

ANÁLISE DA UTILIZAÇÃO DE ONDAS MECÂNICAS PARA DETECÇÃO DE DESASTRES NATURAIS E PROSPECÇÃO DE PETRÓLEO

ANALYSIS OF THE USE OF MECHANICAL WAVES FOR NATURAL DISASTER DETECTION AND OIL PROSPECTING

ANÁLISIS DE LA UTILIZACIÓN DE ONDAS MECÁNICAS PARA LA DETECCIÓN DE DESASTRES NATURALES Y PROSPECCIÓN PETROLERA

Mitchel Wagner Xavier Silva¹
Daniel Guimarães Tedesco²

Resumo

Este trabalho aborda a importância da utilização da teoria da ondulatória em temas muito importantes para a nossa sociedade, mais precisamente na questão energética ligada a indústria do petróleo e na questão da preservação da vida associada a identificação de eventos sismológicos. Para tal, realizou-se um estudo sobre aplicações de ondas mecânicas relacionadas a equipamentos, programas e simulações computacionais voltados para a identificação de terremotos e maremotos e para aquisição de dados sísmicos na prospecção de petróleo. Conceitos teóricos e exemplos práticos foram utilizados para demonstrar a importância de uma rápida e precisa captação e identificação das ondas mecânicas associadas a abalos sísmicos, o que é fundamental para o sucesso na aplicação de medidas de segurança e contenção. Redes de monitoramento foram citadas para reforçar a importância da existência de grandes infraestruturas dedicadas à identificação dos tremores. Da mesma forma, exemplos e conceitos foram usados para descrever o processo de aquisição de dados sísmicos, onde ondas mecânicas são artificialmente geradas e depois registradas para serem processadas e interpretadas. Equipamentos utilizados para registros das ondas foram citados e descritos, tanto para identificação de tremores de terra quanto para exploração de petróleo. Simulações voltadas para uma melhor compreensão dos fenômenos e para melhorias nos procedimentos adotados foram exemplificadas para ambos os casos.

Palavras-chave: mecânica; ondulatória; ondas mecânicas; abalos sísmicos; exploração de petróleo.

Abstract

This work addresses the importance of using wave theory in very important issues for our society, more precisely in the energy issue linked to the oil industry and in the issue of preserving life associated with the identification of seismological events. To this end, a study was carried out on applications of mechanical waves related to equipment, programs and computer simulations aimed at identifying earthquakes and tsunamis and acquiring seismic data for oil prospecting. Theoretical concepts and practical examples were used to demonstrate the importance of quickly and accurately capturing and identifying the mechanical waves associated with seismic tremors, which is fundamental to the successful application of safety and containment measures. Monitoring networks were mentioned to reinforce the importance of having large infrastructures dedicated to identifying tremors. Similarly, examples and concepts were used to describe the process of seismic data acquisition, where mechanical waves are artificially generated and then recorded to be processed and interpreted. Equipment used to record the waves was mentioned and described, both for identifying earthquakes and for oil exploration. Simulations aimed at a better understanding of the phenomena and improvements in the procedures adopted were exemplified for both cases.

Keywords: mechanics; undulatory; mechanical waves; seismic tremors; oil exploration.

Resumen

Este trabajo desarrolla la importancia de utilizar la teoría ondulatoria en temas muy importantes para la sociedad, más precisamente en la cuestión energética relacionada con la industria del petróleo y en la cuestión de la

¹ Acadêmico no curso de Bacharelado em Física no Centro Universitário Internacional (UNINTER).

² Docente no Centro Universitário Internacional (UNINTER).

preservación de la vida asociada a la identificación de eventos sísmológicos. Para ello, se realizó un estudio sobre aplicaciones de ondas mecánicas relacionadas con equipos, programas y simulaciones computacionales dirigidas a la identificación de terremotos y maremotos y para adquisición de datos sísmicos en prospección de petróleo. Se utilizaron conceptos teóricos y ejemplos prácticos para demostrar la importancia de una rápida y precisa captura e identificación de las ondas mecánicas asociadas a los terremotos, lo cual es fundamental para el éxito en la aplicación de medidas de seguridad y contención. Se citaron redes de monitoreo para reforzar la importancia de la existencia de grandes infraestructuras dedicadas a la identificación de los terremotos. De la misma manera, se han utilizado ejemplos y conceptos para describir el proceso de adquisición de datos sísmicos, donde las ondas mecánicas son generadas artificialmente y luego registradas para ser procesadas e interpretadas. Se han citado y descrito equipos utilizados para registros de ondas, tanto para la identificación de terremotos como para la exploración de petróleo. Simulaciones dirigidas a una mejor comprensión de los fenómenos y para mejoras en los procedimientos adoptados fueron ejemplificadas para ambos casos.

Palabras clave: mecánica; ondulación; ondas mecánicas; terremotos; exploración de petróleo.

1 Introdução

As ondas mecânicas estão presentes em nossas vidas desde o momento em que nascemos. O simples ato de falar, por exemplo, é um processo que envolve a propagação de ondas sonoras por meio do ar. O estudo, análise e utilização de ondas mecânicas estão associados a vários avanços científicos e tecnológicos, como a invenção do telefone celular, do forno micro-ondas, dos radares, dos telescópios e aparelhos de rádio. Frequentemente, é comum dar destaque e importância apenas para invenções e aparelhos que estão relacionados à utilização de ondas eletromagnéticas, quase que desprezando as ondas mecânicas. No entanto, as ondas mecânicas e a pesquisa associada a elas têm contribuído e muito com a humanidade ao longo do tempo, por isso, são a base teórica deste trabalho (Nussenzweig, 2002)

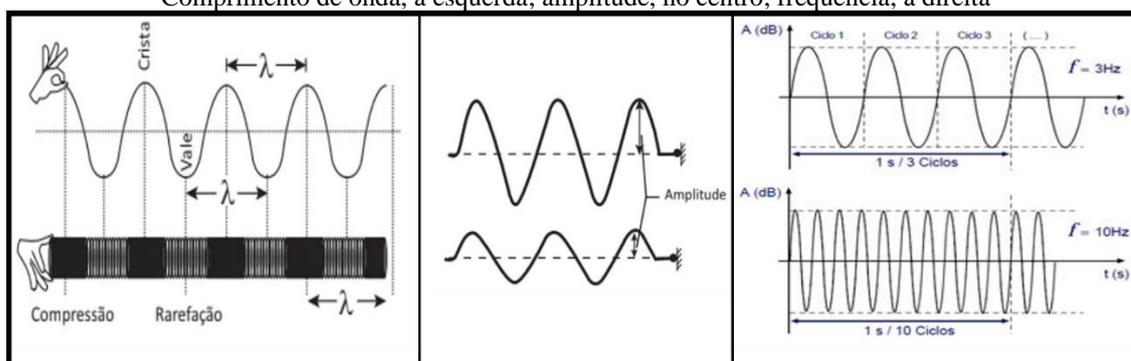
A questão da importância das ondas mecânicas na vida cotidiana é inegável. Elas estão presentes em nossas atividades cotidianas, desde a comunicação oral até a ecolocalização de animais. No entanto, é possível questionar se existem exemplos práticos relacionados à utilização do conhecimento científico associado a ondas mecânicas em questões importantes para a sociedade, como na prospecção de petróleo e na prevenção e contenção de tragédias humanitárias. Tanto a questão energética associada ao petróleo, quanto a questão da preservação da vida, são tópicos importantíssimos para a raça humana. O conhecimento e a divulgação de técnicas e teorias científicas, aqui associadas ao estudo de ondas mecânicas, empregadas para o desenvolvimento dessas questões, são fundamentais para uma melhor educação da população, para estimular a busca por novas soluções e até mesmo para incentivar a aplicação em outros cenários (Simm; Bacon, 2014; Shearer, 2019).

Ondas mecânicas, de acordo com Nussenzweig (2002) e Halliday, Resnick e Walker (2012), por definição, são aquelas que necessitam de um meio para se propagarem. Existem diversos exemplos bem conhecidos de ondas se propagando em um meio material, como, por exemplo, ondas em uma corda, ondas em uma mola, ondas do mar, ondas sonoras, ondas em

uma superfície de um lago etc. Quando as partículas do meio vibram paralelamente à direção do movimento, dizemos que é uma onda longitudinal, porém quando vibram perpendicularmente à direção do movimento, dizemos que é uma onda transversal (Halliday, Resnick; Walker, 2012).

As ondas possuem várias propriedades que ajudam a defini-las e a melhor compreendê-las, algumas dessas propriedades são: frequência (f), que é o número de ciclos completos por intervalo de tempo; período (T), que é o tempo necessário para completar um ciclo; comprimento de onda (λ), que é a distância entre duas cristas ou dois vales consecutivos; amplitude (A), que é o afastamento máximo em relação à posição de equilíbrio; velocidade de propagação (v), que é a velocidade com que a onda se propaga naquele meio específico (Nussenzveig, 2002). Na Figura 1, algumas dessas propriedades são ilustradas.

Figura 1: Ilustração de propriedades das ondas.
Comprimento de onda, à esquerda; amplitude, no centro; frequência, à direita



Fonte: Melo (2021) e Explicatorium (s. d.).

Uma equação que é bastante conhecida e utilizada no estudo das ondas (Nussenzveig, 2002), que relaciona a velocidade de propagação da onda (v), com sua frequência (f) e seu comprimento de onda (λ) é:

$$v = \lambda f \tag{1}$$

Determinados tipos de estudos e pesquisas, como modelagens e simulações, necessitam analisar o comportamento das ondas, a sua evolução temporal e a interação delas com o meio de propagação. A equação diferencial que descreve o movimento de ondas se propagando em um espaço tridimensional, de acordo com Nussenzveig (2002), é:

$$\frac{\partial^2 u(\vec{r}, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u(\vec{r}, t)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u(\vec{r}, t)}{\partial z^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 u(\vec{r}, t)}{\partial t^2} = 0 \tag{2}$$

Em que $u(\vec{r}, t)$ representa o campo de onda, t representa a coordenada temporal, c representa o módulo da velocidade da onda e o vetor \vec{r} representa as coordenadas espaciais x , y e z .

O objetivo deste artigo é apresentar e descrever conceitos e exemplos, relacionadas a equipamentos, programas e simulações computacionais, associados à aplicação da teoria das ondas mecânicas na prevenção de tragédias e prospecção de petróleo. Nesse contexto, mais especificamente, as ondas mecânicas aqui estudadas serão as ondas sísmicas, descritas com mais detalhes na seção 3. A ideia é apontar a importância da detecção de ondas sísmicas para o alerta, prevenção e minimização de danos relacionados a desastres como terremotos e tsunamis, destacar a utilização das assinaturas de ondas sísmicas para a descoberta de novos campos de petróleo e realizar comparações, quando pertinente, entre as técnicas aplicadas para prospecção de petróleo e identificação de abalos sísmicos.

2 Metodologia

A metodologia utilizada seguiu uma abordagem qualitativa baseada em pesquisa e análise bibliográfica de textos didáticos consolidados. Estudos realizados e trabalhos já existentes foram utilizados como exemplos para consolidar ideias apresentadas. Pesquisas e investigações foram realizadas em páginas de universidades, em páginas de agências especializadas e em outras páginas reconhecidas pela comunidade acadêmica do Brasil e de outros países. Livros didáticos de teoria ondulatória, sismologia e ciências da exploração de petróleo foram consultados para explicar e exemplificar conceitos científicos abordados ao longo do texto. O objetivo é fazer um resumo didático sobre o uso da ondulatória para o leitor iniciante e curioso na área.

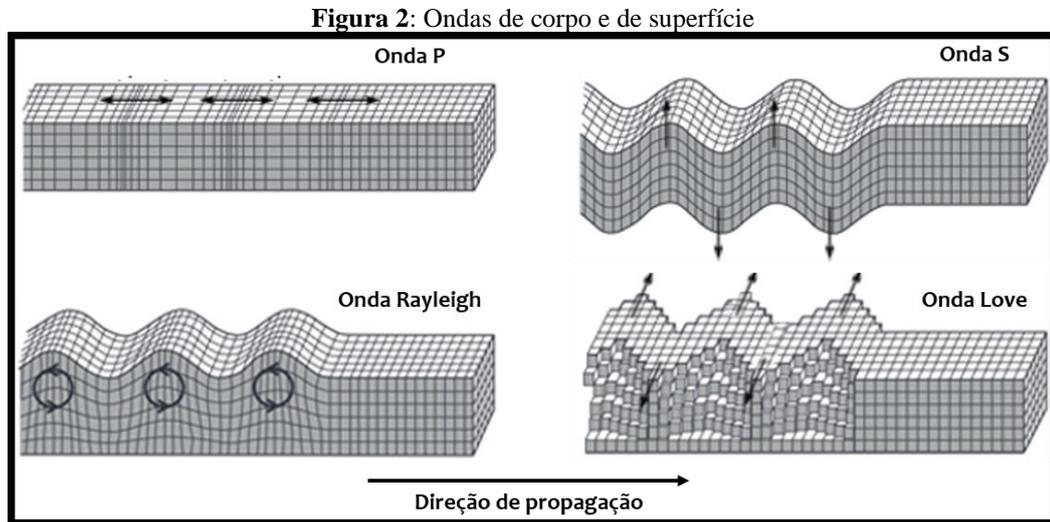
3 Ondas mecânicas aplicadas na detecção de desastres naturais e prospecção de petróleo

Nas próximas subseções serão apresentados uma visão geral da teoria e alguns exemplos da aplicação prática de ondas mecânicas, especificamente ondas sísmicas, na detecção de abalos sísmicos e na exploração de petróleo.

3.1 Introdução às ondas sísmicas

Basicamente, de acordo com Sheriff e Geldart (1995), as ondas sísmicas podem ser divididas em dois grupos principais: ondas de corpo e ondas de superfície. Ondas de corpo podem se propagar por meio da terra e de suas camadas internas, já as ondas de superfície só se propagam na superfície da terra. Existem dois tipos principais de ondas de corpo, as ondas P ou ondas compressoriais, onde as partículas do meio vibram paralelamente à direção do movimento, e as ondas S ou ondas cisalhantes, onde as partículas do meio vibram perpendicularmente à direção

do movimento. As ondas P possuem velocidades mais altas do que as ondas S, que possuem velocidades mais altas que as de superfície. As principais ondas de superfície são as ondas Rayleigh e as ondas Love. Na Figura 2, encontram-se ilustrações das ondas mencionadas.



Fonte: Santos, Catapang e Reyta (2019).

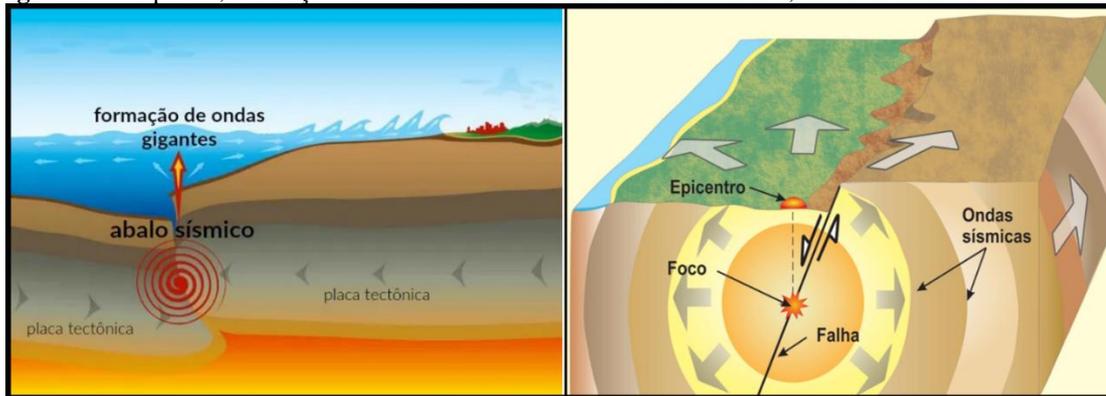
O valor das velocidades vai depender de fatores como, por exemplo, profundidade, densidade da rocha e se a rocha é mais ou menos consolidada. Valores típicos para velocidades da onda P variam de poucas centenas de metros por segundo até pouco mais de 6000 metros por segundo. Para a onda S, os valores oscilam de dezenas de metros por segundo até algo entorno de 4000 metros por segundo (Sheriff; Geldart, 1995).

3.2 Aplicação na detecção de terremotos e maremotos

Sismologia é, de acordo com Shearer (2019), o estudo de terremotos e de ondas sísmicas que se propagam através do planeta Terra. As ondas sísmicas desempenham um papel fundamental na sismologia, pois é por meio da detecção delas que é possível identificar a ocorrência de abalos sísmicos que causam terremotos na terra e maremotos no mar.

Terremotos são causados por deslocamentos de corpos rochosos em subsuperfície que, dependendo da intensidade, podem gerar movimentos grandes e bruscos na superfície. Quando acontecem sob o assoalho marinho são chamados de maremotos e podem transferir grande energia para a água, causando enorme agitação e conseqüentemente ondas gigantes, conhecidas como tsunamis. Tais deslocamentos em subsuperfície geram ondas sísmicas que, ao serem detectadas, fornecem informações importantes sobre os tremores (Figura 3). Após um abalo sísmico, as ondas que se propagam fazem, geralmente, o solo tremer com frequência entre 0.1 e 30 Hertz (USGS, 2023).

Figura 3: à esquerda, ilustração da ocorrência de um maremoto e à direita, da ocorrência de um terremoto

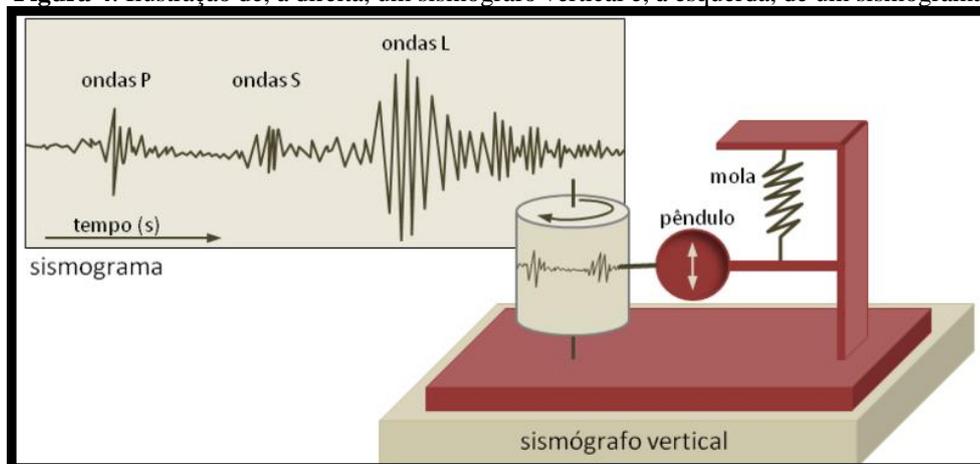


Fonte: Sousa (2023); Lima e Nascimento (2022).

3.2.1 Aparelho de detecção de abalos sísmicos

O aparelho que identifica e registra as ondas sísmicas é conhecido como sismógrafo (Figura 4) e o resultado da medição é conhecido como sismograma. Basicamente, um sismógrafo funciona com base na Lei da Inércia, identificando e registrando movimentos relativos. O aparato (Figura 4) é montado de forma que o tambor, onde fica o papel, fique imóvel. A caneta fica presa a um dispositivo contendo um pêndulo e uma mola que se desloca com o movimento do solo (UCSD, 2023). Dessa forma, a caneta marcará o papel toda vez que ocorrer um sismo detectável, registrando amplitude e tempo de duração, por exemplo. Atualmente os sismógrafos modernos possuem sistemas eletrônicos de detecção de movimento que enviam sinais para um computador. O primeiro registro da existência de um sismógrafo refere-se a um cientista chinês chamado Zhang Heng, no ano de 132 (Britannica, s. d.).

Figura 4: Ilustração de, à direita, um sismógrafo vertical e, à esquerda, de um sismograma



Fonte: Wikiciencias (2023).

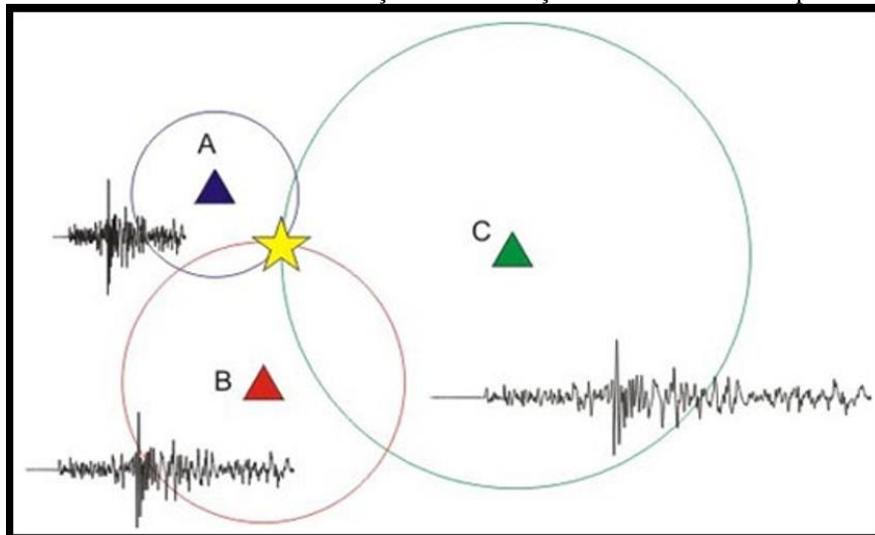
Normalmente, as ondas de superfície causam estragos bem maiores que as ondas de corpo, pois balançam e sacodem o terreno e, dependendo da intensidade, podem derrubar

prédios e até abrir crateras no solo. A magnitude de um tremor de terra é geralmente medida com base em uma escala conhecida como Escala Richter. Tal escala, desenvolvida em 1935 por Charles Francis Richter e Beno Gutenberg, é uma escala logarítmica graduada de 1 a 9, onde 1 indica tremor de baixa magnitude e 9 de alta (UFRGS, 2023). É muito difícil realizar a predição de um tremor de terra, mas é possível identificar os primeiros sinais de um abalo sísmico e, dependendo da magnitude, começar a tomar as medidas de segurança cabíveis.

3.2.2 Redes de detecção e monitoramento de terremotos e tsunamis

Os sistemas ou redes de detecção de tremores são geralmente formados por várias estações de monitoramento espalhadas por uma região e cada estação possui seu próprio sistema de sismógrafos. Quando um mesmo sinal é detectado por pelo menos três dessas estações, é possível identificar a localização de origem do tremor, conhecida como epicentro (Figura 5). Algumas destas estações são chamadas de sistema de alerta precoce, pois possuem programas e algoritmos que processam rapidamente as informações captadas pelos sismógrafos e, quando necessário, emitem sinais de alerta em tempo recorde (Caltech, s. d.).

Figura 5: Ilustração relativa à identificação do epicentro, representado pela estrela amarela, do abalo sísmico utilizando informação de três estações de monitoramento próximas.



Fonte: BGS (s. d.).

Existem grandes redes de monitoramento de terremotos ao redor do mundo. No Brasil, por exemplo, temos a Rede Sismográfica Brasileira (RSBR), que realiza o monitoramento sismográfico no país e fornece informações que auxiliam no estudo da subsuperfície (Figura 6). Felizmente para a população brasileira, dificilmente acontece algum evento de abalo sísmico relevante no Brasil, porém, infelizmente, essa não é a realidade para as populações de outras

nações, como Chile, Estados Unidos, Japão, Índia e Rússia. Os Estados Unidos e a Europa, por exemplo, possuem uma ampla rede de monitoramento de terremotos.

Figura 6: Estações de monitoramento da Rede Sismográfica Brasileira



Fonte: (RSBR, s. d.).

A existência dessas redes de monitoramento é de vital importância para humanidade, pois uma rápida e correta identificação do local e da magnitude do terremoto pode significar uma chance maior de sucesso na evacuação da população, em uma melhor efetividade no socorro às eventuais vítimas e até na aplicação de medidas de contenção para evitar danos maiores. Ou seja, para muitas pessoas, a rápida identificação desses tremores pode ser a diferença entre se manterem vivas ou não.

3.2.3 Simulações computacionais de terremotos e tsunamis

A simulação computacional é uma ferramenta importantíssima para o estudo de tremores de terra, pois permite uma melhor compreensão dos fenômenos, suas causas e consequências. Um conjunto de equações muito utilizadas para realizar a simulação numérica de terremotos e tsunamis são as equações de Navier-Stokes (Equações 3 e 4). Tais equações

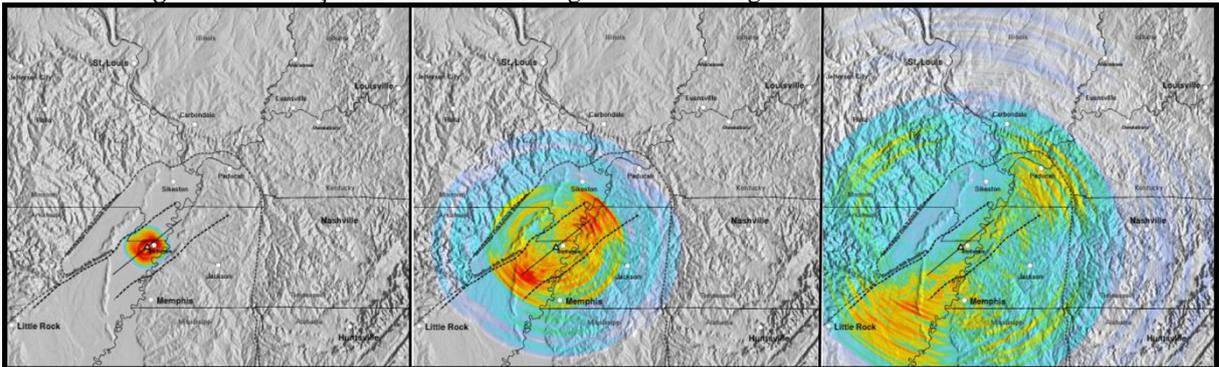
descrevem a evolução no tempo e relação entre a pressão, velocidade, temperatura e densidade de um fluido em deslocamento (NASA, s. d.) e são apresentadas a seguir:

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho(\nabla \cdot \vec{u}) = 0 \quad (3)$$

$$\rho \frac{D\vec{u}}{Dt} = \rho \vec{g} - \nabla p + \mu \nabla^2 \vec{u} \quad (4)$$

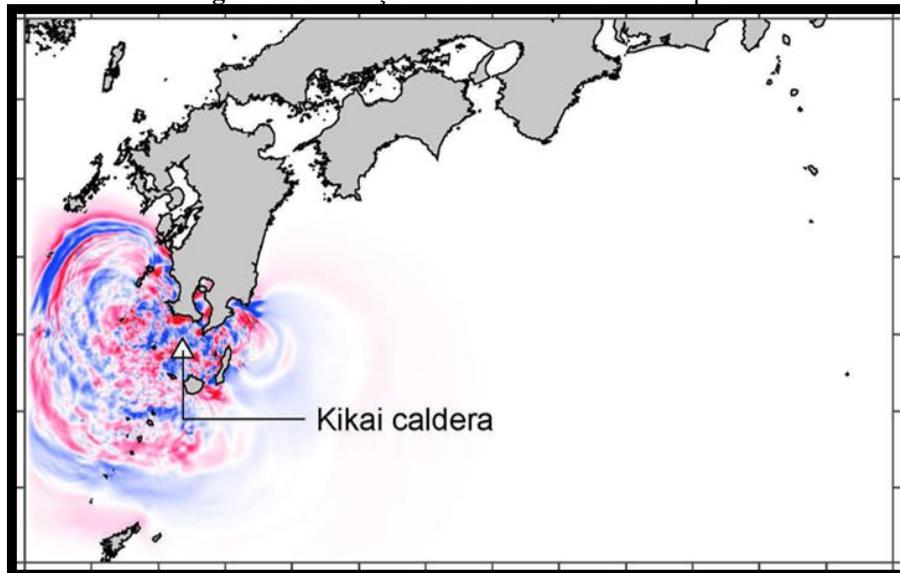
Onde a derivada expressa por D é conhecida como derivada material, \vec{u} é o vetor velocidade do fluido, ρ a densidade, \vec{g} a aceleração da gravidade, p a pressão e μ a viscosidade do fluido. Para realizar a simulação propriamente dita, as Equações 3 e 4 são resolvidas numericamente, utilizando, por exemplo, o método dos elementos finitos (Oishi *et al.*, 2013). Nas Figuras 7 e 8 são apresentados *snapshots* de simulações de terremoto e tsunami ocorrendo nos Estados Unidos e Japão, respectivamente.

Figura 7: Simulação de terremoto de magnitude 7.7 na região central dos Estados Unidos



Fonte: (USGS, 2023).

Figura 8: Simulação de tsunami na costa do Japão



Fonte: Yamada (s. d.).

3.3 Aplicação na prospecção de petróleo

A indústria do petróleo é responsável pela fabricação e disponibilização de uma grande variedade de produtos que são extremamente úteis e até fundamentais no dia a dia da sociedade. Além dos importantíssimos e amplamente conhecidos combustíveis, como gasolina, óleo diesel e querosene de aviação, o resultado do refino do petróleo é utilizado, por exemplo, na produção de garrafas PET, tecidos, fertilizantes, peças para automóveis e até medicamentos (Petrobras, 2023).

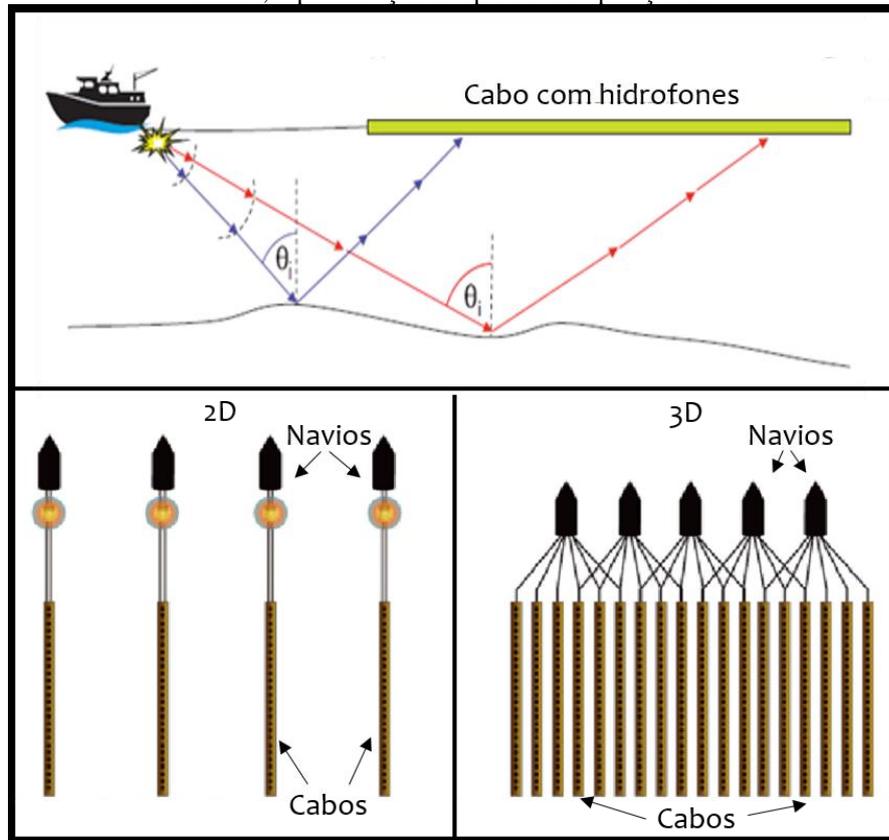
Naturalmente, ante de ser retirado dos reservatórios em subsuperfície e sem utilizado na fabricação de diversos produtos, o petróleo primeiro precisa ser encontrado. Essa etapa inicial de pesquisa e investigação de possíveis locais onde se encontram o petróleo faz parte do processo conhecido como exploração e as ondas mecânicas, mais precisamente as ondas sísmicas, desempenham um papel fundamental nesse contexto.

As ondas utilizadas na prospecção de petróleo são as ondas de corpo, principalmente as ondas compressoriais P. Após a escolha da área a ser explorada e após todos os estudos preliminares, dá-se início a fase de aquisição de dados sísmicos, podendo ser no mar ou na terra. A campanha de aquisição de dados possui uma logística bem complexa, principalmente quando feita na terra. A aquisição de dados sísmicos mais comum consiste basicamente em duas etapas:

1. primeiro, utiliza-se uma fonte explosiva, como, por exemplo, canhão de ar comprimido no mar e dinamite na terra, para gerar as ondas que irão se propagar por meio das camadas em subsuperfície. O ato de detonação da fonte é conhecido como tiro;
2. segundo, após as ondas interagirem com as camadas em subsuperfície, muitas delas são refletidas e aquelas que retornam à superfície são gravadas ou registradas (Figura 9). Esses receptores são posicionados em linhas de vários quilômetros, no caso da aquisição 2D, e em áreas de vários quilômetros quadrados, no caso de aquisições 3D (Figura 9). No mar, esses receptores ficam acoplados em imensos cabos que possuem comprimento de quilômetros.

O processo de geração e gravação das ondas é repetido por vários e vários quilômetros, cobrindo assim grandes áreas (Simm; Bacon, 2014).

Figura 9: Ilustração da aquisição de dados sísmicos no mar. No topo, desenho representando detonação da fonte e caminho percorrido pelas ondas. Na parte de baixo, à esquerda, representação de aparato de aquisição 2D e, à direita, representação de aparato de aquisição 3D



Fonte: Simm, Bacon (2014); Haan *et al.* (2015).

3.3.1 Aparelhos de registro das ondas na aquisição sísmica

O processo de registro das ondas que retornam à superfície é realizado por aparelhos conhecidos como geofones, na terra, e hidrofones, no mar. Internamente, os receptores são formados por um sistema composto por uma mola enrolada em um ímã (Figura 10). Basicamente, de acordo com Sheriff e Geldart (1995), quando a onda atinge o receptor, ela causa um pequeno deslocamento relativo entre a mola e o ímã. Esse deslocamento gera uma pequena diferença de potencial que é então registrada como a assinatura daquela onda.

Figura 10: À esquerda, um geofone; no centro, um cabo com vários hidrofones; à direita, esquematização relativa ao interior de um receptor.

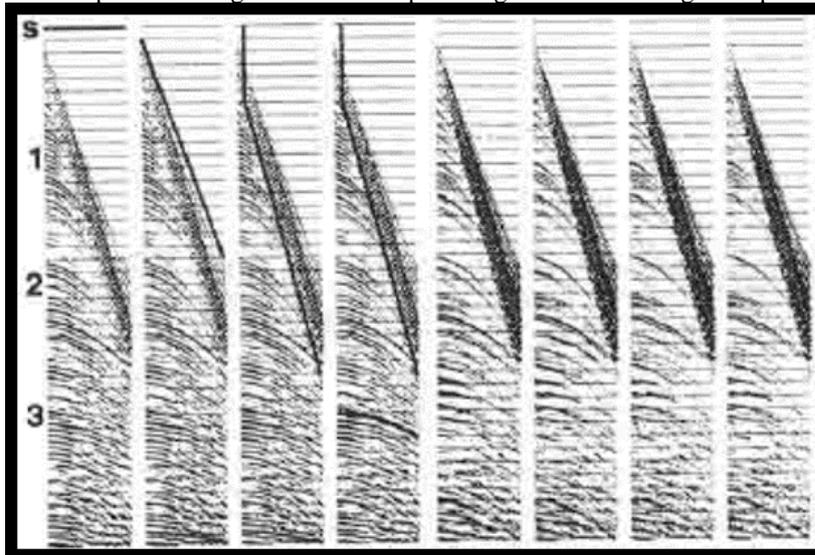


Fonte: Seis (s. d.); Csi (s. d.) e Goodlark (s. d.)

Para cada detonação de fonte, ou seja, para cada tiro dado, as ondas são registradas durante um tempo determinado, conhecido como tempo de registro, que pode ser de, por exemplo, 10 ou 12 segundos. E durante esse tempo de registro, são captadas de acordo com uma pré-determinada taxa de amostragem, por exemplo, a cada 2 ou 4 milissegundos. Assim como na detecção de ondas provenientes de terremotos, o conjunto dos dados registrados também é chamado de sismograma (Figura 11).

Dependendo da quantidade de tiros dados e do tamanho da área varrida, um processo de aquisição de dados sísmicos pode resultar em muitos milhares de sismogramas. Em uma aquisição sísmica convencional, a frequência máxima do dado registrado, sinal e ruído juntos, pode atingir algo entorno de 250 Hertz. Após processado, a frequência máxima do dado pode chegar em algo entorno de 70 Hertz (Sheriff; Geldart, 1995).

Figura 11: Exemplo de sismogramas com tempo de registro das ondas igual a quatro segundos



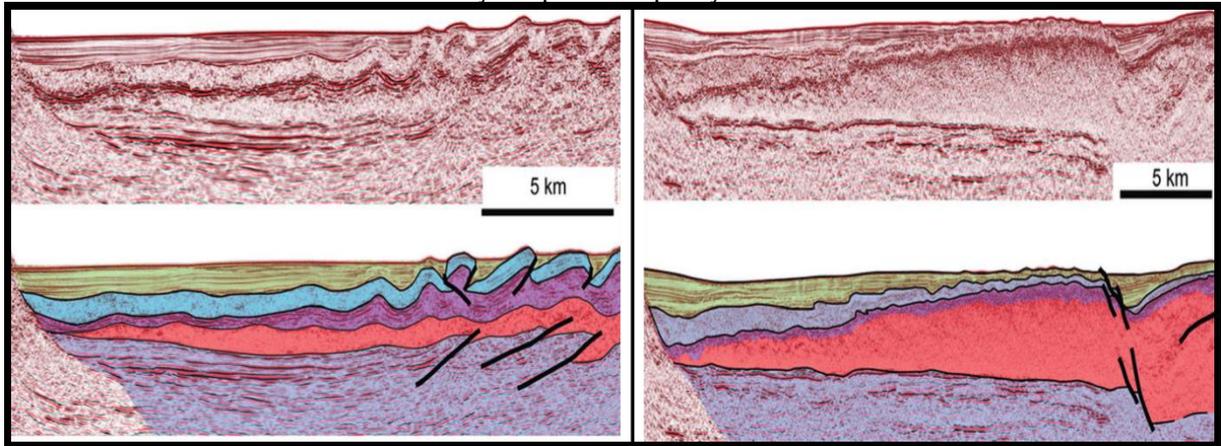
Fonte: Sheriff e Geldart (1995).

3.3.2 Processamento e interpretação dos dados registrados

Após o registro dessa imensa quantidade de dados associados às ondas sísmicas, eles são processados e depois são interpretados. O processamento dos sinais de ondas sísmicas é complexo e composto por várias etapas. No final do processamento, o resultado mais comum é a obtenção de uma “fotografia” da subsuperfície, conhecida como seção sísmica, representando as diversas camadas de rochas e outras características associadas ao interior da terra (Figura 12). Uma vez obtida essa “fotografia” da subsuperfície, ela precisa ser interpretada. O complexo processo de interpretação do dado também consiste em várias etapas, qualitativas e

quantitativas, e, basicamente, procura mapear a subsuperfície e procurar por regiões que apresentem alta probabilidade da existência de acumulação de petróleo (Figura 12).

Figura 12: Na parte de cima, exemplos de seção sísmica e, na parte de baixo, as mesmas seções após a interpretação de estruturas.



Fonte: Butler *et al.* (2014).

3.3.3 Simulação computacional de aquisição de dados

Aquisição de dados relacionados a ondas sísmicas é um processo bastante custoso e pode levar meses para ser concluído. Nesse contexto, a simulação computacional, que gera dados sísmicos sintéticos, se apresenta como uma excelente ferramenta para testar, por exemplo, novas estratégias de aquisição, novos algoritmos de processamento de dados e novas técnicas de interpretação.

Para uma simulação acústica tridimensional, com uma fonte $f(t)$ sendo detonada em determinada posição, temos a seguinte equação:

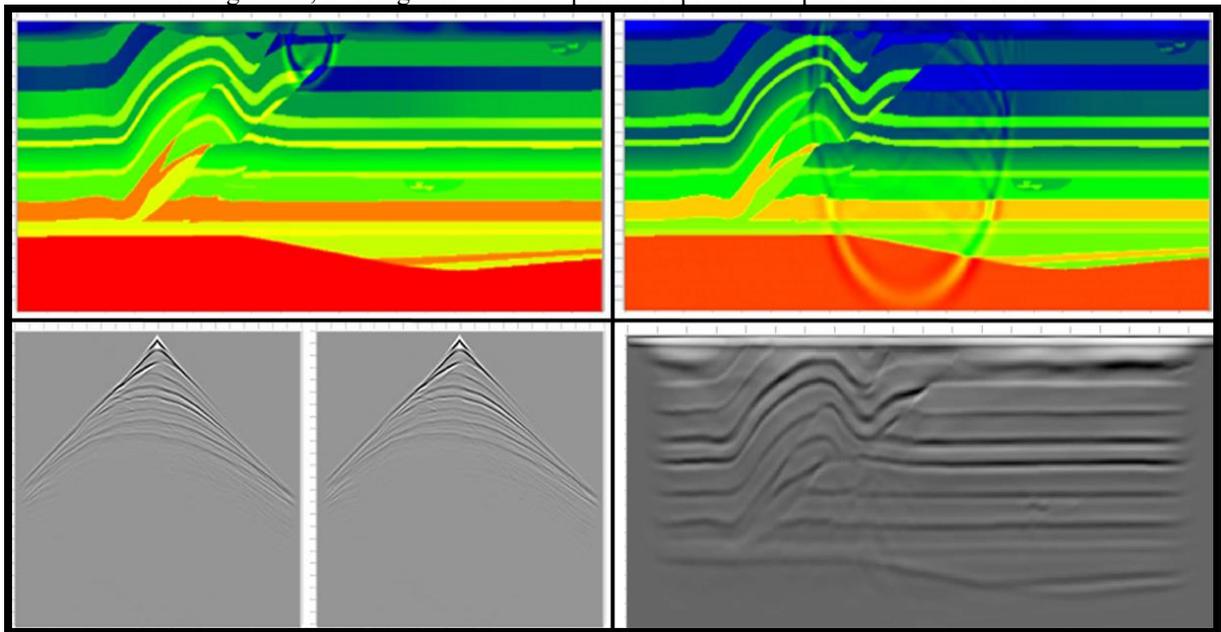
$$\frac{\partial^2 P(\vec{r}, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P(\vec{r}, t)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 P(\vec{r}, t)}{\partial z^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 P(\vec{r}, t)}{\partial t^2} = f(t)\delta(x - x_f)\delta(y - y_f)\delta(z - z_f) \quad (5)$$

Onde $P(\vec{r}, t)$ representa o campo de onda compressional, o vetor \vec{r} representa as coordenadas espaciais, t representa a coordenada temporal, c representa o módulo da velocidade e a posição da fonte é representada por x_f , y_f e z_f .

Da mesma forma que para o caso das Equações de Navier-Stokes, para realizar a simulação em si, a equação 5 é resolvida numericamente, utilizando, por exemplo, o método das diferenças finitas (Silva, 2006). Primeiro, cria-se um modelo de velocidades que represente as estruturas em subsuperfície, por onde as ondas irão se propagar. Após isso, o processo de aquisição, então, é simulado por completo, com várias fontes sendo “detonadas” em várias posições diferentes (Silva, 2009). Em cada “detonação”, a propagação e o registro das ondas

são simulados. Ao final, tem-se uma grande quantidade de sismogramas sintéticos prontos para serem utilizados em estudos de processamento e interpretação, por exemplo. Na figura 13, encontram-se exemplos do processo supracitado.

Figura 13: No topo, modelo de velocidades e *snapshots* da propagação das ondas. Na parte de baixo, à esquerda, exemplos de sismogramas sintéticos gerados e, à direita, resultado do processamento de todos os sismogramas sintéticos gerados, a “fotografia” da subsuperfície representada pelo modelo de velocidades.



Fonte: Imagens retiradas de Silva (2008).

4 Considerações finais

Ondas mecânicas fazem parte da vida cotidiana da humanidade desde os primórdios da nossa existência. Estão presentes, por exemplo, desde em uma simples conversa até o alerta de possível tempestade gerado pelo som emitido por trovões. Porém, as aplicações das teorias associadas as ondas mecânicas vão muito além das questões cotidianas, desempenhando importante papel em diversas áreas de pesquisa que são fundamentais para a sociedade. Este artigo apresentou algumas teorias e exemplos da utilização das ondas mecânicas no estudo e identificação de abalos sísmicos e na procura e identificação de acumulações de petróleo.

No caso de abalos sísmicos, ondas P e S são as primeiras a serem detectadas, mas as ondas de superfície, Rayleigh e Love, são as que causam mais impactos. A possibilidade de identificar e mensurar tremores de terra, por meio das ondas sísmicas, é extremamente importante e fundamental para a segurança da humanidade. Ficou constatado que a utilização de redes de detecção de terremotos e maremotos, locais ou globais, são cruciais para a tomada de medidas de segurança que minimizem e até evitem prejuízos maiores para sociedade. A

simulação computacional mostrou-se muito importante para uma melhor compreensão dos fenômenos associados aos abalos sísmicos.

Nos estudos de prospecção de petróleo, a onda P vem sendo amplamente utilizada para a identificação de reservatórios. Durante a campanha de aquisição de dados sísmicos, milhares e milhares de sismogramas são registrados a partir da geração e posterior captação das ondas P. Após o registro, todo esse dado é processado e depois interpretado. As simulações computacionais, da mesma forma que na sismologia, são fundamentais para que os fenômenos sejam mais bem compreendidos e para testar novas ideias associadas a aquisição, processamento e interpretação dos dados. Ou seja, as ondas P são de grande importância para a imensa e complexa indústria do petróleo.

De maneira geral ficou comprovado que, apesar das ondas eletromagnéticas serem mais famosas e badaladas, as ondas mecânicas e suas aplicações possuem sim papel importantíssimo para com a raça humana, seja sendo utilizadas em questões relativamente simples, porém importantes, seja sendo utilizadas em cenários mais complexos que são fundamentais para o funcionamento da sociedade.

Referências

BGS. **How are earthquakes detected, located and measured?** Disponível em: <https://www.bgs.ac.uk/discovering-geology/earth-hazards/earthquakes/how-are-earthquakes-detected/>. Acesso em: 21 out. 2023.

BRITANNICA. **Seismograph**. Disponível em: <https://www.britannica.com/science/seismograph/Basic-principles-of-the-modern-seismograph>. Acesso em: 21 out. 2023.

BUTLER, R. W. H. *et al.* Variations Control Deformation Patterns in Evaporite Basins: Messinian Examples, Onshore and Offshore Sicily (Italy). **Journal of the Geological Society**, [s. l.], v. 172, n. 1, p. 113-124, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1144/jgs2014-024>. Disponível em: <https://chooser.crossref.org/?doi=10.1144%2Fjgs2014-024>. Acesso em: 21 out. 2023.

CALTECH. **How do earthquake early warning systems work?** Disponível em: <https://scienceexchange.caltech.edu/topics/earthquakes/earthquake-early-warning-systems>. Acesso em: 10 set. 2023.

CSI. **Hydrophone array**. Disponível em: <https://www.csicablesupplies.com/hydrophone-array/>. Acesso em: 27 out. 2023.

EXPLICATORIUM. **Características das ondas**. Disponível em: <https://www.explicatorium.com/cfq-8/caracteristicas-das-ondas.html>. Acesso em: 04 nov. 2023.

GOODLARK. **Seismic geophone**. Disponível em:

<https://www.goodlarkproducts.com/products/gl/>. Acesso em: 27 out. 2023.

HAAN, D. *et al.* **Potential Effects of Seismic Surveys on Harbour Porpoises**. Imares Report, C126/15; IMARES Wageningen UR: IJmuiden, 2015.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos de física 2: gravitação, ondas e termodinâmica**. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

LIMA, C. C. U.; NASCIMENTO, A. F. Existem terremotos no Brasil, saiba onde e por que eles acontecem. **Revista superinteressante**, 28 out. 2022. Disponível em: <https://super.abril.com.br/coluna/deriva-continental/existem-terremotos-no-brasil-saiba-onde-e-por-que-eles-acontecem>. Acesso em: 23 out. 2023.

MELO, L. Noções de ondulatória. **Promilitares**, 13 dez. 2021 Disponível em: <https://promilitares.com.br/concursos-militares/concursos/nocoas-de-ondulatoria/>. Acesso em 04 de novembro de 2023.

NASA. **Navier-Stokes equations**. Disponível em: <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/nseqs.html>. Acesso em: 01 nov. 2023.

NUSSENZVEIG, H. M. **Curso de física básica 2: fluidos, calor, oscilações e ondas**. 4. ed., revisada. São Paulo: Edgard Blücher, 2002.

OISHI, Y. *et al.* A three dimensional tsunami propagation simulation of the 2011 off Tohoku earthquake using an unstructured finite element model. **Journal Of Geophysical Research**, [s. l.], v.118, p. 2998-3018, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1002/jgrb.50225>. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/jgrb.50225>. Acesso em: 23 out. 2023.

PETROBRAS. **Refino**: tecnologia que cria várias soluções com uma única matéria-prima. Disponível em: <https://petrobras.com.br/quem-somos/refino>. Acesso em: 20 out. 2023.

RSBR. **Rede Sismográfica Brasileira**. Disponível em: <http://rsbr.on.br/index.html>. Acesso em: 25 out. 2023.

SANTOS, J. G.; CATAPANG, A. N.; REYTA, E. D. Understanding the Fundamentals of Earthquake Signal Sensing Networks. **Revista digital Analog**, [s. l.], v. 53, n. 3, 2019. Disponível em: <https://www.analog.com/en/resources/analog-dialogue/articles/understanding-the-fundamentals-of-earthquake-signal-sensing-networks.html>. Acesso em: 25 out. 2023.

SEIS. **How to select a suitable geophone for certain seismic method?** Disponível em: <https://www.seis-tech.com/faq/select-suitable-geophone-for-seismic-method/>. Acesso em: 27 out. 2023.

SHEARER, P. M. **Introduction to seismology**. 3. ed. Cambridge: Cambridge university press, 2019.

SHERIFF, R. E.; GELDART, L. P. **Exploration seismology**. 2. ed. Cambridge: Cambridge university press, 1995.

SILVA, B. M. **Migração RTM, PSPI e SPLIT-STEP de registros de múltiplas fontes: imageamento sísmico em meios com altos contrastes de velocidade.** 2006. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2006.

SILVA, M. W. X. **Estudo da variação de parâmetros de aquisição de dados sísmicos associado ao imageamento de falhas utilizando migração reversa no tempo.** 2008. Dissertação (Mestrado em Geociência) — Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2008.

SILVA, M. W. X. **Migração reversa no tempo com diferentes condições de imagem.** 2009. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2009.

SIMM, R.; BACON, M. **Seismic Amplitude: An Interpreter's Handbook.** Cambridge University Press, 2014.

SOUSA, R. **Maremoto.** Brasil Escola. Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/geografia/maremoto.htm>. Acesso em: 25 out. 2023.

UCSD. **How do seismologists record earthquakes?** Disponível em: <https://topex.ucsd.edu/es10/es10.1997/lectures/lecture20/secs.with.pics/node4.html>. Acesso em: 21 out. 2023.

UFRGS. **Escala Richter.** Disponível em: <https://ppgenfis.if.ufrgs.br/mef004/20021/Marcelo/richter-escala.html>. Acesso em: 21 out. 2023.

USGS. **Computer Simulation of a Magnitude 7.7 Earthquake in the New Madrid Seismic Zone.** Disponível em: <https://earthquake.usgs.gov/scenarios/related/nmszM7.7.php>. Acesso em: 25 out. 2023.

WIKICIENCIAS. **Sismógrafo.** Disponível em: <https://wikiciencias.casadasciencias.org/wiki/index.php/Sism%C3%B3grafo>. Acesso em: 21 out. 2023.

YAMADA, M. **Past Tsunamis recorded in Geological Strata.** Shinshu University. Disponível em: <https://www.shinshu-u.ac.jp/faculty/science/english/quest/research/past-tsunamis-recorded-in-geological-strata.php>. Acesso em: 27 out. 2023.