

CARACTERÍSTICAS DIMENSIONAIS DO SISTEMA DE FRACTURAS DO TERRITÓRIO CONTINENTAL PORTUGUÊS*

Dimensional Characteristics of the System of Fractures of the Portuguese Mainland

por

JOSÉ GABRIEL CHARRUA-GRAÇA**

RESUMO – A quantificação do risco expectável para uma obra em maciços rochosos pode ser obtida com base no conhecimento das distribuições estatísticas que descrevem a atitude das suas discontinuidades, a dimensão dessas discontinuidades e a lei dos espaçamentos entre elas. No presente artigo justifica-se a utilização de distribuições log-normais e exponenciais para as duas últimas características e apresentam-se estudos do sistema de fracturas que foi detectado no território continental português por observação remota. A análise deste sistema de fracturas confirma a aplicabilidade daquelas leis não obstante alguns condicionamentos que se expressam.

SYNOPSIS – The quantification of the expectable risk for works built on rock masses may be obtained on basis of the knowledge of the statistical distributions that describe the attitude of their discontinuities, the dimension of these discontinuities and the law that governs the spacing between them. This article gives reasons for the use of log-normal and exponential distributions for the last two characteristics and present studies of the system of fractures detected in the portuguese mainland by means of remote sensing. The analysis of this system of fractures confirms the applicability of those laws in spite of some limitations, which are given.

1 – GENERALIDADES

A análise do comportamento dum maciço rochoso quer em relação à deformabilidade quer em relação à rotura, quando sob uma perspectiva casual e uma vez estabelecidas as famílias de discontinuidades mais importantes para

* Trabalho apresentado no III International Congress of Engineering Geology. Madrid. September 1978.

** Engenheiro Civil, Especialista do Serviço de Barragens do LNEC.

o caso em estudo, terá que ter como parâmetros de base a probabilidade de se encontrar uma discontinuidade a certa distância, e a probabilidade de essa discontinuidade ter um certo desenvolvimento.

Estas duas probabilidades só se podem exprimir se forem conhecidas as suas leis de distribuição gerais e os parâmetros respectivos para o específico caso em estudo.

Várias têm sido as leis preconizadas e mesmo as grandezas seleccionadas para serem caracterizadas por essas leis. Julgamos que uma boa caracterização do maciço sob este ponto de vista pode ser feita com base no espaçamento entre discontinuidades e dimensão dessas discontinuidades, utilizando estes termos no sentido que seguidamente se esclarece:

a) espaçamento num certo ponto e em dada direcção é o comprimento do segmento de recta passando pelo ponto, paralelo à direcção definida, limitado pelas duas discontinuidades mais próximas que o intersectam, uma de cada lado do ponto. Este espaçamento poderá referir-se apenas a uma família de discontinuidades, e só se considerarão na sua definição as fracturas pertencentes à família, ou referir-se a todo um sistema e todas as fracturas do sistema serão consideradas;

b) dimensão de uma discontinuidade numa certa direcção do seu plano corresponde à sua extensão nessa mesma direcção. Se se considerar uma discontinuidade como circular ela terá uma dimensão isotropa no seu plano e portanto será necessário caracterizar do ponto de vista geral apenas uma variável, se se considerar de forma mais complexa serão necessárias mais variáveis. Para casos como o estudo a que este artigo se refere em que se analisam grandes massas ao nível continental poder-se-á admitir que só uma dimensão é relevante.

2 – JUSTIFICAÇÃO DAS LEIS DE DISTRIBUIÇÃO PRECONIZADAS

2.1 – *Distribuição exponencial dos espaçamentos*

Uma justificação da adopção desta lei foi apresentada por Priest e Hudson (1) sendo sobre ela que nos basearemos.

Considere-se um elemento suficientemente pequeno do maciço com uma certa dimensão d segundo a direcção considerada para o espaçamento. Este elemento pode ou não ser atravessado por uma fractura de dada família.

Se admitirmos o maciço constituído por um grande número de tais elementos, todos com a mesma probabilidade p de ser atravessado por uma fractura dessa família, a probabilidade de termos um certo espaçamento e , ou seja a probabilidade de após a ocorrência duma fractura termos uma série de e/d elementos não atravessados por fracturas seguidos por um elemento atravessado por uma fractura é

$$P(e) = (1-p)^{e/d} p \quad (1)$$

A probabilidade de uma linha com a direcção já referida encontrar k num comprimento x ($x = nd$) é

$$P_x(k) = \frac{n!}{(n-K)!} p^K (1-p)^{n-K} \quad (2)$$

expressão da distribuição binomial, exprimindo a ocorrência de K casos favoráveis em n possíveis.

Se a dimensão d considerada decrescer para um valor infinitesimal a expressão (2) transforma-se numa distribuição de Poisson

$$P_x(K) = \frac{(\lambda x)^K e^{-\lambda x}}{K!} \quad (3)$$

virá então que a probabilidade de existir uma distância l menor ou igual a x entre uma discontinuidade e a seguinte será:

$$P(l \leq x) = 1 - P(l > x) = 1 - P_x(0) \quad (4)$$

e considerando (3) teremos

$$P(l \leq x) = 1 - e^{-\lambda x} \quad (5)$$

Esta expressão corresponde a uma distribuição cumulativa de que a respectiva distribuição de densidade de probabilidade $p(x)$ terá a expressão

$$p(x) = \lambda e^{-\lambda x} \quad (6)$$

em que λ é o inverso do espaçamento médio

Admitindo que durante o fenómeno de geração de discontinuidades as famílias não são interinfluenciáveis, isto é, independentemente da existência de discontinuidades em dado momento o processo de evolução é de molde a que qualquer ponto mantenha a equiprobabilidade de pertencer a nova discontinuidade, ainda será exponencial a densidade de probabilidade dos espaçamentos referidos ao sistema.

Com efeito as condições de haver num ponto um espaçamento x correspondem à existência simultânea de um espaçamento pelo menos igual numa das famílias e um espaçamento igual ou superior nas restantes famílias. A utilização das expressões (5) e (6) conduzirá a

$$p(x) = \left(\sum_n \lambda_n \right) e^{-\left(\sum_n \lambda_n \right) x} \quad (7)$$

Deve aqui ter-se em atenção que todos os λ_n e portanto os espaçamentos médios considerados devem ser referidos à mesma direcção.

2.2 – Distribuição log-normal das dimensões

Uma justificação para a adopção deste tipo de lei para dimensões de discontinuidades, e especificamente aplicada a dimensões de afloramento de grandes falhas continentais (superiores a 50 km) foi apresentado por G. Ranali (II).

Baseia-se na associação a cada falha de uma medida S representativa de um volume de região com elevado estado de tensão, envolvendo a falha no período da sua formação.

A partir da situação inicial e independentemente da função de distribuição dos volumes referidos e do processo de formação original das falhas, a situação actual teria sido obtida por uma sequência no tempo de operações aleatórias afectando esses volumes S . Se a variação em qualquer estágio do processo for uma proporção aleatória p_i do estágio do processo anterior diz-se que o processo segue a lei dos efeitos proporcionais

$$S_i = p_i S_{i-1} \quad (8)$$

e

$$S_n = S_0 \prod_{i=1}^n p_i \quad (9)$$

em que S_0 é o valor inicial de S e S_n o seu valor ao fim de n passos.

Pela lei do limite central se, n for suficientemente grande e nas condições referidas, S_n terá uma distribuição log-normal e o comprimento L das falhas que pode ser obtido de S por uma lei de potência também terá uma distribuição log-normal.

Esta justificação para a log-normalidade da dimensão é aplicável ao comprimento do afloramento a grandes falhas, com base na relativamente pequena espessura da crosta envolvida no processo o que confere a estas falhas a predominância duma dada dimensão. Não poderá em princípio justificar a log-normalidade das intersecções com superfícies de discontinuidade de menor amplitude como por exemplo diaclases.

3 – APLICAÇÃO A UM CASO CONCRETO

No sentido de experimentar a veracidade destas leis de distribuição às grandezas em causa foi tentada a sua aplicação ao sistema de grandes fracturas (superiores a 500 m) que corta o território continental português.

Nabais Conde e Santarém Andrade (III) elaboraram, a partir de imagens fotografadas pelos satélites ERTS-1 e ERTS-2, uma carta à escala 1/500 000 contendo as fracturas que detectaram no território, e julgou-se em face da área amostrada e o número elevado de fracturas, que seria este um bom caso para verificação da verosimilhança das leis.

Para execução prática do estudo caracterizou-se cada uma de 4155 fracturas pelas coordenadas dos seus extremos. Seguidamente foram as lineações analisadas do ponto de vista de direcção através dum programa automático que as agrupou em classes de um certo número de graus.

Na Fig. 1 encontram-se representados dois polígonos de frequência relativa, a traço fino o correspondente a classes de 1° e a traço grosso o correspondente a classes de 5°. Em ordenadas indicam-se os números de ocorrência em escalas comparáveis, e em abcissas os ângulos exibidos com a direcção E-W.

Na observação dos polígonos destacam-se duas principais famílias, a primeira das quais (A) entre 5° e 45° com moda em cerca de 25°, e a segunda (B) entre 45° e 85° com moda em cerca de 65°.

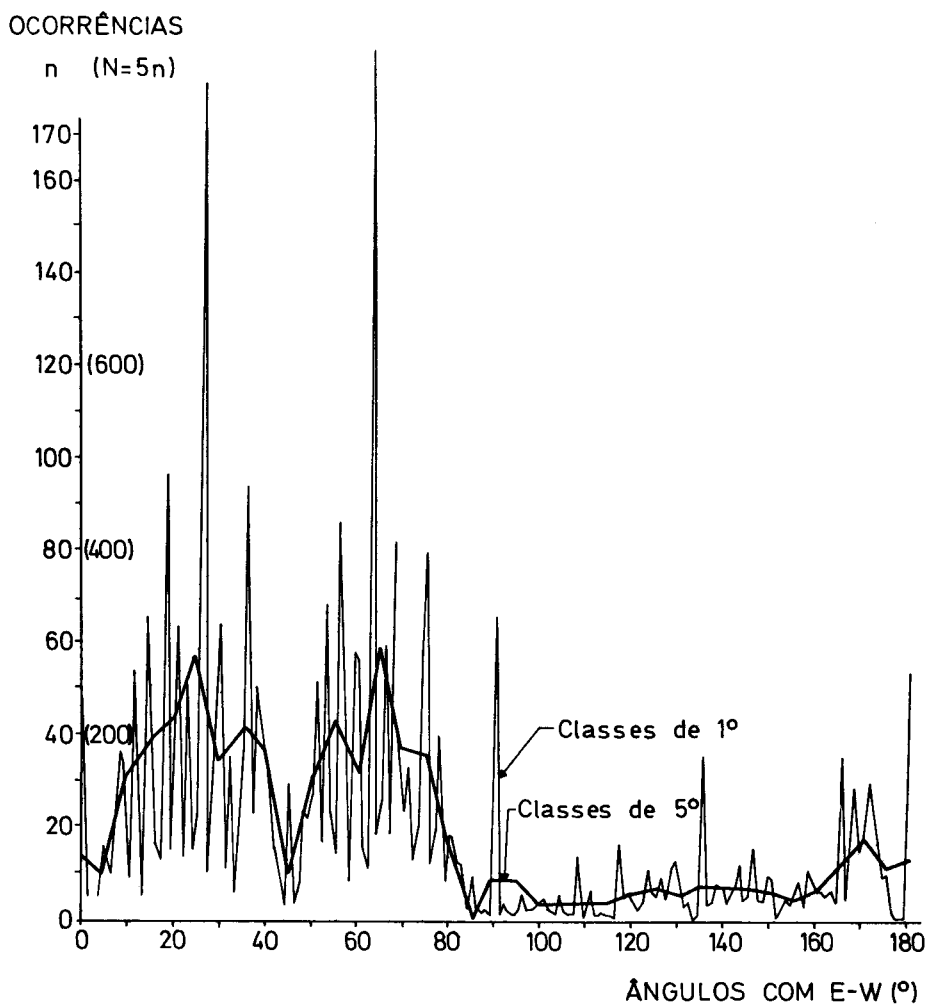


Fig. 1 – Polígonos de frequência de direcções das fracturas

3.1 – *Análise dos espaçamentos*

Para se proceder a esta análise elaborou-se um programa automático que determina a intersecção das fracturas com uma recta previamente definida, calcula as distâncias entre sucessivos pontos de intersecção, traça a curva acumulada de frequência de ocorrência dessas distâncias e a curva de frequência acumulada da distribuição exponencial mais provável, sendo em seguida determinado o desvio máximo relativo verificado entre as duas curvas acumuladas.

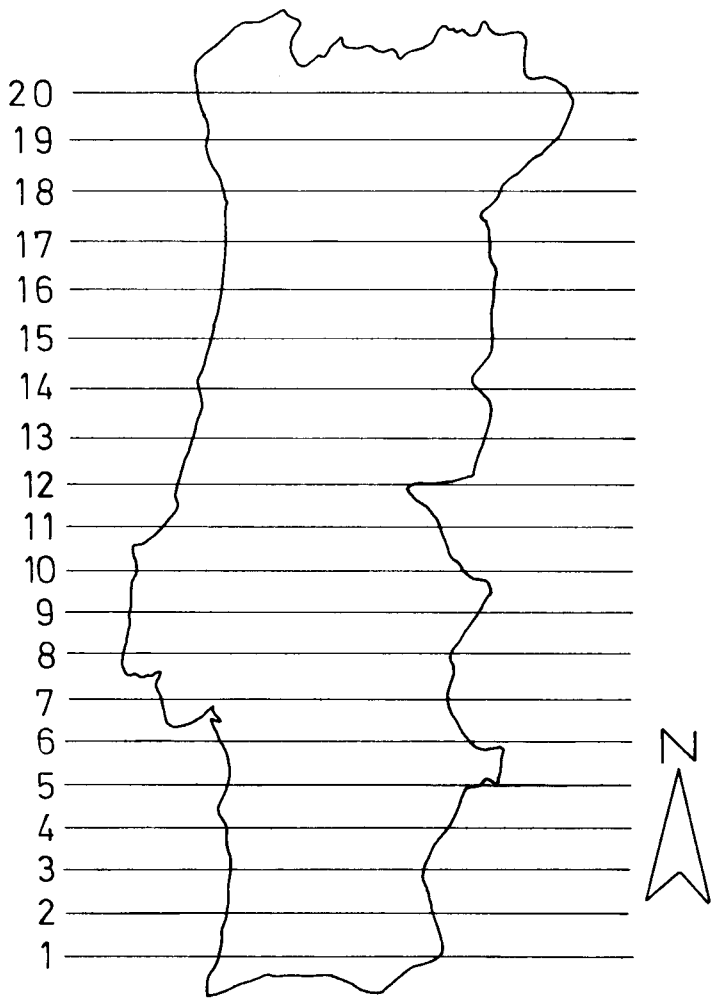


Fig. 2 – Linhas pré-estabelecidas para estudo dos espaçamentos

O estudo foi executado para vinte linhas com a direcção E-W equidistantes de 25 km (Fig. 2) e no quadro seguinte apresentam-se resultados obtidos, indicando-se para cada linha o número de espaçamentos considerados, estimadores de máxima verosimilhança do espaçamento médio $\bar{e}$ e o desvio máximo relativo (δ) observado para a lei exponencial mais provável.

Todos estes valores estão indicados respectivamente para as famílias A e B e para o sistema total de fracturas observadas.

No caso da distribuição exponencial ser aceitável para os espaçamentos teríamos que o conjunto dos desvios máximos verificado para cada uma das famílias e para o sistema total de fracturas deveria ter a distribuição λ de Kolmogorov e Smirnov.

Foram construídas as curvas acumuladas dos desvios e comparadas com a correspondente àquela distribuição como se pode observar nas Figuras 3, 4 e 5 relativas respectivamente às famílias A e B e ao sistema total. Verifica-se pela aplicação do teste de Kolmogorov que os valores de $Q(\lambda)$ relativos às três figuras são respectivamente 24%, 60% e 80% e portanto se pode considerar que existe uma boa adaptabilidade.

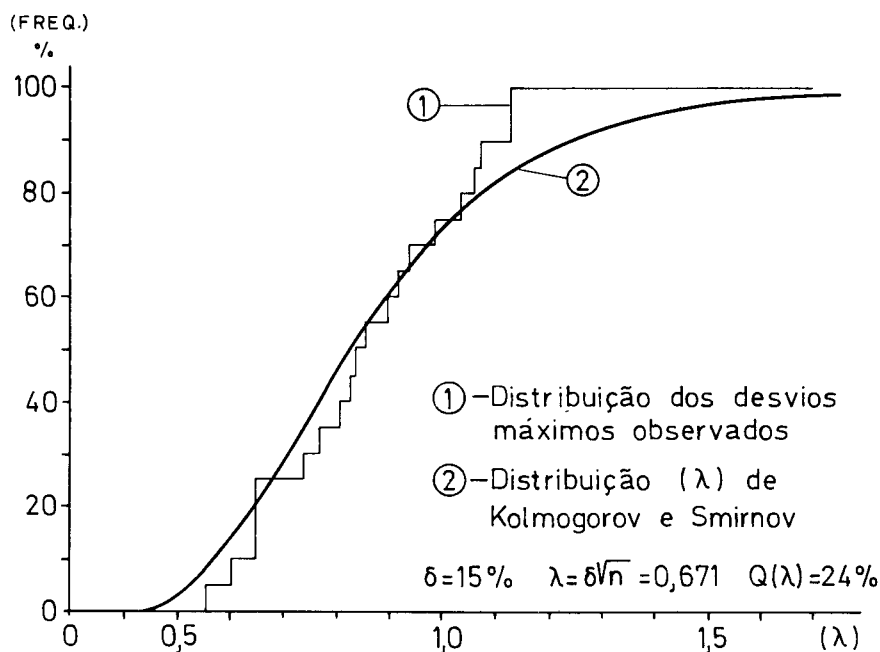


Fig. 3 - Curva de frequência acumulada dos desvios máximos da família A

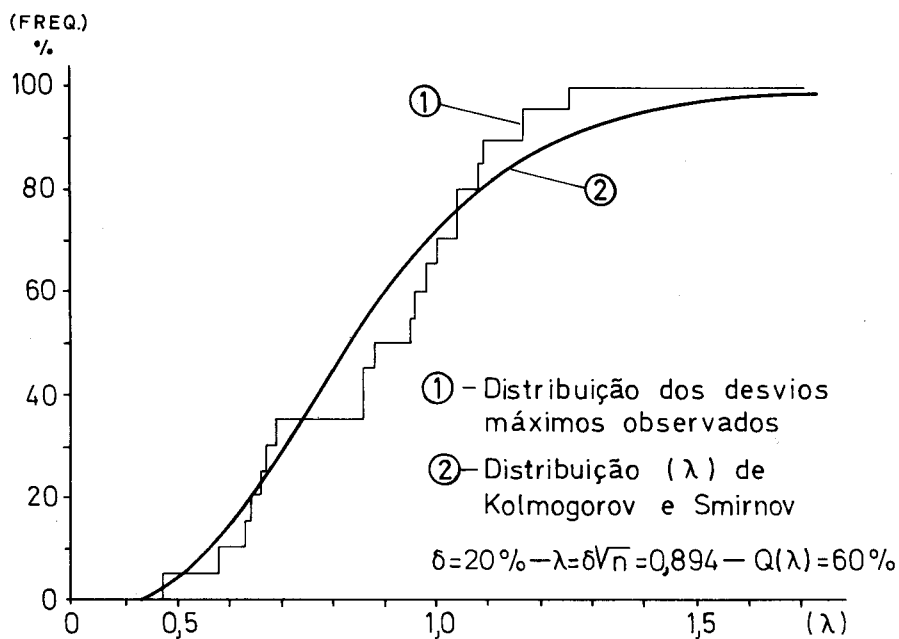


Fig. 4 - Curva de frequência acumulada dos desvios máximos da família B

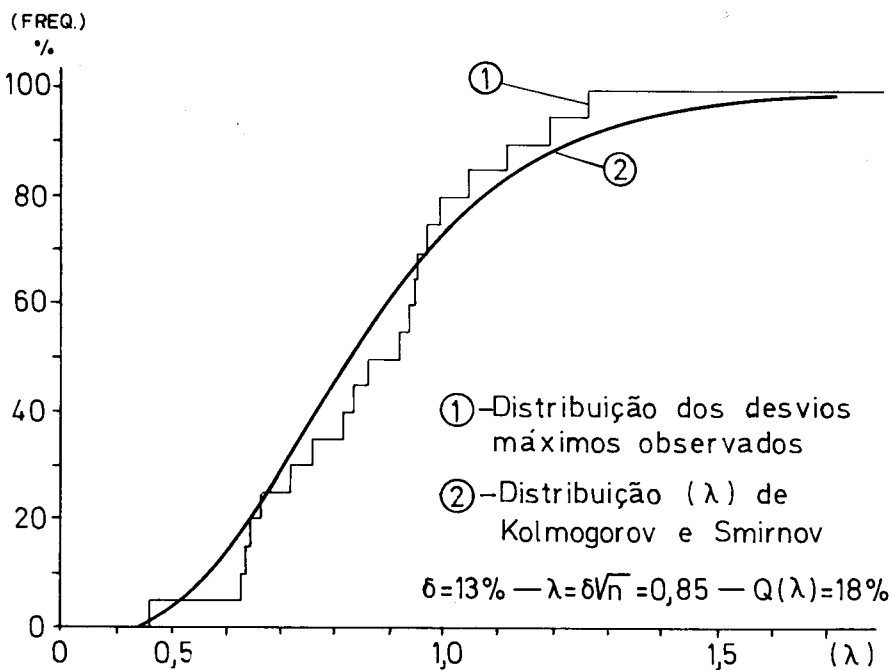


Fig. 5 - Curva de frequência acumulada dos desvios máximos do total das fracturas

3.2 – *Análise dos comprimentos dos afloramentos*

Foi elaborado um outro programa automático que a partir das coordenadas extremas dos afloramentos calculou os comprimentos respectivos e calculou e traçou a curva de frequências acumuladas desses comprimentos, comparando esta curva com a curva log-normal mais provável.

Dado só se terem considerado fracturas com comprimentos de afloramento superior a 500 m, a log-normal considerado foi truncada aos 500 m. Considerou-se ainda a distribuição como censurada até aos 2,5 km devido à pouca precisão das medições de comprimento até este valor. O efeito total destas considerações afectou apenas cerca de 5% do número total de fracturas.

Na Fig. 6 pode observar-se a boa adaptação da curva acumulada de frequências de comprimentos observados, à correspondente à log-normal com os seguintes parâmetros:

$$\sigma_{est} = 0,83$$

$$\xi_{est} = 4,4 \text{ km}$$

O teste de Kolmogorov relativo a esta adaptação deu um valor de $Q(\lambda)$ igual a 47%.

3.3 – *Conclusões*

Parece poder concluir-se para o sistema de fracturas do território continental português que os comprimentos dos afloramentos são bem descritos por uma distribuição log-normal e que os espaçamentos entre fracturas da mesma família ou de todo o sistema são bem descritos por uma distribuição exponencial.

Duas observações devem ser feitas no entanto, dado não estarem presentes todas as fracturas. Os espaçamentos menores devem ter menor frequência que a correspondente à lei mais provável dando-se o contrário com os espaçamentos maiores; quanto aos comprimentos, e para os mais pequenos, não é tão clara a viabilidade de os considerar como unidimensionais, dada a sua escala em relação à crosta terrestre já não considerável como casca.

Não obstante estes reparos, que não se querem deixar de expressar, a boa adaptabilidade verificada para as duas leis parece apoiar a sua adopção.

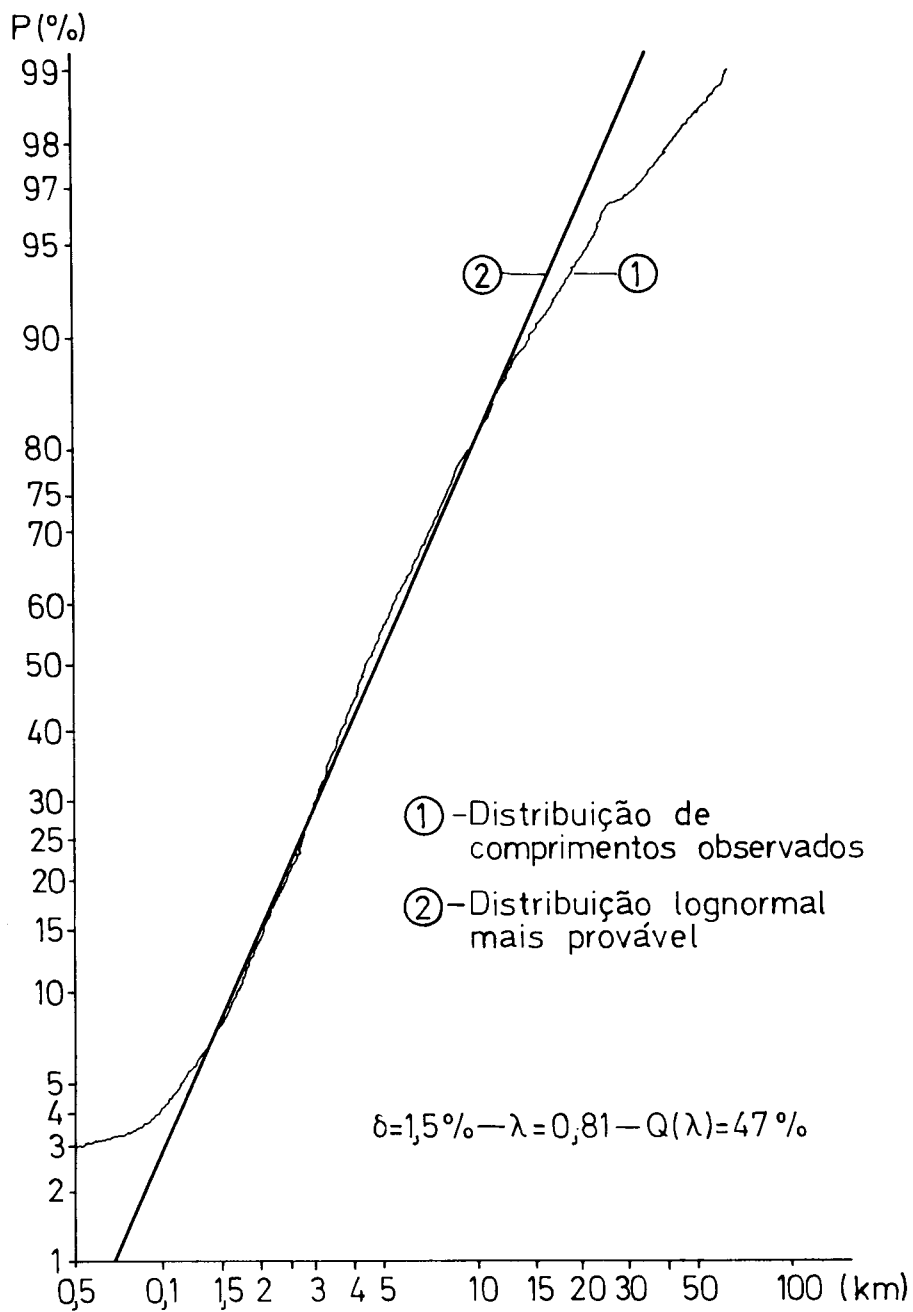


Fig. 6 - Curva acumulada de frequências de comprimentos

LINHA	NÚMERO DE ESPAÇAMENTOS CONSIDERADOS			EST. ESPAÇAMENTO MÉDIO C (km)			DESVIO MÁXIMO (%)		
	A	B	TOTAL	A	B	TOTAL	A	B	TOTAL
1	18	17	51	6,08	4,32	1,92	0,65	1,26	0,67
2	9	6	40	11,28	12,91	2,78	0,61	0,57	0,76
3	14	8	50	7,39	12,88	2,38	0,74	0,62	0,94
4	12	9	54	7,00	11,39	2,75	0,65	0,87	0,83
5	12	10	57	8,92	8,15	2,19	0,81	1,00	1,01
6	14	17	53	6,61	6,88	2,74	1,14	1,04	0,63
7	10	18	75	16,90	9,69	2,40	0,78	1,04	0,92
8	14	20	69	10,57	7,55	2,63	1,14	0,66	0,72
9	4	8	51	23,12	13,50	3,50	0,83	0,95	0,95
10	8	16	54	18,38	8,72	3,20	0,84	1,17	0,64
11	2	18	42	10,50	5,00	3,45	0,56	1,09	0,95
12	7	18	62	22,42	7,41	2,25	1,06	0,63	1,05
13	12	13	74	8,42	9,04	1,97	1,05	0,65	0,46
14	15	16	42	6,97	9,25	3,52	0,95	0,69	0,65
15	13	19	76	7,27	6,08	1,89	0,87	0,85	0,81
16	10	23	74	7,80	5,45	1,65	0,65	0,85	0,86
17	10	38	100	7,46	4,19	1,28	0,93	0,98	1,20
18	13	27	64	11,60	3,26	2,13	1,09	0,46	1,12
19	16	36	110	8,68	4,11	1,42	1,07	1,08	0,98
20	9	30	58	11,60	3,47	2,60	0,91	0,96	1,27

3.4 – Agradecimentos

Quer o autor expressar os seus agradecimentos ao Prof. Manuel Rocha que lhe sugeriu este estudo e à Divisão de Fundações Rochosas do Serviço de Barragens do Laboratório Nacional de Engenharia Civil que lhe permitiu a execução do mesmo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (I) S. D. PRIEST e J. A. HUDSON - "Discontinuity spacings in Rock". Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. Vol. 13 pp 135-143, 1976.
- (II) G. RANALLI - "Length distribution of strike-slip faults and the process of breakage in continental crust". Can. J. Earth Sci. 13, 704-707, 1976.
- (III) L. NABAIS CONDE e R. SANTARÉM ANDRADE - "Portugal - Sistema de fracturas obtido a partir de imagens dos satélites Ertis-1 e Ertis-2". Carta à escala 1/500.000. 1976.