0,035	0,375
	1,00	0,973	0,978	0,944	0,2262	23,2	1,024	0,344	-0,496	0,521
n=27	1,50	1,329	1,351	1,295	0,2829	21,3	1,202	0,448	-0,594	0,371
Grupo K	0,25	0,287	0,262	0,271	0,0996	34,7	0,340	0,151	0,400	-0,935
Corneana	0,50	0,456	0,459	0,431	0,1563	34,2	0,560	0,276	0,356	-0,905
	1,00	0,792	0,767	0,753	0,2496	31,5	0,894	0,366	0,168	-0,977
n=29	1,50	1,099	1,037	1,049	0,3330	30,3	1,178	0,534	0,199	-0,837
Grupo L	0,10	0,214	0,221	0,209	0,0474	22,1	0,181	0,051	0,061	1,633
Granito	0,30	0,436	0,422	0,426	0,0911	20,9	0,317	0,127	-0,269	0,162
Família H	0,60	0,700	0,685	0,688	0,1297	18,5	0,438	0,148	-0,679	0,763
n=10	0,90	0,946	0,948	0,923	0,2004	21,2	0,707	0,245	-1,094	1,889
Grupo M	0,40	0,441	0,428	0,428	0,1189	26,9	0,413	0,146	0,857	1,184
Xisto	0,80	0,711	0,707	0,701	0,1217	17,1	0,394	0,132	0,098	-0,225
Família H	1,20	0,976	1,003	0,970	0,1156	11,8	0,370	0,146	-0,696	-0,088
n=10	1,60	1,267	1,300	1,256	0,1772	14,0	0,570	0,165	-0,479	0,119
Grupo N	0,40	0,408	0,398	0,406	0,0514	12,6	0,146	0,067	-1,015	1,118
Xisto	0,80	0,704	0,717	0,702	0,0584	8,3	0,176	0,079	-1,062	1,585
Família V	1,20	1,000	1,020	0,996	0,0931	9,3	0,273	0,121	-1,427	2,236
n=7	1,60	1,266	1,271	1,261	0,1150	9,1	0,366	0,119	-0,934	1,755
Grupo O	0,40	0,213	0,200	0,211	0,0290	13,6	0,085	0,040	1,134	0,753
Xisto	0,80	0,412	0,406	0,407	0,0673	16,3	0,195	0,079	1,139	1,316
Família X	1,20	0,602	0,573	0,599	0,0754	12,5	0,217	0,089	1,556	2,391
n=7	1,60	0,791	0,754	0,788	0,0878	11,1	0,254	0,056	2,258	5,360
Grupo P	0,50	0,537	0,509	0,525	0,1191	22,2	0,422	0,169	0,389	-0,482
Xisto	1,00	0,952	0,902	0,934	0,1943	20,4	0,728	0,270	0,513	-0,179
Família H	1,50	1,346	1,290	1,323	0,2635	19,6	0,962	0,350	0,833	0,252
n=16	2,00	1,730	1,648	1,699	0,3474	20,1	1,269	0,447	0,987	0,428
Grupo Q	0,50	0,405	0,389	0,399	0,0731	18,0	0,259	0,113	0,460	-0,802
Xisto	1,00	0,748	0,727	0,735	0,1454	19,4	0,496	0,246	0,047	-1,153
Família V	1,50	1,083	1,073	1,066	0,1966	18,2	0,666	0,347	-0,155	-1,178
n=20	2,00	1,405	1,397	1,381	0,2618	18,6	0,877	0,444	-0,173	-1,243
Grupo R	0,50	0,489	0,454	0,482	0,0938	19,2	0,308	0,073	1,368	0,912
Xisto	1,00	0,875	0,855	0,867	0,1289	14,7	0,515	0,117	0,724	0,627
Família X	1,50	1,241	1,201	1,231	0,1681	13,5	0,700	0,184	0,568	0,600
n=18	2,00	1,598	1,572	1,584	0,2159	13,5	0,922	0,273	0,311	0,629

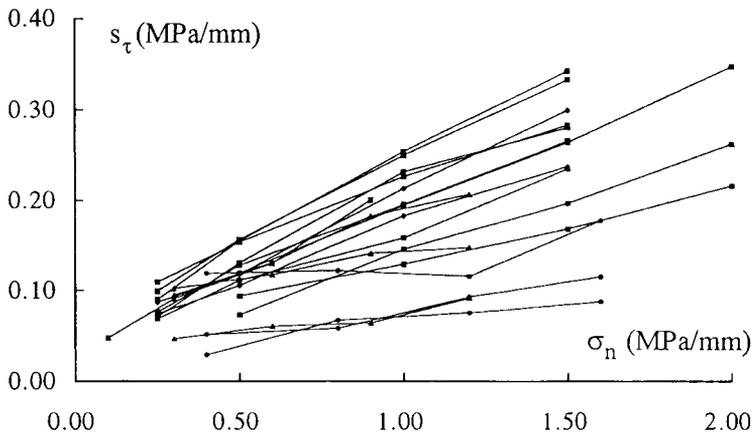


Figura 1 - Variação do desvio padrão da tensão tangencial resistente com a tensão

Tabela 2 - Constantes das regressões lineares de s_t vs s_n

Grupo	Constante a	Declive b	Coefficiente de correlação
A	0,0386	0,173	0,9985
B	0,0421	0,133	0,9973
C	0,0480	0,200	0,9978
D	0,0458	0,148	0,9974
E	0,0417	0,168	0,9842
F	0,0397	0,127	0,9946
G	0,0569	0,129	0,9914
H	0,0874	0,053	0,9790
I	0,0315	0,046	0,9497
J	0,0805	0,138	0,9965
K	0,0590	0,185	0,9985
L	0,0297	0,184	0,9931
M	0,0912	0,042	0,7426
N	0,0231	0,056	0,9738
O	0,0188	0,046	0,9394
P	0,0426	0,151	0,9993
Q	0,0149	0,123	0,9981
R	0,0503	0,081	0,9975

O desvio padrão da resistência tangencial cresce também linearmente com a tensão normal, apesar de apresentar um declive inferior ao de τ . Tal pode ser verificado pela diminuição do coeficiente de variação com σ_n . A Figura 1 apresenta graficamente esta relação e a Tabela 2 a intersecção com o eixo das ordenadas **a** e o declive **b** das rectas mais prováveis definidas por regressões lineares da relação entre s_τ e σ_n . Os coeficientes de correlação mostram a boa aproximação conseguida pela relação linear: 75% dos valores são superiores a 0,99 e somente num caso inferior a 0,90.

O coeficiente de variação é uma medida de dispersão que permite a comparação entre diferentes casos. Verifica-se que os valores dos coeficientes de variação dos conjuntos de descontinuidades em que o agrupamento não leva em conta a orientação do diaclasamento (cerca de 25%) são superiores aqueles provenientes das famílias de descontinuidades em que o critério da amostragem se baseia na atitude das descontinuidades, que varia entre 10% e 25% com um valor médio de cerca de 15%. Trata-se de uma boa razão para justificar que a caracterização estatística da resistência ao deslizamento se deve basear em conjuntos definidos a partir da orientação das descontinuidades (famílias). Contudo, deve tomar-se particular atenção quando circunstâncias específicas, como o caso das descontinuidades preenchidas que ocorrem na família de diaclases **C**, não permitem que estas amostras possam ser consideradas homogéneas.

4 - DESCRIÇÃO ESTATÍSTICA DA RIGIDEZ TANGENCIAL

Na tabela 3 são apresentados os valores de diversos parâmetros estatísticos da rigidez tangencial dos diferentes grupos de descontinuidades. As médias aritméticas variam entre 1,5 e 11 MPa/mm, com a larga maioria dos valores a caírem no intervalo de 3 a 7 MPa/mm. As medianas são constantemente inferiores às médias aritméticas e em cerca de metade dos casos indicam uma assimetria positiva relevante dos dados. Um dos requisitos dos estimadores é a robustez, isto é, serem pouco sensíveis a pequenos desvios das hipóteses para as quais o estimador foi optimizado; assim, a mediana deve ser preferencialmente usada como um estimador da medida central da rigidez tangencial em detrimento da média aritmética, dado que os histogramas apresentam caudas pronunciadas à sua direita (para os valores mais elevados).

No que concerne a dispersão, K_s é um parâmetro com uma alta variabilidade. Os desvios padrão são elevados e conduzem a coeficientes de variação nunca inferiores a 40% e, em certos casos, mesmo superiores a 100%. Com valores de dispersão desta ordem de grandeza, é de esperar que os intervalos de confiança da média aritmética apresentem valores negativos.

Esta dificuldade levou à utilização de um parâmetro alternativo - o ângulo associado à rigidez tangencial - definido por

$$\kappa = tg^{-1} K_s \quad (4)$$

Na tabela 4 são apresentados as médias aritméticas, respectivas tangentes, medianas, desvios padrão e coeficientes de variação do ângulo da rigidez tangencial dos diferentes conjuntos de descontinuidades. A conclusão mais importante que pode ser retirada é a redução de C_{VK_s} .

5 - MODELAÇÃO

A incerteza de uma dada grandeza física é, em regra, devida a diversas causas ou efeitos. No caso das descontinuidades dos maciços rochosos, os mecanismos que comandam a resistência ao deslizamento são o galgamento da rugosidade que caracteriza as paredes das diaclases e o corte do material rocha das suas asperezas; o primeiro é predominante para tensões normais baixas e o segundo para tensões normais elevadas. Neste contexto, tensões normais altas e baixas são intimamente dependentes da resistência do material constituinte das paredes das descontinuidades.

Tabela 3 - Parâmetros estatísticos da rigidez tangencial

Grupo	s (MPa/mm)	K_{s50} (MPa/mm)	s_{Ks} (MPa/mm)	V_{Ks} (-)
A	3,43	2,54	2,491	0,73
B	3,25	2,90	2,106	0,65
C	4,05	2,58	5,174	1,28
D	3,47	2,48	4,274	1,23
E	6,18	2,79	7,742	1,25
F	2,57	2,21	1,414	0,55
G	6,49	5,65	3,600	0,56
H	4,53	4,42	2,174	0,48
I	4,71	3,87	2,569	0,55
J	5,32	3,78	6,993	1,31
K	6,62	5,75	4,873	0,74
L	1,51	1,30	0,663	0,44
M	5,82	5,95	3,008	0,52
N	7,06	4,79	5,047	0,71
O	10,90	10,62	4,478	0,41
P	4,82	4,88	2,472	0,51
Q	4,41	4,09	2,815	0,64
R	5,63	5,14	2,651	0,47

Em certas situações, é possível definir um modelo probabilístico para uma dada variável mesmo sem um estudo detalhado das causas, bastando que seja conhecida a forma como elas interagem. Em Engenharia é usual a consideração de 3 casos: aquele em que os efeitos das diferentes causas são aditivos, aquele em que os efeitos são multiplicativos e aquele em que um efeito extremo ou crítico assume um papel fundamental. Mesmo nos casos em que existe uma evidência física ou um modelo para o mecanismo associado ao fenómeno sugerindo a aplicação de uma distribuição apropriada, algumas distribuições de probabilidades mais familiares são, usualmente, testadas.

As distribuições estatísticas utilizadas para tentar modelar a incerteza e variabilidade da resistência ao deslizamento e da rigidez tangencial de descontinuidades foram as seguintes: A distribuição normal (ou de Gauss) em que a variação dos resultados resulta de um somatório de efeitos; a distribuição log-normal que advém da multiplicação de um conjunto de factores; a distribuição de Weibull que representa eventos definidos pela rotura do elo mais fraco; a distribuição de função Gamma que ilustra o tempo de espera até à ocorrência do k-ésimo evento. Como não é possível a selecção de um destes modelos estatísticos com base na fenomenologia do comportamento mecânico das descontinuidades, foi seguida uma abordagem empírica.

A tensão tangencial resistente e a rigidez tangencial são variáveis físicas que só apresentam valores superiores a 0, pelo que, no que se refere aos domínios de aplicação das

Tabela 4 - Parâmetros estatísticos do ângulo da rigidez tangencial

Grupo	s (°)	tan _s (Mpa/mm)	s50 (°)	s _s (°)	V _s (%)
A	67,0	2,35	68,5	12,44	18,6
B	68,1	2,48	71,0	11,17	16,4
C	67,8	2,45	68,8	11,31	16,7
D	66,6	2,31	68,0	11,50	17,3
E	72,4	3,15	70,3	9,98	13,8
F	64,1	2,06	65,7	11,58	18,1
G	77,4	4,47	79,7	9,67	12,5
H	73,7	3,41	77,2	11,50	15,6
I	74,1	3,51	75,5	9,77	13,1
J	70,9	2,89	75,2	13,39	18,9
K	76,5	4,17	80,1	9,43	12,3
L	53,8	1,37	52,1	9,59	17,8
M	76,9	4,30	80,5	8,74	11,4
N	75,5	3,87	78,2	14,27	18,9
O	83,9	9,36	84,6	2,53	3,0
P	73,6	3,41	78,4	12,02	16,3
Q	71,1	2,92	76,3	12,99	18,3
R	78,1	4,74	79,0	5,22	6,7

distribuições, a normal não parece ser apropriada. No que se refere à flexibilidade das distribuições, a distribuição normal apresenta uma desvantagem significativa, dado que só apresenta valores bem definidos para os coeficientes de assimetria (0) e de curtose (3). As distribuições log-normal e de Weibull são mais adaptáveis porque possuem um factor de forma. A distribuição Gamma é ainda mais versátil pois as possíveis relações entre Cs e Ck definem uma área e não só uma curva, como no caso das duas distribuições referidas antes ou unicamente um ponto isolado como as distribuições de Gauss.

Todos os parâmetros das distribuições foram estimados usando o método dos momentos, onde são calculados usando a média aritmética e a variância determinadas a partir das amostras por meio de estimadores não tendenciosos. A análise prossegue com a determinação da estatística de Kolmogorov (diferença absoluta máxima entre as distribuições cumulativas das amostras e as respectivas distribuições cumulativas estimadas). A tabela de Smirnov permite o cálculo do nível de significância resultante desta estatística e testar a hipótese de ambas as distribuições provirem da mesma população. Como os estimadores foram determinados usando os valores das amostras, foi estabelecido um nível de significância elevado (0,999) e as soluções retiradas devem ser encaradas com cautelas e sob um ponto de vista eminentemente qualitativo.

No que se refere à tensão tangencial resistente, a principal conclusão é que, na globalidade, todas as distribuições podem ser usadas para modelar este parâmetro de uma forma equivalente e eficiente. Também pode ser notado que nenhuma distribuição apresentou uma vantagem ou *handicap* em relação às restantes. Contudo, certos casos particulares foram detectados: os grupos **A** e **B** não seguem distribuições normais ou de Weibull; as famílias **C** (como seria de esperar) e **H** não conseguem ser modeladas por nenhuma das distribuições; distribuições log-normais e Gamma não conseguem adaptar-se ao conjunto de diaclases **D**.

No que concerne a rigidez tangencial, a distribuição log-normal aparece como a que melhor se adapta aos dados experimentais, as distribuições Gamma e de Weibull apresenta uma adaptação aceitável à maioria dos resultados e a distribuição normal não consegue adaptar-se em quase metade dos casos.

A distribuição de Weibull é a única que apresenta uma adaptação razoável para o ângulo da rigidez tangencial. As restantes distribuições unicamente de forma ocasional conseguem modelar esta variável. Tal pode resultar de o ângulo da rigidez tangencial ser limitado em ambos os extremos (só pode variar entre 0° e 90°).

6 - CONCLUSÕES

A primeira conclusão é que a descrição da resistência ao deslizamento e da rigidez tangencial de descontinuidades de maciços rochosos, tanto em termos de estatísticas descritivas como de distribuições, pode ser facilmente atingida. Contudo, a capacidade de passar além deste ponto e estabelecer um modelo probabilístico de previsão do comportamento mecânico ainda requer estudo e investigação. Por ora, existe somente um modelo muito simples, que usa distribuições normais para modelar a resistência tangencial para uma dada tensão constante em que os valores médios e os desvios padrão variam linearmente com a tensão normal. A possibilidade de este modelo fornecer probabilidades não nulas para a existência de tensões tangenciais resistentes negativas não deve ser encarada como uma desvantagem significativa, visto que a simples utilização da distribuição truncada correspondente é suficiente para ultrapassar este óbice. Este modelo possibilita, ainda, a determinação de intervalos de confiança em torno das médias, apesar de largos face aos valores dos coeficientes de variação.

Uma hipótese futura que se afigura como promissora é a utilização de distribuições Gamma, porque a determinação dos parâmetros de forma e de escala desta distribuição pode ser melhorada, nomeadamente, através dos estimadores de máxima verosimilhança. Como para o projecto é importante definir valores característicos da resistência ao deslizamento, como por exemplo o valor do 5º percentil que corresponde à probabilidade de 95% de ser excedido, uma importante tarefa é a determinação de intervalos de confiança para este e outros percentis.

A consideração da variabilidade destes parâmetros permite a definição do número de ensaios que se torna necessário efectuar para que os intervalos de confiança possam ser considerados satisfatórios, isto é, definir o número de ensaios que pode ser considerado significativo para a prospecção de um maciço rochoso. Apesar de a realização de ensaios ser a melhor forma para estabelecer valores para os diferentes parâmetros, em certas situações, a realização de um conjunto diminuto de ensaios, por ser estatisticamente pouco significativo, pode mesmo ser economicamente questionável.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BAECHER, G.B.; LANNEY, N.A. e H.H. EINSTEIN - *Statistical description of rock properties and sampling*. 18th U.S. Symp. on Rock Mechanics, Keystone, Colorado. 1977.
- CEN - Comité Européen de Normalisation. *Eurocode 7 - Geotechnical Design. General Rules*. CEN/TC 250/SC 7. 1994.
- DERSHOWITZ, W.S. - *Rock joint systems*. PhD thesis, MIT. Cambridge, Massachusettes. 1984.
- GROSSMANN, N.F. - *Joint statistics. State of the art and practical applications*. Workshop Survey and Testing Methods for Discontinuous Rock Masses. Japan Institute of Systems Research, Tokyo. 1990.
- GROSSMANN, N.F. - *About the confidence limits of the joint set parameters*. 8th Congress ISRM, Tokyo, Japan. Rotterdam. Balkema. 1995.
- MURALHA, J. - *Evaluation of mechanical characteristics of rock joints under shear loads*. Proc. Int. Symp. on Rock Joints, Barton & Stephansson (eds), Loen, Norway. Rotterdam: Balkema. 1990.