



UNIVERSIDADE DE ÉVORA

FONTE SÍSMICA

**Relatório de unidade curricular previsto na alínea b) 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

O relatório que aqui se apresenta visa dar cumprimento legal ao estabelecido no Decreto-lei nº 239/2007; Artº 5º al. b), que exige “um relatório sobre uma unidade curricular, grupo de unidades curriculares, ou ciclo de estudos, no âmbito do ramo do conhecimento ou especialidade em que são prestadas as provas”.

Índice

Nota Introdutória	5
Unidade Curricular Fonte Sísmica	15
1. Introdução	15
2. Razão da escolha	17
3- Integração curricular	19
4- Objetivos da UC	23
5- Competências	27
6- Estratégia de ensino	31
7- Carga horária	35
8- Avaliação	37
9- Programa	39
9.1- Lista de Conteúdos	39
9.2- Planificação semanal	43
9.3- Tarefas	49
9.4- Cronograma	53
10- Bibliografia	55
11- Referências	57

NOTA INTRODUTÓRIA

Os dois principais objetivos da Geofísica Interna, são o conhecimento da estrutura do interior da Terra e a compreensão da globalidade de processos físicos que aí ocorrem. Se por um lado a incapacidade de observar diretamente (*in situ*) representa um obstáculo à interpretação dos processos, por outro aviva a curiosidade e promove o esforço de pesquisa. Dentro da categoria de processos internos, o fenómeno sísmico, talvez pelas consequências catastróficas que se lhe associam, tem sido desde sempre aquele que mais tem estimulado a imaginação humana. A confirmação podemos facilmente encontrá-la nas inúmeras alusões, compiladas por Mendonça (1758), a sismos históricos destrutivos ou às mais fantásticas explicações sobre a sua natureza, apresentadas por Bolt (1993) e Liner (1997).

Em 1668 Robert Hook, no seu livro "Discurso acerca dos terremotos" (Hough and Bilham, 2020), sem dúvida o primeiro livro significativo que trata dos terremotos como um fenómeno natural, defende a ideia de que o sismo tem origem numa resposta elástica do material geológico. Mas é só a partir das discussões acerca das manifestações produzidas na superfície da Terra na sequência do grande terremoto de Lisboa de 1755, que a comunidade científico-filosófica começa a relacionar o fenómeno com os recentes modelos mecânicos apresentados por

Hook. Por isso, como considerado por Ben-Menahem, 1995 e muitos outros sismólogos, o sismo de 1755 assinala o início da sismologia moderna.

A primeira referência explícita à relação da fonte dos sismos com movimentos de acidentes tectónicos foi feita em 1884 por G. K. Gilbert (Gilbert, 1884). Gilbert fundamenta as suas conjecturas em observações sobre os efeitos superficiais, nomeadamente deformação e fendas, deixadas pelo sismo de Valley (Califórnia) de 1872. Porém, o grande passo, hoje considerado decisivo para o estabelecimento de uma teoria física de fonte sísmica, capaz de fundamentar cientificamente as manifestações produzidas pelos sismos, foi dado por Reid (1911) com a apresentação do modelo do ressalto elástico, a hipótese fundamental da sismologia que se pode enunciar assim:

Quando determinada região do interior da crosta, constituída por material com determinadas propriedades elásticas, fica sujeita a forças, deforma enquanto acumula tensões. Como a ação das forças deformadoras é ininterrupta, o meio continua a acumular tensão enquanto deforma num processo lento que perdura enquanto as tensões acumuladas puderem ser equilibradas pelas forças de coesão (atrito e ligação) dos materiais. No instante em que esse equilíbrio cessa dá-se a rotura que se manifesta por violentos deslocamentos e consequente libertação, em escassos instantes, de grande parte da energia acumulada durante muito tempo.

Reid deduziu o seu modelo a partir de uma base observacional de carácter geodésico, geológico e geofísico, tendo como palco a falha de Santo André, antes e depois do sismo de S. Francisco de 1906. A partir deste modelo e na sequência dos trabalhos de Knopoff e Gilbert (1960) e de Burridge e Knopoff (1964), suportados matematicamente pela teoria elastodinâmica de Volterra (1907), modificada por Love (1944), desenvolveu-se a teoria que permite descrever matematicamente, e portanto quantificar, os movimentos e as deformações produzidos em qualquer ponto da superfície da Terra como consequência de deslizamentos subterrâneos (descontinuidade num meio elástico) desde que

conhecidos esses deslizamentos e as propriedades mecânicas do meio entre a fonte e a superfície. Isto é, uma teoria que fornece as leis que permitem modelar a formação e propagação das ondas sísmicas no interior da Terra e descrever os movimentos produzidos na superfície.

Acredita-se hoje que os sismos com maior impacto sobre a estabilidade humana, os de natureza tectónica, resultam de um processo dinâmico também chamado ciclo sísmico que se desenvolve em quatro fases. A primeira, **inter-sísmica**, que pode demorar milhares de anos, corresponde à acumulação de tensões/energia potencial devido à atuação de forças tectónicas que deformam elasticamente as rochas; a segunda, denominada **pré-sísmica**, ocorre à medida que as rochas deformadas começam a perder elasticidade aproximando-se do ponto de rotura; a terceira, denominada **co-sísmica**, acontece quando as forças de coesão dos materiais sob tensão são excedidas pelas tensões desenvolvidas no processo de deformação. Aí dá-se a rotura e ocorre a conversão rápida de parte significativa da energia potencial acumulada em energia cinética. Aquilo a que habitualmente chamamos sismo e que consiste no deslizamento rápido entre duas porções de material geológico que se desliga, corresponde a esta fase. Finalmente a quarta fase, chamada **pós-sísmica** corresponde à transição para o estado de equilíbrio caracterizado pela fase inter-sísmica. Esta dualidade temporal em que o fenómeno sísmico se desenvolve (acumulação lenta de tensões e libertação rápida) associada à complexidade do sistema mecânico envolvido respondem pela grande dificuldade em interpretar algumas singularidades do fenómeno, nomeadamente fazer previsões sísmicas fiáveis compostas pela determinação simultânea do local, do instante e da magnitude.

Quando o sismo ocorre, as vibrações produzidas pelos deslizamentos da fonte propagam-se em todas as direções por meio de ondas mecânicas que vão sendo modificadas pelas estruturas que atravessam até atingirem a superfície terrestre, fazendo-a oscilar. Os movimentos produzidos na superfície, e as deformações que nela ficam impressas após a passagem das ondas, são os dois tipos de

manifestação (dados) utilizados pela ciência para poder caracterizar os sismos. A amplitude destes dois efeitos, movimentos e deformações, registados na superfície, são fortemente enfraquecidas em função do afastamento à fonte (razão inversa ao cubo da distância), sendo as deformações superficiais praticamente impercetíveis para distâncias superiores à ordem de grandeza da dimensão da projeção superficial da região por onde os deslizamentos se espalharam (dimensão da rotura). Por essa razão o efeito da deformação superficial produzida pela atividade tectónica ou vulcânica é considerado um efeito predominantemente de campo próximo.

Depois do modelo do ressalto elástico apresentado por Reid, várias têm sido as contribuições no sentido da edificação de uma teoria físico-matemática unificada de fonte sísmica. A ideia que governa esse desígnio traduz-se na conceção de modelos de fonte capazes de reproduzir os efeitos mensuráveis dos sismos em campo longínquo e em campo próximo. Quando um sismo acontece, a primeira classificação que dele se faz, para além da localização, é a dimensão, designada por magnitude. É uma grandeza que obviamente depende da amplitude dos deslizamentos ocorridos na fonte e da extensão da área por onde os deslizamentos se estendem. Habitualmente é considerado que esses deslizamentos, cuja sequência configura a rotura, ocorrem sobre o plano de uma falha. Ao conjunto dos parâmetros com os quais é possível caracterizar esse processo de rotura (geometria e cinemática) chama-se parâmetros da fonte. Tipicamente às fontes de sismos de magnitude inferior a 5 correspondem roturas de pequenas dimensões (que não ultrapassam a dezena de quilómetros de comprimento) e por isso, se observadas em campo longínquo (milhares quilómetros de distância), podem ser consideradas pontuais sem que isso levante grandes incorreções. Porém, o modelo de fonte pontual deixa de responder adequadamente quando a dimensão da fonte ultrapassa determinados limites a partir dos quais os parâmetros que tem a ver com a dimensão da fonte devem ser considerados. Nessa altura entramos num domínio do estudo que denominamos de fonte finita ou fonte extensa. Atualmente esses limites são estabelecidos em função do conteúdo espectral da radiação sísmica registada.

Assim, sempre que com a radiação sísmica registada não seja possível detalhar pormenores da fonte está-se num contexto de fonte pontual; caso contrário só um modelo de fonte finita pode responder satisfatoriamente. Estão nesta situação fontes sísmicas de magnitudes baixas desde que observadas de perto (em campo próximo) ou fontes de magnitudes superiores a seis, mesmo que observadas a distâncias superiores a 30° (distâncias telessísmicas).

No início do século XX, após uma primeira fase de desenvolvimento dos sismógrafos, estavam estabelecidos os alicerces para uma sismologia instrumental que permitisse registar com rigor os movimentos do solo produzidos pelas ondas. Porém, subsistia o problema de como, através desses registos, se poderia deduzir a orientação do plano de falha e calcular a direção e sentido dos movimentos sobre ele. Isto é, determinar o mecanismo da fonte. Omori (1905) constatou que para os sismos que ocorriam em determinada região do Japão, havia uma regularidade no sentido dos primeiros movimentos produzidos pelas ondas sísmicas registadas. Relacionou essa regularidade com uma semelhança no mecanismo dessas fontes. Galitzini (1909), verificou que as amplitudes do primeiro impulso registado em duas componentes horizontais definem uma direção de vibração contida no plano do círculo maior que contém a estação e o epicentro do sismo. Porém apurou que o sentido dessa vibração horizontal umas vezes ocorria dirigido para epicentro, outras vezes dirigido do epicentro para a estação. Esta ambiguidade foi levantada quando após a instalação de um sismógrafo vertical apurou que quando o primeiro impulso na componente vertical era dirigido para cima (compressão), o sentido da composição do primeiro movimento nas componentes horizontais apontava do epicentro para a estação; quando era dirigido para baixo (dilatação) o sentido do primeiro movimento nas componentes horizontais apontava da estação para o epicentro. A partir destas conjecturas, realizadas por via experimental, foi estabelecido o suporte observacional dos métodos de estudo da fonte sísmica que se viriam a desenvolver posteriormente.

O estudo publicado por Nakano (1923) sobre a propagação de ondas elásticas em meios homogêneos semi-infinitos, geradas a partir de sistemas de forças aplicados pontualmente, assinala o início da intensa atividade científica que se constitui desde então para desenvolver todo o edifício conceptual teórico sobre a fonte sísmica e que se estende até ao final dos anos 50 (e.g. Matsuzawa, 1926; Sezawa e Kanai, 1932; Jeffreys, 1931; Sezawa, 1935; Nishimura, 1937; Sato, 1949; Heelan, 1953).

A par dos primeiros estudos teóricos, Byerly (1926) apresenta um método baseado no padrão dos primeiros movimentos das ondas P registadas em estações em torno do epicentro para estimar o mecanismo dos sismos. Foi um método sucessivamente melhorado pelo próprio Byerly durante vários anos. Porém, um dos aperfeiçoamentos mais significativos a este método foi a introdução, por Hodgson and Milne (1951), da técnica de projecção estereográfica. Desde então esta técnica passou a ser utilizada por toda a comunidade e desenvolvidas várias versões melhoradas (e.g. Kashara, 1963; Brillinger et al., 1980). São métodos que devolvem os parâmetros angulares que caracterizam a orientação dos pares de forças que atuam pontualmente no foco, ou equivalentemente a direção e sentido do deslizamento da fonte.

Durante o período que medeia entre os primeiros trabalhos de Nakano (1923) e principio dos anos 90 do séc XX foram bastantes os contributos para calcular a radiação sísmica que procede de fontes pontuais e se propaga em meios homogêneos (eg. Jeffereys 1931; Nishiamura, 1937; Honda, 1957, Aki e Richards (2002), Udias, 1999). De entre as várias contribuições destaca-se o formalismo introduzido por Burridge e Knopoff (1964) que consistiu em separar os efeitos da fonte dos efeitos da propagação, através de um instrumento matemático da elastodinâmica denominando teorema da representação. De acordo com esse formalismo, a solução das equações do movimento para qualquer ponto, pode ser substituída pela combinação do efeito produzido pelo deslizamento devido a um impulso unitário (função de Green) com a função que descreve a distribuição de forças (ou deslizamento) na fonte (modelo de fonte). A função de Green depende

da orientação do impulso unitário e das propriedades mecânicas do meio atravessado pela onda na sua propagação entre a fonte e o ponto considerado. A sua determinação é um problema cuja solução para além de envolver o conhecimento do meio, pode ser obtida por vários métodos (e. g. Hartzell, 1978; Heaton e Helmberger, 1979; Wang e Herrmann, 1980; Bouchon, 1981; Heaton, 1982; Kikuchi e Kanamori, 1991). Outra importante contribuição que acrescentou elegância, rigor e operacionalidade ao cálculo dos movimentos sísmicos foi a introdução do tensor momento sísmico (M), instrumento matemático que caracteriza a distribuição total de forças aplicadas na fonte sísmica. Através do tensor momento sísmico ficam completamente definidos a geometria e mecanismo do deslizamento que ocorre na fonte sísmica.

Apesar dos esforços despendidos no desenvolvimento dos métodos para calcular os movimentos sísmicos a partir de modelos de fonte pontual, nenhuma das abordagens consegue reproduzir convenientemente os detalhes observados nas ondas reais, nomeadamente para os sismos de maiores dimensões ou mesmo sismos pequenos quando observados a distâncias próximas da fonte. Limitar a fonte sísmica a um sistema de forças aplicado pontualmente e as ondas que daí procedem a propagarem-se num meio homogéneo, são constrangimentos demasiado drásticos face à complexidade do sistema real. Um modo mais conveniente de expressar as soluções das equações do movimento para o sistema sísmico foi o que resultou dos trabalhos desenvolvidos simultaneamente por Maruyama (1963) e Burridge e Knopoff (1964). Genericamente a proposta assenta na ideia de considerar a rotura sísmica constituída por uma sequência de deslizamentos que se distribuem sobre um plano de falha, comandados por uma frente de rotura que se propaga em conformidade com as leis da mecânica. A partir de considerações gerais sobre as causas ou os efeitos da rotura, pode partir-se para o estabelecimento de modelos físico-matemáticos de fonte finita mediante duas vias diferentes: a dinâmica e a cinemática. Os modelos cinemáticos assentam em conjeturas acerca da evolução da rotura sobre o plano de falha. A rotura é representada por uma sucessão de deslizamentos que evolui sobre o plano de falha

segundo uma lei cinemática. Estão nesta categoria o modelo de rotura retilínea de Haskell (1964) e o de rotura circular de Brune (1970). A forma operacionalizar numericamente o cálculo das ondas produzidas por sismos de magnitudes elevadas tendo por base a via cinemática, é considerar a fonte finita como uma sucessão de fontes pontuais que se distribuem sobre o plano de falha. O cálculo dos movimentos do solo é feito através da soma das contribuições individuais de cada uma das fontes pontuais devidamente ajustadas espacial e temporalmente. Com o suporte deste instrumento de cálculo foi possível desenvolver vários métodos que permitem reconstituir a cinemática da rotura por inversão das formas de onda registadas por estações sísmicas distribuídas à volta da fonte a distâncias telessísmicas (Fukao, 1972; Nabelek, 1984; Ihmlé, 1998; Kikuchi and Kanamori 1991; Ammon et al. 2005; Wang et al. 2008; Lay et al. 2010; Zhang et al. 2013; Zhang et al. 2016)) ou em campo próximo (eg., Asano and Iwata 2009; Suzuki et al., 2009, Hartzel et al, 2007; Delouis et al 2009). Em situações onde é possível registar as deformações superficiais próximas da fonte, através de técnicas geodésicas (GNSS ou InSAR), a inversão destes dados revela-se bastante eficaz para caracterizar parâmetros da fonte como a geometria e magnitude dos deslizamentos (e.g. Radigue et al 2011; Zhao et al, 2021; Crowell et al 2012.). Também têm sido propostos métodos de inversão conjunta das duas classes de dados que proporcionam modelos de rotura mais robustos (e.g Pritchard et al. (2007), Li et al , 2018, Liu et al 2019). A aptidão que os métodos de inversão têm para produzir cenários detalhados da cinemática da rotura faz deles uma das ferramentas mais atrativas no domínio do estudo da fonte sísmica. Porém, uma análise detalhada sobre os aspetos matemáticos do problema (Beresnev, 2003) revela a existência de vários fatores de instabilidade numérica que podem levar à convergência em soluções fisicamente insatisfatórias. A maneira de evitar esse problema é introduzir constrangimentos baseados em considerações físicas e geológicas, que limitam e dão coerência ao espectro de soluções. Estão nestas categorias de constrangimentos parâmetros geométricos como a orientação e dimensão do plano de falha ou atributos diretivos como sentido e velocidade de rotura (Caldeira et al. 2010).

Os mais recentes esforços de pesquisa sobre a fonte sísmica incorporam estudos teóricos e laboratoriais sobre o comportamento mecânico dos materiais geológicos e vão no sentido do estabelecimento de interpretações dinâmicas da fonte sísmica (Olsen, K. B., et al., 2009; Campillo, et al., 2001; Madariaga et al., 2001; Madariaga and Olsen, 2002; Peyrat e Olsen, 2004; Weng e Yang, 2018; Wollherr, et al., 2019). Nesta perspetiva a caracterização da fonte sísmica é feita através da descrição da evolução no espaço e no tempo dos parâmetros que controlam a rotura: o estado de tensão e o atrito sobre a falha. Essa evolução é deduzida das equações da elastodinâmica desde que estabelecidas as condições iniciais para estes parâmetros. É uma imposição que implica o conhecimento de como se distribui o estado de tensão na falha no momento que antecede o sismo e de uma lei de atritos que permita descrever como evolui esse estado de tensão assim que a rotura se iniciar. Operacionalizar por esta via para simular os movimentos do solo na superfície é uma tarefa exigente por duas ordens de razões: primeiro por restrições computacionais que limitam a frequência máxima a que se pode chegar; segundo, por haver necessidade de conhecer detalhadamente as condições iniciais de um conjunto de grandezas físicas do meio inacessíveis à observação direta. O nível de exigência aumenta se o objetivo do estudo for o cálculo dos parâmetros do modelo dinâmico da fonte de um sismo real, por inversão da forma de onda. Nestas circunstâncias, às dificuldades já referidas acresce a necessidade de grandes quantidades de registos sísmicos bem distribuídos azimutalmente e com um conteúdo espectral rico. Geralmente para se conseguirem reunir as informações necessárias para operar pela via dos modelos dinâmicos em casos reais é necessário recorrer aos resultados obtidos através dos métodos cinemáticos para caracterizar o estado inicial de tensão. É uma condicionante que restringe os estudos da fonte a pouco mais que aperfeiçoar ligeiramente as descrições cinemáticas de fonte, nomeadamente a afinar pormenores do mecanismo das roturas em geometrias complexas (Yue et al. 2020). Porém, como os parâmetros obtidos da inversão dinâmica refletem propriedades intrínsecas da zona de falha, válidas para o próximo evento a acontecer nessa falha, potencialmente as inversões

dinâmicas têm um significado prático para prever futuros eventos. Devido a isso e ao aumento da capacidade de cálculo, embora ainda timidamente, começam a surgir resultados promissores nesta tipologia de modelos (e.g. Ando & Kaneko, 2018; Gallovič, et al., 2019; Otarola et al., 2021).

Na unidade curricular aqui proposta pretende-se estruturar um curso avançado sobre fonte sísmica que promova o estudo teórico das questões mais significativas referidas nesta nota introdutória e prepare o estudante para ser capaz de aplicar autonomamente uma multiplicidade de métodos que lhe permitam a partir das várias categorias de dados disponíveis (sísmicos e geodésicos) proceder ao estudo de qualquer fonte sísmica real.

UNIDADE CURRICULAR FONTE SÍSMICA

I. Introdução

O projeto Tuning, criado no âmbito do processo de Bolonha para estudar e propor medidas de normalização da matriz de ensino superior no espaço europeu, preconiza uma organização curricular estabelecida em função das competências que se pretende que o aluno adquira como resultado da aprendizagem. Nesta perspectiva a estruturação de uma unidade curricular, deve começar por definir os objetivos da própria UC e em função deles ser capaz de explicitar os desempenhos esperados nos estudantes, isto é, aquilo que no final os estudantes devem saber e aquilo que devem ser capazes de fazer. É em função dessas competências que se pretendem estabelecer no estudante que são planificadas as estratégias para se lá chegar, isto é, as metodologias. É um modelo de formação que coloca o estudante no centro do processo, atribuindo-lhe a função diretora da construção do seu próprio conhecimento. Para isso os ambientes de aprendizagem devem ser estruturados por forma a promover atitudes de autonomia, por exemplo através da colocação de desafios ao estudante sob a forma de tarefas e encorajando-o a executá-las com solicitude. Ao professor, ao invés do tradicional papel de fonte e provedor do conhecimento, ficam atribuídas as funções de supervisão e animação do processo,

com capacidade de proporcionar os recursos necessários e intervir no estabelecimento do rumo a seguir. Outro importante aspeto que decorre naturalmente deste modelo é o da inserção dos estudantes, ainda enquanto alunos, nos ambientes profissionais das áreas de estudo (empresarial, científico, académico...), os principais reservatórios das competências que se pretendem estabelecer.

A UC Fonte Sísmica aqui proposta é uma unidade estruturada segundo o paradigma de Bolonha atrás enunciado e pensada para integrar o elenco das UC's do Doutoramento em Ciências da Terra e do Espaço (DCTE) da Universidade de Évora. Objetiva-se para proporcionar uma formação sólida e atualizada sobre os mecanismos físicos responsáveis pela ocorrência de sismos, dos seus efeitos na superfície e em desenvolver o conjunto de competências necessárias para modelar quantitativamente esses mecanismos a partir da interpretação dos registos superficiais dos efeitos dos sismos. Globalmente envolve um conjunto de conhecimentos que se estrutura segundo uma combinação de três níveis de competências: teóricas (do saber); práticas do observar e do medir (do fazer); e da aplicação dos métodos operacionais para interpretar as observações (do saber fazer). A metodologia proposta para se alcançar a unificação dessas três componentes do saber no nível de proficiência pretendido, envolve a investigação de situações problema, que designamos por tarefas, segundo uma sequência de nível de dificuldade crescente. A execução de cada uma dessas tarefas é orientada de maneira a envolver a articulação dos três níveis de competência que se querem ver desenvolvidos, estimulando sempre atitudes de autonomia do estudante face à procura das soluções. A comunicação em todas as fases do processo e através de meios diversificados é outro aspeto a explorar nesta UC.

2. Razão da escolha

A escolha da UC Fonte Sísmica, para elaboração do presente relatório foi feita por várias razões:

- existir na Universidade de Évora um mestrado em Ciências da Terra e da Atmosfera (MCTA) e um Doutoramento em Ciências da Terra e do Espaço (DCTE), com ramos de especialidades na área da Geofísica Interna, onde os processos físicos que ocorrem no interior da Terra e os métodos que permitem a sua interpretação são matérias fundamentais e frequentemente escolhidas pelos estudantes para as suas dissertações;
- fazer parte do elenco dos conteúdos científicos que investigo e que leciono nesses cursos há mais de 16 anos, nomeadamente nas UC's Fonte Sísmica do DCTE, Modelação da Deformação Crustal do mesmo curso de Doutoramento ou a UC Fundamentos de Geodesia Espacial e Deformação Crustal do MCTA;
- ser matéria de estudo comum nas formações pós-graduadas na área da Física da Terra nas Universidades de todo o Mundo¹ à exceção de Portugal não haver nenhuma Unidade Curricular desta natureza.

1 Turquia: https://debis.deu.edu.tr/ders-katalog/2015-2016/eng/en_132_9181_797.html

Suissa: <https://edu.epfl.ch/coursebook/en/introduction-to-earthquake-source-physics-ME-615>;

<http://www.vvz.ethz.ch/Vorlesungsverzeichnis/lerneinheit.view?lerneinheitId=109869&semkez=2016W&ansicht=LEHRV ERANSTALTUNGEN&lang=en> ;

Suécia: <https://www.uu.se/en/admissions/master/selma/kursplan/?kKod=1GE027>

- ser a área da sismologia onde é mais evidente o poder e elegância da aplicação das leis da Física para reproduzir as manifestações do fenómeno sísmico e desvendar a complexidade dos mecanismos que o explicam.
- pertencer a uma especialidade da Geofísica onde a Universidade de Évora detém investigação e recursos de referência. O Instituto de Ciências da Terra – Évora e o Laboratório EarsLab, a que pertenço, são duas unidades de Investigação da Universidade de Évora que mantêm uma intensa atividade nesta área do conhecimento, sustentada por projetos de investigação e um corpo de investigação com as competências e os meios materiais capazes de assegurar o funcionamento teórico e experimental desta disciplina atualizado.

Sendo a criação de conhecimento por via da investigação o aspeto distintivo da Universidade relativamente a outras estruturas de ensino e o garante, reconhecido nos diferentes processos de avaliação, da formação avançada, a oferta da UC Fonte Sísmica pela Universidade de Évora deve ser encarada como uma circunstância natural.

3- Integração curricular

Na Universidade de Évora existe em funcionamento desde o ano letivo 2008/2009 um Doutoramento em Ciências da Terra e do Espaço com áreas de especialização em i) Física da Atmosfera e do Clima, ii) Processos Geológicos, iii) Astronomia e Astrofísica e, iv) Geofísica. O plano de estudos deste curso, em qualquer das áreas de especialização, consistia num primeiro semestre curricular e os cinco semestres seguintes eram ocupados com a atividade de investigação conducente à Tese. O semestre curricular era preenchido por duas Unidades curriculares (Técnicas de Observação, Aquisição e Tratamento de Dados e Seminário em Ciências da Terra e do Espaço) obrigatórias e transversais a todas as áreas, complementadas por um conjunto de UC's opcionais em função da área de especialização. Na área de especialização em Geofísica era oferecida a UC de Fonte Sísmica que, complementada pelas UC's Modelação de Movimentos Sísmicos e Modelação da Deformação Crustal também opcionais, proporcionavam uma formação sólida na área da Física do Interior da Terra. São testemunho disso os vários estudantes que tiveram essa formação e que hoje ocupam posições de relevo neste domínio científico, em Portugal e no estrangeiro.

Em 2017 este curso foi avaliado por uma Comissão de Avaliação Externa (CAE) da Agência de Avaliação e Acreditação do Ensino Superior (A3ES) que, apesar de reconhecer a elevada relevância formativa dos temas abordados, considerou que as UC's que configuram o curso *“devem ser regularmente oferecidos e não ficarem dependentes de escolhas avulsas orientadas por interesses particulares de um ou outro estudante”*. Face a estas opiniões e com vista a atender às recomendações, foi acordado, em sede de pronuncia, para além da extinção da área de especialização Astronomia e Astrofísica, a eliminação das UC's optativas. Nesse sentido foi aprovado um plano de estudos com uma componente curricular composta por 5 UC's obrigatórias, num total de 30 ECTS, comuns às três áreas de

especialização. São elas: Técnicas de Observação, Aquisição e Tratamento de Dados e 4 Seminários de Investigação, cada seminário dedicado a um tema específico (Comunicação; Física da Atmosfera; Geofísica e; Geologia).

No ano letivo 2018/2019 o novo plano de estudos entrou em funcionamento. Após quatro anos, há ilações a tirar. É um curso frequentado por estudantes com distintas formações de base, que geralmente escolhem a área de especialização mais compatível a sua formação. As especialidades em Física da Atmosfera e do Clima e de Geofísica são procuradas em geral por estudantes com formação em áreas das Ciências Exatas e Engenharias, com competências sólidas em Física e Matemática. Contrariamente, a especialidade Processos Geológicos é procurada por estudantes de áreas da Geologia e de Arqueometria/Conservação e restauro, geralmente com proficiências limitadas em Física e Matemática. Perante este facto, a necessidade de se ter que orientar as mesmas UC's a públicos tão diferentes acaba por ser um fator limitativo dos assuntos a abordar e da profundidade com que se podem explorar. Os próprios estudantes dão conta disso, lamentando, por um lado, serem obrigados a estudar assuntos afastados da área que escolheram, por outro, os temas que mais lhes interessam serem apresentados com alguma superficialidade. Por exemplo, um estudante que procure este curso para conseguir uma especialização numa área de Física do Interior da Terra, jamais receberá na fase curricular do curso, o nível de formação sobre as matérias fundamentais na área da escolha, como Fonte Sísmica, que o anterior plano de estudos proporcionava. Na minha opinião esta estrutura do plano de estudos deixa uma lacuna no nível de conhecimentos que é necessário introduzir, que precisa ser colmatada no período de preparação da tese.

Esta situação parece não se articular muito bem com o espírito da legislação que regulamenta os Doutoramentos, nomeadamente o artº 31 dos Decretos-Lei nº 74/2006, 107/2008, 230/2009, 115/2013, 63/2016 e o mais recente 65/2018 de 16 de agosto, que recomendam que nos ciclos de estudos conducente ao grau de doutor a leção de “unidades curriculares dirigidas à formação para a

investigação e e/ou o desenvolvimento de competências complementares” visem “essencialmente a aprendizagem orientada da prática de I&D de alto nível.

Atendendo a estas questões considero que assim que possível o plano de estudos deste programa de Doutoramento deve ser novamente modificado para um modelo mais flexível, que permita ao estudante elencar um conjunto de UC's que melhor respondam aos propósitos da formação que escolheu. Para tal vou sugerir que se se introduzam algumas UC's optativas dos vários domínios de especialidade. No caso dos estudos em Física do Interior da Terra considero que uma UC de Fonte Sísmica bem estruturada pode abranger perfeitamente os conteúdos mais significativos que eram tratados nas três UC's do anterior plano de estudos: Fonte Sísmica, Modelação de Movimentos Sísmicos e Modelação da Deformação Crustal; é essa a UC que é adiantada nesta proposta. Assim, Fonte Sísmica é uma UC optativa, proposta para a área de especialização em Geofísica, creditada com 6 ECTS e a ser lecionada no primeiro semestre do curso de Doutoramento em Ciências da Terra e do Espaço.

.

4- Objetivos da UC

Os grandes objetivos da especialidade da Sismologia designada por Fonte Sísmica são a compreensão dos processos físicos responsáveis pela ocorrência dos terremotos e o desenvolvimento de métodos que permitam modelar esses processos para situações reais. Isto é, aplicar os conhecimentos da Física para a interpretação da fonte sísmica. Sob o ponto de vista teórico envolve a compreensão e utilização de complexos modelos sob o ponto de vista físico-matemático. Por outro lado, a operacionalização numérica desses modelos com dados reais obtidos a partir de técnicas sismológicas e geodésicas, requer a utilização de algoritmos de processamento laboriosos e meios de cálculo poderosos. Daí que o estudo destas matérias exija uma maturidade científica em domínios da Física, da Matemática e dos Métodos numéricos só alcançada em plenitude por estudantes com uma formação académica de nível superior nessas áreas.

O objetivo geral desta UC é estruturar um curso avançado de fonte sísmica que: proporcione a noção geral do estado atual do conhecimento sobre o tema; promova o estudo das teorias mais significativas acerca do mecanismo da fonte dos sismos; e prepare o estudante para estruturar autonomamente a análise da fonte de qualquer sismo real, selecionando e aplicando os métodos adequados ao tipo de evento e aos dados disponíveis. Assim, esta UC estabelece-se em termos de conteúdos e metodologias de feição a desenvolver competências no âmbito dos três domínios cognitivos que a compõem: a) teórico; b) aplicação dos métodos de cálculo; c) técnicas de análise e processamento de sinal. São também objetivos desta UC:

- Proporcionar um ensino flexível, ligado à investigação e à prática, que promova o conhecimento, a criatividade, o talento e o pensamento crítico;

- Apresentar os modelos teóricos mais significativos e demonstrar como evoluem segundo as leis da Física aplicadas a um meio elástico perturbado pela ação de forças (elastodinâmica);
- Explicar e promover a utilização dos métodos de cálculo (analíticos ou numéricos) que permitem reproduzir sinteticamente os efeitos dos sismos (ondas e deformações da superfície) ou reconstituir com o pormenor possível, as causas (tensões na fonte ou parâmetros da rotura);
- Treinar os estudantes na análise e processamento de sinais registados instrumentalmente de sismos reais – formas de onda registadas por sismómetros (sismogramas) e deformações em campo próximo registadas por técnicas geodésicas (GPR e InSAR).
- Dotar os estudantes com as competências específicas e capacidade de adaptação necessária à sua integração a um mundo de trabalho da ciência em profunda transformação.
- Desenvolver capacidades para construção do conhecimento sobre temas científicos específicos através de uma articulação entre a pesquisa em bibliografia de referência com a discussão e debate entre pares.
- Estimular a capacidade para estruturar autonomamente a análise de qualquer fonte sísmica através da correta escolha dos métodos estudados e em função dados disponíveis.
- Estimular o desenvolvimento de novos métodos de estudo da fonte sísmica ou aperfeiçoamento dos existentes, a partir dos conhecimentos teóricos adquiridos.
- Familiarizar os estudantes com as principais questões metodológicas e práticas que envolvem a preparação e desenvolvimento de um plano de estudo de um sismo;

- Proporcionar aos estudantes a noção geral sobre o estado atual do conhecimento sobre a fonte sísmica e os principais desafios que se colocam nesta área de investigação;
- Promover o desenvolvimento de competências de comunicação científica, quer oral quer escrita.
- Proporcionar a produção de elementos de divulgação (relatórios, artigos, comunicações) mediante a aplicação das regras aceites em meio académico.

5- Competências

As competências a adquirir pelos estudantes nesta UC consubstanciam o foco da missão e como tal norteiam todo o planeamento do processo de ensino/aprendizagem. Pretende-se que o estudante adquira e integre a multiplicidade de saberes que constituem o conhecimento do tema, desde o estudo das leis e modelos físico-matemáticos que sustentam o edifício conceptual aos aspetos operacionais, que no final lhe permitam autonomamente colocar e resolver problemas reais em situações diversas. Assumindo que esta UC é dirigida a estudantes que pretendam prosseguir uma carreira profissional, científica ou académica, na área da Geofísica, devem obter dela competências teóricas e funcionais sólidas que lhes permitam avançar na pesquisa de novos conhecimentos sobre sistemas mecânicos que envolvem a perturbação de meios viscoelásticos em zonas afastadas da observação direta. Para tal não basta conhecer bem os aspetos teóricos da mecânica de meios viscoelásticos, como é fundamental dominar os métodos numéricos que permitam reconstituir o funcionamento desses sistemas mecânicos a partir da interpretação dos efeitos produzidos na superfície (movimentos e deformações).

Nesta perspetiva, no final da UC o estudante deverá genericamente ser capaz de:

A nível científico

Dominar os conhecimentos de Física fundamental necessários para a compreensão dos modelos cinemáticos e dinâmicos de fonte sísmica;

Conhecer as principais técnicas de modelação da forma de onda e os métodos mais utilizados para calcular os parâmetros da fonte.

Ser capaz de aplicar os conhecimentos adquiridos para planificar e concretizar um estudo detalhado sobre o processo de rotura de qualquer fonte sísmica, utilizando registos sísmicos e geodésicos.

A nível técnico

Utilizar as principais rotinas de tratamento de sinal sísmico e geodésico para delas extrair os dados necessários para o cálculo dos vários parâmetros que caracterizam a rotura sísmica;

Manipular os algoritmos de cálculo necessários ao estudo da fonte, nomeadamente para determinação da diretividade da propagação da rotura sísmica; mecanismo dos sismos e geometria das falhas; dimensionamento da fonte sísmica por análise espectral das ondas; modelação de ondas sísmicas e da deformação crustal; distribuição de deslizamentos sobre o plano de falha por inversão da forma de onda.

Discutir os resultados obtidos por aplicação dos vários métodos e cruzar esses resultados para produzir a interpretações bem estruturada das fontes sísmicas sob estudo.

A nível de organização pessoal

Mostrar capacidade de autonomia através da realização de tarefas que envolvam a pesquisa de novas informações.

Partir dos conhecimentos adquiridos para propor aperfeiçoamentos às abordagens clássicas para o estudo da fonte sísmica.

Partir dos dados disponíveis sobre qualquer sismo para planificar as atividades que permitem fazer a análise da fonte e realizar autonomamente essas atividades.

A nível interpessoal

Se integrar no mundo do trabalho científico imposto por um mundo em profunda transformação, adaptando-se aos diferentes ambientes que esse trabalho possa ter.

Construir conhecimento sobre os temas científicos específicos a partir articulação entre a pesquisa em bibliografia de referência e a discussão e debate entre pares.

Interagir cordialmente com a equipa de trabalho através da utilização de uma boa expressão oral na transmissão e receção de ideias e informações e respeito nas tomadas de decisão e de resolução de problemas.

Envolver-se em atividades de extensão sobre a divulgação do conhecimento sobre a fonte sísmica e dos principais desafios que se colocam nesta área de investigação.

A nível de comunicação

Expressar-se oralmente utilizando corretamente as regras de comunicação habituais no meio académico da especialidade.

Produzir elementos de comunicação diversos (relatórios, artigos, diapositivos, vídeos...) aplicando adequadamente as regras específicas de cada uma desses meios.

Partilhar saberes e debater ideias entre colegas ou outras equipas de investigação que colaboram no âmbito de projetos ou redes de pesquisa.

Fazer revisão crítica de artigos científicos pondo em evidência os aspetos mais relevantes dos trabalhos em análise.

6- Estratégia de ensino

Para se atingirem com sucesso as competências e autonomia pretendidos o ensino foi organizado mediante uma opção metodológica articulada às exigências do novo paradigma de ensino superior, nomeadamente:

- encorajar os estudantes a desenvolver atitudes de autonomia em relação à sua aprendizagem, organizando a unidade curricular de forma a promover essa autonomia;
- estabelecer um ensino que promova o conhecimento através de metodologias que valorizam a utilização das publicações fonte;
- tornar o ensino atrativo e mais próximo dos interesses do estudante e na sua integração na sociedade;
- criar condições de apoio ao estudante, planificando ambientes de aprendizagem onde se estimule o trabalho de equipa, o trabalho individual e a partilha e comunicação de saberes, mediante trabalho de projeto;
- promover ações que conduzam à criação de hábitos de estudo auto orientado.

Para tal será implementado um plano de aprendizagem inspirado nos modelos de produção de conhecimento seguidos na investigação. Segundo um modelo que promova a indissolubilidade entre ensino, investigação e extensão. Um paradigma centrado no aluno, que privilegia a auto-aprendizagem para inserção num mundo em evolução contínua e acelerada. Para conseguir esse objetivo é necessário definir um plano que forme investigadores dotados de uma robusta formação científica, altamente treinados na resolução de problemas, dotados de elevado sentido de integridade científica, com capacidade de comunicar, com espírito empreendedor, dotados de elevada autonomia e capacidade de atualização

contínua. Nesse sentido, o programa de formação proposto neste curso é diversificado, assente no desenvolvimento de projetos centrados na resolução de problemas de investigação em fonte sísmica (tarefas), procurando sempre que os estudantes se integrem nas equipas de investigação constituídas e incentivando-se a autoformação e autoavaliação ao longo de todo o programa. Assim o ensino está estruturado a partir de aulas/reuniões onde a componente teórica e aplicada dos temas em estudo surjam integradas e articuladas através da colocação de tarefas para execução. Cada novo tema é introduzido na generalidade pelo professor ou por algum especialista convidado, e sobre ele são colocadas questões problema (tarefas) que os estudantes são incumbidos de solucionar num período acordado. A metodologia proposta para a resolução de cada tarefa é começar pelo estudo dos aspetos teóricos que a envolvem e para isso é recomendada uma base bibliográfica que o estudante deve autonomamente alargar por forma a obter os conhecimentos que lhe permitam solucionar os problemas concretos colocados. A rapidez com que cada um consegue executar estas tarefas dependerá do seu nível de conhecimentos / da dedicação que lhe conceder. Durante este processo, são agendadas sessões presenciais regulares onde a evolução dos trabalhos de cada estudante é monitorizada e lhe é prestado o apoio necessário. São sessões onde o estudante deve partilhar os avanços e solicitar apoio à equipa (docentes e colegas) para ultrapassar qualquer dificuldade que o impeça de avançar. Para tal terá de contextualizar e expor as dúvidas que, após debate, deverão ser encontradas vias de resolução.

Na primeira parte do curso, correspondente a cerca de 1/4 do tempo, serão exploradas situações problema de carater mais conceptual e instrumental que sustentam os vários métodos utilizados para o estudo da fonte sísmica (modelos de fonte, parâmetros da fonte, teorema da representação, cálculo tensorial, funções de Green, modelação da forma de onda, diretividade, modelação da deformação, inversão, análise espectral...). Paralelamente o estudante é solicitado a realizar tarefas que envolvam essas questões como manipulação do Tensor momento sísmico; representação de mecanismos e transformação de formatos; desenvolver

algoritmo que permita modelar a forma de onda que combine os parâmetros do modelo de fonte com as funções de Green; modelação do espectro de rutura de Brune...

A segunda parte do curso (2/4 do tempo) é dedicada ao estudo e treino do processamento de sinal sísmico e dos métodos mais usadas para estudo da fonte sísmica e à utilização dos algoritmos de cálculo correspondentes a cada um dos métodos. Serão analisados e treinados métodos como: determinação do mecanismo focal a partir da análise das polaridades; estimativa da função temporal da fonte pelo método das funções empíricas de Green; cálculo numérico das funções de Green; Inversão do tensor momento sísmico; deteção de efeitos diretivos; modelação da cinemática de fontes finitas por inversão da forma de onda; modelação da deformação e sua comparação com dados geodésicos (GPS e InSAR) para confirmação dos modelos de fonte obtidos com dados sísmicos.

A parte final do curso (1/4 do tempo) será dedicada à realização do estudo da fonte de um sismo e à sua divulgação. Cada estudante é incumbido de realizar o estudo completo de uma fonte sísmica real e atual. A cada estudante é atribuído um evento recente sobre o qual haja dados sismológicos e eventualmente geodésicos. O estudante deverá em função dos dados disponíveis, dimensão e tipo de evento, selecionar os métodos adequados e aplicá-los por forma a conseguir o modelo de rutura mais completo. Para além do estudo deve ainda preparar um seminário para a sua exposição e produzir um artigo. No final da UC tudo faremos para que os materiais produzidos possam ser apresentados publicamente num dos encontros científicos da área como os (EGU, ESC, APMG ou ALEGG), aos quais está associada a publicação do artigo.

7- Carga horária

Com a aplicação do Processo de Bolonha é introduzido o regime de unidades de crédito ECTS definidas em função do trabalho do aluno, realizado em ambientes formais e não formais. O Senado da Universidade de Évora estabelece que um crédito ECTS corresponde a 26 horas de trabalho do aluno e que cada semestre é composto por 19 semanas, das quais 15 são destinadas a aulas.

Atendendo que esta UC surge orientada para o desenvolvimento de competências dirigidas à investigação na área da Geofísica Interna segundo uma metodologia de formação que valoriza a produção autónoma de conhecimento; face à extensão, diversidade, complexidade e profundidade dos assuntos em estudo nesta UC e considerando que terá uma duração semestral, cremos ser necessário que o estudante lhe dedique uma média de duas horas diárias do seu tempo durante as 15 semanas letivas do semestre. Articulando esta estimativa com as determinações do Senado da Universidade de Évora a esta Unidade Curricular Semestral deve corresponder um número de 6 ECTS, a que corresponde uma carga horária total de 156 horas. Estima-se que cerca de 15% destas horas sejam, cerca de 23 horas, sejam de contacto e decorrerão em regime de orientação tutorial. As restantes 133 horas (85%) são utilizadas pelo estudante em trabalho autónomo.

8- Avaliação

O processo de avaliação dos estudantes é uma tarefa de grande responsabilidade pelo rigor/justiça que exige e pela importância que representa para os estudantes, como fator facilitador de oportunidades. A avaliação é também imprescindível ao sistema de ensino-aprendizagem permitindo não apenas aferir a aquisição de competências e conhecimentos considerados essenciais ou o progresso do estudante ao longo do tempo de aprendizagem, mas também perceber a prestação do docente e a adequação dos programas, através de retroinformação (feedback), análise crítica dos resultados e controlo do processo de ensino-aprendizagem. Como permite detetar as dificuldades dos estudantes assume a função de indicador para o diagnóstico e análise de problemas.

Obviamente que uma alteração ao tradicional paradigma de ensino centrado na transmissão de conhecimentos pelo professor em aulas teóricas e práticas, deve também na avaliação ter um reflexo compatível. O convencional modelo de avaliação baseado em testes e exames, que valoriza a medição da quantidade de conhecimento adquirido face ao transmitido, deve ser substituído por uma avaliação em que os alunos terão oportunidade de expressar o conhecimento que construíram, como o construíram, o que perceberam e o que conseguem fazer com ele, e ao mesmo tempo torne possível ao professor acompanhar essa evolução. Isto é, um modelo que valoriza as aprendizagens quantitativas e qualitativas no decorrer do próprio processo de aprendizagem.

Numa tentativa de implementar um sistema de avaliação que responda aos requisitos enunciados atrás, a avaliação desta UC é contínua e composta por 3 partes:

- A.** Realização da série de tarefas propostas ao longo do semestre que envolvem a resolução de uma série de problemas encadeados e num crescendo de

dificuldade. São tarefas que incluem, por exemplo a utilização e manipulação do tensor momento sísmico; representação de mecanismos e transformação de formatos; processamento de sinal sísmico; desenvolvimento de algoritmo de modelação da forma de onda que combine os parâmetros do modelo da fonte com as funções de Green; modelação do espectro de rutura de Brune e sua determinação a partir de dados reais, para a estimativa da dimensão da fonte; determinação do mecanismo focal a partir da análise das polaridades; estimativa da função temporal da fonte pelo método das funções empíricas de Green; cálculo numérico das funções de Green; Inversão do tensor momento sísmico; análise de efeitos diretivos; modelação da cinemática de fontes finitas por inversão da forma de onda; modelação da deformação e sua comparação com dados geodésicos (GPS e InSAR).

- B.** Relatório do estudo da fonte de um sismo recente (ocorrido no último ano) sob a forma de artigo. A elaboração desse relatório exige uma justificação sobre a escolha dos métodos utilizados, enquadramento teórico dos métodos, apresentação dos dados bem como o seu processamento; o que implica a revelação do domínio geral do conhecimento adquirido;
- C.** Apresentação de seminário no final do semestre sobre o estudo da fonte do sismo escolhido

$$\text{Nota final} = 0.5 \cdot \text{A} + 0.25 \cdot \text{B} + 0.25 \cdot \text{C}$$

9- Programa

Os conteúdos desta Unidade Curricular foram selecionados por forma a dar uma visão avançada dos mecanismos físicos responsáveis pela ocorrência de terremotos que inclua abordagens clássicas e recentes e combine teoria, observação e modelação. O foco está na mecânica que governa as roturas em falhas, em particular os novos desenvolvimentos que permitem modelar essas roturas a partir da interpretação das duas classes de dados disponíveis: sísmicos e geodésicos. Os temas a tratar vão desde os conceitos físicos fundamentais como as equações da teoria elastodinâmica, até à sua aplicação numérica que permite resolver os problemas mais avançados, incluindo os modelos cinemáticos e dinâmicos da fratura.

9.1- Lista de Conteúdos

1. Sismogénese - generalidades conceptuais

- 1.1. Evolução do conceito de fonte sísmica através dos tempos
- 1.2. Tectónica mundial
- 1.3. O modelo do ressalto elástico.
- 1.4. O modelo de Burridge -Knopof e a máquina dos sismos
- 1.5. Simplicidade do modelo versus complexidade da manifestação.
- 1.6. O padrão estocástico das zonas sismogénicas
- 1.7. O sistema dinâmico e as leis de atrito
 - 1.7.1. *Relações de escala, dimensão fractal e imprevisibilidade dos sismos.*

- 1.8. Movimento de falhas sísmicas
- 1.9. Momento sísmico
- 1.10. Parâmetros geométricos do mecanismo focal
- 1.11. Representação do mecanismo em diagramas *beach Ball*

2. Representação Físico-Matemática da fonte sísmica

- 2.1. Fundamentos da teoria elastodinâmica
- 2.2. Modelação do deslocamento num meio elástico - Teorema da representação.
- 2.3. Modelos de forças equivalentes - A equivalência forças deslizamento
- 2.4. Tensor Momento Sísmico - O objeto matemático que define a fonte
- 2.5. Função de Green - Deslocamento produzido por impulso unitário
- 2.6. Deslocamento em campo próximo e campo longínquo.
- 2.7. Modelos de fonte pontual
- 2.8. A geometria da fonte e os padrões da radiação
- 2.9. Função temporal da fonte
- 2.10. Queda de tensão
- 2.11. Modelo do centroide
- 2.12. Modelo de subeventos
- 2.13. Modelos de fonte finita
- 2.14. Propriedades espectrais da radiação da fonte sísmica
- 2.15. Dimensão e geometria da fonte
- 2.16. Propagação da rotura
- 2.17. Efeitos diretivos

- 2.18. Velocidade de propagação da rotura e sua determinação
- 2.19. Modelo de Haskell
- 2.20. Modelo de Brune
- 2.21. Modelos Cinemáticos
- 2.22. Introdução à dinâmica das roturas sísmicas

3. Quantificação da fonte através de Métodos sísmicos

- 3.1. Aspectos funcionais gerais do processamento de sinais sísmicos digitais para a caracterização dos movimentos da superfície e estudo da fonte sísmica, utilizando o software Seismic Analysis Code (SAC). Picagem de fases, cortes, decimação, transformações geométricas, filtragem, correção do instrumento, representação no domínio do tempo e frequência, convolução, desconvolução, ...)
- 3.2. Determinação da dimensão da fonte e Momento sísmico por análise espectral das ondas de volume.
- 3.3. Determinação do mecanismo focal de fonte pontual através de um método de análise das polaridades da primeira fase (e.g. FOCMEC ou Mecsta).
- 3.4. Determinação da função temporal da fonte por desconvolução das funções empíricas de Green no domínio do tempo.
- 3.5. Cálculo das funções de Green em campo próximo, distâncias regionais e telessísmicas
- 3.6. Determinação da Direção e velocidade da rotura por análise da diretividade.
- 3.7. Inversão do tensor Momento sísmico utilizando um dos vários códigos disponíveis.
- 3.8. Modelação da distribuição espaço temporal dos deslizamentos por inversão da forma de onda em campo próximo e distâncias regionais e telessísmicas.

4. Modelação da deformação crustal e comparação com dados geodésicos

- 4.1. Modelos analíticos e numéricos de deformação crustal. Aplicação ao estudo da dinâmica da deformação crustal em regiões activas
- 4.2. As fórmulas analíticas de Okada (Okada, 1992) aplicadas a modelos de fonte pontual
- 4.3. Utilização de métodos analíticos e numéricos para modelações da deformação associadas a fontes finitas (utilização dos programas EDMC ou Coulomb)
- 4.4. Modelação de deformação superficial associada a sismos reais a partir de modelos de fonte publicados.
- 4.5. Medição da deformação crustal através de tecnologias geodésicas espaciais (GPS e InSAR).

5. Combinação de métodos Sísmicos e Geodésicos

- 5.1. Aferição de modelos de ruptura por comparação dos deslocamentos inelásticos sintéticos com os correspondentes registados por técnicas geodésicas (GPS e DInSAR).
- 5.2. Aplicação dos modelos de deformação crustal ao estudo da dinâmica de regiões activas.

9.2- Planificação semanal

Semana 1

Generalidades conceptuais sobre a sismogénese apresentadas na forma de seminário, no qual são discutidos os assuntos listados na secção 1 dos conteúdos programáticos. No final do seminário é proposto a realização da tarefa **T1** cujo relatório deve ser entregue na semana seguinte.

Semana 2

Fundamentos físico-matemáticos (parte 1)- Reunião de preparação do estudo dos fundamentos físico-matemáticos de suporte ao desenvolvimento dos modelos de fonte sísmica: teoria elastodinâmica; teorema da representação e modelação dos deslocamentos produzidos em meios elásticos devido a atuação de forças localizadas; modelo de forças equivalentes (par e duplo par); equivalência entre forças deslizamento; tensor momento sísmico; função de Green; radiação sísmica em campo próximo e campo longínquo. Nesta reunião são clarificadas questões formais sobre as leis da física e de nomenclatura que envolvem os temas em estudo e proposta a lista bibliográfica de referência para o estudo dos fundamentos das teorias da fonte sísmica (Aki & Richards, 2002; Udias, 1999; Udias et al. 2014; Sholtz, 2002; Kostrov & Das, 1988). No final da reunião é proposta a tarefa **T2** que deve ser realizada e os resultados apresentados na semana seguinte.

Semanas 3 e 4

Fundamentos físico-matemáticos (parte 2) - Estudo de modelos de fonte sísmica –
a) Descrição da fonte sísmica através de modelos cinemáticos e dinâmicos. Descrição simples da elastodinâmica da rotura sísmica. Nucleação propagação e

paragem da rotura. Modos de propagação da rotura em geometria circular (modelo de Bune) ou retangular (modelo de Haskel); b) modelo de fonte pontual (relação entre o mecanismo da fonte e os padrões da radiação, função temporal da fonte, queda de tensão, modelo do centroide, modelo de subeventos); c) modelos cinemáticos de fonte finita (propriedades espectrais da radiação da fonte sísmica, dimensão e geometria, propagação da rotura, efeitos diretivos e determinação dos respetivos parâmetros, modelos Cinemáticos de distribuição de deslizamentos). O estudo destes assuntos é feito autonomamente por leitura da bibliografia proposta e apoiado por sessões presenciais semanais para esclarecimento de dúvidas. A consolidação de conceitos é feita através da realização da tarefa **T3**, que permite operacionalizar uma parte do estudo.

Semana 5

Processamento do sinal sísmico - Sessão prática sobre a aplicação das bases do processamento digital de dados sísmicos para caracterizar os movimentos da superfície produzidos por ondas sísmicas, nomeadamente para o estudo da fonte sísmica. Para o efeito será utilizado o software de análise de dados sísmicos Seismic Analysis Code (SAC), Goldstein, et al., 2003. (eventualmente poderá ser usado o MatLab). Nesta sessão são exploradas funcionalidades como picagem de fases, cortes, decimação, transformações geométricas, filtragem, correção do instrumento, representação no domínio do tempo e frequência, convolução, desconvolução, ... No final é proposto o estudo autónomo da análise espectral para a determinação da dimensão da fonte e momento sísmico escalar (e.g Hanks & Wyss (1972) ou Prieto et. al (2004)). Como exercício é proposto a realização da tarefa **T4** que deve ser apresentada na semana seguinte.

Semana 6

Mecanismo focal pelo método das polaridades - Estudo e aplicação de métodos de cálculo dos parâmetros do modelo de fonte pontual: Mecanismo da fonte através da polaridade das primeiras chegadas. Para a aplicação do método é fornecido um dos códigos disponíveis (FOCMEC de Snoke et al., 2003 ou Mecsta de Udias e Buforn, 1988) e facultada a respetiva bibliografia. A consolidação do estudo deste método é feita através da realização da tarefa **T5** proposta.

Semana 7

Funções empíricas de Green - Estudo do método das funções empíricas de Green (Hartzell, 1978) para a determinação da Função temporal da fonte. Após a leitura da secção 3.2.4 de Caldeira (2005) e o estudo do método da inversa generalizada, o estudante familiariza-se com o método através da realização da tarefa **T6**.

Semana 8

Cálculo numérico das funções de Green- Nesta semana os estudantes irão estudar e treinar a aplicação de algoritmos para o cálculo das funções de Green em campo próximo, distâncias regionais e telessísmicas. Para o efeito é proposto o estudo de um dos vários códigos disponíveis, como Qseis Wang (1999), GEMINI Friederich and Dalkomo (1995), QSSP Wang, R. (1997), SPECFEM3D Komatitsch and J. P. Vilotte 1998, E3D Shawn Larsen, dsmti kawai et al 2006 , AWP-ODC (<https://strike.scec.org/scecpedia/ASP-ODC>) , SW3D (<http://sw3d.cz/index.htm>). Partindo do código estudado o estudante deverá planificar a execução da tarefa **T7**.

Semana 9

Diretividade. Uma das consequências da propagação da rotura previstas nos modelos de fonte finita são os efeitos diretivos detetáveis na radiação sísmica que

procede dessas fontes. Esta semana é dedicada ao estudo dos métodos que permitem determinar os parâmetros diretivos e à utilização desses métodos para estimar a direção e velocidade de rotura a partir de uma coleção de dados registados em torno da fonte (Caldeira. 2010). Para consolidar esses conhecimentos os estudantes são solicitados a executar a tarefa **T8**.

Semana 10

Inversão do tensor Momento sísmico utilizando um dois vários códigos disponíveis, e.g. RAPIDINV (Cesca, 2010), Kiwi Tools (Heimann, 2011), HybidMT (Kwiatek et al, 2016), TDMT-INVC (Dreger, 2003), ISOLA-GUI (Sokos & Zahradnik, 2008), mtinvers (Dahm et al., 2007). A consolidação deste tema é feita com a execução da tarefa **T9**

Semana 11

Modelação cinemática de fonte finita- Instalação de algoritmo inversão da forma de onda em campo próximo ou distâncias telessísmicas para a modelação da distribuição espaço temporal dos deslizamentos e sua utilização mediante a execução da tarefa **T10**.

Semana 12

Deformação crustal- interpretação das fórmulas analíticas de Okada (Okada, 1992) para modelar a deformação inelástica superficial devida gerada por fonte pontual e realização da tarefa **T11**.

Semanas 13 a 15

Modelação cinemática da fonte finita de um sismo real. Fazer o estudo completo da fonte de um sismo recente seleccionando, em função dos dados sismológicos e geodésicos disponíveis, de entre os métodos estudados, os que melhor se adaptem ao estudo desta fonte. Procurar um sismo onde existam não apenas dados sismológicos mas também alguns dados geodésicos com informação sobre deformação em campo próximo. Propõe-se que o modelo de rotura obtido seja usado para modelar o campo de deformação em torno da fonte e que esses resultados sejam comparados com a distribuição de réplicas e com dados geodésicos para avaliação do modelo de fonte obtido. Esta última questão pressupõe a realização das tarefas **T12** e **T13** que devem ser executadas nestas semanas, sem contudo ser necessário apresentar relatório sobre elas. Finalmente o estudante deverá preparar um artigo e apresentar um seminário sobre o estudo dessa fonte sísmica (tarefa **T14**).

9.3- Tarefas

Tarefas a realizar ao longo do semestre (a execução de cada tarefa pressupõe a elaboração de um pequeno relatório que será usado como elemento de avaliação)

T1

Recolher a sismicidade de uma zona sismogénica ativa e partindo das equações empíricas do artigo Kanamori & Anderson (1975) calcular a queda de tensão associada a cada evento. A partir dessa informação reconstituir a dinâmica da tensão dessa zona durante o período de observação sísmica.

T2

Dados o momento sísmico escalar de um sismo e os parâmetros focais *st*, *dip* e *rake*, representar graficamente o mecanismo e calcular as componentes do tensor momento sísmico desse evento.

T3

Desenvolver um algoritmo que permita modelar as três componentes do deslocamento produzido pelas ondas P num ponto situado numa determinada posição a distância telessísmica da fonte, conhecendo as componentes do tensor momento sísmico dessa fonte, a *ftf* e as funções de Green correspondentes. (Aki Richards, 2002)

T4

Fazer a análise espectral das ondas calculadas no exercício anterior e a partir desse espectro, considerando tratar-se de uma rotura circular, estimar o raio dessa rotura a o momento sísmico escalar desse evento. (bibliografia Brune, 1970). Sabendo os parâmetros focais, se houver tempo também pode modelar o espectro.

T5

Identificado um sismo recente de magnitude entre 5.5 e 6.0 pedir ao estudante que obtenha, partir de um consórcio IRIS ou Orpheus, as formas de onda de um conjunto de cerca de 25 estações distribuídas azimutalmente a várias distâncias do foco e que identifique as polaridades da primeira chegada da componente vertical de cada estação. Posteriormente utilizando um método de análise de polaridades da primeira chegada (Mecsta ou Focmec) determinem o mecanismo focal desse sismo.

T6

Selecionar uma réplica do sismo do problema anterior de magnitude cerca de 4 e obter as formas de onda dessa réplica para algumas das estações usadas na tarefa anterior mais próximas do foco (preferencialmente distribuídas azimutalmente) e usando as formas de onda dessas réplicas como funções empíricas de Green fazer a sua desconvolução no domínio do tempo, mediante o método descrito em Caldeira 2004, para obter as FTF do sismo principal.

T7

Utilizando um dos códigos identificados na planificação da semana 8 calcule as funções de Green relativas a uma sucessão de eventos pontuais que ocorrem numa direção fornecida pelo professor e com mecanismo também fornecido. Essas funções de Green devem ser referentes a três ou quatro pontos situados em torno da rotura de coordenadas também fornecidas.

T8

Dado o momento sísmico escalar de cada subevento do problema anterior modelar os primeiros 15s da forma de onda em cada um dos pontos de observação considerado e por análise dessas formas de onda tente encontrar evidências dos efeitos diretivos da rotura, nomeadamente a sua direção e velocidade.

T9

Utilizando as mesmas formas de onda utilizadas no exercício anterior determinar as componentes do tensor momento sísmico do evento por inversão das formas de onda (inversão do tensor momento sísmico) e comparar o mecanismo equivalente com o determinado pelo método das polaridades.

T10

Inversão da forma de onda para distribuição de deslizamentos sobre plano de falha através do método de kikuchi-Kanamori (1991), utilizando uma coleção de formas de onda obtidas num dos consórcios IRIS ou Orpheus;

T11

Utilizar as equações do artigo de Okada (1992) para modelar a deformação produzida por uma fonte pontual com determinadas características a fornecer pelo professor.

T12

Modelar o campo de deformação produzido pela fonte invertida na tarefa T10 utilizando uma aplicação disponível que utilize as equações de Okada, como o programa Coulomb 3.0 de Toda et al. (2011).

T13

Calcular a tensão de Coulomb produzida pelo modelo de rotura obtido em várias profundidades e compare com a distribuição de réplicas desse sismo.

T14

Fazer o estudo completo da fonte de um sismo recente seleccionando os vários métodos, e dados a utilizar e produzir um artigo e um seminário sobre o estudo dessa fonte sísmica.

9.4- Cronograma

Semana	Tema	Tarefa
1	Cap. 1- Sismogénese - generalidades conceptuais	T1
2	Cap. 2- Representação Físico-Matemática da fonte sísmica	T2
3	Cap. 2- Representação Físico-Matemática da fonte sísmica	T3
4	Cap. 2- Representação Físico-Matemática da fonte sísmica	
5	Secção 3.1 e 3.2.	T4
6	Secção 3.3 - <i>Mecanismo focal pelo método das polaridades</i>	T5
7	Secção 3.4 - Funções empíricas de Green para cálculo da Função temporal da fonte.	T6
8	Secção 3.5 - Cálculo numérico das funções de Green	T7
9	Secção 3.6 - Diretividade.	T8
10	Secção 3.7 - Inversão do tensor Momento sísmico	T9
11	Secção 3.8 - Distribuição de slip por inversão da forma de onda	T10
12	Cap. 4- Cálculo analítico da deformação crustal	T11
13	Cap. 5 - Combinação de métodos Sísmicos e Geodésicos	T12
14		T13
15		T14

I0- Bibliografia

Aki, K., & Richards, P. G. (2002). Quantitative seismology. 2nd ed. Sausalito, California: University Science Books.

Das, S., J. Boatwright, and C. H. Scholz. (1986). Earthquake Source Mechanics. Maurice Ewing Series, vol. 6. Washington, D.C.: American Geophysical Union.

Helffrich, G., Wookey, J., & Bastow, I. (2013). The seismic analysis code: A primer and user's guide. Cambridge University Press.

Jost, M. U., & Herrmann, R. B. (1989). A student's guide to and review of moment tensors. Seismological Research Letters, 60(2), 37-57.

Kostrov, B. V., & Das, S. (1988). Principles of earthquake source mechanics. Cambridge University Press.

Lay, T., and T. C. Wallace. (1995). Modern Global Seismology. San Diego: Academic Press,.

Menke, W. (2018). Geophysical data analysis: Discrete inverse theory. Academic press.

Scherbaum, F. (2006). Of poles and zeros: Fundamentals of digital seismology (Vol. 15). Springer Science & Business Media.

Scholz, C. H. (2002). The Mechanics of Earthquakes and Faulting, Cambridge University Press, Cambridge.

Udias, A. (1999). Principles of Seismology, Cambridge University Press, London.

Udías, A., Vallina, A. U., Madariaga, R., & Buforn, E. (2014). Source mechanisms of earthquakes: Theory and practice. Cambridge University Press.

II- Referências

Aki, K., & Richards, P. G. (2002). Quantitative seismology. 2nd ed. Sausalito, California: University Science Books.

Ammon, C. J., Ji, C., Thio, H., Robinson, D., Ni, S., Hjorleifsdottir, V., Kanamori, H., Lay, T., Das, S., Helmberger, D., Ichinose, G., Polet, J., Wald, D. (2005). Rupture Process of the 2004 Sumatra-Andaman Earthquake, *Science* 308, 1133-1139, DOI: 10.1126/science.1112260,

Ando, R., & Kaneko, Y. (2018). Dynamic rupture simulation reproduces spontaneous multifault rupture and arrest during the 2016 Mw 7.9 Kaikoura earthquake. *Geophysical Research Letters*, 45(23), 12-875.

Asano, K., Iwata T. (2009). Source Rupture Process of the 2004 Chuetsu, Mid-Niigata Prefecture, Japan, Earthquake Inferred from Waveform Inversion with Dense Strong-Motion Data, *Bull. Seism. Soc. Am*, 99(1), 123-140, doi:10.1785/0120080257.

Ben-Menahem, A. (1995). A Concise History of Mainstream Seismology: Origins, Legacy, and Perspectives. *Bull. Seism. Soc. Am*, 85(4):. 1202-1225.

Benavente, R., Cummins, P. R., & Dettmer, J. (2016). Rapid automated W-phase slip inversion for the Illapel great earthquake (2015, Mw = 8.3). *Geophysical Research Letters*, 43, 1910–1917. <https://doi.org/10.1002/2015GL067418>

Beresnev, I. A. (2003). Uncertainties in Finite-Fault Slip Inversions: To What Extend to Believe? (A Critical Review), *Bull. Seism. Soc. Am*. 93, 2445—2458.

Bolt, B. A. (1993). *Earthquakes and Geological Discovery*, Scientific American Library, New York.

Bouchon, M. (1981). A Simple Method to Calculate Green's Functions for Elastic Layered Media, *Bull. Seism. Soc. Am* 71, 959-971.

Brillinger, D., Udias, A. e Bolt, B. A. (1980). A Probability Model for Regional Focal Mechanism Solutions, *Bull. Seis. Soc. Am.* 70, 149—170.

Brune, J. N. (1970). Tectonic Stress and the Spectra of Seismic Shear Waves from Earthquakes, *J. Geophys. Res.* 75, 4997—5009.

Burridge, R. & Knopoff, L. (1964). Body Force Equivalents for Seismic Dislocations, *Bull. Seism. Soc. Am.* 54, 1875—1888.

Byerly, P. (1926). The Montana earthquake of June 28, 1925, *GMCT. Bull. Seism. Soc. Am*, 16(4), 209-265.

Byerly, P. (1955). Nature of faulting as deduced from seismograms. In *Crust of the Earth* (Vol. 62, pp. 75-85). *Geol. Soc. Am.*.

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.

Campillo, M., Favreau, P., Ionescu, I. R. and Voisin, C. (2001). On the effective friction law of a heterogeneous fault, *J. Geophys. Res.*, 106(B8), 16,307– 16,322, doi:10.1029/2000JB900467.

Cesca, S., Heimann, S., Stammler, K., and Dahm, T. (2010). Automated procedure for point and kinematic source inversion at regional distances. *J. Geophys. Res.*, doi:10.1029/2009JB006450

Crowell, B. W., Bock, Y., & Melgar, D. (2012). Real-time inversion of GPS data for finite fault modeling and rapid hazard assessment. *Geophysical Research Letters*, 39, L09305. <https://doi.org/10.1029/2012GL051318>

D. Komatitsch and J. P. Vilotte. (1998). The spectral-element method: an efficient tool to simulate the seismic response of 2D and 3D geological structures. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 88(2):368–392.

Dahm, T., Krüger, F., Stämmeler, K., Klinge, K., Kind, R., Wylegalla, K., Grasso, J.-R. (2007). The 2004 Mw 4.4 Rotenburg, Northern Germany, earthquake and its possible relationship with gas recovery. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 97(3), 691-704.

Delouis, B., Pardo, M., Legrand, D., Monfret, T. (2009). The Mw 7.7 Tocopilla Earthquake of 14 November 2007 at the Southern Edge of the Northern Chile Seismic Gap: Rupture in the Deep Part of the Coupled Plate Interface, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 99(1), 87-94, doi:10.1785/0120080192.

Dreger, D. S. (2003). TDMT_INV: Time Domain Seismic Moment Tensor INVersion, In: Lee, W. H. K., Kanamori, H., Jennings, P. C., and Kisslinger, C. (Eds.). *International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology*, Academic Press, Amsterdam, Part B, p 1627

Friederich, W., and Dalkolmo, J. (1995): Complete synthetic seismograms for a spherically symmetric earth by a numerical computation of the Green's function in the frequency domain. *Geophys. J. Int.*, 122, 537-550.

Fukao, Y. (1972). Source Process of a Large Deep-Focus Earthquake and its Tectonic Implications: The Western Brazil Earthquake of 1963, *Phys. Earth. Planet. Inter.* 5, 61—76.

Galitzin, B. (1909). Zur frage der bestimmung des azimuts der epizentrums eines beben. *C. R. des Seances de l'Assoc. Int. Seism. Zermatt*, 132–141.

Gallovič, F., Valentová, L., Ampuero, J. P., & Gabriel, A. A. (2019). Bayesian dynamic finite-fault inversion: 2. Application to the 2016 Mw 6.2 Amatrice, Italy, earthquake. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 124(7), 6970-6988.

Gilbert, G. K. (1884). A Theory of the Earthquakes of the Great Basin, with a Practical Application, *Am. J. Sci.* XXVII, 121—138.

Goldstein, P., D. Dodge, M. Firpo, Lee Minner (2003) “SAC2000: Signal processing and analysis tools for seismologists and engineers, Invited contribution to “The IASPEI International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology”, Edited by WHK Lee, H. Kanamori, P.C. Jennings, and C. Kisslinger, Academic Press, London.

Guatteri, M., Mai, P. M., & Beroza, G. C. (2004). A pseudo-dynamic approximation to dynamic rupture models for strong ground motion prediction. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 94(6), 2051-2063.

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.

Hartzell, S. H. (1978). Earthquake Aftershocks as Green's Functions, *Geophys. Res. Lett.* 53, 1425—1436.

Hartzell, S., P. Liu, C. Mendoza, C. Ji, e K. M. Larson. (2007). Stability and Uncertainty of Finite-Fault Slip Inversions: Application to the 2004 Parkfield, California, Earthquake, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 97(6), 1911-1934, doi:10.1785/0120070080.

Haskell, N. A. (1964). Total Energy and Energy Spectral Density of Elastic Wave Radiation from Propagating Faults, *Bull. Seism. Soc. Am.* 54, 1811—1841.

Heaton, T. (1982). The San Fernando Earthquake: A Double Event?, *Bull. Seism. Soc. Am.* 72, 2037—2062.

Heaton, T. e Helmberger, D. (1979). Generalized Ray Models of the San Fernando Earthquake, *Bull. Seism. Soc. Am.* 69, 1311—1341.

Heelan, P. A. (1953). Radiation from a Cylindrical Source of Finite Length, *Geophysics*, 18, 685-696.

Heimann, S. (2011). A Robust Method to estimate kinematic earthquake source parameters, Universität Hamburg, PhD thesis

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.

Honda, H. (1957). The Mechanism of the Earthquakes. *Science Reports, Tohoku Univ. Ser. 5, Geophys. 9, Supplement*, 1-46.

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

Ihmlé, P. F. (1998). On the Interpretation of Subevents in Teleseismic Waveforms: The 1994 Bolivia Deep Earthquake Revisited, *J. Geophys. Res.* 103, 17919— 17932.

Jeffreys, H. (1931). On the Cause of Oscillatory Movements in Seismograms. *Monthly Notices. Roy. Astr. Soc. Geophys. Suppl.*, 2, 407-416.

Kanamori, H., & Anderson, D. L. (1975). Theoretical basis of some empirical relations in seismology. *Bulletin of the seismological society of America*, 65(5), 1073-1095.

Kasahara, K. (1963). Computer program for a fault-plane solution. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 53(1), 1-13.

Kawai, K., Takeuchi, N. & Geller, R.J., 2006. Complete synthetic seismograms up to 2 Hz for transversely isotropic spherically symmetric media, *Geophys. J. Int.*, 164, 411-424.

Kikuchi, M. e Kanamori, H. (1991). Inversion of Complex Body Waves - III, *Bull. Seis. Soc. Am.* 81, 2335—2350.

Knopoff, L. e Gilbert, F. (1960). First Motions from Seismic Sources, *Bull. Seism. Soc. Am.* 50, 117—134.

Kwiatek, G., P. Martínez-Garzón, and M. Bohnhoff (2016), HybridMT: A MATLAB/shell environment package for seismic moment tensor inversion and refinement, *Seismol. Res. Lett.*, doi:10.1785/0220150251

Lay, T., Ammon, C. J., Kanamori, H., Koper, K. D., Sufri, O., & Hutko, A. R. (2010). Teleseismic inversion for rupture process of the 27 February 2010 Chile (Mw 8.8) earthquake. *Geophysical Research Letters*, 37(13).

Li, Q., Tan, K., Wang, D. Z., Zhao, B., Zhang, R., Li, Y., & Qi, Y. J. (2018). Joint inversion of GNSS and teleseismic data for the rupture process of the 2017 M w 6.5 Jiuzhaigou, China, earthquake. *Journal of Seismology*, 22(3), 805-814.

Liner, C. (1997). *Greek Seismology - Being an Annotated Source Book of Earthquake Theories and Concepts in Classical Antiquity*, Samizdat Press, <http://samizdat.mines.edu/>.

Liu, C., Lay, T., Brodsky, E. E., Dascher-Cousineau, K., & Xiong, X. (2019). Coseismic rupture process of the large 2019 Ridgecrest earthquakes from joint inversion of geodetic and seismological observations. *Geophysical Research Letters*, 46(21), 11820-11829.

Love, A. E. (1944). *Treatise on the Mathematical Theory of Elasticity*, 4th edn, Dover Pubns.

Madariaga, R., & Olsen, K. B. (2002). Earthquake dynamics. International Geophysics Series, 81(A), 175-194.

Maruyama T. (1963). On the force equivalents of dynamical elastic dislocations with reference to the earthquake mechanism, Bulletin of the Earthquake Research Institute 41: 467–486.

Matsuzawa, T. (1926). On the Relative Magnitude of the Preliminary and the Principal Portion of Earthquake Motions. Jap. Journ. Astro. and Geophys., 4, 1-33.

Melgar, D., & Bock, Y. (2015). Kinematic earthquake source inversion and tsunami runup prediction with regional geophysical data. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 120, 3324–3349. <https://doi.org/10.1002/2014JB011832>

Mendonça, J. J. M. (1758), Historia universal dos terramotos que tem havido no Mundo, de que ha noticia, desde a sua creação até o seculo presente: com huma narraçam individual do terremoto do primeiro de Novembro de 1755... e huma dissertação phisica sobre as causas geraes dos terremotos... 1.a ed., Lisboa, Offic. de Antonio Vicente da Silva.

Nabelek, J. L. (1984). Determination of Earthquake Source Parameters from Inversion of Body Waves, PhD thesis, Mass. Inst. of Technology, Cambridge.

Nakano, H. (1923). Notes on the Nature of the Forces which give Rise to the Earthquake Motions. Seismol. Bull. Centr. Met. Obs. Japan, 1, 92-120.

Nishimura, G. (1937). On the Elastic Waves due to Pressure Variation on the Inner Surface of a Spherical Cavity in an Elastic Solid. Bull. Earthquake Res. Inst. 15, 614-635.

Okada, Y. (1992). Internal Deformation Due to Shear and Tensile Faults in a Half-Space, Bull. Seis. Soc. Am. 82, 1018—1040.

Olsen, K. B., et al. (2009). ShakeOut-D: Ground motion estimates using an ensemble of large earthquakes on the southern San Andreas fault with spontaneous rupture propagation, *Geophys. Res. Lett.*, 36, L04303, doi:10.1029/2008GL036832.

Omori, F. (1905). Similarity of seismic motions originating at neighboring centers. *Earthquake Invest. Com. Publ. (Tokyo)*, 21: 9–52.

Otarola, C., Ruiz, S., Herrera, C., Madariaga, R., & Siegel, C. (2021). Dynamic rupture of subduction earthquakes located near the trench. *Earth and Planetary Science Letters*, 562, 116842.

Prieto, G. A., Shearer, P. M., Vernon, F. L., & Kilb, D. (2004). Earthquake source scaling and self-similarity estimation from stacking P and S spectra. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 109(B8).

Pritchard, M., Norabuena, E., Ji, C., Boroscsek, R., Comte, D., Simons, M., et al. (2007). Geodetic, teleseismic and strong motion constraints on slip from recent southern Peru subduction zone earthquakes. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 112(B03307), 24.

Radiguet, M., F. Cotton, M. Vergnolle, M. Campillo, B. Valette, V. Kostoglodov, and N. Cotte. (2011). Spatial and temporal evolution of a long term slow slip event: The 2006 Guerrero slow slip event, *Geophys. J. Int.*, 184(2), 816– 828, doi:10.1111/j.1365-246X.2010.04866.x.

Reid, H. (1911). The Elastic-Rebound Theory of Earthquakes, *Bull. Dept. Geol. Sci* 6, 413—444.

Sato, Y. (1949). Boundary Conditions in the Problem of Generation of Elastic Waves. *Bull. Earthquake Res. Inst.*, 27, 1-9.

Scholz, C. H. (2002). *The Mechanics of Earthquakes and Faulting*, Cambridge University Press, Cambridge.

Sezawa, K. (1935). Elastic Waves produced by Applying Statical Force to a Body or by Releasing It from a Body. Bull. Earthquake Res. Inst., 13, 740-749.

Sezawa, K. and Kanai, K. (1932). Amplitudes of P and S-Waves at Different Focal Distances. Bull. Earthquake Res. Inst., 10, 299-334.

Shawn Larsen, Lawrence Livermore National Laboratory, E3D: 2D/3D Elastic Finite-Difference Wave Propagation Code, <http://crack.seismo.unr.edu/ftp/pub/louie/class/455/e3d/e3d.txt>.

Snoke, J. A., Lee, W. H. K., Kanamori, H., Jennings, P. C., & Kisslinger, C. (2003). FOCMEC: Focal mechanism determinations. International handbook of earthquake and engineering seismology, 85, 1629-1630.

Sokos, E., and Zahradník, J., (2008). ISOLA: a Fortran code and a Matlab GUI to perform multiple-point source inversion of seismic data, Computers and Geosciences, 34, 967-977.

Suzuki, W., Aoi, S., Sekiguchi, H. (2009). Rupture Process of the 2008 Northern Iwate Intraslab Earthquake Derived from Strong-Motion Records, Bull. Seism. Soc. Am., 99(5), 2825-2835, doi:10.1785/0120080331.

Toda, S., Stein, R.S., Sevilgen, V., Lin, J. (2011). Coulomb 3.3 Graphic-rich deformation and stress-change software for earthquake, tectonic, and volcano research and teaching—user guide: U.S. Geological Survey Open-File Report 2011–1060, 63 p., available at <https://pubs.usgs.gov/of/2011/1060/>.

Udias, A. (1999). Principles of Seismology, Cambridge University Press, London.

Udias, A. e Buforn, E. (1988). Single and Joint Fault-Plane Solutions from First Motion Data, D. Doornbos (ed.), Seismological Algorithms. Academic Press, London pp. 443—453.

- Volterra, V. (1907). Sur L'équilibre Des Corps Elastiques Multiplement Connexes, Ann. Sci. École Normal Supérieur de Paris 24, 401—517.
- Wang, C. e Herrmann, R. B. (1980). A Numerical Study of P, SV and SH Wave Generation in a Plane Layered Medium, Bull. Seism. Soc. Am. 70, 1015—1036.
- Wang, R. (1997). Tidal response of the solid earth. In H. Wilhelm, W. Zürn and H. G. Wenzel (Eds.). Tidal phenomena, Lecture Notes in Earth Sciences, Vol. 66, pp. 27-57, Springer- Verlag, Berlin/Heidelberg
- Wang, R. (1999). A simple orthonormalization method for stable and efficient computation of Green's functions. Bull. Seism. Soc. Am., 89(3), 733-741.
- Weng, H., & Yang, H. (2018). Constraining frictional properties on fault by dynamic rupture simulations and near-field observations. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 123(8), 6658-6670.
- Wollherr, S., Gabriel, A. A., & Mai, P. M. (2019). Landers 1992 “reloaded”: Integrative dynamic earthquake rupture modeling. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 124(7), 6666-6702.
- Yue, H., Zhang, Y., Ge, Z., Wang, T., & Zhao, L. (2020). Resolving rupture processes of great earthquakes: Reviews and perspective from fast response to joint inversion. Science China Earth Sciences, 63(4), 492-511.
- Zhang, H., van der Lee, S., Ge, Z. (2016). Multiarray rupture imaging of the devastating 2015 Gorkha, Nepal, earthquake sequence, Geophys. Res. Lett., 43, 584– 591, doi:10.1002/2015GL066657.
- Zhang, H., van der Lee, S., Ge, Z. (2016). Multi-array rupture imaging of the devastating 2015 Gorkha, Nepal earthquake sequence, Geophys. Res. Lett., 43, pp. 584-591, 10.1002/2015GL066657

Zhao, X., Wang, C., Zhang, H., Tang, Y., Zhang, B., & Li, L. (2021). Inversion of seismic source parameters from satellite InSAR data based on deep learning. *Tectonophysics*, 821, 229140.