



UNIVERSIDADE DE ÉVORA

Sumário do seminário

COMO ACONTECEM OS SISMOS

Sumário do seminário a que se refere a alínea c) do artigo 5º do Decreto-lei nº 239/2007, de 19 de junho.

apresentado à Universidade de Évora para Provas de Agregação de

Bento António Fialho Caeiro Caldeira

Índice

Nota introdutória	5
Objetivos	7
Resumo	9
Estrutura do seminário	15
Bibliografia	17

NOTA INTRODUTÓRIA

O seminário aqui planificado pretende ser uma sensibilização focada no conhecimento e na pesquisa sobre a fonte dos sismos. Tomando o confronto de ideias surgido na sequência do terramoto de Lisboa de 1755, episódio considerado hoje o ponto de partida para o estabelecimento de uma sismologia científica, veremos como o conceito de fonte sísmica evoluiu até à atualidade a par do progresso científico e do desenvolvimento tecnológico. Fixando-nos no conhecimento atual pretende-se realçar os principais modelos aceites, os seus pontos fortes e fragilidades para reproduzir o comportamento do sistema natural e como a investigação nesta área é feita. A exploração desta fase do seminário consiste numa revisão dos processos físicos que permitem interpretar a fonte sísmica e visita aos principais métodos, que aplicam leis da Física aos efeitos dos sismos registados na superfície, para calcular os parâmetros da fonte. Como é uma sensibilização pretende-se utilizar uma linguagem que, embora rigorosa e fiel aos conteúdos de especialidade, vai ser expurgada dos formalismos que a possam tornar demasiado hermética. Neste caso é um seminário que foi estruturado para ser dirigido a alunos no contexto da UC fonte sísmica, como primeiro encontro com muitos dos assuntos que vão ser aprofundados. Porém, pelas características de como foi preparado, creio ser um seminário possível de apresentar a alunos de outros cursos, a investigadores de outras áreas, ou mesmo em outros contextos de ensino não formal e de divulgação científica.

OBJETIVOS

- Sensibilizar os estudantes para a investigação em fonte sísmica numa perspetiva onde a ciência surge integradora e inclusiva.
- Fornecer uma visão global do estado do conhecimento sobre fonte sísmica em linguagem acessível.
- Introduzir o estudante no tema da UC fonte sísmica, resumizando parte dos assuntos que vão ser aprofundados nessa UC.
- Realçar o carácter interdisciplinar entre ciências e tecnologias aplicadas ao estudo da fonte sísmica;

RESUMO

A procura de estratégias de investigação dirigidas à interpretação pormenorizada dos processos físicos que ocorrem no interior da Terra, que expliquem as manifestações registadas à superfície como consequência direta do sismo [1-3] é uma questão científica marcante, mas ainda não completamente resolvida. Para além da motivação científica que o estudo da fonte sísmica possa encerrar, o domínio de métodos que conduzem ao seu conhecimento preciso tem subjacente um propósito mais fundamental e utilitário: o de encontrar formas de proteger pessoas e bens dos efeitos nefastos dos terremotos. A inacessibilidade que o fenómeno encerra, se por um lado representa um obstáculo à sua compreensão, por outro deixa livre o caminho da imaginação e daí a diversidade de diferentes modelos explicativos que ao longo da história têm sido propostos.

Assim, para o enquadramento deste seminário parte-se do episódio que assinala o início da sismologia científica: a controvérsia gerada entre as ideias aristotélicas e o novo pensamento científico em torno da interpretação do sismo de Lisboa de 1755 que atinge toda a Europa e catalisa as atenções do mundo civilizado para o fenómeno [4-6].

Em seguida são apresentados os principais desenvolvimentos no sentido do estabelecimento de uma teoria física explicativa do fenómeno sísmico e como esses desenvolvimentos foram articulados até se chegar a um modelo teórico de fonte sísmica próximo dos atualmente aceites [7-10].

A sismologia instrumental bem estabelecida a partir do Séc. XX e a dimensão operacional que introduz através da medição dos efeitos dos sismos foi o motor da grande transformação. Por um lado, possibilitou a confirmação dos modelos teóricos de fonte sísmica propostos e a sua sofisticação, por outro promove o desenvolvimento de ferramentas com as quais os parâmetros desses modelos podem ser determinados com rigor. É então que, através da articulação destes três fatores, modelos físico-matemáticos, dados e métodos, se funda o edifício que nos permite estudar a fonte sísmica. Esta é a questão que vai preencher o resto do seminário.

O primeiro passo no sentido do conhecimento da fonte sísmica é o estabelecimento de modelos teóricos baseados nas teorias científicas e na observação dos efeitos do fenómeno, que formem o edifício conceptual para a sua interpretação [11]. Sobre esse assunto merecem destaque os instrumentos que fundamentam as várias dimensões do conhecimento atual sobre fonte: teorema da representação [12] modelos de fonte pontual[13]; modelos de fonte extensa; modelos cinemáticos e dinâmicos e a título de exemplo referir o funcionamento de dois desses modelos (o de Brune e o de Haskell) [14-15].

Outra peça fundamental para o estudo da fonte sísmica são os dados obtidos de medições precisas sobre os efeitos diretos dos sismos. Destes assumem especial importância os de natureza sismológica e geodésica. Os primeiros consistem no registo dos movimentos elásticos produzidos pelas ondas sísmicas que emanam na superfície Terrestre, provenientes da fonte. Os segundos resultam de deformações inelásticas permanentes produzidas também em consequência dos sismos e que podem ser medidos por técnicas geodésicas (GPS ou InSAR) nas proximidades dos grandes sismos.

Finalmente a classe dos métodos, recurso fundamental para se estabelecer a representação da fonte e quantificar essa representação. Eles são os utensílios que, sendo fabricados de acordo com os esquemas delineados pelos modelos teóricos, permitem usar os dados para calcular os parâmetros que configuram a fonte. O

cálculo desses parâmetros pode fazer-se por uma multiplicidade de métodos independentes dos quais se destacam

A. Mecanismo focal por polaridades da primeira fase.

Permite: determinar os parâmetros geométricos da rotura (ou melhor, do início da rotura) a partir do sentido do primeiro movimento do solo registado num conjunto de pontos situados à volta da fonte [16].

B. Análise espectral de ondas de volume

Método que consiste em representar em gráficos bi-logarítmicos as amplitudes espectrais das ondas de volume e desses diagramas extrair a informação necessária (frequência de esquina e amplitude espectral no patamar das baixas frequências) que permitem fazer estimativas da dimensão da fonte e do momento sísmico escalar [17].

C. Diretividade

Os efeitos diretivos, uma característica de fontes sísmicas finitas, são uma consequência da propagação da rotura em direcções privilegiadas. São efeitos que se manifestam por desvios espectrais da radiação sísmica em função do lugar de observação. Os pontos de observação em relação aos quais a rotura se aproxima registam desvios para as altas frequências; os pontos para os quais a rotura se afasta registam desvios para as baixas frequências e não se observam nos pontos perpendiculares à rotura.

Através dos efeitos diretivos que se manifestam nos registos sismológicos podem determinar-se parâmetros da rotura a como direcções e velocidade. De entre os vários métodos propostos destaco o que é baseado numa análise Doppler sobre coberturas azimutais de registo sismológico [18].

D. Funções empíricas de Green

Método que permite usar um pequeno sismo com as mesmas características e localização próxima do sismo objeto de estudo, para estabelecer a evolução temporal da libertação de momento sísmico do sismo principal [19].

E. Inversão da forma de onda para distribuição de deslizamentos

Os métodos de inversão da forma de onda constituem atualmente os mais populares para estabelecer descrições pormenorizadas da evolução espaço-temporal das roturas sísmicas. Usam porções extensas do registo sismográfico de um conjunto de pontos de observação para, mediante alguns constrangimentos de natureza física, produzirem soluções cinemáticas de fonte que por sua vez expliquem os registos que lhe dão origem. As soluções assim obtidas consistem na caracterização de um conjunto de deslizamentos que se sucedem sobre um plano de falha discretizado em malha regular. Estes métodos decorrem diretamente de uma das ferramentas físico-matemáticas teóricas mais poderosas da sismologia que é o teorema da representação [20].

F. Cruzamento de métodos

As soluções devolvidas pelos métodos de inversão da forma de onda se bem que possam ser obtidas com um erro muito pequeno, podem não corresponder à realidade e dificilmente poderão ser comprovadas. A marca dessa falha encontramos-la em inúmeros exemplos de soluções diferentes do mesmo evento obtidas por métodos similares. A grande razão para este defeito deve-se à grande complexidade do sistema real aliada à incapacidade dos modelos teóricos e dos métodos numéricos integrarem toda essa complexidade. A sofisticação dos modelos e a grande capacidade de cálculo até podem forçar que a convergência aconteça em soluções que explicam muito bem os dados embora não possam garantir que correspondam ao modelo real. É um problema bem conhecido de toda a geofísica (problema da não unicidade) onde há uma multiplicidade de soluções que servem o objetivo. Isso acontece quando a quantidade de parâmetros a caracterizar é insuficiente para explicar a complexidade que se quer modelar. São

situações onde o nível de discretização imposto pelos métodos é insuficiente devido a fatores como capacidade de cálculo ou escassez de dados. A resolução deste problema passa por de impor constrangimentos às soluções aceitas ou introduzir no problema outras classes de dados que o modelo também deve reproduzir. A credibilidade de um modelo de rotura será tanto maior quanto maior for a diversidade de diferentes manifestações observadas que permita explicar. Entramos no domínio do cruzamento de dados e métodos. Neste caso as duas classes de dados que se podem cruzar são os sísmicos e os geodésicos. As soluções encontradas por inversão da forma de onda garantem que o modelo explica os movimentos registados num conjunto de pontos na superfície da Terra. O modelo será mais poderoso se também explicar os dados de deformação cosísmica registados.

ESTRUTURA DO SEMINÁRIO

O seminário está estruturado numa forma sequencial que compreende:

1. Contextualização do problema: O sismo de Lisboa de 1755 e a controvérsia em torno da origem dos sismos.
2. O estabelecimento de uma teoria física explicativa do fenómeno sísmico;
3. A dimensão operacional introduzida pela sismologia instrumental;
 - a. Os modelos de fonte
 - b. Os métodos
4. Conclusões e desafios.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Aki, K., & Richards, P. G. (2002). Quantitative seismology. 2nd ed. Sausalito, California: University Science Books.
- [2] Udías, A., Vallina, A. U., Madariaga, R., & Buforn, E. (2014). Source mechanisms of earthquakes: Theory and practice. Cambridge University Press.
- [3] Caldeira B (2004) Caracterização espaço-temporal da fonte sísmica—Processos de ruptura e directividade. PhD thesis, Évora University.
- [4] Rhoda Rappaport (1986) *Hooke on Earthquakes: Lectures, Strategy and Audience*, *The British Journal for the History of Science*, Vol. 19, No. 2, pp. 129-146 (18 pages)
- [5] Hough, S. E., & Bilham, R. G. (2005). The Lisbon Earthquake and the Age of Reason. In *After the Earth Quakes*, Oxford University Press. Published to Oxford Scholarship Online: November 2020. DOI: 10.1093/oso/9780195179132.001.0001
- [6] Voltaire. (1759). *Cândido ou o Otimismo*. Ed. Relógio de água, coleção clássicos para leitores de hoje, 2016., trad. José Cláudio, Júlia Ferreira, 160p.
- [7] Gilbert, G. K. (1884). A Theory of the Earthquakes of the Great Basin, with a Practical Application, *Am. J. Sci.* XXVII, 121—138.
- [8] Reid, H. (1911). The Elastic-Rebound Theory of Earthquakes, *Bull. Dept. Geol. Sci* 6, 413—444.
- [9] Volterra, V. (1907). Sur L'equibre Des Corps Elastiques Multiplement Connexes, *Ann. Sci. École Normal Supérieur de Paris* 24, 401—517.

- [10] Love, A. E. (1944). *Treatise on the Mathematical Theory of Elasticity*, 4th edn, Dover Pubns.
- [11] Knopoff, L. e Gilbert, F. (1960). First Motions from Seismic Sources, *Bull. Seism. Soc. Am.* 50, 117—134.
- [12] Burridge, R. & Knopoff, L. (1964). Body Force Equivalents for Seismic Dislocations, *Bull. Seism. Soc. Am.* 54, 1875—1888.
- [13] Jeffreys, H. (1931). On the Cause of Oscillatory Movements in Seismograms. *Monthly Notices. Roy. Astr. Soc. Geophys. Suppl.*, 2, 407-416.
- [14] Brune, J. N. (1970). Tectonic Stress and the Spectra of Seismic Shear Waves from Earthquakes, *J. Geophys. Res.* 75, 4997—5009.
- [15] Haskell, N. A. (1964). Total Energy and Energy Spectral Density of Elastic Wave Radiation from Propagating Faults, *Bull. Seism. Soc. Am.* 54, 1811—1841.
- [16] Hodgson, J. H., & Milne, W. G. (1951). Direction of faulting in certain earthquakes of the North Pacific. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 41(3), 221-242.
- [17] Hanks, T. C., & Wyss, M. (1972). The use of body-wave spectra in the determination of seismic-source parameters. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 62(2), 561-589.
- [18] Caldeira, B., Bezzeghoud, M. and Borges, J.F. (2010). DIRDOP: A directivity approach to determining the seismic rupture velocity vector, *J. Seismol.* V.14, Issue 3, pp 565—60. Doi: 10.1007/s10950-009-9183-x.

- [19] Hartzell, S. H. (1978). Earthquake Aftershocks as Green's Functions, *Geophys. Res. Lett.* 53, 1425—1436.
- [20] Kikuchi, M. e Kanamori, H. (1991). Inversion of Complex Body Waves - III, *Bull. Seis. Soc. Am.* 81, 2335—2350.