

# ONDAS E TERREMOTOS<sup>†</sup>

**Antonio Carlos F. Santos, Carlos Eduardo Aguiar**

Instituto de Física, Universidade Federal do Rio de Janeiro

## Proposta pedagógica

O estudo das ondas mecânicas é base para o entendimento de diversos fenômenos naturais como o som, ondas no mar, vibrações em corpos e muitos outros. A compreensão de ondas mecânicas também é importante porque permite uma introdução simples a efeitos ondulatórios encontrados em outras áreas da física (eletromagnetismo, óptica, física moderna). Apesar de sua relevância, pouca atenção é dada às ondas mecânicas nos cursos introdutórios de física.

Um tipo especial de onda mecânica são as ondas sísmicas produzidas por terremotos. O estudo dessas ondas tem enorme importância prática: avanços na sua compreensão tornaram possível desde investigar o interior da Terra até projetar sistemas de alarme de terremotos que podem salvar milhares de vidas. Algumas dessas aplicações não necessitam mais do que alguns conceitos básicos sobre ondas mecânicas e sua cinemática, e serão desenvolvidas a seguir. Elas são um bom exemplo de como temas interdisciplinares ligados a múltiplos aspectos da atividade humana podem ser abordados em uma discussão de física elementar.

## Temas para discussão

Todo mundo já assistiu a noticiários sobre a devastação causada por grandes terremotos. Em 2004, um desses terremotos gerou um tsunami que matou mais de 250.000 pessoas em Sumatra e outros locais no oceano Índico. O maior terremoto já registrado por sismógrafos ocorreu em 1960 no Chile e destruiu várias cidades. O tsunami gerado na ocasião foi tão forte que chegou a causar mortes no Havaí e Japão, a muitos milhares de quilômetros do Chile. A enorme capacidade destrutiva dos terremotos torna importante mapear as regiões onde eles ocorrem com maior frequência. Nem sempre os terremotos ocorrem em regiões habitadas, e por isso os sismólogos desenvolveram métodos para localizar o epicentro de um terremoto a partir de observações obtidas a grande distância. Como veremos, com um pouco de conhecimento sobre propagação de ondas, estudantes de física básica podem compreender esses métodos e até calcular a localização de um dado terremoto.

### *Ondas sísmicas*

Terremotos produzem ondas que se propagam tanto pelo interior da Terra quanto pela sua superfície. Essas ondas podem percorrer grandes distâncias e chegam a atravessar o planeta. Estudando como as ondas geradas por terremotos (e outros fenômenos sísmicos como erupções vulcânicas) se propagam pela Terra, os cientistas descobriram que o interior do planeta é formado por diferentes camadas: a crosta, o manto e o núcleo. A crosta é a parte

---

<sup>†</sup> Versão original de artigo publicado em *Scientific American Brasil – Aula Aberta n. 12 (2012)*, sem as modificações introduzidos pela revista durante o processo editorial.

mais externa, com espessura de aproximadamente 5 km abaixo dos oceanos e cerca de 50 km sob os continentes. A camada seguinte é o manto, que vai até uma profundidade de 3000 km abaixo da superfície da Terra e é composto por rocha sólida. A crosta e a parte mais externa do manto formam a litosfera, que está “partida” em placas tectônicas que se movem umas em relação às outras com velocidades que vão de 10 a 100 mm/ano. A camada mais interna da Terra é o núcleo, que começa a uma profundidade de cerca de 3.000 km e tem temperatura muito elevada. A parte superior do núcleo é líquida, mas seu centro, com raio de 1200 km, é sólido.

As regiões mais susceptíveis aos terremotos estão localizadas próximas às interfaces das placas tectônicas. Dentre os países do continente sul-americano, o Peru, o Chile e o Equador, são os que mais sofrem com a incidência de terremotos. Estes países estão próximos a uma região onde duas placas tectônicas, a de *Nazca* e a *Sul-Americana*, se encontram. O Brasil está situado na parte central da placa Sul-Americana. Nesta região, os sismos possuem intensidade baixa. Porém, isto não significa que terremotos não ocorram no Brasil. Em geral, ocorrem pequenos terremotos que têm origem nos desgastes na placa tectônica, causando falhas. Há falhas tectônicas em todo o território brasileiro gerando terremotos de pequena magnitude, a maioria imperceptível por nós.

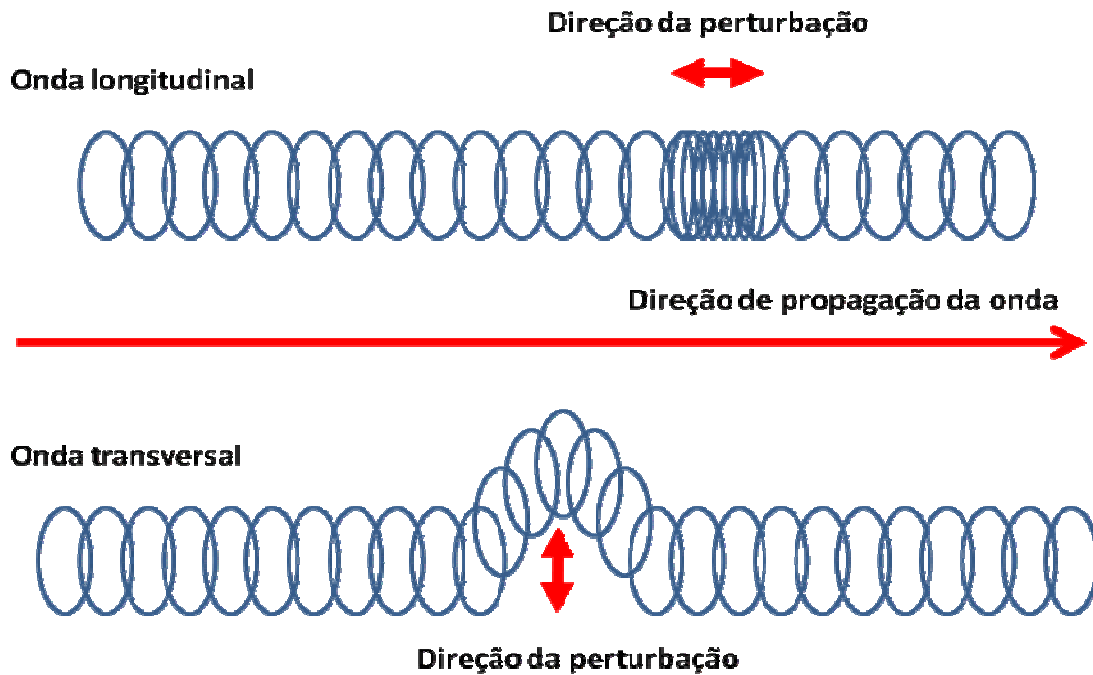
As ondas geradas por um terremoto são ondas mecânicas. Basicamente, são deformações elásticas que se propagam pelo interior da Terra transportando energia. Não há, porém, um deslocamento efetivo do meio que é atravessado pela onda, ou seja, não há transporte de massa. Durante a passagem de uma onda cada partícula do meio efetua um movimento oscilatório em torno da sua posição de equilíbrio. Dependendo da direção de vibração ou perturbação, podemos classificar as ondas mecânicas em transversais ou longitudinais. Nas ondas transversais, as perturbações ocorrem na direção perpendicular à direção de propagação da onda, tal como ocorre em uma corda esticada. Por outro lado, nas ondas longitudinais, a perturbação ocorre na mesma direção de propagação da onda. A Fig. 1 ilustra esses dois tipos de onda.

As ondas sísmicas de um terremoto podem ser tanto transversais quanto longitudinais. Além disso, existem vários tipos de ondas sísmicas. Algumas se movem no interior da Terra (as chamadas ondas de corpo ou de volume), outras pela superfície. Analogamente à luz que pode ter sua trajetória alterada pela refração, os percursos das ondas de corpo também podem ser distorcidos, dependendo das propriedades do meio por onde se propagam.

Dentre as ondas que se movem no interior da Terra, as *ondas primárias* (ou ondas P) são as mais rápidas, com velocidades da ordem de 10 km/s. As ondas P são ondas longitudinais ou de compressão, tal como as ondas sonoras. Essas ondas podem se propagar através de sólidos e fluidos. Ao se deslocar através da Terra, as ondas P comprimem e distendem as rochas ao longo da direção em que se propagam. Por serem de natureza longitudinal, as ondas P de um terremoto não costumam provocar muitos danos.

As *ondas secundárias* (também chamadas ondas S ou ondas de cisalhamento) constituem um outro tipo de onda de corpo, que se propaga no interior da Terra. Ao contrário das ondas P, as ondas S são transversais, deformando as rochas na direção perpendicular à direção de propagação, tal como uma onda oceânica. As ondas S viajam um pouco mais devagar do que as ondas P, e só se propagam através dos sólidos, uma vez que fluidos não suportam forças de cisalhamento. Elas costumam ser mais intensas e destrutivas que as ondas P.

Além das ondas de corpo, terremotos também geram ondas que se movem ao longo da superfície da Terra. Há dois tipos de ondas de superfície, as ondas L e R, e elas são as responsáveis pela maior parte da destruição causada por um terremoto. As ondas de superfície são mais lentas das ondas sísmicas, o que significa que elas chegam por último. Elas podem percorrer distâncias enormes; ondas de superfície geradas por grandes terremotos dão várias voltas na Terra antes de se dissiparem.

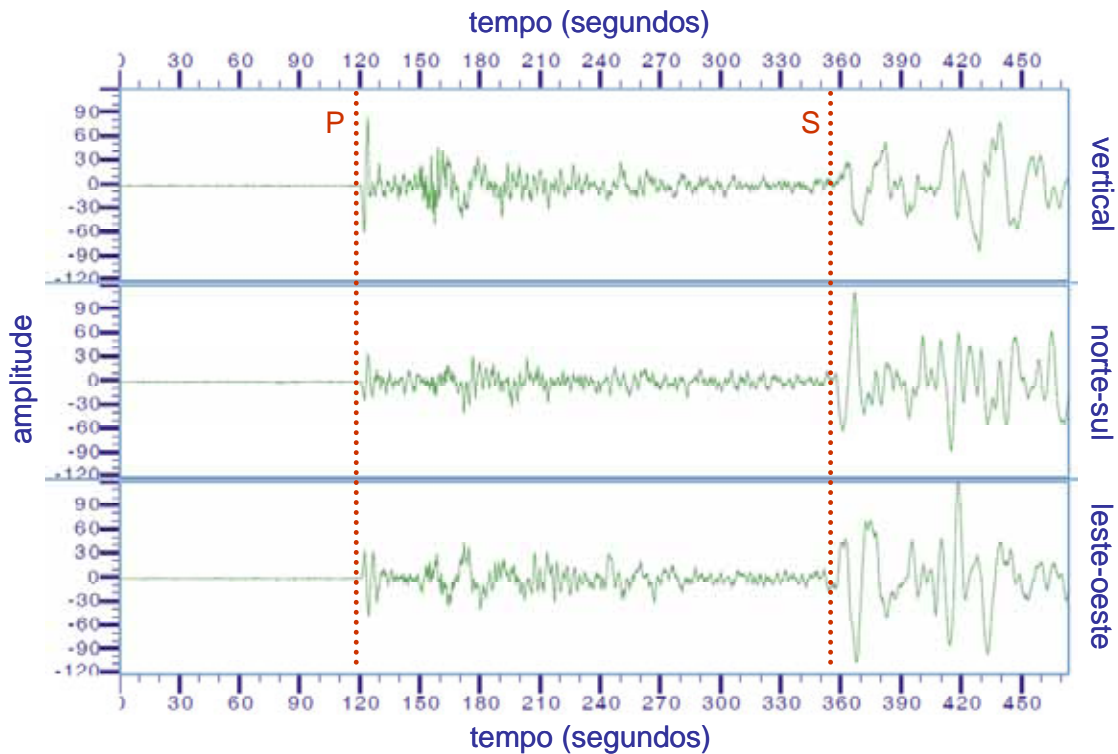


**Figura 1.** Classificação das ondas quanto à direção da perturbação.

#### *Como localizar um terremoto*

As velocidades das ondas P e S variam dependendo do meio por onde elas se propagam. Isso significa que essas ondas sofrem refrações e reflexões no interior da Terra, e portanto não é simples calcular quanto tempo elas levam para chegar a um dado ponto na superfície. No entanto, se esse ponto não estiver muito longe do epicentro do terremoto – menos de 3.000 km, digamos – é possível supor, com boa precisão, que as ondas P se propagam com velocidade  $V_P = 8$  km/s e as ondas S com  $V_S = 4,5$  km/s. Como mostraremos a seguir, com esses valores podemos determinar a que distância ocorreu o terremoto.

A Fig. 2 mostra o registro (sismograma) de um terremoto de magnitude 7,2 ocorrido em 2011 na fronteira entre Brasil e Peru. Os dados foram obtidos por um sismógrafo (um detetor de ondas sísmicas) localizado na Nicarágua. Os três gráficos mostram o deslocamento causado pelo tremor nas direções vertical, norte-sul e leste-oeste. Podemos notar que dois tipos de onda chegam ao sismógrafo: primeiro vêm as ondas P, de pequena amplitude e alta frequência, e em seguida surgem as ondas S, com amplitude maior e frequência menor. Os instantes de chegada dessas ondas estão indicados nos gráficos.



**Figura 2.** Terremoto de magnitude 7,2 ocorrido em agosto de 2011 na fronteira Brasil-Peru, registrado por um sismógrafo na Nicarágua.

Um pouco de cinemática é suficiente para calcular a distância  $D$  entre o foco do terremoto e o sismógrafo que o registrou. O tempo que as ondas P levam para chegar ao sismógrafo é  $T_P = D / V_P$ ; as ondas S chegam em  $T_S = D / V_S$ . A diferença entre os tempos de chegada das duas ondas,  $\Delta T = T_S - T_P$ , que pode ser medida diretamente no sismograma (é o intervalo entre as duas linhas verticais traçadas) é então

$$\Delta T = \frac{D}{V_S} - \frac{D}{V_P} = D \frac{V_P - V_S}{V_P V_S}.$$

Daí obtemos que a distância é

$$D = \frac{V_P V_S}{V_P - V_S} \Delta T,$$

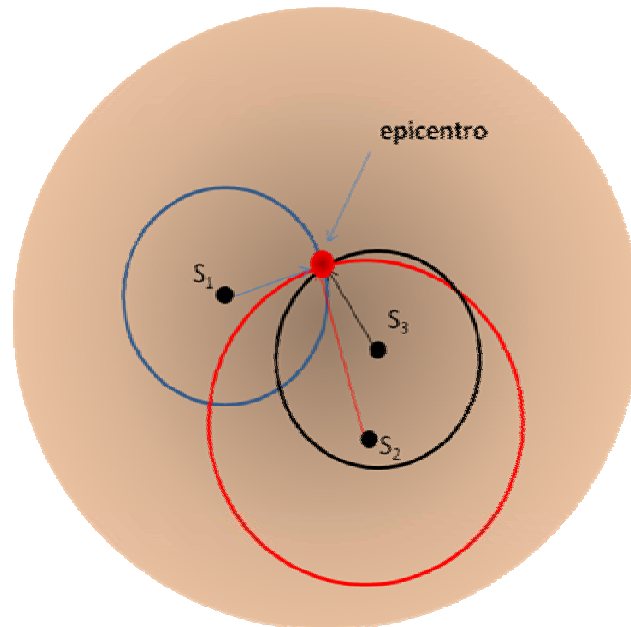
e usando os valores mencionados acima para  $V_P$  e  $V_S$  obtemos finalmente que

$$D \approx (10 \text{ km/s}) \Delta T.$$

Com esse resultado podemos calcular a que distância da estação sísmica ocorreu o terremoto. No caso da Fig. 2 temos do gráfico que  $\Delta T \approx 240$  s, de modo que o epicentro estava a uma distância  $D \approx 2400$  km da estação sísmica nicaraguense. Cálculos mais precisos mostraram que a distância exata foi de 2.460 km, de modo que nossa estimativa cinemática teve uma precisão bem razoável, de aproximadamente 2%.

A distância do epicentro ao sismógrafo não é suficiente para determinar o local do terremoto – ele pode ter ocorrido em qualquer ponto sobre um círculo de raio  $D$  com centro na estação sísmica. Para localizar o epicentro precisamos de informações vindas de três ou mais estações. Conhecendo as distâncias do epicentro a três sismógrafos, uma triangulação simples

permite encontrar o local do terremoto. O procedimento está ilustrado na Fig. 3. Em um mapa desenhamos um círculo em torno cada sismógrafo, com raio igual à distância  $D$  determinada pela análise de seu sismograma. Os três círculos devem se cruzar na região onde ocorreu o terremoto.



**Figura 3.** Localização do terremoto a partir da distância do epicentro a três sismógrafos  $S_1$ ,  $S_2$  e  $S_3$ .

Como vimos, um pouco de cinemática e algumas informações sobre ondas mecânicas são suficientes para calcular a que distância de um sismógrafo ocorreu um terremoto. Sismogramas de terremotos recentes (ou antigos, mas particularmente grandes) podem ser encontrados na internet, por exemplo em <http://rev.seis.sc.edu>. Eles tornam possível realizar análises como as descritas acima em muitas situações diferentes. Esses exercícios podem ser entendidos sem grande dificuldade por alunos do ensino médio, e ilustram muito bem como conceitos elementares de física podem ser aplicados com sucesso a problemas interdisciplinares de enorme importância prática.

### Sugestões de leitura

- John McCloskey, *The physics of an earthquake*, Physics Education v. 43, n. 2, p. 136 (2008).
- Marcus Lacerda Santos, *Tsunami, que onda é essa?* Física na Escola, v. 6, n. 2, p. 8 (2005).
- Fernando Lang da Silveira e Maria Cristina Varriale, *Propagação das ondas marítimas e dos tsunamis*, Caderno Brasileiro de Ensino de Física, v. 22, n. 2, p. 190 (2005).
- IRIS - Incorporated Research Institutions for Seismology, <http://www.iris.edu>