

ANÁLISE DO MECANISMO FOCAL DE ALGUNS SISMOS MEDIANTE O MODELO PASSO-A-PASSO

Some earthquakes focal mechanism analyses by means of the rate process model

ÚLPPIO NASCIMENTO*

RESUMO - Tendo em vista averiguar o ajustamento à realidade do modelo passo-a-passo do mecanismo dos sismos, analisa-se por meio desse modelo o mecanismo focal de cinco sismos: Kobe, Loma Prieta, Açores 1980, Lisboa 1969 e Lisboa 1941.

Essa análise consiste na elaboração das fichas desses sismos, na apresentação de exemplos de eventuais soluções e na discussão dos valores dos respectivos parâmetros sismológicos.

SYNOPSIS - Considering checking the adjust to reality of the seismic mechanism rate process model, by means of this model, the focal mechanism of five seisms are analysed: Kobe, Loma Prieta, Açores 1980, Lisboa 1969 e Lisboa 1941.

That evaluation consists of making cards of those seisms, presenting examples of eventual solutions and in the values discussion of the respective seismological parameters.

1 - INTRODUÇÃO

Em anterior trabalho (Nascimento, 1995) apresentaram-se os conceitos básicos de um modelo passo-a-passo do mecanismo dos sismos. Nessa mesma linha de investigação, procura-se agora averiguar até que ponto tal modelo se ajusta à realidade da natureza dos sismos. Para tal considera-se necessário analisar por meio desse modelo o mecanismo focal de um número suficientemente elevado de sismos. É essa análise que no presente trabalho se inicia por cinco sismos: Kobe, 17/1/1995; Loma Prieta, 18/10/1989; Açores, 1/1/1980; Lisboa, 28/2/1969 e Lisboa, 25/11/1941.

2 - FICHAS DE IDENTIFICAÇÃO DOS SISMOS

Apresentam-se seguidamente as fichas de identificação dos cinco sismos analisados.

Cada ficha é constituída por um quadro, onde se apresentam os parâmetros relativos a três exemplos de eventuais soluções do sismo, e quatro ábacos, onde se mostra a interdependência dos principais desses parâmetros e se localizam os pontos representativos das referidas soluções.

Descrevem-se seguidamente esses ábacos referindo as respectivas equações, que são apresentadas no formulário em Anexo.

* Investigador do LNEC

Ábaco I - Este ábaco representa, em escala logarítmica, o deslocamento sísmico d em função do módulo de elasticidade E . Como se mostra em Anexo (Eq. A6), esta função é linear e depende apenas da magnitude M_s e do momento sísmico M_0 . A entrada neste ábaco pode também fazer-se pelo módulo de rigidez G (Eq. A4).

Ábacos II, III e IV - Estes ábacos representam a rugosidade r (Eq. A26) em função do módulo de elasticidade E (Eq. A38) para três coeficientes de variação das solicitações sobre a falha: $C_s = 0,1; 0,5; 1,0$, nos ábacos II, III e IV, respectivamente.

Cada ábaco tem duas famílias de curvas: uma, a traço cheio, onde o coeficiente k (Eq. A18) de concentração da tensão é constante e com o valor indicado na curva respectiva; outra, a tracejado, onde é constante a obliquidade α da tensão (Eq. A20).

Da primeira família apresentam-se três curvas: uma correspondente ao valor máximo de k , quando este coeficiente é igual ao coeficiente de segurança F (Eq. A21); outra para $k = 1,02$, valor próximo do mínimo, que é a unidade; e outra intermédia. Ao longo destas curvas indicam-se os valores de α correspondentes aos pontos calculados.

Da segunda família, obtida por interpolação dos valores de α acima referidos, apresentam-se também três curvas correspondentes a $\alpha = 1^\circ; 10^\circ$ e 30° .

Como se vê, à medida que diminui a rugosidade r da falha cresce a obliquidade α da tensão que nela actua. O valor máximo $\alpha = 45$ corresponde à rugosidade mínima (Eq. A41). Essa rugosidade mínima é tanto maior quanto menor for o coeficiente de variação da tensão sobre a falha.

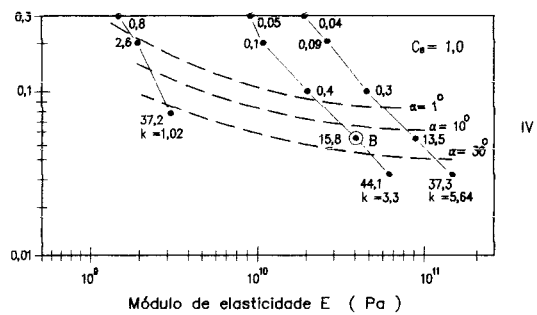
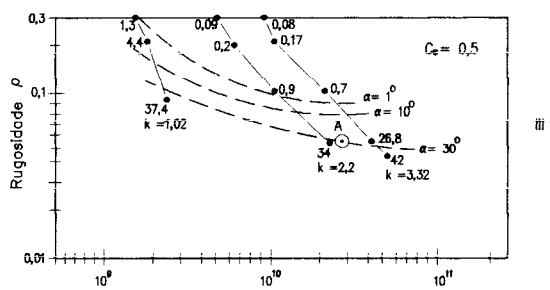
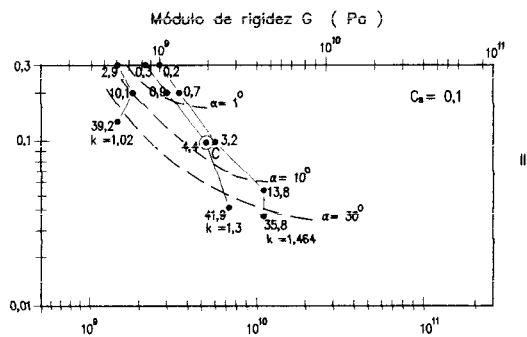
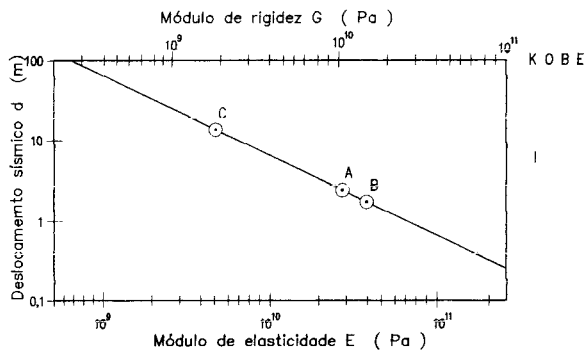
Para calcular uma das múltiplas soluções para o sismo procede-se do seguinte modo:

- 1º - Arbitra-se o peso volúmico da rocha ρ .
- 2º - Arbitra-se o passo b da rugosidade da rocha. Note-se porém que este valor apenas determina o tamanho da unidade sísmica (US), mas não influencia o tamanho da superfície de rotura.
- 3º - Escolhe-se dos ábacos II, III e IV aquele cujo valor de C_s se considera corresponder à variabilidade das tensões na falha.
- 4º - Arbitra-se o valor do coeficiente k de concentração da tensão na falha.
- 5º - Arbitra-se a rugosidade r da rocha atendendo a que quanto menor for r maior será o coeficiente de elasticidade E .

Magnitude	M_s	-	7,2	$M_w = 6,9$ (A. Ribeiro, 1995)
Momento sísmico	M_0	Nm	2,8 E 19	(deduzido de M_w , Eq. A2)
Profundidade	z	km	20	
Taxa de deslizamento	u'	mm/a	1	

EXEMPLOS DE SOLUÇÕES

			A	B	C
<u>Tamanho da superfície de rotura</u>					
Área	A_r	km ²	1122		
Diâmetro	a_r	km	37,8		
<u>Coefficiente de segurança da US</u>					
Probabilidade de rotura	P	-	1,9 E-6		
Índice de fiabilidade	β^*	-	4,46		
Coef. Var. solicitações (arbt.)	C_s	-	0,5	1,0	<u>0,1</u>
Coef. de segurança	F	-	<u>3,32</u>	<u>5,64</u>	<u>1,464</u>
<u>Tamanho da US</u>					
Passo das rugosidades (arbt.)	b	<u>m</u>	<u>0,005</u>		
Coef. concent. Tensões (arbt.)	k	-	<u>2,5</u>	<u>3,3</u>	<u>1,3</u>
Passo da US	b_n	<u>km</u>	<u>59,8</u>	<u>68,7</u>	<u>43,1</u>
Núm. de rugosidades da US	n	-	1,429E14	1,880E14	7,729E13
Ordem da US	O	-	14,15	<u>14,28</u>	<u>13,87</u>
<u>Energia sísmica</u>					
Rugosidade da rocha (arbt.)	r	-	<u>0,05</u>	<u>0,05</u>	<u>0,1</u>
Peso volúmico (“)	ρ	kN/m ³	<u>30</u>		
Módulo de elasticidade	E	<u>Pa</u>	2,563E10	3,895E10	4,933E9
Ângulo de fricção	ϕ_0	°	<u>41,4</u>	<u>27,0</u>	<u>4,9</u>
Obliquidade da tensão	α	°	<u>31,2</u>	<u>15,8</u>	<u>4,4</u>
Deslocamento sísmico	d	<u>m</u>	<u>2,5</u>	<u>1,7</u>	<u>13,3</u>
Energia sísmica potencial	W	<u>J</u>	<u>1,56E17</u>	8,884E16	5,055E17
Energia sísmica radiante	W_r	<u>J</u>	2,604 E15	1,715E15	1,358E16
Queda de tensão	$\Delta\tau$	Pa	1,82E 6		
Queda de fricção	Δf	-	1,21E-3	9,115E-4	2,318E-3



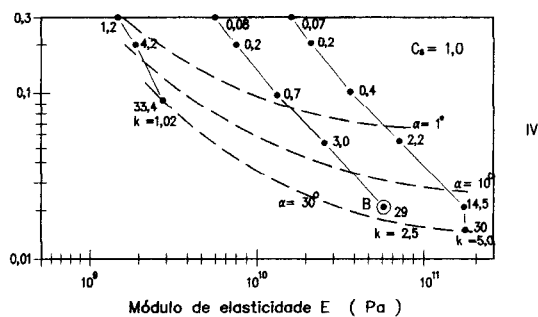
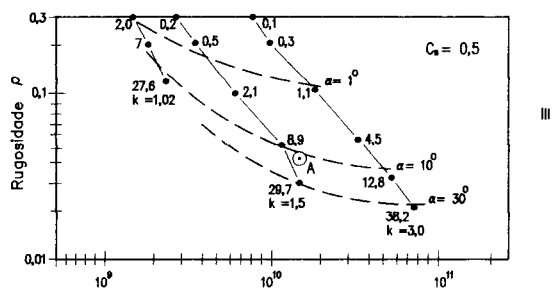
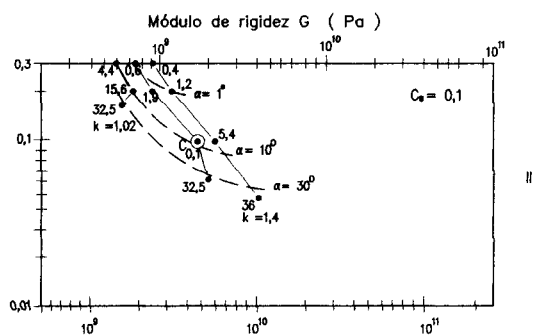
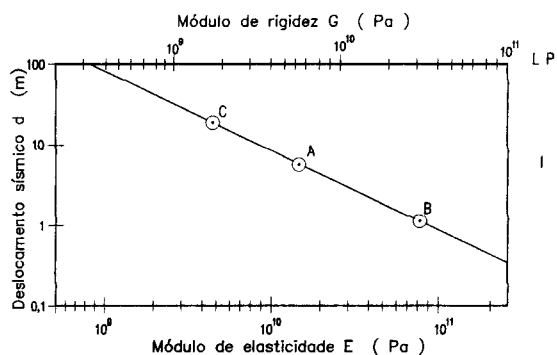
LOMA PRIETA, 18/10/1989

Magnitude	M_s	-	7,1
Momento sísmico	M_0	Nm	2,7E19
Profundidade	z	km	19 (Lomnitz, 1994)
Taxa de deslizamento	u'	mm/a	15 (Scholtz, 1990)

EXEMPLOS DE SOLUÇÕES

	A			B	C
	<u>Tamanho da superfície de rotura</u>				
Área	A_r	km^2	891		
Diâmetro	a_r	km	33,7 (40*)		
	<u>Coefficiente de segurança da US</u>				
Probabilidade de rotura	P	-	2,85E-5		
Índice de fiabilidade	β^*	-	4		
Coef. var. solicitações (arbit.)	C_s	-	0,5	1,0	0,1
Coef. de segurança	F	-	3,0	5,0	1,4
	<u>Tamanho da US</u>				
Passo das rugosidades (arbit.)	b	m	0,005		
Coef. concentr. tensões (arbit.)	k	-	1,5		
Passo da US	b_n	km	41,3	53,3	36,9
Número de rugosidades da US	n	-	6,8E13	1,14E14	5,44E13
Ordem da US	o	-	13,8	14,05	13,7
	<u>Energia sísmica</u>				
Rugosidade da rocha (arbit.)	r	-	0,04	0,02	0,10
Peso volúmico (arbit.)	ρ	kN/m^3	30		
Módulo de elasticidade	E	Pa	1,326E10	5,333E10	4,075E 9
Ângulo de fricção	ϕ_0	°	27,2	36,3	10,6
Obliquidade da tensão	α	°	14,4	20,2	9,1
Deslocamento sísmico	d	m	6,0	1,5	19,5
Energia sísmica potencial	W	J	1,099E18	6,087E17	1,097E18
Energia sísmica radiante	W_r	J	6,587E15	1,635E15	2,158E16
Queda de tensão	$\Delta\tau$	Pa	2,48E 6		
Queda de fricção	Δf	-	3,085E-3	1,974E-3	3,686E-3

* B. Romanowicz, 1992

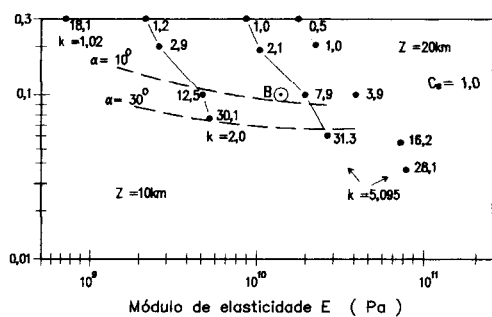
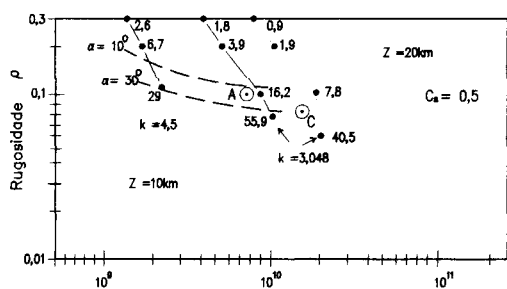
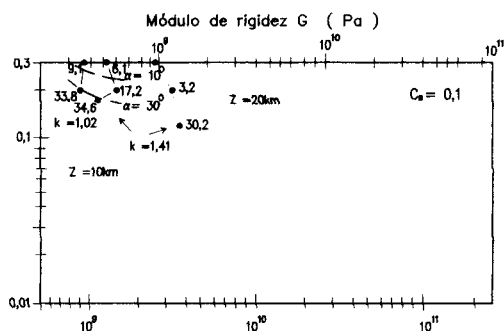
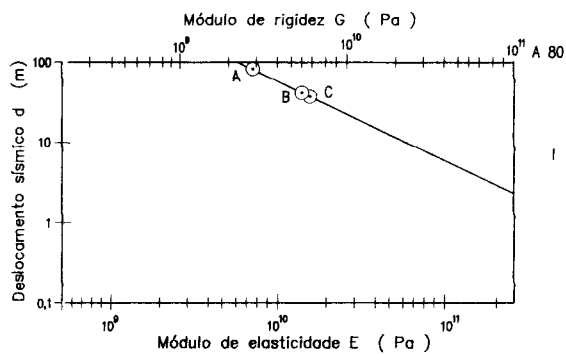


ACORES, 1/1/1980

Magnitude	M_s	-	7,1	
Momento sísmico	M_0	Nm	2E20	
Profundidade	z	km	10	(Oliveira,1992)
Taxa de deslizamento	u'	mm/a	10	(Pagarete,1992)

EXEMPLOS DE SOLUÇÕES

			A	B	C
<u>Tamanho da superfície de rotura</u>					
Área	A_r	km^2	891		
Diâmetro	a_r	Km	33,7		
<u>Coeficiente de segurança da US</u>					
Probabilidade de rotura	P	-	1,9E-5		
Índice de fiabilidade	β^*	-	4,095		
Coef. var. solicitações (arbit.)	C_s	-	0,5	1,0	0,5
Coef. de segurança	F	-	3,048	5,095	3,048
<u>Tamanho da US</u>					
Passo das rugosidades	b	m	0,005		
Coef. concentr. tensões (arbit.)	k	-	2,8	4,0	2,5
Passo da US	b_n	km	56,4	67,4	53,3
Número de rugosidades da US	n	-	1,271E14	1,816E14	1,135E14
Ordem da US	O	-	14,1	14,3	14,1
<u>Energia sísmica</u>					
Rugosidade da rocha (arbit.)	r	-	0,1	0,1	0,08
Peso volúmico (arbit.)	ρ	kN/m^3	30		
Módulo de elasticidade	E	Pa	7,177E 9	1,310E10	1,538E10
Ângulo de fricção	Φ_0	°	18,3	10,7	16,7
Obliquidade da tensão	α	°	16,9	8,4	13,9
Deslocamento sísmico	d	m	83,4	45,9	38,5
Energia sísmica potencial	W	J	9,834E18	4,724E18	7,471E18
Energia sísmica radiante	W_r	J	6,834E17	3,759E17	3,157E17
Queda de tensão	$\Delta\tau$	Pa	1,834E 7		
Queda de fricção	Δf	-	2,302E-2	1,489E-2	1,271E-2

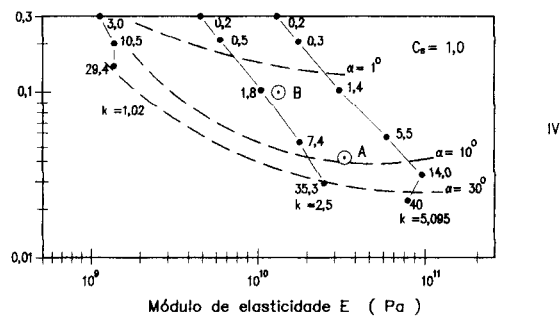
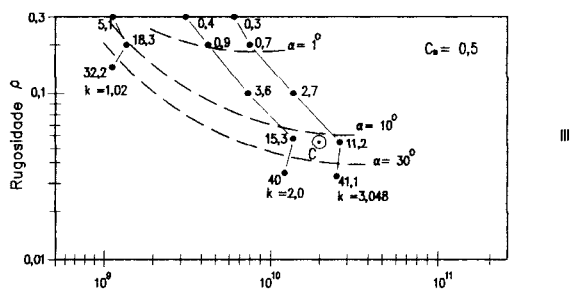
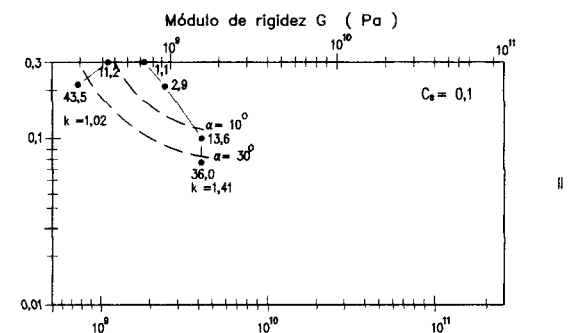
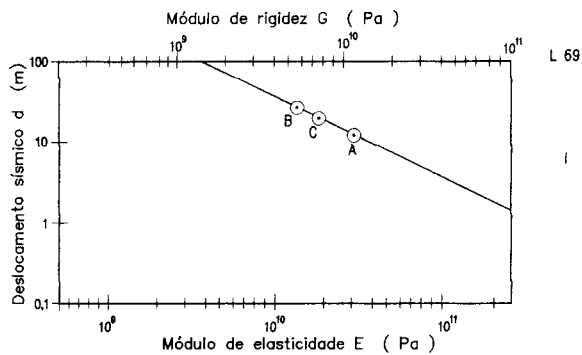


Magnitude	M_s	-	7,8	
Momento sísmico	M_o	Nm	6E20	
Profundidade	z	km	15	(Lomnitz,1994)
Taxa de deslizamento	u	mm/a	10	

EXEMPLOS DE SOLUÇÕES

			A	B	C
<u>Tamanho da superfície de rotura</u>					
Área	A_r	km ²	4467 (4050*)		
Diâmetro	a_r	km	75,4 (90*)		
<u>Coeficiente de segurança da US</u>					
Probabilidade de rotura	P	-	1,9E-5		
Índice de fiabilidade	β^*	-	4,095		
Coef. var. solicitações (arbit.)	C^s	-	1,0		0,5
Coef. de segurança	F	-	5,095		3,048
<u>Tamanho da US</u>					
Passo das rugosidades	b	m	0,005		
Coef. concentr. Tensões (arbit.)	k	-	3,0		2,5
Passo da US	b_n	km	131		119
Número de rugosidades da US	n	-	6,825E14		5,687E14
Ordem da US	O	-	14,83		14,75
<u>Energia sísmica</u>					
Rugosidade da rocha (arbit.)	r	-	0,04	0,1	0,05
Peso volúmico (arbit.)	ρ	kN/m ³	30		
Módulo de elasticidade	E	Pa	3,051E10	1,304E10	1,836E10 (7E10*)
Ângulo de fricção	ϕ_0	°	17,5	2,8	15,2
Obliquidade da tensão	α	°	10,5	1,6	12,6
Deslocamento sísmico	d	m	11,5	27,5	19,1 (2,5*)
Energia sísmica potencial	W	J	1,063E19	4,710E18	1,259E19
Energia sísmica radiante	W_r	J	1,126E17	3,021E17	2,101E17
Queda de tensão	$\Delta\tau$	Pa	4,904E 6		(5, 6*)
Queda de fricção	Δf	-	3,743E-3	3,503E-3	4,547E-3

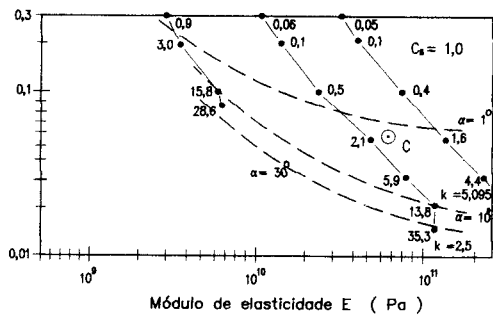
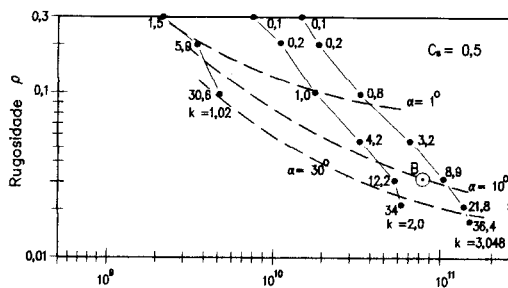
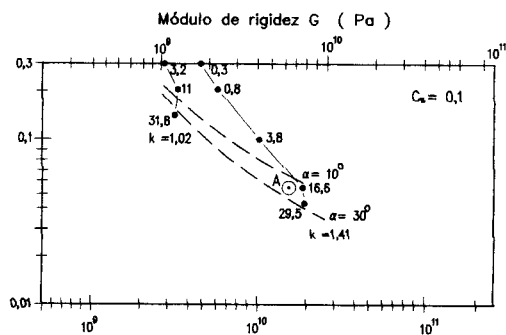
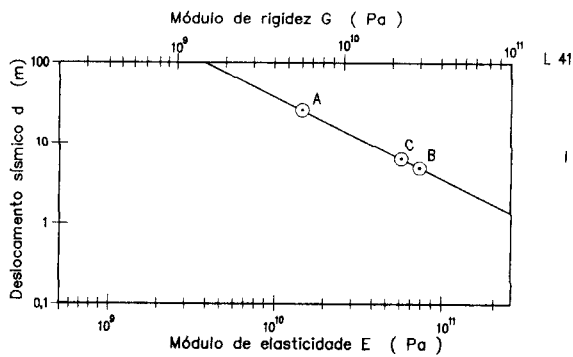
* Mineiro, Cap 3 p. 63



Magnitude	M_s	-	8,2	
Momento sísmico	M_0	Nm	1,57E21	(Lomnitz, 1994)
Profundidade	z	km	34	
Taxa de deslizamento	u'	mm/a	10	

EXEMPLOS DE SOLUÇÕES

			A	B	C
<u>Tamanho da superfície de rotura</u>					
Área	A_r	km^2	11220		
Diâmetro	a_r	km	120		
<u>Coeficiente de segurança da US</u>					
Probabilidade de rotura	P	-	1,9E 5		
Índice de fiabilidade	β^*	-	4,095		
Coef. var. solicitações (arbit.)	C_s	-	0,1	0,5	1,0
Coef. de segurança	F	-	1,41	3,048	5,095
<u>Tamanho da US</u>					
Passo das rugosidades		m	0,005		
Coef. concent. Tensões (arbit.)		-	1,3	2,5	3,0
Passo da US		km	136	189	207
Número de rugosidades da US	b	-	7,429E14	1,429E15	1,714E15
Ordem da US	k	-	14,9	15,1	15,2
	b_n				
<u>Energia sísmica</u>					
Rugosidade da rocha (arbit.)	r	-	0,05	0,03	0,05
Peso volúmico (arbit.)	ρ	kN/m^3	30		
Módulo de elasticidade	E	Pa	1,415E10	7,016E10	5,737E10
Ângulo de fricção	ϕ_0	°	23,3	12,2	3,2
Obliquidade da tensão	α	°	21,7	10,0	1,9
Deslocamento sísmico	d	m	25,8	5,2	6,4
Energia sísmica potencial	W	J	7,157E19	1,561E19	6,258E18
Energia sísmica radiante	W	J	4,672E17	9,420E16	1,157E17
Queda de tensão	$\Delta\tau$	Pa	3,223E 6		
Queda de fricção	Δf	-	2,812E-3	1,303E-3	1,047E-3



3 - DISCUSSÃO

Diâmetro da superfície de rotura - A determinação do tamanho da superfície de rotura oferece dificuldades relacionadas, quer com a observação directa da respectiva falha (Gomes Coelho, 1993), quer com a evolução da área de rotura ao longo do período de réplicas sísmicas. Com efeito, a zona de réplicas aumenta continuamente durante um ou mais meses; por isso a área de rotura é geralmente estimada a partir da extensão da zona de réplicas depois de um a dois dias (Lay et al., 1995).

No sismo dos Açores (A80), cujo epicentro ocorreu no oceano, o comprimento de rotura da falha foi, segundo Buforn, citado por Oliveira (1992), de 70 Km, ou seja, cerca do dobro do valor calculado por este modelo.

Módulo de elasticidade - Apresentam-se seguidamente valores típicos de E e do coeficiente de Poisson ν de algumas rochas, valores esses relativos aos trechos rectilíneos dos respectivos diagramas de compressão (Rocha, 1981):

	E (10^3 Kgf/cm ²)	ν
Granito são	760	0,21
Granodiorito	665	0,23
Basalto	1000	0,27
Pórfiro	960	0,26
Gnaisse	933	0,22
Micaxisto	760	0,23
Calcário	830	0,23
Grés	538	0,25

Em Sismologia considera-se 200 kbar (2 E10 Pa) um valor típico do módulo de rigidez G, ou seja, para $\nu = 0,3$: 5,2 E10 Pa (520.000 kgf/cm²).

Note-se que os valores do módulo de elasticidade nas condições de pressão, temperatura e taxa de deformação que ocorrem no foco sísmico poderão ser muito diferentes dos determinados em ensaios de laboratório como os da referida tabela.

Acerca da influência da taxa de deformação, deve notar-se que a reologia do fenómeno envolve dois mecanismos simultâneos, um elástico e reversível, e outro visco-plástico e irreversível, daí resultando que o módulo de elasticidade aparente é tanto maior quanto maior é essa taxa de deformação.

A relação entre os designados módulos de elasticidade elástico e dinâmico tem sido objecto de muita investigação de cujos resultados se apura resumidamente o seguinte (Handbook of Geoph. Explo. Vol. 18, 1996):

- O módulo estático é menor que o módulo dinâmico;
- A diferença aumenta com a fracturação e a porosidade;
- A diferença diminui com a pressão de confinamento.

Note-se no entanto que, no ressalto sísmico, sendo a deformação rapidíssima, é o módulo de elasticidade dinâmico que se manifesta.

Rugosidade - Na Fig. 1 esquematizam-se três rugosidades correspondentes a $r = 0,3$; $0,1$ e $0,01$.

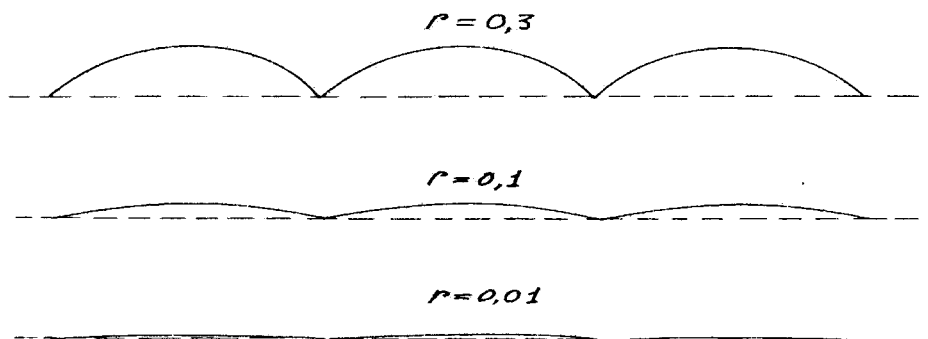


Fig. 1 - Esquema de rugosidades

Considera-se que as rugosidades com efeito sísmico são aquelas que originam deformações elásticas, isto é, que subsistem depois do alisamento da superfície da falha por efeito de deformações visco-plásticas. Aliás, conforme se vê nos ábacos II, III e IV, são as rugosidades pequenas que correspondem a módulos de elasticidade considerados típicos.

Ângulo de fricção - Segundo este modelo, o atrito entre as superfícies de uma falha é considerado como a soma de duas parcelas: uma devida ao imbricamento das suas rugosidades, e outra à fricção dessas superfícies supostas sem rugosidades. É a esta fricção que corresponde ϕ_0 .

O valor de ϕ_0 depende de muitos factores e tem sido objecto de muita investigação (Nascimento, 1978). Afigura-se porém que, como primeira aproximação, se poderá tomar 20° como um limite superior para a fricção estática, sendo a fricção cinemática ligeiramente inferior. Mas, atendendo às condições de pressão e temperatura reinantes no foco sísmico, admite-se que ϕ_0 possa ser bem menor que nas condições de ensaio laboratorial.

Obliquidade da tensão - Neste modelo o estado de tensão na falha é traduzido por um único parâmetro: a obliquidade da tensão que nela actua. A atitude da falha não pode ser determinada por este modelo. Para tal haverá que recorrer a métodos geológicos (Ribeiro, 1995) e a métodos sismológicos e outros (Zoback et al., 1989; Lay e Wallace, 1995).

Outra abordagem deste problema é a de assimilar a litosfera a uma casca e procurar determinar o seu estado de tensão pelo método dos elementos finitos (Câmara et al., 1993).

Como se presume que o valor de ϕ_0 andarará, quanto muito, por 20° , afigura-se que a obliquidade α seja sempre menor que 20 como se mostra na seguinte tabela deduzida da Eq. A21.

	C _s	0,01	0,1	0,5	1,0
	F	1,04	1,4	3,0	5,0
K	1,0	19,3	14,8	6,9	4,2
	1,04	20	15,1	7,2	4,3
	1,4		20	9,6	5,8
	2			13,6	8,3
	3			20	12,3
	4				16,2
	5				20

Nos ábacos II,III e IV vê-se que para módulos de elasticidade típicos, as obliquidades menores que 20° correspondem a pequenas rugosidades, e tanto menores quanto maior é a variabilidade da tensão.

Variabilidade da tensão - Os ábacos II,III e IV mostram como é grande a influência do coeficiente C_s de variação da tensão nos outros parâmetros sismológicos.

Como C_s traduz a variabilidade da tensão que actua na falha, o seu valor deverá traduzir as causas dessa variabilidade, como sejam o vulcanismo, o efeito local das marés terrestres, as causas artificiais, tais como explosões, etc..

Note-se a este respeito que, segundo estudos de Whitford (1996), no período que vai de 1950, quando se iniciaram os ensaios nucleares subterrâneos, até 1990, a frequência dos sismos de magnitude superior a 6 duplicou relativamente ao período desde o início do século até 1950 (Science & Vie, nº 946, Julho 1996).

Concentração da tensão - Como se vê nos ábacos II, III e IV, quanto maior é o módulo de elasticidade maior é o correspondente coeficiente k de concentração da tensão.

A avaliação deste parâmetro na natureza implicaria a determinação de tensões em pontos da zona sismogénica da litosfera entre si afastados de uma distância igual ou inferior ao tamanho da US.

Deslocamento sísmico - Na Fig. 2 apresenta-se um diagrama do deslocamento sísmico d em função do diâmetro de rotura a_r, no qual se indicam os pontos representativos dos exemplos de soluções dos sismos analisados. Como se vê, como a_r depende apenas da magnitude (Eq. A7), todas as soluções de um mesmo sismo têm o mesmo valor de a_r. A mancha a tracejado indica a zona dentro da qual se localizam pontos relativos a deslocamentos sísmicos referidos na bibliografia; isto porém supondo que a área de rotura é rectangular com 20 km de largura, e que o módulo de rigidez é G 3E10 Pa (E 7,8E10 Pa) (Gross, 1996).

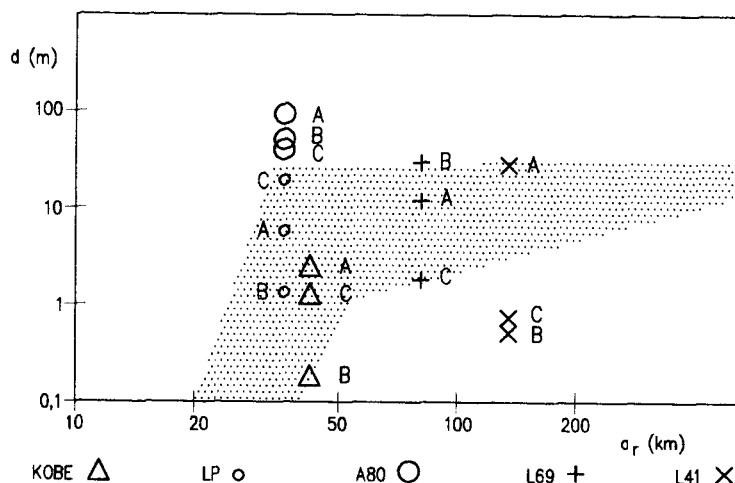


Fig. 2 - Deslocamento sísmico d em função do diâmetro da área de ruptura a_r
 Mancha tracejada: zona de deslocamentos sísmicos referidos na bibliografia

Peso volúmico - O peso volúmico das rochas ígneas e metamórficas varia entre cerca de 25 e 34 kN/m³. Se, em vez de 30 kN/m³, que se tomou nos exemplos apresentados, se tomasse 34 kN/m³, isso teria a seguinte influência no sismo de Loma Prieta (Solução A):

ρ	30kN/m ³	34kN/m ³	+ 13%
α	14,4	12,6	- 12%
E	1,326E10	1,526E10	+ 15%
w	1,099E18	9,545E17	- 13%

Quer dizer, se a rocha tivesse uma densidade 13% maior, a obliquidade da tensão seria 12% menor, o módulo de elasticidade 15% maior e a energia sísmica 13% menor.

Profundidade - No sismo dos Açores, ábacos II, III e IV, mostra-se a influência nos parâmetros sismológicos de um aumento da profundidade de 10 km para 20 km. Comparando as curvas correspondentes ao máximo coeficiente k de concentração da tensão, a cheio para $z = 10$ km, a pontado para $z = 20$ km, vê-se que a esta duplicação da profundidade corresponde aproximadamente à duplicação do módulo de elasticidade.

Queda de fricção - A queda do coeficiente de fricção é da ordem de 0,001 a 0,005 para todos os sismos analisados, exceptuando o sismo dos Açores em que essa queda anda por 0,02.

As medições feitas por Horn e Deere (1962), citados por Nascimento (1978), em vários minerais constituintes das rochas, deram valores dos coeficientes de fricção estático e cinemático diferindo de 0,01, ou iguais. Como, porém, a medição era feita com a precisão de 0,01, é bem possível que tenha havido diferenças da ordem de 0,001, como as acima referidas.

ANEXO

FORMULÁRIO

Magnitude - A magnitude local (Escala de Richter) é dada por

$$M_s = \log A_{20} + 1,66 \log \Delta + 2,0 \quad \text{A 1}$$

- A_{20} - Amplitude, em micrómetros, da onda de superfície de período 20 s.
 Δ - Distância ao epicentro, em km, medida em função do intervalo de tempo de chegada das ondas P e S.

A magnitude de momento é dada por

$$M_w = \left(\frac{\log M_o}{1,5} \right) - 10,73 \quad \text{A 2}$$

M_o - Momento sísmico, em din.cm (Lay et al. 1995).

Momento sísmico

$$M_o = GA_r d \quad \text{A 3}$$

G - Módulo de rigidez

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad \text{A 4}$$

ν - Coeficiente de Poisson.

Para $\nu = 0,3$

$$M_o = \frac{1}{2,6} EA_r d \quad \text{A 5}$$

Com a introdução, nos anos sessenta, deste parâmetro procurou-se um modelo simples do mecanismo de rotura da falha produzindo uma equivalente radiação de ondas sísmicas (Lay e Wallace, 1995).

Aplicando-se logaritmos à Eq. A 5 obtém-se

$$\log E = (\log M_o - M_s - 1,435) - \log d \quad \text{A 6}$$

É esta a equação da recta do ábaco I.

Profundidade - A determinação da profundidade z do foco sísmico (Hipocentro) faz-se a partir da distância Δ do epicentro, medida à superfície, e da distância de propagação medida radialmente desde o foco à estação sismográfica. Tal determinação envolve vários erros inerentes ao modelo da Terra utilizado nos respectivos cálculos (Lay e Wallace, 1995).

Área de rotura - Fórmula empírica de Wyss (1979):

$$\log A_r = M_s - 4,15$$

A 7

A_r - Área de rotura em km^2

Diâmetro da área de rotura, suposta circular:

$$a_r = \sqrt{\frac{4 A_r}{\pi}} \times 10^3$$

A 8

a_r - Diâmetro da área de rotura em m.

Probabilidade de rotura

$$P = \frac{u'}{u'_\phi}$$

A 9

u' - Taxa de deslizamento em mm/a
 u'_ϕ - Taxa de deslizamento correspondente à rotura generalizada tomando-se $u'_\phi = 1\text{mm/min.}$, que é a ordem de grandeza da velocidade de ensaios de corte em amostras de rocha.

$$P = 1,9E - 6 \times u'$$

A10

Índice de fiabilidade β^* - obtém-se em função da probabilidade P por intermédio da seguinte tabela (Ferry e Castanheta, 1971):

β^*	P
0	0,5
1	1,59E-1
2	2,3E-2
2,5	6,8E-3
3,0	1,4E-3
3,5	2,3E-4
4,0	3,2E-5
4,5	3,4E-6
5,0	2,9E-7
6,0	1E-9

Por interpolação entre $\beta^* = 3,5$ e $4,5$, obtém-se

$$\beta^* = 3,5 + (\log 2,34E - 4 - \log P)0,564 \quad A11$$

Coefficiente de segurança

$$F = \frac{1 + \beta^* \sqrt{C_s^2 + C_m^2 - \beta^{*2} C_s^2 C_m^2}}{1 - \beta^{*2} C_m^2} \quad A12$$

$$C_m = \frac{C_r}{\sqrt{n}} \quad A13$$

C_s - Coeficiente de variação das solicitações

C_r - Coeficiente de variação da resistência das rugosidades

C_m - Coeficiente de variação da resistência das US.

Como n é muito grande, $C_m \cong 0$ e portanto

$$F = 1 + \beta^* C_s \quad A14$$

Tamanho das US - Passo b_n das US

$$b_n = a_r \sqrt{\frac{k}{C_A}} \quad A15$$

C_A - Coeficiente de forma $\cong 1$

k - Coeficiente de concentração da tensão: $1 \leq k \leq F$

Quando $k = 1$, b_n tem o seu valor mínimo que é igual a a_r .

Ordem da US

$$n = \frac{b_n^2}{b^2} \quad A16$$

b - Passo das rugosidades da rocha

n - Número de rugosidades constituintes da US

$$O = \log n \quad A17$$

O - Ordem da US

Concentração da tensão - Coeficiente de concentração da tensão: relação entre a tensão efectiva σ' na área de rotura A_r e a tensão aparente σ na área aparente A .

$$k = \frac{\sigma'}{\sigma} = \frac{N_r / A_r}{N_r / A} = \frac{A}{A_r} \quad A18$$

Obliquidade da tensão - Quando se dá a rotura, a tensão tangencial efectiva e a tensão tangencial aparente τ são dadas por

$$\tau_r = \sigma' \operatorname{tg} \phi_o \quad \text{A19}$$

$$\tau = \sigma \operatorname{tg} \alpha \quad \text{A20}$$

sendo ϕ_o o ângulo de fricção e α o ângulo de obliquidade da tensão aparente na falha. Da relação das Eq. A19 e A20, atendendo a A18, obtém-se

$$F = k \frac{\operatorname{tg} \phi_o}{\operatorname{tg} \alpha} \quad \text{A21}$$

Deslocamento sísmico

$$d = \Delta u_r \left(r \frac{1 - \frac{1}{k}}{\frac{R}{b} - \frac{r}{k}} \right) \quad \text{A22}$$

sendo

$$\Delta u_r = 1,23 \operatorname{tg} \phi_o \cdot I_n \quad \text{A23}$$

a deformação elástica tangencial da calote de referência, onde I_n é o imbricamento da calote que simula a rugosidade

Considerando que esse imbricamento, quando se dá a rotura, é aproximadamente igual ao dobro da flecha Δh_n da calote correspondente ao diâmetro a_r da superfície de rotura, tem-se

$$R_n^2 = \left(\frac{a_r}{2} \right)^2 + (R_n - \Delta h_n)^2$$

donde

$$I_n = 2 \left(R_n - \sqrt{R_n^2 - \frac{a_r^2}{4}} \right) \quad \text{A24}$$

sendo R_n o raio dessa calote dado por

$$R_n = b_n \frac{1 + 4r^2}{8r} \quad \text{A25}$$

onde r é a rugosidade da rocha, relação entre a altura h e o passo b dessa rugosidade

$$r = \frac{h}{b} \quad \text{A26}$$

Admite-se a auto-semelhança:

$$\frac{b_n}{b} = \frac{I_n}{I} = \frac{R_n}{R} \quad \text{A27}$$

A Eq. A22 toma a forma

$$d = 1,23 \text{tg} \phi_o \cdot I_n \frac{r \left(1 - \frac{1}{k}\right)}{\frac{R}{b} - \frac{r}{k}} \quad \text{A28}$$

Módulo de elasticidade - Assimilando a área de rotura ao contacto entre duas calotes esféricas de raio R_n , a força N_r , desenvolvida nesse contacto é dada pela fórmula de Hertz (para $\nu = 0,3$):

$$N_r = 0,183 \frac{E}{R_n} \alpha_r^3 \quad \text{A29}$$

Atendendo à Eq. A18:

$$N_r = \sigma k A_r \quad \text{A30}$$

sendo

$$\sigma = \frac{\rho z}{1 + \text{tg}^2 \alpha} \quad \text{A31}$$

ρ - Peso volúmico da rocha
 z - Profundidade do foco sísmico

Tem-se portanto a Eq. A29 sob a forma

$$\text{tg}^2 \alpha = \frac{\rho z F^2 A_r R_n}{0,183 k E \alpha_r^3} - 1$$

e, atendendo à Eq. A21

$$\text{tg}^2 \phi_o = \frac{\rho z F^2 A_r R_n}{0,183 k E \alpha_r^3} - \frac{F^2}{k^2} \quad \text{A32}$$

por outro lado, atendendo às eq. A3 e A28

$$\frac{2,6 M_0}{E A_r} = 1,23 \text{tg} \phi_o I_n \frac{r \left(1 - \frac{I}{k}\right)}{\frac{R}{b} - \frac{r}{k}}$$

donde

$$\text{tg}^2 \phi_o = \left[\frac{2,114 M_0 \left(\frac{R}{b} - \frac{r}{k} \right)}{E A_r I_n r \left(1 - \frac{I}{k} \right)} \right]^2 \quad \text{A33}$$

igualando A32 e A33, e fazendo

$$x = \frac{1}{E} \quad \text{A34}$$

obtem-se

$$Ax^2 - Bx + \frac{F^2}{k^2} = 0 \quad \text{A35}$$

sendo

$$A = \left[\frac{2,114M_o}{A_r I_n} \cdot \frac{\frac{R}{b} - \frac{r}{k}}{r \left(1 - \frac{I}{k} \right)} \right]^2 \quad \text{A36}$$

$$B = \frac{F^2}{k} A_r \rho z \frac{R_n}{0,183a_r^3} \quad \text{A37}$$

donde

$$E = \frac{2A}{B - \sqrt{B^2 - 4A \frac{F^2}{k^2}}} \quad \text{A38}$$

$$\operatorname{tg} \phi_o = \frac{\sqrt{A}}{E} \quad \text{A39}$$

Rugosidade da rocha - A Eq. A39 só dá valores reais se

$$B^2 \geq 4A \frac{F^2}{k^2} \quad \text{A40}$$

ou, atendendo às Eq. A36 e A37

$$Q \geq Q' \quad \text{A41}$$

sendo

$$Q = 0,797 \frac{\rho z a_r}{M_o} \quad \text{A42}$$

$$Q' = \frac{1}{FR_n I_n} \cdot \frac{\frac{R}{b} - \frac{r}{k}}{r \left(1 - \frac{I}{k}\right)} \quad A43$$

a rugosidade mínima será pois a que corresponde a $Q=Q'$.

Energia sísmica

Energia sísmica potencial:

$$W = \frac{1}{2} T_r d \quad A44$$

T_r - Força tangencial desenvolvida na rotura do contacto entre duas US:

$$T_r = N_r \operatorname{tg} \phi_0 \quad A45$$

Energia sísmica radiante: Diferença entre a energia sísmica potencial e a energia sísmica dissipada em fricção cinemática durante o ressalto sísmico:

$$W_r = \frac{1}{2} N_r \left(\operatorname{tg} \phi_o - \operatorname{tg} \phi_{oc} \right) \cdot d \quad A46$$

ϕ_{oc} - Ângulo de fricção cinemática; ligeiramente inferior ao ângulo ϕ_0 de fricção estática

Queda de fricção:

$$\Delta f = \operatorname{tg} \phi_o - \operatorname{tg} \phi_{oc} \quad A47$$

dividindo A46 por A44:

$$\Delta f = \frac{W_r}{W} \cdot \operatorname{tg} \phi_o \quad A48$$

Queda de tensão:

$$\Delta \tau = \sigma \Delta f \quad A49$$

A Eq. 46 pode escrever-se

$$W_r = \frac{1}{2} A_r \cdot \Delta \tau \cdot d \quad A50$$

que é a fórmula de Kostrof (1974) (Lay e Wallace, 1995).

A determinação de $\Delta \tau$, no caso de uma superfície de rotura circular de raio $a_r/2$, é deduzida pela lei de Hooke sob a forma (Lay Wallace, 1995):

$$\Delta \tau = \frac{7\pi}{16} \cdot G \cdot \frac{d}{0,5a_r} \quad A51$$

donde

$$\Delta \tau = 1,06 E \frac{d}{a_r} \quad A52$$

O raio $0,5 a_r$ é considerado como dimensão característica em relação à qual se calcula a distorção de rotura. Atendendo à Eq. A 5, a Eq. A53 pode escrever-se

$$\Delta \tau = 2,44 M_0 A_r^{-1,5} \quad A53$$

BIBLIOGRAFIA

- CABRAL, J - *Sismotectónica de Portugal*. Colóquio/Ciência nº 18. Fund. C. Gulbenkian., 1996.
- CÂMARA, R.; PINA, C.; GOMES, J. e NASCIMENTO, U. - *Modelo matemático para estudo das tensões tectónicas na litosfera*. LNEC, Rel. 39/93, NDE/NEF, 1993.
- FERRY BORGES, J. e CASTANHETA, M. - *Structural safety*. Curso 101. LNEC, 1971.
- GROSS, G. - *On the scaling of average slip with rupture dimensions of earthquakes. Reduction and predictability of natural disaster*. Santa Fé Inst. Studies in Sci. of Complexity. Vol. XXV. Addison-Wesley, 1996.
- GOMES COELHO, A. (1993) - *Falhas activas e casualidade sísmica em Portugal* Simp. sobre catástrofes naturais. Ordem dos Engenheiros/LNEC, 1993.
- HANDBOOK OF GEOPHYSICAL EXPLORATION, Vol. 18 - *Physical properties of rocks*. Pergamon, Oxford, 1996.
- HORN, H.M. e DEERE, D.V. - *Frictional Characteristic of minerals*, Geotechnique, Vol. XII, Nº 4, pp. 313 – 334, 1962.
- KOSTROF, B. - *Seismic moment and energy of earthquakes, and seismic flow of rock*. Isv. Acad. Sci USSR. Phys. Solid Earth (Engl. Transl.) 1. 23-40. Citado por (Lay et al. 1995), 1974.
- KOSTROF, B. - *Seismic moment and energy of earthquakes, and seismic flow of rock*. Isv. Acad. Sci USSR. Phys. Solid Earth (Engl. Transl.) 1. 23-40. Citado por (Lay et al. 1995), 1974.
- LAY, T. e WALLACE, T. - *Modern global seismology*. Acad. Press. San Diego, 1995.
- LOMNITZ, C. - *Fundamentals of earthquake prediction*. J. Wiley, 1994.
- MADEIRA, J. e RIBEIRO, A. - *O regime tectónico dos Açores*. 10 anos após o sismo dos Açores de 1 de Janeiro de 1980. Vol. 1. LNEC, 1992.
- MINEIRO, A.J.C. - *Revisão crítica de conceitos básicos em Engenharia sísmica*. Notas das aulas de Engenharia sísmica. Universidade Nova de Lisboa.
- NASCIMENTO, U. - *Notas sobre a fricção entre partículas de materiais granulares*. Geotecnia nº 22, 1979.
- NASCIMENTO, U. - *Mecanismo elástico de fricção entre partículas de solos granulares*. Geotecnia nº 27, 1979.
- NASCIMENTO, U. - *Um modelo passo-a-passo do mecanismo dos sismos*. Geotecnia nº 75, 1995.
- OLIVEIRA, C.S. - *Quantificação do movimento sísmico aquando do sismo de 1 de Janeiro de 1980*. Vol. 1. LNEC, 1992.
- PAGARETE, J. e PINTO, J.T. - *Geodesia aplicada à geodinâmica dos Açores*. 10 anos após o sismo dos Açores de 1 de Janeiro de 1980. Vol. 1, LNEC, 1992.
- RIBEIRO, A. - *Falhas activas e sismos*. Colóquio/Ciência nº 17. Fund. C. Gulbenkian, 1995.
- ROCHA, M. - *Mecânica das rochas*. LNEC, Lisboa, 1981.
- SCHOLZ, C.H. - *The mechanics of earthquakes faulting*. Cambridge Univ. Press. 1990.
- WHITFORD - *Referido em Science & Vie*, Nº 946, Julho, 1996.
- WYISS, M. - *Estimating maximum expectable magnitude of earthquakes from fault dimensions*. Geology 7. 336-340, 1979.
- ZOBACK, M. L. et al. - *Global pattern of tectonic stress*. Nature, Vol. 341, 1989.