

# Contribuição da geotecnia para o eventual surgimento de uma sismotecnia

## *A geotechnical contribution to the possible emergence of a seismotechnique*

Úlpio Nascimento\*

**RESUMO** - Na sequência de trabalhos publicados na GEOTECNIA sobre fricção, fluência friccional e mecanismo da fonte sísmica, e como resultado de uma conferência realizada na Academia de Engenharia em 25/05/00 sobre “O distante objectivo da previsão dos sismos”, foi constituído na AE um Grupo de Trabalho da Previsão dos Sismos (GTPS). Nos relatórios anuais respectivos descrevem-se as actividades desenvolvidas pelo GTPS.

No presente artigo resume-se a referida conferência bem como algumas exposições do autor nas reuniões da GTPS sobre o modelo que propõe para o mecanismo da fonte sísmica; e conclui-se com algumas considerações sobre o eventual surgimento de uma Sismotecnia.

**SYNOPSIS** - Subsequently to works published in the magazine “GEOTECNIA”, on subjects related with friction, frictional creep and seismic source mechanism, and as a result of a conference held at the Academy of Engineering (25/05/00) about the “Remote goal of earthquake prediction”, a Work Group for Earthquake Prediction (GTPS) has been created. Furthermore, the activities developed by the GTPS are described in the annual reports of the Group. Therefore, the present article contains an overview of the above conference, as well as of some lectures delivered by the author at the GTPS meetings, on the model proposed by him for the seismic source mechanism. Lastly, the document presents some considerations about the possible emergence of a Seismotechnique.

\* Investigador Coordenador do LNEC, aposentado.

**Palavras-chave** – Fricção; fluência friccional; mecanismo friccional; rate process model; modelo passo-a-passo.

# 1 - FRICÇÃO, FLUÊNCIA FRICCIONAL E MECANISMO DA FONTE SÍSMICA

Sobre este título reúnem-se as seguintes contribuições publicadas de 1978 a 1997:

## 1.1 - Notas sobre a fricção entre partículas de materiais granulares

Apresenta-se um estado da arte sobre o assunto, salientando os seguintes aspectos: técnicas de ensaio (Figura 1), materiais ensaiados e resultados obtidos, leis da fricção e alguns modelos propostos explicativos dessas leis (Figura 2) (Nascimento, 1978).

## 1.2 - Mecanismo elástico de fricção entre partículas de materiais granulares

Apresenta-se um mecanismo de fricção em que intervém a deformação elástica das rugosidades das superfícies em contacto (Nascimento, 1979). O mecanismo é simulado por um modelo físico em que as rugosidades são formadas por arcos de fita de aço (Figura 3).

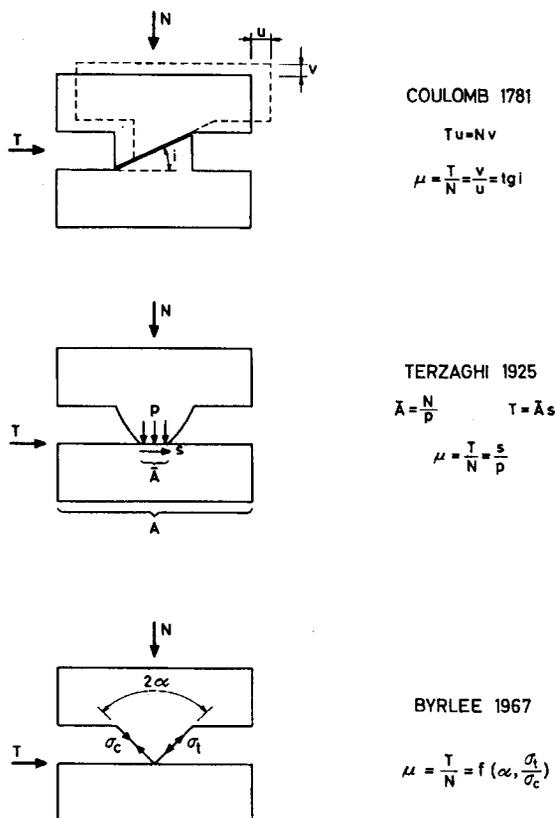


Fig. 2 - Alguns mecanismos de fricção anteriormente propostos.

Conclui-se, quanto à cinemática do mecanismo, que o deslizamento do ponto de contacto entre as duas rugosidades pode considerar-se a soma vectorial de duas parcelas: o deslocamento elástico das rugosidades e o deslizamento destas uma sobre a outra (Figura 4). Quanto à dinâmica do mecanismo, ela passa por três fases: na primeira, as rugosidades armazenam energia elástica e opõem resistência ao deslizamento; na segunda, de instabilidade, em que sofrem grandes deslocamentos elásticos, praticamente sem deslizamento aparente dos corpos; e, na terceira, elas restituem essa energia elástica forçando o deslizamento em vez de lhe oporem resistência (Figura 5), o que explica ser a resistência friccional dinâmica menor que a estática.

## 1.3 - Um modelo de fluência friccional aplicável em Geotecnia e Sismotectónica

Apresenta-se um quadro das viscosidades dos geomateriais, desde a fase fluida (gases, água, betumes) até à fase sólida (solos e rochas) relacionados com dimensões desde as moleculares até às litosféricas (Figura 6) (Nascimento, 1990).

Propõe-se um modelo do mecanismo elástico de fricção em que as deformações das rugosidades são traduzidas pela função deduzida por Mindlin (1943) para o deslizamento elastoplástico de esferas em contacto (Figura 7 e 8). Descreve-se um modelo

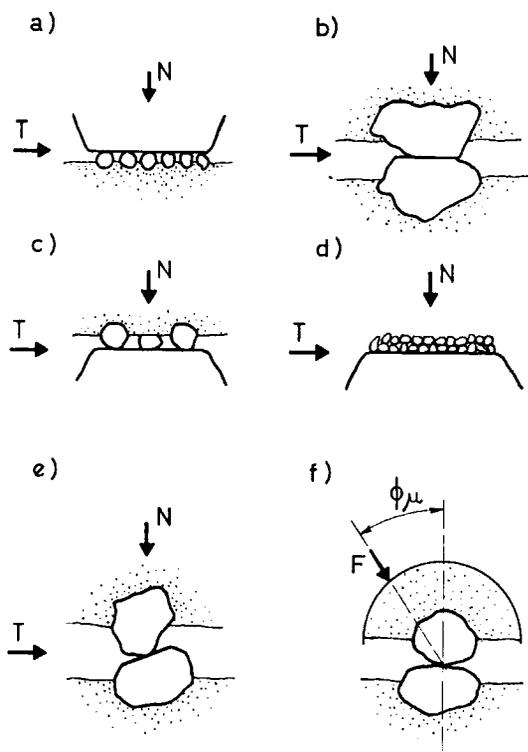


Fig. 1 - Sistemas utilizados para a determinação do ângulo de fricção entre partículas.

físico constituído por um miriápode deslizando num plano inclinado (Figura 9) mediante o qual se deduz experimentalmente uma função de fluência (Figura 10) que é análoga à deduzida pela teoria dos processos passo-a-passo ("rate processes") (Glasstone et al. 1941).

Exemplifica-se a aplicabilidade do modelo em Geotecnia e Sismotectónica e indicam-se pistas para o prosseguimento de investigações.

#### 1.4 - Um modelo passo-a-passo do mecanismo dos sismos

Tendo em consideração a teoria dos "rate processes", bem como a teoria de Reid do ressalto

elástico relativa a o mecanismo dos sismos, e tendo ainda presentes os modelos físicos do mecanismo elástico de fricção e da fluência friccional, propõe-se um modelo matemático do mecanismo dos sismos (Nascimento, 1995).

O conceito básico da teoria dos "rate processes" é o de que o processo de rearranjo da matéria é discreto e não contínuo, isto é, a energia desenvolvida em tal rearranjo não se distribui uniformemente, mas sim em concentrações em algumas unidades, concentrações essas que, ao atingirem certo nível, lhes confere a qualidade de serem unidades activas, deslocando-se e assim determinarem o referido rearranjo.

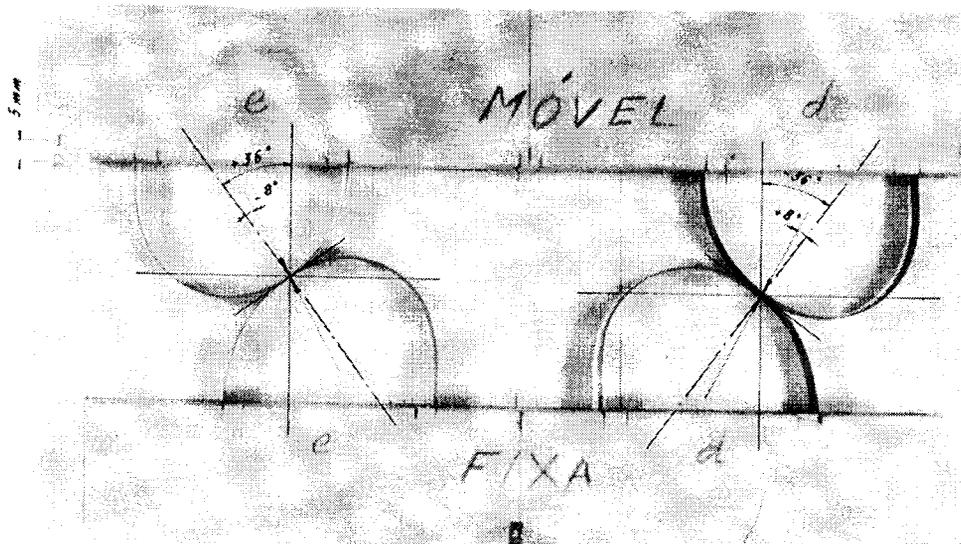


Fig. 3 – Configuração após carga normal e consequente deslocamento de 5 mm.

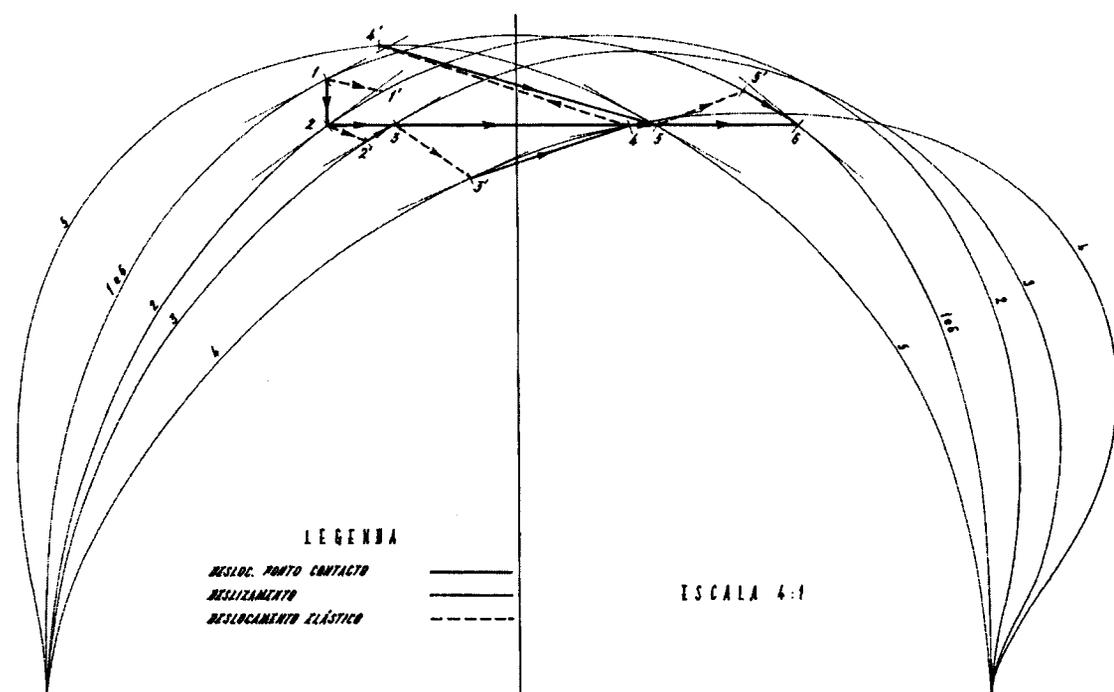


Fig. 4 – Esquema da cinemática de deformação numa saliência, com indicação dos deslocamentos do ponto de contacto, a traço cheio, e das respectivas componentes elásticas, a tracejado, e de deslizamento a traço cheio.

$N_1' = 0 \text{ gf}$   
 $N_2' = 250 \text{ gf}$   
 $N_3' = 400 \text{ gf}$   
 $N_4' = 850 \text{ gf}$   
 $N_5' = 400 \text{ gf}$   
 $N_6' = 0 \text{ gf}$

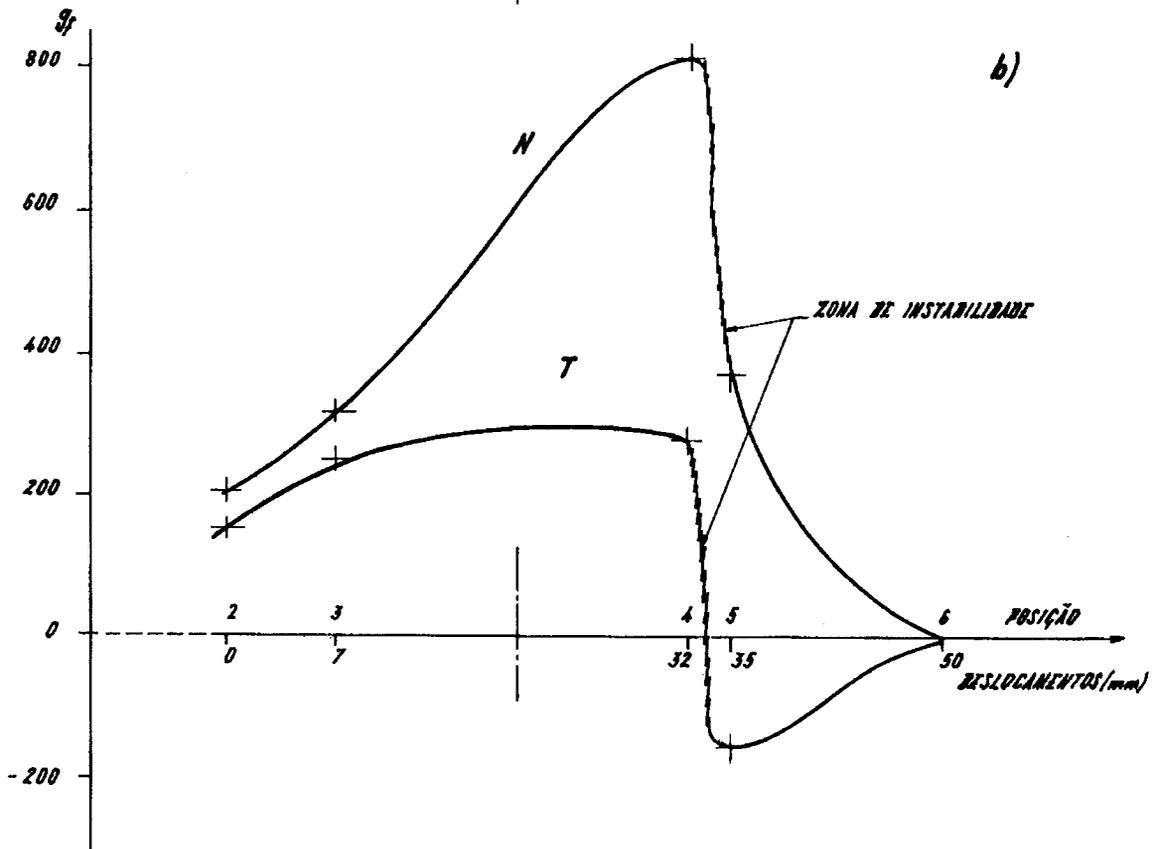
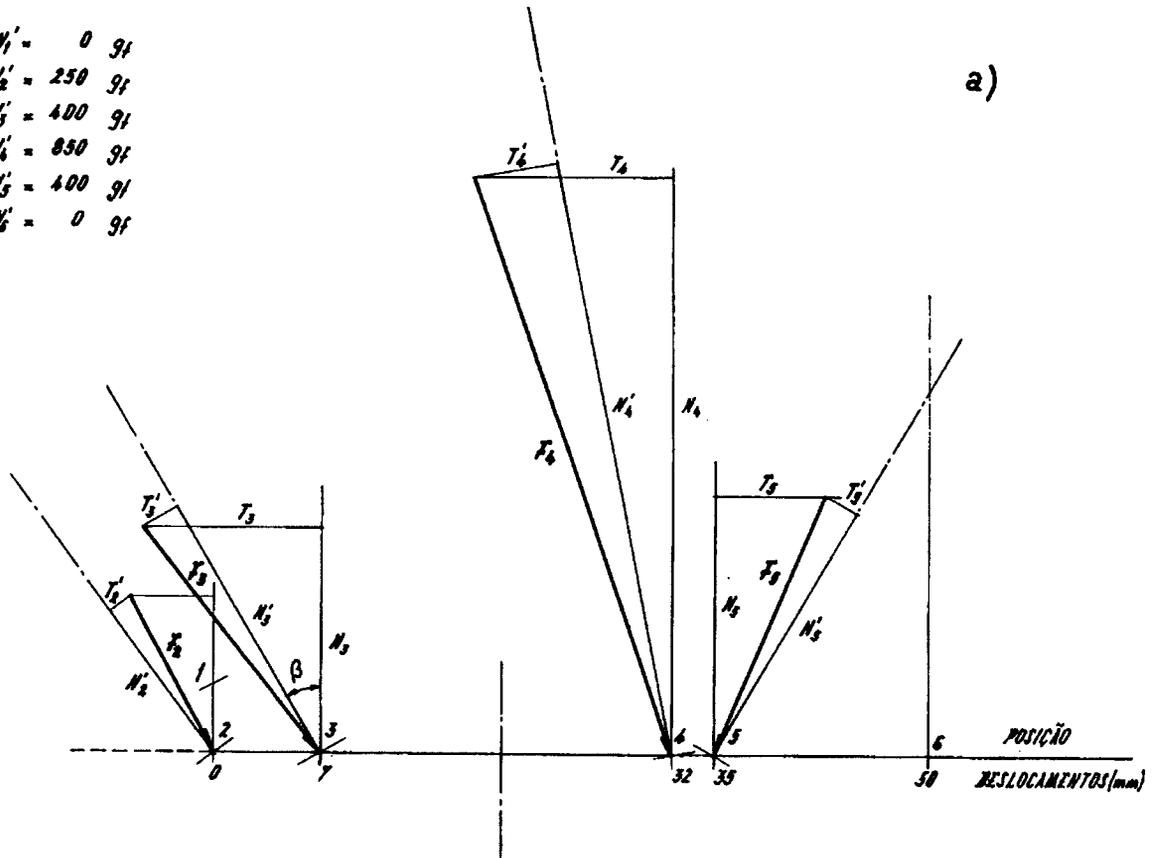


Fig. 5 – Evolução de N e T ao longo do deslizamento (note-se que na parte final do deslizamento T é negativo).

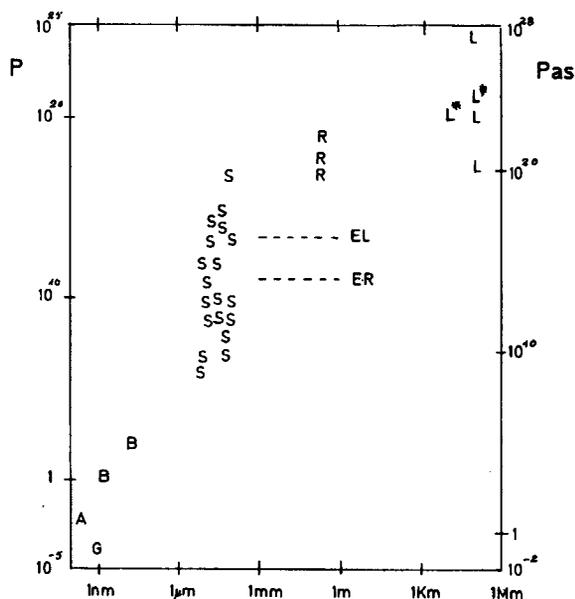


Fig. 6 - Viscosidade dos geomateriais. A - água. G - gases. B - betumes. S - solos. R - rochas. ER - escorregamentos rápidos. EL - escorregamentos lentos. L - litosfera. L\* - Litosfera Atlântica ao largo de Portugal.

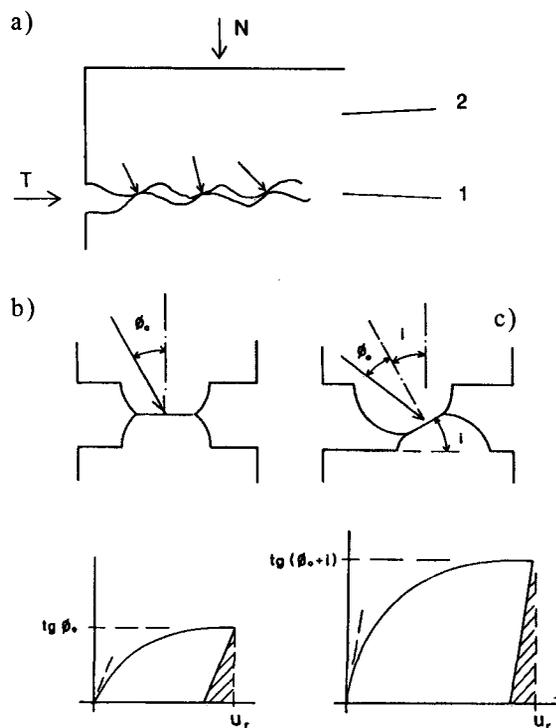


Fig. 7 - Modelo proposto: (a) segundo o princípio de Saint-Venant, a uma certa distância da zona (1) de contacto entre saliências, onde há concentração de tensões e deslocamentos, entra-se noutra zona (2) onde há uniformidade de tensões e deslocamentos; (b) saliências contactando sem imbricamento, e respectivo diagrama da função de Mindlin; (c) Idem, com imbricamento.

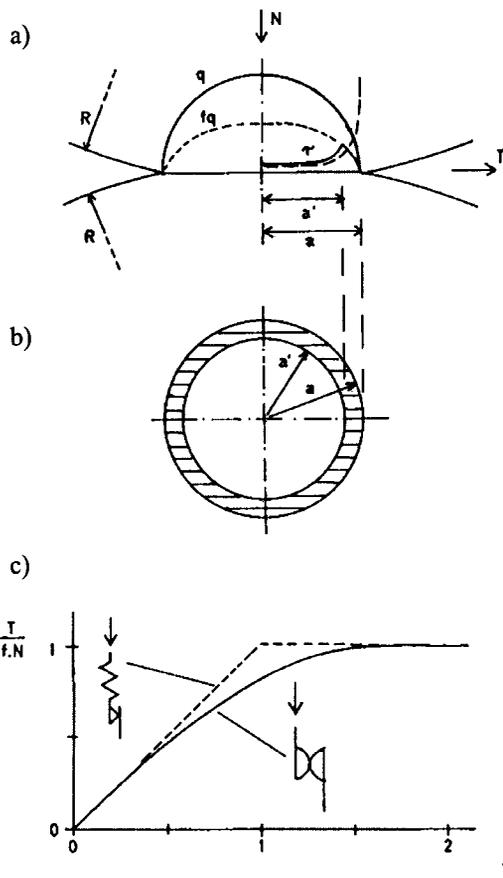


Fig. 8 - Problema de Hertz - Mindlin: (a) tensões desenvolvidas no contacto entre esferas elásticas submetidas às cargas normal N e tangencial T; (b) partes do contacto ainda em fase elástica (círculo de raio  $a'$ ) e em fase de deslizamento plástico (coroa a tracejado); (c) deformação elastoplástica do corpo de Mindlin sob forma adimensional (a cheio); deformação elastoplástica do corpo de Prandtl (a tracejado).

Nas exemplificações apresentadas pelos autores da teoria, as unidades são moléculas, átomos e electrões; mas podem ser outras partículas como os grãos dos solos, os cristais constituintes das rochas ou os blocos dos maciços rochosos. Nesse sentido, Feda (1989) introduziu o conceito de *unidade fluente (flow unit)* para interpretação da fluência dos solos, o que significa que a *partícula* que efectivamente intervém no processo pode ser um agrupado de partículas mais pequenas.

Na fluência friccional de uma falha sísmica, simulada pelo deslizamento de um miriápode, unidades fluentes (UF) são os pés do miriápode, os quais simulam, por sua vez, as rugosidades da superfície da falha e as respectivas concentrações de tensão (Figura 11 e 12).

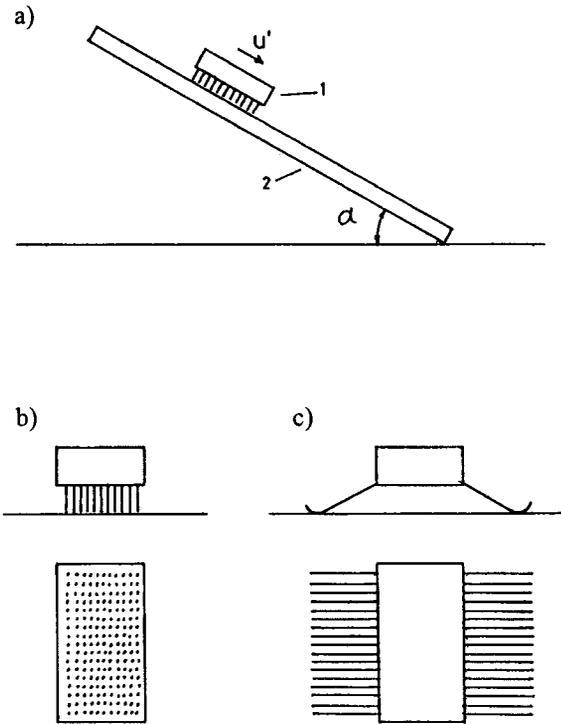


Fig. 9 – Modelo físico (a) conjunto constituído por um bloco com fios e lásticos e ncastrados, formando uma espécie de miriápode (1), deslizando num plano inclinado (2); (b) modelo com fios de plástico. (c) modelo com fios de aço.

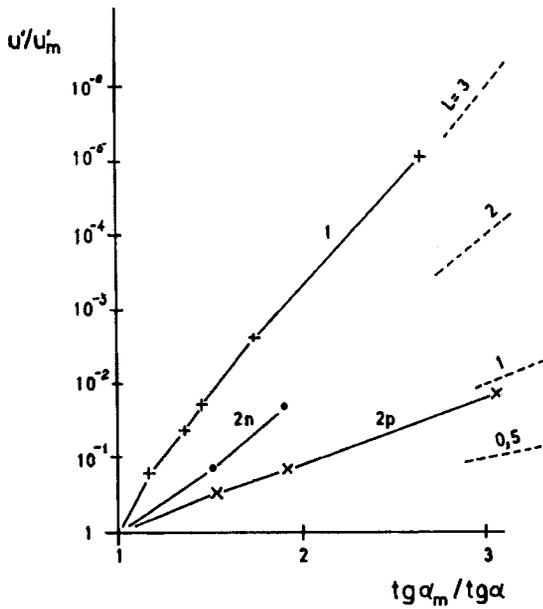


Fig. 10 – Resultados dos ensaios: 1 – modelo com fios de plástico; 2n - modelo com fios de aço deslizando normalmente aos fios; 2p - idem, deslizando paralelamente aos fios.

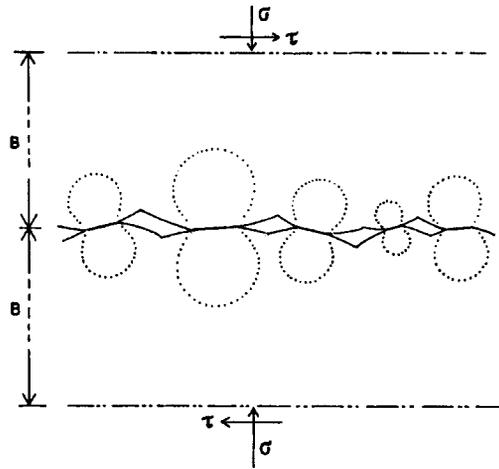


Fig. 11 – Esquema de uma falha e dos bolbos de pressão (a pontuado) gerados nos contactos entre rugosidades; fora dos bolbos de pressão, as tensões são inferiores a 10% da tensão de contacto.

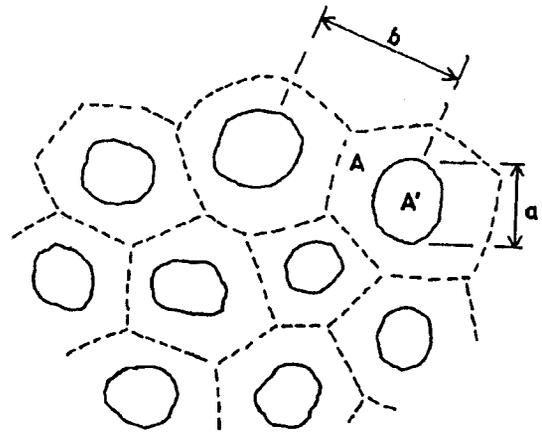


Fig. 12 – Esquema das rugosidades de uma falha: A - área aparente; A' - área efectiva; a - diâmetro médio de A'; b - passo da rugosidade.

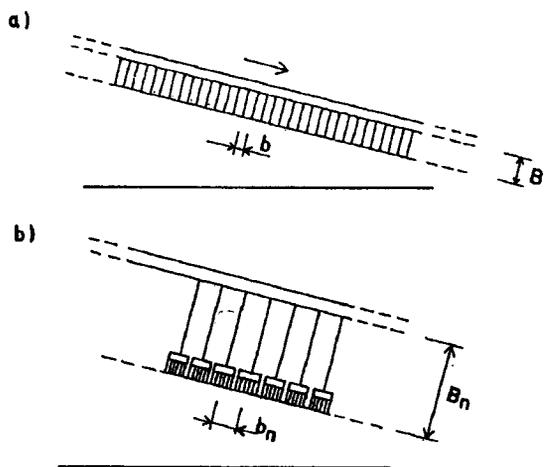


Fig. 13 – a) Falha cujo deslizamento se faz à escala das rugosidades (UF); b) falha cujo deslizamento se faz à escala de grupos de UF constituindo unidades sísmicas (US) de escala n.

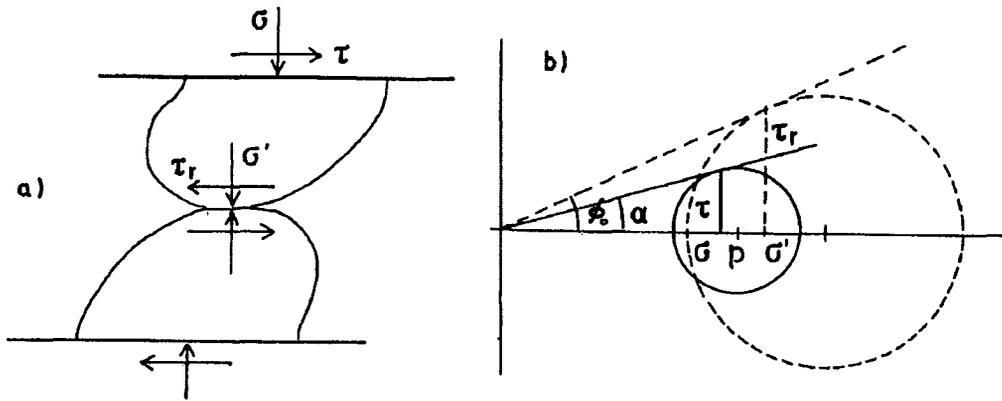


Fig. 14 – a) Modelo das rugosidades assimiladas a uma estrutura constituída por duas consolas; b) círculos de Mohr das respectivas tensões.

Considera-se que os sismos resultam da rotura de *unidades sísmicas* (US), as quais são constituídas pelo agrupamento de numerosas UF (Figura 13) e admite-se também que, num segmento da falha com dadas características, há *auto-selhança* entre as US, qualquer que seja o número de UF que as constituem.

Relaciona-se a taxa média de deslizamento das falhas com a probabilidade de rotura das respectivas US e, por meio da teoria probabilística de segurança estrutural (Ferry Borges *et al.*, 1971), relaciona-se a dita probabilidade com o coeficiente de segurança da US, considerada para o efeito como uma estrutura como qualquer outra em Engenharia Civil (Figura 14). Efectivamente, são análogas as funções  $P=f(F)$  obtidas por esta teoria (Figura 15) e deduzidas experimentalmente do modelo físico de fluência friccional (Figura 10).

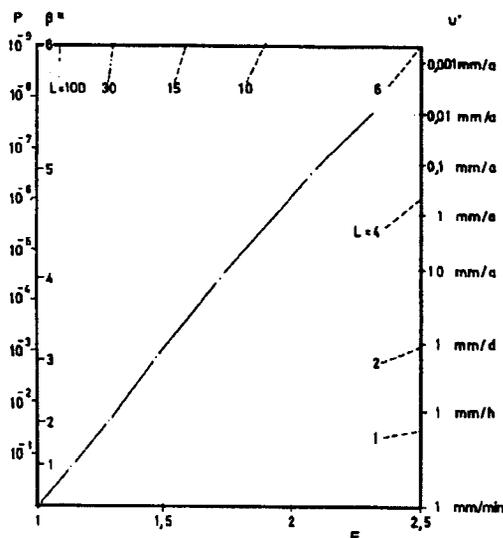


Fig. 15 – Probabilidade  $P$ , índice de fiabilidade  $\beta^*$  e taxa de deslizamento  $u'$  em função do coeficiente de segurança  $F$ , para  $C_s = 0,05$  e  $C_R = 0,10$  (a tracejado, as rectas correspondentes aos coeficientes de lentidão  $L$  de 1 a 100).

Exemplifica-se a aplicação do modelo analisando os sismos de Lisboa, 1755 e 1941, Açores, 1980 e Loma Prieta, 1989.

### 1.5 - Análise do mecanismo focal de alguns sismos mediante o modelo passo-a-passo

Tendo em vista averiguar o ajustamento à realidade do modelo passo-a-passo do mecanismo dos sismos, analisam-se por meio desse modelo cinco sismos: Lisboa, 1941 e 1969, Açores, 1980, Loma Prieta, 1989 e Kobe, 1995 (Nascimento, 1997). Discute-se os resultados obtidos para os 22 parâmetros sismológicos obtidos, arbitrando diferentes valores para o coeficiente de concentração da tensão ( $k$ ) e o coeficiente de variação das sollicitações ( $C_s$ ). Os parâmetros discutidos são, principalmente, o diâmetro da superfície de rotura, o módulo de elasticidade estático, o ângulo de fricção, a obliquidade da tensão e a sua variabilidade, a concentração da tensão, o deslocamento sísmico, o peso volúmico, a profundidade do hipocentro e a queda do coeficiente de fricção.

## 2 - O DISTANTE OBJECTIVO DA PREVISÃO DOS SISMOS (ACAD. ENG. 22/05/2000)

### 2.1 - Objectivo

Assim como as previsões meteorológicas têm progredido mediante modelos baseados na Mecânica dos Fluidos, também se poderá progredir na previsão dos sismos com base numa mecânica da fonte sísmica a desenvolver com a participação das seguintes disciplinas: Sismologia, Geologia, Geodesia e Engenharia Sísmica.

### 2.2 - Estratégia

O seminário da UNO, realizado em Lisboa em 1988, reconheceu a existência de um *déficit científico* relativamente ao mecanismo da fonte sísmica e apontou linhas para a tendência da

investigação: observação de fenómenos percursoros, modelação dos mecanismos de tais fenómenos (fricção, dilatação, rotura, etc.) e ajustamento das modelações aos resultados das observações.

### 2.3 - Programa PODUS – Prospecção e Observação de Unidades Sísmicas.

**Objectivo** – Melhoramento progressivo de previsões sísmicas.

**Método** – Prospecção e monitorização de US.

**Zonas de aplicação inicial** – Açores, Lisboa, Alqueva.

**Disciplinas envolvidas** – Sismologia, Geologia, Geodesia, Engenharia Sísmica.

**Painel multidisciplinar** – Previsão e avaliação de riscos.

**Sectores empresariais interessados** – Serviços de engenharia, de seguros, de protecção civil, etc.

**Valerá a pena?** – Lomnitz (1994): a previsão de sismos é a melhor razão para ser-se sismólogo. Udias (1999): como a previsão dos sismos com suficiente antecedência é uma eficiente via para diminuir o número de mortos e evitar danos, tal previsão constitui um incontornável objectivo dos sismólogos.

**As favoráveis condições de Portugal:**

- Tem um historial sísmico importante e bem estudado.
- É notável a sismotectónica do seu território, numa zona de fronteiras entre três placas tectónicas: a euro-asiática, a africana e a americana.
- Tem neste domínio centros de actividade científica e tecnológica de nível internacional.

### 2.4 - Conclusão

Graças a recentes avanços em Sismologia, Geologia, Geodesia Sísmica; considera-se viável o melhoramento progressivo da previsão dos sismos e, eventualmente, do seu controlo mediante o programa PODUS, que se propõe.

## 3 - ALGUMAS EXPOSIÇÕES NAS REUNIÕES DO GTPS

Enumeram-se em seguida algumas contribuições do autor apresentadas em reuniões do Grupo de Trabalho da Previsão dos Sismos, a funcionar no âmbito da Academia de Engenharia.

### 3.1 - Demonstração experimental das coroas de Mindlin (Acta de 4-12-2000)

Duas esferas de borracha artificial são pressionadas uma contra a outra, tendo-se previamente interposto entre elas papel transparente

riscado com lápis (Figura 16a). Se a tensão é apenas normal, forma-se no papel uma mancha circular correspondente à fórmula de Hertz (1922) (Figura 16b). Se após a pressão normal, se aplica também um esforço tangencial, forma-se na mancha circular uma coroa mais clara, porque aí, tendo sido excedida a resistência ao corte, os traços de lápis foram apagados por um deslizamento de rotura (Figura 17), como previsto por Mindlin (1949). A existência desta coroa de rotura na transição entre a deformação elástica e a rotura sísmica (Figura 8) é muito importante como fenómeno precursor de sismos.

### 3.2 - O modelo passo-a-passo do mecanismo da fonte sísmica. Como avaliar o seu ajustamento à realidade. (Acta de 27-11-2001).

#### 3.2.1 - Introdução

Avaliar o ajustamento à realidade de vários modelos propostos para o mecanismo da fonte sísmica requer a análise, mediante tais modelos, dos parâmetros sismológicos de diversos sismos e a discussão multidisciplinar desses parâmetros. Nesse sentido, apresenta-se neste trabalho a análise, mediante o modelo passo-a-passo, do sismo dos Açores de 1/1/1980, e avançam-se também algumas achegas para a referida discussão.

A escolha de tal sismo justifica-se por ter ocorrido na região de Portugal de maior sismicidade e sobre a qual se dispõe de informação bastante desenvolvida.

Como o número de equações do sistema que traduz o modelo passo-a-passo é inferior ao número das incógnitas, o problema é indeterminado. No entanto, analisando vários sismos e microsismos gerados numa restrita zona de crosta, constituída pelo mesmo tipo de rocha, deverão ser sensivelmente constantes os parâmetros inerentes a essa zona, tais como, *rugosidade, ângulo de fricção, módulo de elasticidade, coeficiente de variação das solicitações e queda de tensão*.

Se tal se verificar e se os valores desses parâmetros merecerem o consenso dos especialistas das várias disciplinas envolvidas no fenómeno sísmico, poderá concluir-se que, em primeira aproximação, o modelo se ajusta àquela restrita zona. E se o mesmo suceder em outras zonas bem diferenciadas, poder-se-á também concluir que, em primeira aproximação, o modelo se ajusta à realidade.

Como os microsismos são muito mais frequentes que os grandes sismos é de supor que num período de tempo aceitável se possa analisar um número suficientemente grande de sismos que permita o apuramento de conclusões bem fundamentadas. Admite-se também que ao longo do processo se reconheça conveniente introduzir

pequenos ajustamentos no próprio modelo para melhorar a sua fiabilidade.

### 3.2.2 - Análise e discussão

No Quadro 1 mostram-se os valores arbitrados a alguns parâmetros para avaliação da sua influência nas soluções calculadas.

No Quadro 2 apresentam-se os valores dos parâmetros da solução A.

Segue-se a análise e discussão de vários parâmetros: probabilidade, coeficiente de segurança, coeficiente de variação das solicitações, desvio da

área de rotura de Wyss, módulo de elasticidade estática, rugosidade, coeficiente de concentração da tensão, deslocamento sísmico, obliquidade da tensão e ângulo de fricção, queda de tensão, energia radiante e frequência focal. Não se apresenta porém toda essa análise e discussão porque isso a longaria excessivamente este artigo.

Salienta-se no entanto a conclusão da necessidade de alargar até aos microsismos a validade das fórmulas empíricas de Wiss e de Gutenberg-Richter, o que poderá fazer-se mediante os respectivos desvios.

**Quadro 1** – Valores arbitrados a alguns parâmetros para avaliação da sua influência nas soluções calculadas.

Parâmetros	Soluções												
	A	A'	B	B'	C	C'	D	D'	E	E'	F	F'	
Coef. vari. solicit., $C_s$	0,1	0,2											
Desvio área rot., $\delta_A$	0		0,2	-0,2									
Coef. concentr. tensão, $k$	1,2				1,01	1,5							
Ângulo de fricção, $\phi_0$ (°)	10						5	25					
Mód. elastic. din., $E_d$ (MPa)	52								40	60			
Queda de tensão, $\Delta\tau$ (MPa)	30										10	100	

**Quadro 2** – Solução A

Magnitude	$M_s$	-	7,1
Momento sísmico	$M_0$	Nm	2E20
Profundidade do foco	$z$	km	10
Taxa de deslizamento	$u'$	mm/a	10
Coeficiente de variação das solicitações	$C_s$	-	0,1
Probabilidade	$P$	-	1,90E-5
Coeficiente de segurança	$F$	-	1,41
Desvio da área de rotura	$\delta_A$	-	0
Área de rotura	$A_r$	km <sup>2</sup>	891
Coeficiente de concentração da tensão	$k$	-	1,2
Passo da rugosidade	$b$	m	0,005
Diâmetro da área de rotura	$a_r$	km	33,7
Deslocamento sísmico	$d$	m	11,2
Ordem da unidade sísmica	$O$	-	13,7
Módulo de elasticidade dinâmico	$E_d$	GPa	52
Ângulo de fricção estático	$\phi_0$	°	10
Rugosidade	$\rho$	-	0,085
Obliquidade da tensão	$\alpha$	°	8,54
Módulo de elasticidade estático	$E_s$	GPa	2,5
Peso específico	$\rho$	N/m <sup>3</sup>	3E4
Viscosidade friccional	$\eta_f$	Pas	1,55E19
Energia sísmica potencial	$W$	J	3,06E17
Energia sísmica radiante	$W_r$	J	1,77E16
Queda de tensão	$\Delta\tau$	MPa	3
Eficiência sísmica	$\eta$	-	0,058
Coeficiente de fricção estático	$\mu_0$	-	0,176
Coeficiente de fricção dinâmico	$\mu_d$	-	0,166
Frequência focal	$f$	Hz	0,014
Energia Gutenberg & Richter	$W_{GR}$	J	2,82E15
Desvio da energia $W_{GR}$	$\delta_w$	-	0,052

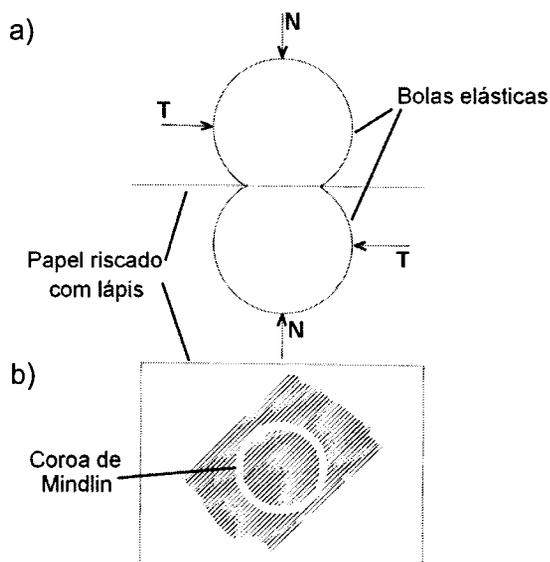


Fig. 16 – Demonstração experimental das coroas de Mindlin.

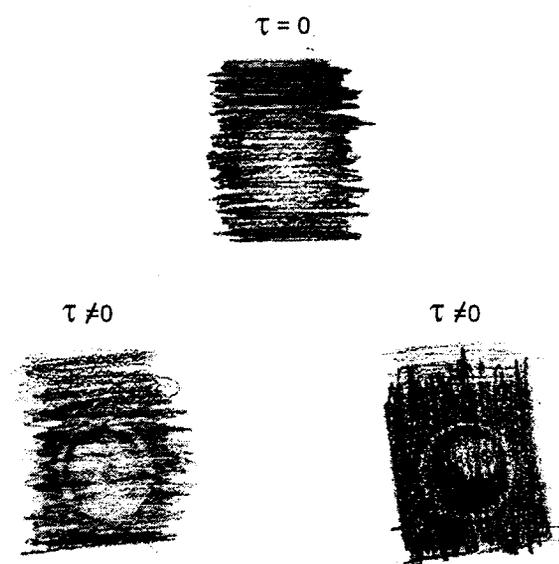


Fig. 17 – Coroas de Mindlin obtidas com duas “bolas saltitonas” de  $\phi = 6$  cm.

### 3.3 - Modelação das tensões na crosta terrestre. Contribuição do modelo passo-a-passo (Acta de 16/12/2002)

Referem-se as definições dos termos *aspereza*, *barreiras*, *rugosidades* e *unidades sísmicas* e as definições atribuídas pelos autores que as usam, concluindo-se que há muita analogia nos respectivos significados.

Mais uma vez, salienta-se a importância da coroa de Mindlin na eventual detecção de uma US na fase pré-sísmica.

Procura-se explicar a diferença entre os módulos de elasticidade estática e dinâmica.

Mostra-se como a partir da obliquidade da tensão, dada pelo modelo passo-a-passo, se pode deduzir, em primeira aproximação, o estado de tensão no hipocentro de um sismo. Exemplifica-se com o sismo dos Açores (Figura 18 e 19).

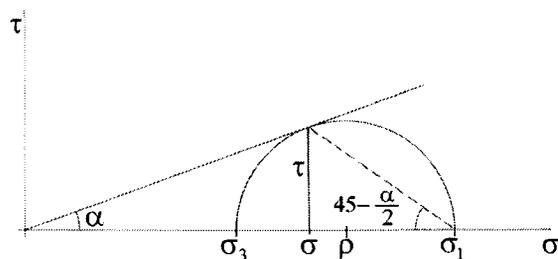
### 3.4 - O mecanismo elástico de fricção no modelo passo-a-passo. (Acta de 2-6-2003).

Analisa-se a teoria da auto-similaridade no mecanismo da fonte sísmica, e apresenta-se um quadro onde, com base nessa teoria, se extrapolam as fórmulas empíricas de Wyss e de Gutenberg-Richter desde áreas de rotura da ordem dos  $km^2$ , em que a observação se fundamenta, até às áreas dos  $mm^2$ , das rugosidades petrográficas (Figura 20).

Refere-se que em Engenharia Civil esta via da semelhança estrutural foi muito desenvolvida por Manuel Rocha (1952) com múltiplas aplicações no dimensionamento experimental de estruturas.

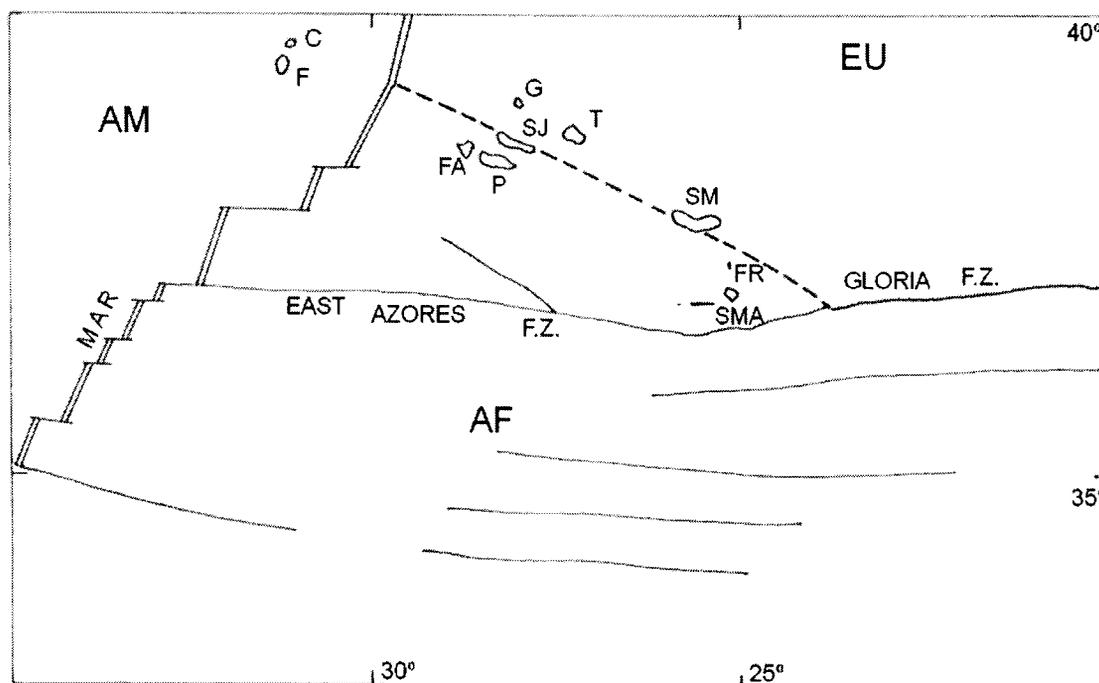
Salienta-se que o mecanismo elástico de fricção da fonte sísmica, isto é, da estrutura de uma US, pode pois, mediante a teoria da auto-similaridade, ser estudado em modelo reduzido.

Recorda-se o mecanismo elástico de fricção referido no § 1.2 deste trabalho.

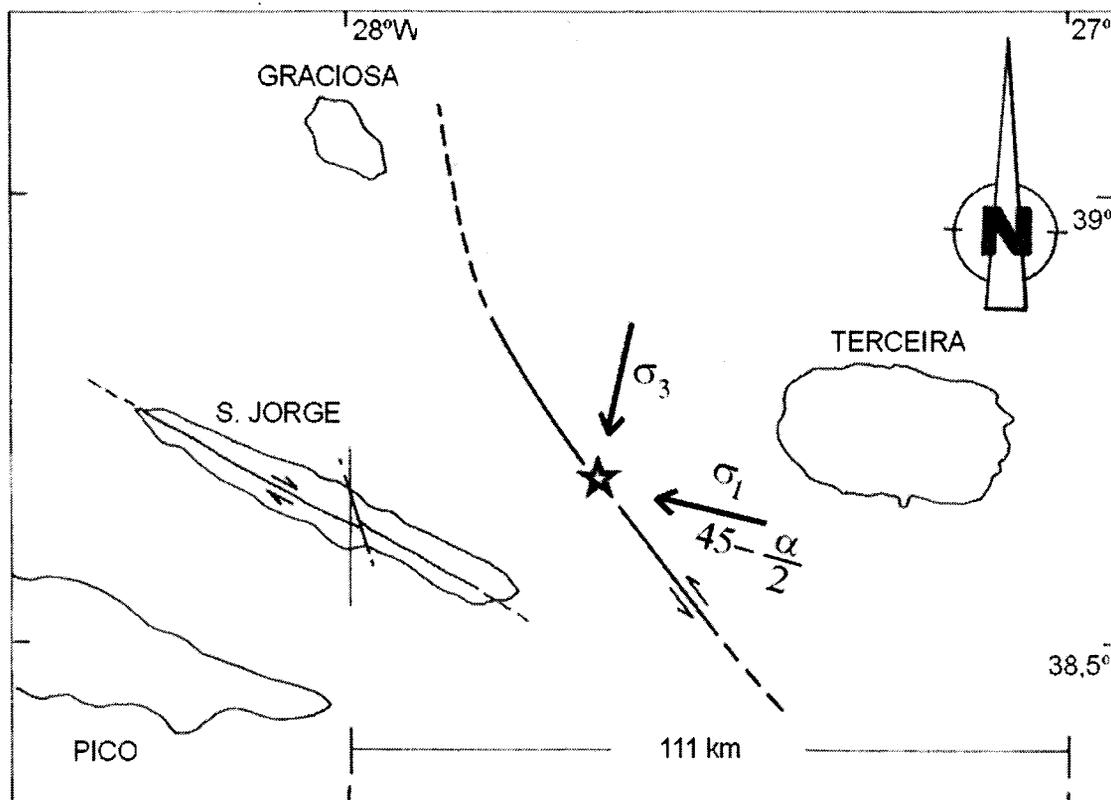


Peso específico	$\rho = 3 \times 10^4 \text{ N/m}^3$
Profundidade	$z = 10 \text{ km}$
Pressão isostática	$p = p_z = 300 \text{ MPa}$
Obliquidade	$\alpha = 8^\circ,5$
Tensão normal	$\sigma = \frac{p}{1 + \text{tg}^2 \alpha} = 293 \text{ MPa}$
Tensão de corte	$\tau = \sigma \text{ tg } \alpha = 45 \text{ MPa}$
Tensão principal máxima	$\sigma_1 = p(1 + \text{sen } \alpha) = 344 \text{ MPa}$
Tensão principal mínima	$\sigma_3 = p(1 - \text{sen } \alpha) = 256 \text{ MPa}$
Tensão principal intermédia	$\sigma_2 \cong p = 300 \text{ MPa}$
Ângulo de $\sigma_1$ com o plano da falha	$45^\circ - \frac{\alpha}{2} = 41^\circ$

Fig. 18 – Exemplo: Açores 1/1/80. Estado de tensão no hipocentro.



Enquadramento tectónico dos Açores: a traço duplo – rift médio atlântico; a traço fino – falhas transformantes; a traço grosso – falha da Glória; a tracejado – extremo oeste da fronteira de placas Eurásia-África; AM – placa americana; EU – placa eurasiática; AF – placa africana; C – Corvo; F – Flores; G – Graciosa; FA – Faial; P – Pico; SJ – S. Jorge; T – Terceira; SM – S. Miguel; FR – Formigas; SMA – Santa Maria (simplificado de Laughton e Whitmarsh, 1974).



Localização da falha do sismo de 1 de Janeiro de 1980 baseada na distribuição dos epicentros das réplicas e respectivo mecanismo focal. A estrela marca o epicentro do sismo principal (baseado em Hirn et al., 1980)

Fig. 19 – O regime tectónico dos Açores (J. Madeira e A. Ribeiro, 1992), incluindo-se as direcções das tensões principais calculadas na Figura 18.

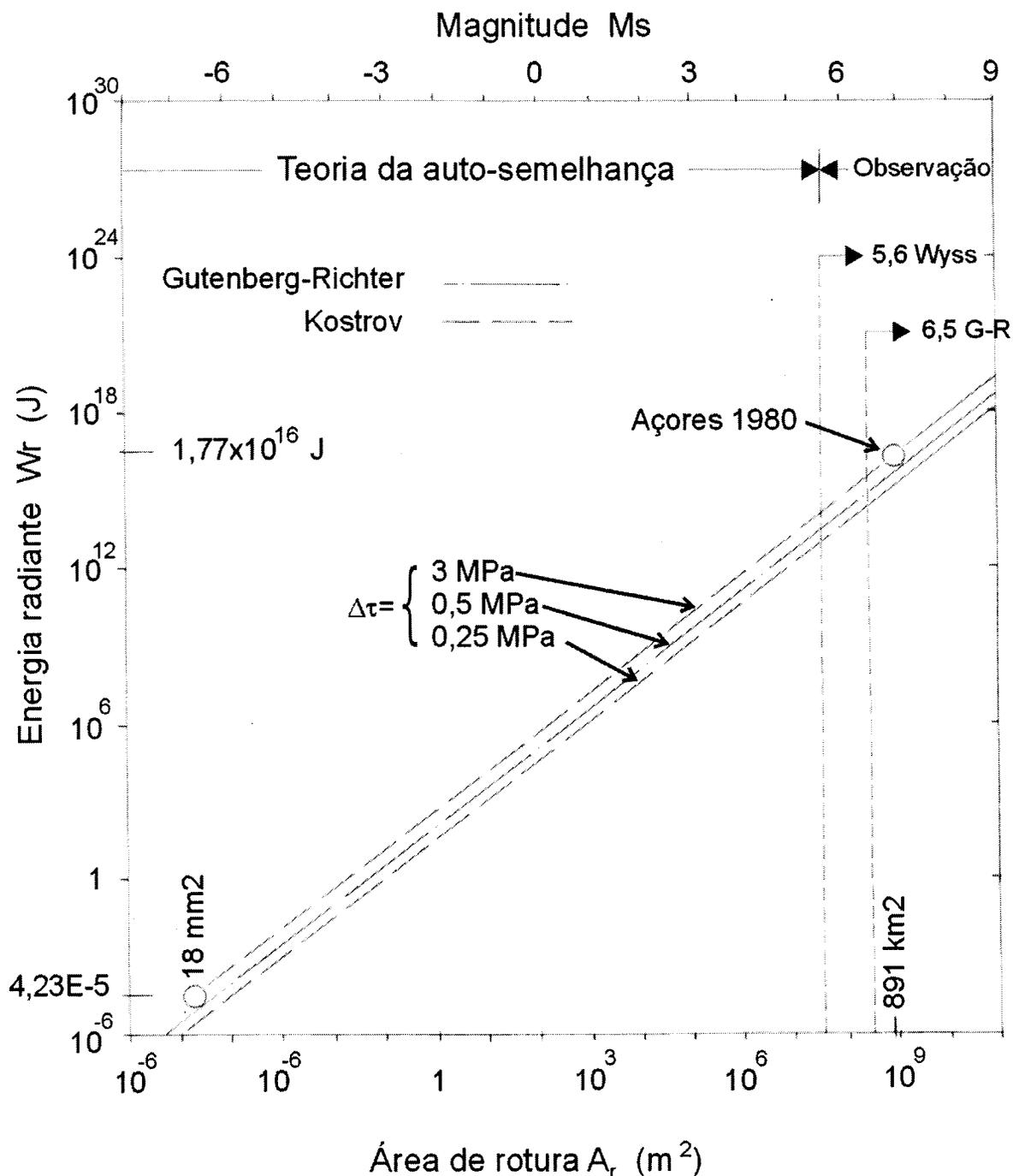


Fig. 20 – Nesta figura as fórmulas de Gutenberg-Richter e de Kostrov, mediante a teoria da auto-semelhança, são extrapoladas das áreas de rotura da ordem dos  $km^2$ , em que a observação as fundamenta, até às áreas dos  $mm^2$ , das rugosidades petrográficas.

Põem-se finalmente as interrogações: como se forma e como se poderá detectar uma US?

E adiantam-se, para reflexão, algumas considerações sob o estado de tensão e natureza da rocha da falha; sobre os recentes avanços das tecnologias de observação geodésica (GPS e SAR) e na observação e modelação das tensões na crosta

terrestre; e ainda na observação e análise de microssismos.

E conclui-se: a conjugação da teoria da auto-semelhança com o mecanismo elástico da fricção parece constituir uma via prioritária de investigação do mecanismo da fonte sísmica.

#### 4 - O EVENTUAL SURGIMENTO DE UMA SISMOTECNIA

No artigo “contribuição” para a história da Geotecnia em Portugal” (Nascimento, 1990), descreve-se o surgimento da especialização em Geotecnia, hoje institucionalizada na Ordem dos Engenheiros.

No início do século XX, o desenvolvimento da construção de grandes obras evidencia a necessidade de uma mais íntima colaboração entre engenheiros civis e geólogos e, também, de um maior esforço de investigação nas disciplinas de Mecânica dos Solos, Mecânica das Rochas e Geologia de Engenharia. Assim surgiu a especialização de Geotecnia.

Agora, no início do século XXI, é de uma evidência chocante a diferença de danos causados pelos sismos nas regiões em que a tecnologia de construção antissísmica está mais desenvolvida, onde esses danos são reduzidos, e nas regiões onde tal tecnologia praticamente não existe, onde tais danos são catastróficos.

O objectivo de prever os sismos com antecedência suficiente para evitar tais catástrofes torna-se pois incontornável.

Considera-se porém que o potencial científico e tecnológico actualmente disponível nas diferentes disciplinas envolvidas no fenómeno sísmico tem capacidade de investigação para, em tempo razoável, alcançar esse objectivo.

Parece pois que se deve responder a esse desafio promovendo-se uma mais íntima, colaboração interdisciplinar, daí resultando, eventualmente, a compreensão e modelação do mecanismo da fonte sísmica, condição indispensável para se avançar com bases seguras para a previsão dos sismos.

E desse movimento surgirá eventualmente uma Sismotecnia.

#### AGRADECIMENTOS

O autor agradece à Academia de Engenharia nas pessoas dos seus presidentes, o anterior, Prof. Armando Lencastre, pela iniciativa da criação do Grupo de Trabalho da Previsão dos Sismos e pelo apoio inicial que lhe deu, e o actual, Prof. Maranha das Neves, pela continuidade desse estimulante apoio; à Academia das Ciências de Lisboa, a colaboração muito efectiva prestada às actividades do Grupo por intermédio do Prof. António Ribeiro; ao Laboratório Nacional de Engenharia Civil, ao Instituto Superior Técnico e à Faculdade de Ciências de Lisboa a disponibilidade e apoio dados para a realização de Sessões Públicas de GTPS; ao Prof. Mendes Victor e Prof. Sousa Oliveira que conjuntamente com o autor coordenam os trabalhos de Grupo; ao Prof. Ricardo Oliveira e ao Investigador Gomes Coelho pela colaboração prestada na fase inicial da constituição do Grupo;

aos restantes membros do GTPS, Prof. António Mineiro, Eng.º. Cansado de Carvalho, Prof. João Martins, Prof. Joaquim Pagarete, Prof. Eduardo Madeira, Eng.º. Oliveira Pedro, Dra. Luísa Senos, Eng.º. Mário Castanheta, Eng.º. Sêco e Pinto, Prof. Raimundo Delgado, Eng.º. Rui Correia, Prof. João Cabral, Dra. Teresa d’Orey, Prof. Luís Gaspar, Prof. Miguel Miranda e Prof. Luís Matias, pela colaboração prestada ou disponibilidade para oportunamente vir a prestá-la; e especialmente ao Prof. Vieira de Lemos que mais sobrecarregado tem sido com o secretariado das reuniões do Grupo. Finalmente, um agradecimento à D. Teresa Fonseca, secretária da Academia de Engenharia, pela sua eficiente dedicação às tarefas do GTPS.

#### BIBLIOGRAFIA

- Academia de Engenharia. Grupo de Trabalho da Previsão dos Sismos. Relatório de Actividades 2001.
- Idem, 2002
- Idem 2003 (Em elaboração)
- Cabral, J. e Ribeiro, A. (1989) *Estudo de neotectónica em Portugal Continental*. Actas do Encontro sobre Sismologia e Engenharia Sísmica, LNEC, pp. 11-19.
- Cabral, J. (1996) *Sismotectónica de Portugal*. Colóquio / Ciência nº 18, Fundação Calouste Gulbenkian.
- Câmara, R., Pina, C., Gomes, J. e Nascimento, Ú. (1993) *Modelo matemático para estudo das tensões tectónicas na litosfera*. LNEC, Rel. 39/93, NDE/NEF.
- Cansado, C. (2000) *O risco sísmico em Portugal*. Comunicação à Academia de Engenharia, 20 de Março.
- Correia, R. (1996) *Avaliação probabilística da perigosidade numérica*. Informação técnica de Geotecnia, ITG 23, LNEC.
- Feda, J. (1989) *Interpretation of creep of soils by rate process theory*. Géotechnique, 39, N. 4.
- Fernandes, R., Baptista P. e Bastos, L. (1988) *Análise da dinâmica crustal recente no arquipélago dos Açores pelo uso de observações GPS*. I Assembleia Hispano-Portuguesa de Geodesia e Geofísica, Almeria. Programa y Resúmenes, pp. 57.
- Folque, J. (1987) *Comportamento de maciços terrosos sob a acção de solicitações sísmicas*. Geotecnia nº 51, pp. 1-31.
- Ferry Borges, J. e Castanheta, M. (1971) *Structural Safety*, LNEC.
- Hertz, H. (1922) Citado por Timoshenko *et al.* Theory of Elasticity, 1951, pp. 377.
- Gomes Coelho, A. (1993) *Falhas activas e casualidade sísmica em Portugal*. Simpósio sobre Catástrofes Naturais. Ordem dos Engenheiros, LNEC, 1993.

- Kovach, R. L. (1971) *Previsão e modificação dos sismos. Vamos compreender a Terra*. Gass et al. Edit. Tradução do inglês por Portugal Ferreira et al. Almedina, 1984, pp. 381
- Madeira, J. e Ribeiro, A. (1992) *O regime tectónico dos Açores. 10 anos após o sismo dos Açores de 1 de Janeiro de 1980*. Vol. 1, LNEC.
- Mindlin, R. D. (1949) *Compliance of elastic bodies in contact*. J. Appl. Mechanics (Trans. ASME), V. 16.
- Mineiro, A. J. C. (1984). *Revisão crítica de conceitos básicos em Engenharia sísmica. Notas das aulas de Engenharia Sísmica*, F. C. T. da U. N. L.
- Nascimento, Ú (1978). *Notas sobre a fricção entre partículas de materiais granulares*. Geotecnia nº 22, pp. 23-59.
- Nascimento, Ú. (1979). *Mecanismo elástico de fricção entre partículas de solos granulares*. Geotecnia nº 27, pp. 43-61.
- Nascimento, Ú. (1990). *Contribuição para a história da Geotecnia em Portugal*. Geotecnia nº 58, pp. 3-16.
- Nascimento, Ú. (1990). *Um modelo de fluência friccional aplicável em Geotecnia e sismotectónica*. Geotecnia. nº 60, pp. 1-24.
- Nascimento, Ú. (1995). *Um modelo passo-a-passo do mecanismo dos sismos*. Geotecnia Nº 75, pp. 43-79.
- Nascimento, Ú. (1997). *Análise do mecanismo focal de alguns sismos mediante o modelo passo-a-passo*. Geotecnia nº 79, pp. 45-68.
- Nevo, Z., Chierici, F., Sartori, R. e Torelli, L. (1999). *The tectonic source of the 1755 Lisboa earthquake and tsunami*. Annali di Geofisica, Vol. 42, nº 1, Feb.. pp. 49-53.
- Oliveira, C. S. (1992). *Quantificação do movimento sísmico aquando do sismo de 1 de Janeiro de 1980. 10 anos após o sismo dos Açores de 1 de Janeiro de 1980*, Vol. 1, LNEC.
- Pagarete, J. e Pinto, J. T. (1992). *Geodesia aplicada à geodinâmica dos Açores. 10 anos após o sismo dos Açores de 1 de Janeiro de 1980*, Vol. 1, LNEC.
- Pagarete, J. e Mendes, V. B. (1998). *Crustal monitoring in the lower Tagus Valley area using GPS*. I Assembleia Hispano-Portuguesa de Geodesia e Geofísica, Almeria. Programa y Resúmenes, pp. 82.
- Rocha, M. (1952). *Cálculo experimental das construções*. Memória nº 21, LNEC.
- Seco e Pinto. (1999) *Proc. of the 2<sup>nd</sup> Int. Conf. On Earthquake Geotechnical Engineering*, Lisboa, A. A. Balkema.
- Whitford (1996). Referido em Science & Vie, nº 946, Julho.
- Wyss, M. (1979). *Estimating maximum expectable magnitude of earthquakes from fault dimensions*. Geology, Vol. 7, nº 7, pp. 336-340.
- Zoback, M. L. et al (1989). *Global pattern of tectonic stress*. Nature, Vol. 341.