

A Fig. 1.1 mostra como se propagam as ondas sísmicas P e S. Neste exemplo, as ondas se propagam na direção x . Cada partícula do meio se desloca (vibra) durante a passagem da onda. O deslocamento de cada partícula na onda P é paralelo à direção de propagação (a onda P é **longitudinal**) e o deslocamento das partículas na passagem da onda S é perpendicular à direção de propagação (a onda S é **transversal**).

Note também que durante a passagem das ondas sísmicas, o meio se deforma, como pode ser observado pelo cubinho pintado. Há dois tipos principais de deformação: volumétrica (o volume do cubinho é alterado pela passagem da onda) e cisalhante (apenas a forma é alterada, o volume permanece constante). Cada um desses tipos de deformação está associado à uma forma diferente de tensão. A deformação volumétrica é causada por tensões compressivas e distensivas. A deformação de forma, por sua vez, é gerada por tensões cisalhantes. As ondas sísmicas, portanto, propagam não apenas vibrações, mas também deformações, tensões e energia.

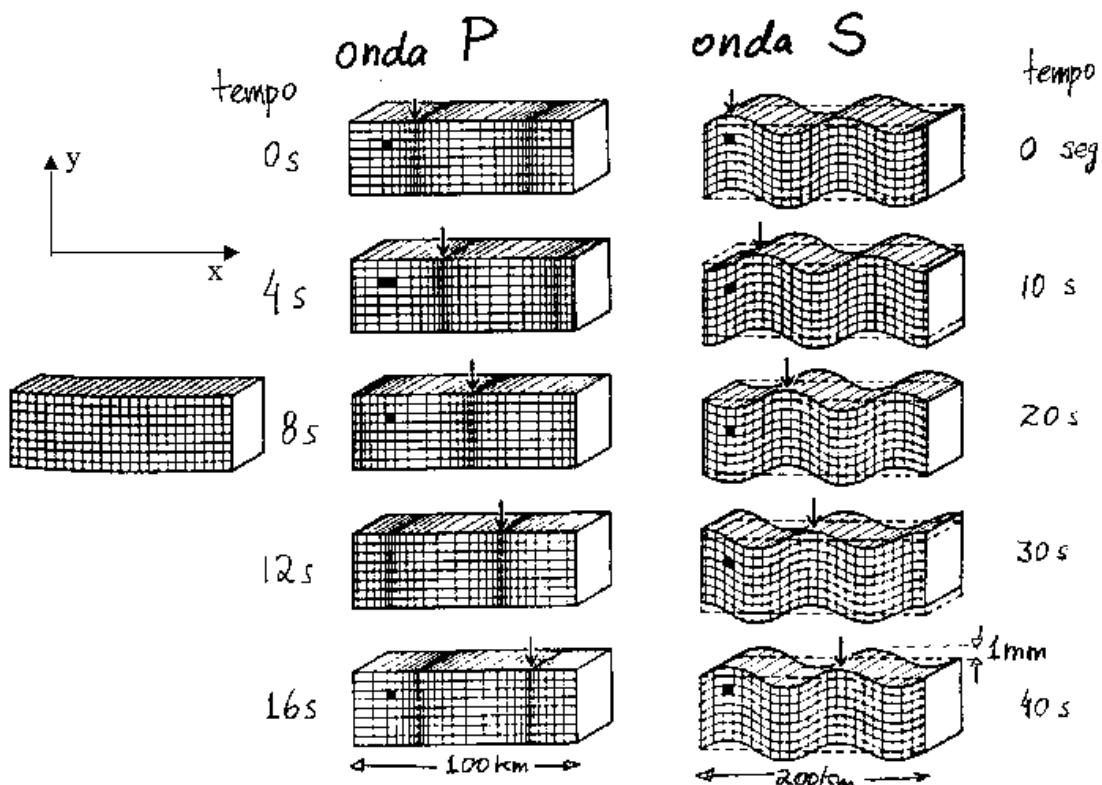


Fig. 1.1. Ondas P e S propagando-se em um meio elástico na direção x . O bloco da esquerda mostra o meio sem ondas e sem deformação. As colunas das ondas P e S mostram as posições das partículas e a deformação do meio em cinco instantes diferentes. A seta indica a propagação da onda.

Os parâmetros necessários para definir a onda são:

Amplitude: A oscilação máxima que as partículas do meio por onde a onda se desloca experimentam. Nos sismogramas, a amplitude pode representar o deslocamento da partícula, sua velocidade ou sua aceleração.

Velocidade de propagação: Velocidade com que a energia se propaga pelo meio (não confundir com a velocidade de movimentação das partículas).

Período: Tempo necessário para que uma partícula do meio complete um ciclo completo de movimentação e retorne para sua posição original.

Frequência: Número de ciclos que uma partícula completa por unidade de tempo (inverso do período).

Comprimento de onda: Distância que a onda percorre em um período.

Há uma relação muito importante entre três das grandezas acima: $v = \lambda f$, onde v é a velocidade de propagação, λ é o comprimento de onda e f é a frequência.

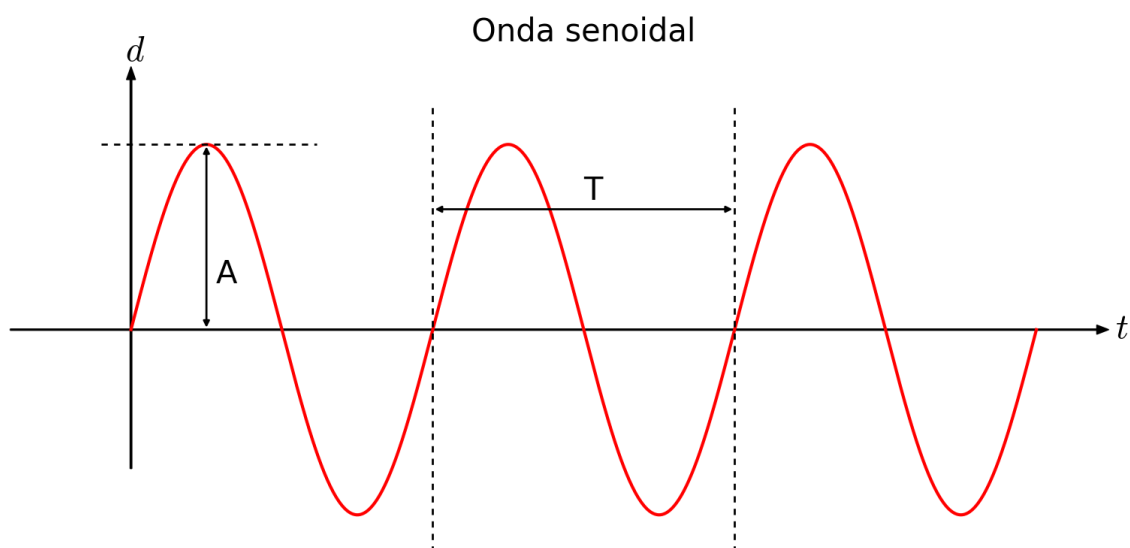


Fig. 1.2. Onda senoidal com indicação de sua amplitude (A) e período (T). O eixo vertical representa o deslocamento da partícula (d) ao longo do tempo (t).

Exercícios

1. Qual a velocidade de propagação da onda P e da onda S na Fig. 1.1? Qual o comprimento de onda em cada caso? E o período?
2. Examine o comportamento do cubinho pintado e diga qual o tipo de deformação que o meio sofre na onda P e na onda S. Quais os tipos de tensões correspondentes? Há variação de volume na onda P? E na onda S?
3. Imaginem uma onda P com formato senoidal, frequência de 20 Hz e amplitude máxima é de $2 \mu\text{m}$ (i.e., valores de amplitude variando entre $-2 \mu\text{m}$ e $2 \mu\text{m}$).

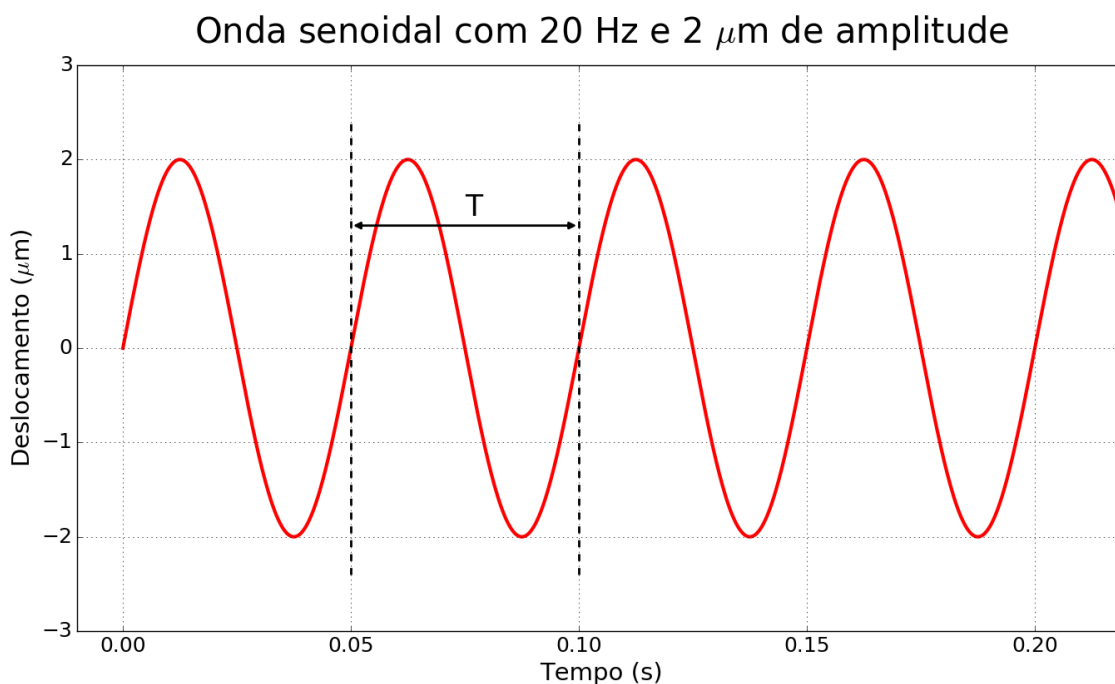


Fig. 1.3. Representação da onda incidente.

Vamos, agora, estudar como seria o deslocamento do solo por onde ela passasse e como representá-lo através de um sismograma.

Exemplo: Suponha, inicialmente, que ela estivesse se propagando na direção de y , e que tentássemos representá-la pelos deslocamentos vertical (dy) e horizontal (dx) que causa nas partículas.

Neste caso, em dx , todos os valores seriam nulos (lembre-se que a onda P é longitudinal e, portanto, só gera movimento na direção de propagação) e, em dy , teríamos uma senoide com amplitude $2 \mu\text{m}$ e frequência de 20 Hz, como representa a figura 1.4:

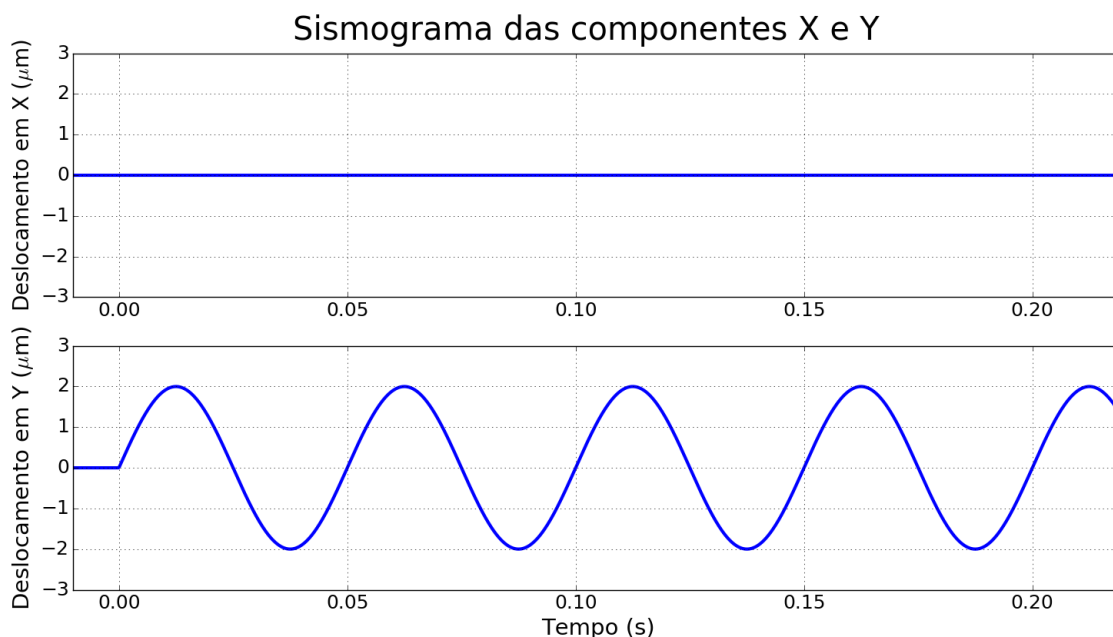
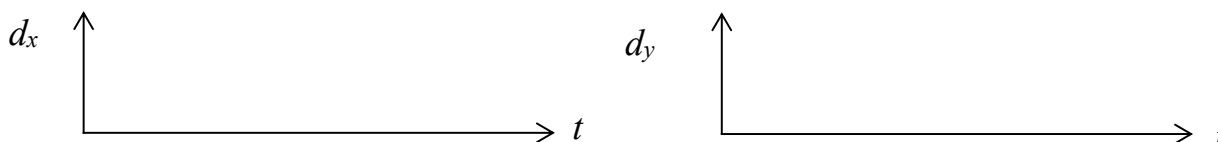


Fig. 1.4. Representação do deslocamento da partícula no local à medida que o tempo passa. Neste caso, escolhemos o instante zero para representar o momento que a onda foi detectada na estação sismográfica.

3.a. Agora faça você mesmo. Suponha que a onda P (longitudinal) viaja na direção x. Como seriam os deslocamentos nos eixos dx e dy em função do tempo?

Obs: Não é necessário fazer a onda completa, ou seja, apenas um período já está ok.



3.b. O que ocorreria se a onda se propagasse em uma direção intermediária (nem vertical e nem horizontal)? Ainda teríamos uma das componentes nulas? Admita que a propagação ocorra em uma direção 30° inclinada em relação a vertical (veja a figura 1.5), quais seriam as máximas amplitudes do movimento em cada componente? Desenhe como seriam os deslocamentos dx e dy , representando as amplitudes nos sismogramas.

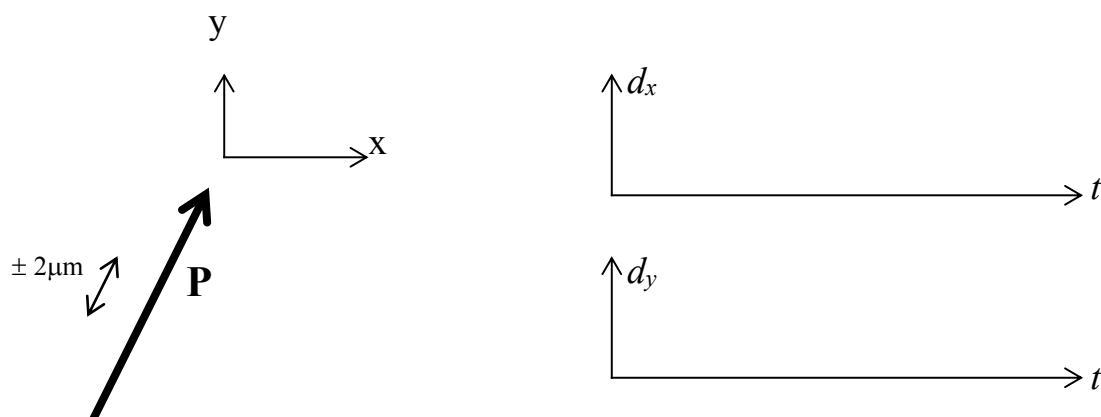


Fig. 1.5. Representação esquemática de uma onda longitudinal propagando-se em uma direção inclinada.

3.c. Estime a ordem de grandeza da velocidade com que as partículas se moveriam (não confundir com velocidade de propagação).

4. Voltando à figura 1.1, examine um canto qualquer do cubinho durante a passagem da onda P e faça um gráfico do movimento de partícula em função do tempo (desenhe um sismograma). Chame o deslocamento da partícula de \mathbf{d} (vetor) cujas componentes são (d_x, d_y) . Para a onda P use uma amplitude máxima arbitrária qualquer. Faça o mesmo para a onda S. Note que a amplitude máxima do deslocamento da onda S é indicada na Fig. 1.1 como 1 mm. No caso da onda S, use a linha tracejada como referência para a situação sem deformação. Nos dois casos indique o período da onda nos seus sismogramas.

5. Os sismogramas abaixo (Fig. 1.6) foram registrados por uma estação sismográfica em Valinhos, SP, e mostram as três componentes do movimento do chão (componentes vertical, horizontal EW e horizontal NS). As ondas vieram de um terremoto do norte da Argentina ocorrido em janeiro de 1997 com magnitude 6,4 m_b .

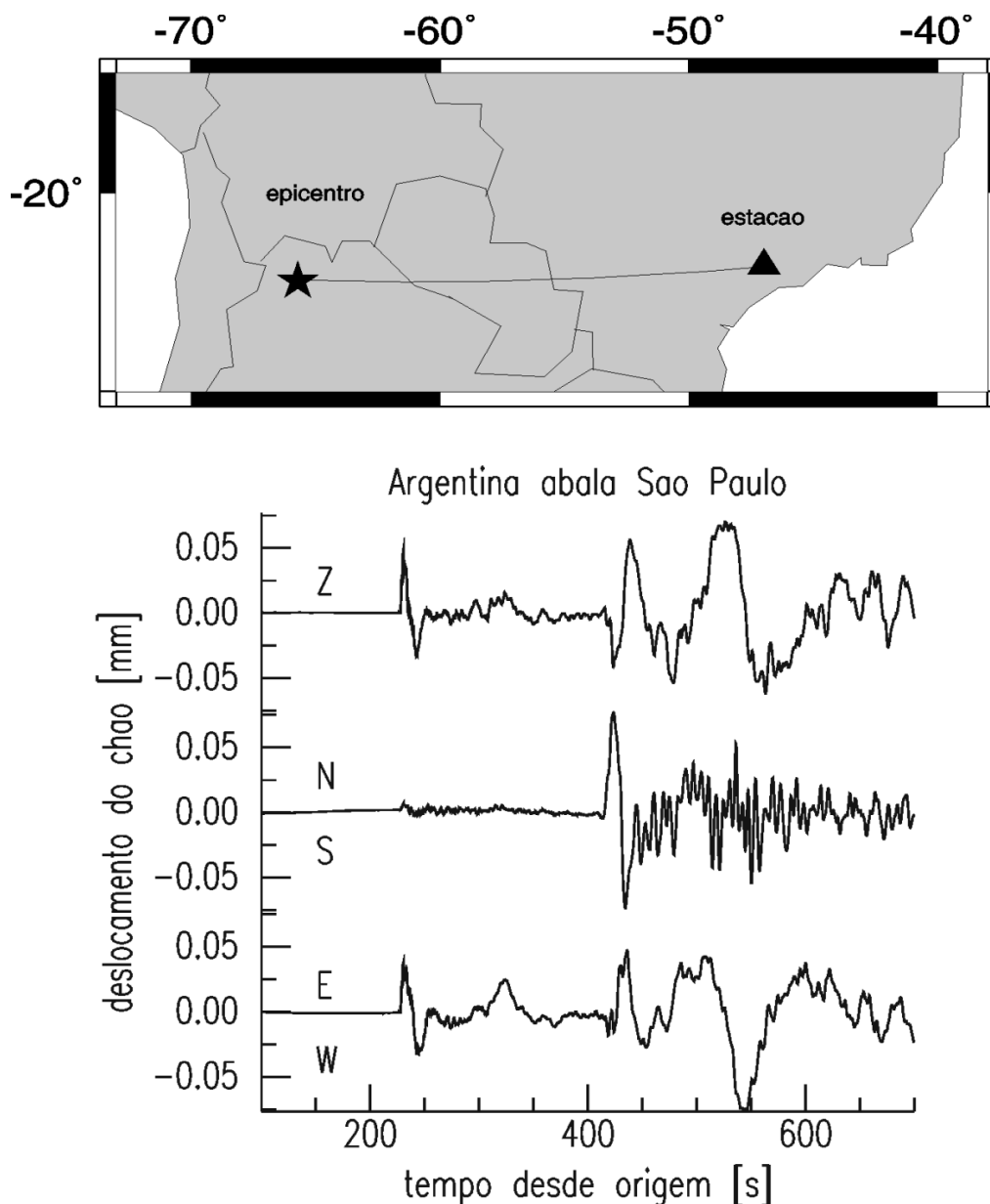


Fig. 1.6. Três componentes do movimento do chão registrado em Valinhos. Na componente Z, deslocamento positivo significa movimento do chão para cima. Nas horizontais, amplitudes positivas significam sentido Norte e Leste, respectivamente. As vibrações deste sismo foram sentidas em São Paulo nos andares superiores de vários edifícios, num fenômeno já ocorrido dezenas de vezes anteriormente.

Exemplo 1: Utilizando o sismograma da figura 1.7, construa o diagrama do movimento de partícula para as componentes horizontais NS e EW e para a componente vertical com uma das horizontais.

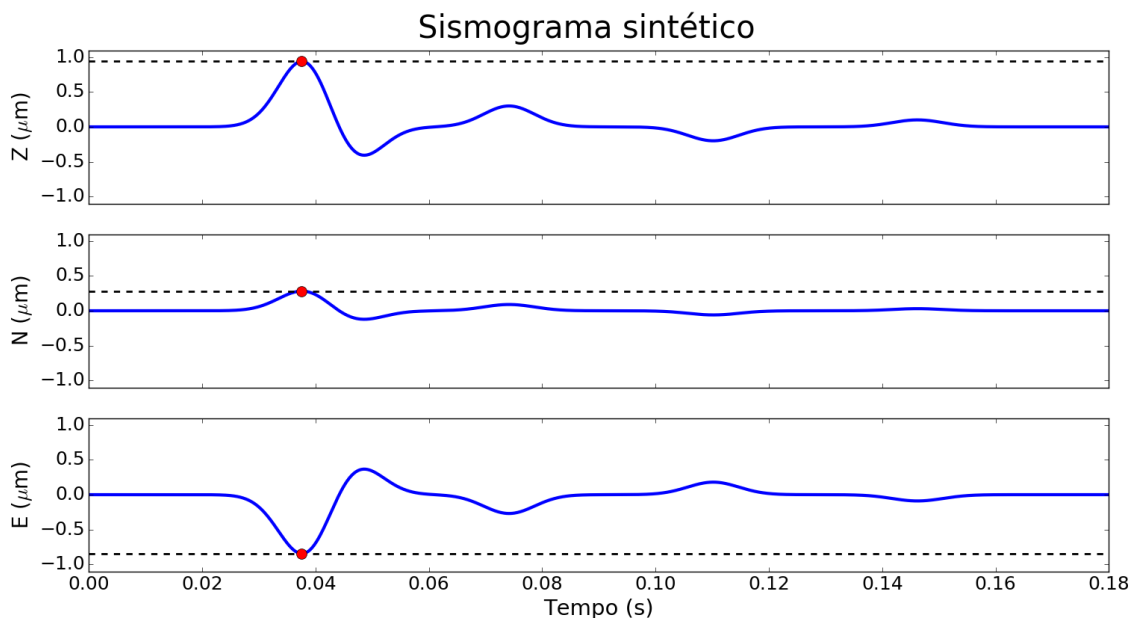


Fig. 1.7. Três componentes do movimento do chão para um sismo fictício.

Diagramas do movimento de partícula

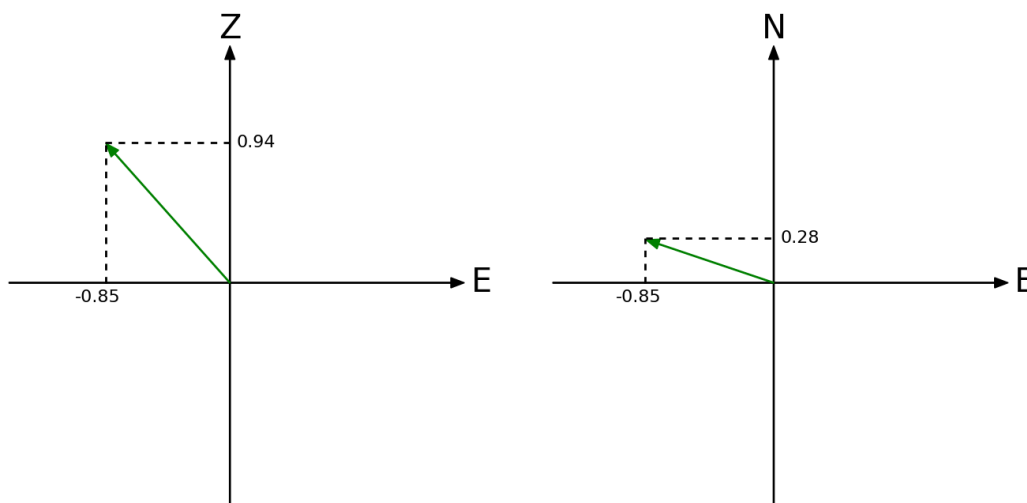


Fig. 1.8. Diagrama do movimento de partícula para a primeira onda registrada no sismograma da figura 1.7, para o instante 0,038 s.

- a) Utilizando a figura 1.6, faça a composição do movimento do solo para a primeira onda e demonstre que ela é uma onda longitudinal (i.e., onda P). Isto é, combine as duas componentes horizontais (NxE) e faça o diagrama de movimento de partícula entre 220 s e 280 s.

Repita para as componentes vertical e EW (ZxE). Analise os dois diagramas e mostre que a oscilação das partículas na onda P é paralela à direção de propagação da onda.

- b) Onde você identificaria a chegada da onda S (onda Transversal, ou seja, perpendicular à direção de propagação)? Por que?

Exemplo 2: Tendo os diagramas de movimento de partícula ZxE e NxE e sabendo-se que a onda P é longitudinal (oscilação paralela à propagação), conseguimos estimar a posição do epicentro em relação à estação sismográfica.

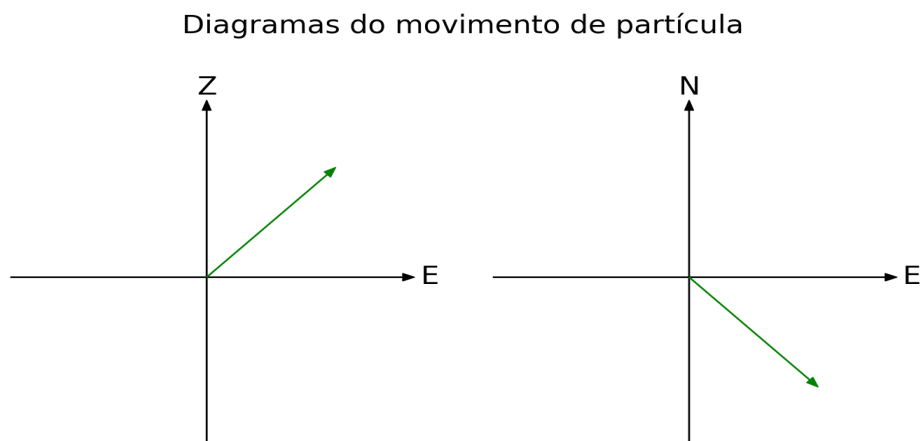


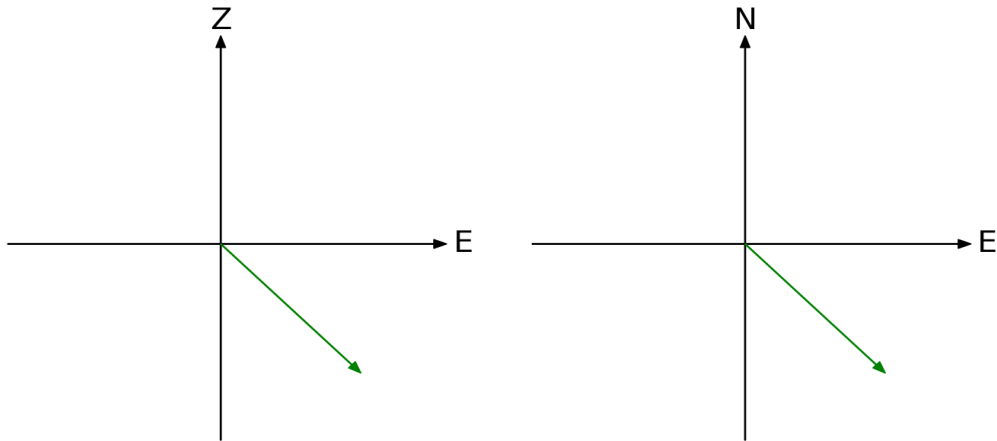
Fig. 1.9. Diagramas do movimento de partícula no plano ZE (à esquerda) e NE (à direita).

Na Fig 1.9 (à esquerda) a partícula se movimenta para cima e para leste, ou seja, um “empurrão” direcionado a leste (porque as ondas vêm pelo interior da Terra e chegam à estação vindo de baixo para cima!). Analisando o digrama das componentes horizontais (à direita). temos que o solo se movimento para sul e leste, logo para sudeste (SE).

Tendo em mente que a) estamos trabalhando com a onda P, e b) que a onda deu um “empurrão” para SE, ou seja, o sismógrafo foi empurrado para SE. Podemos concluir que a fonte está a noroeste (NW) da estação.

6.a. Agora é com você. Tendo os diagramas abaixo, em que direção está a fonte?

Diagramas do movimento de partícula



6.b. Os sismogramas abaixo (Fig. 1.10.) mostram as ondas P, S e as de superfície (Love e Rayleigh) de um sismo a 3570 km de distância de uma estação em Poços de Caldas, MG. Analise a vibração da onda P e determine a direção do epicentro (i.e. faça o diagrama de movimento da partícula no plano horizontal EW-NS, e no plano vertical-NS). Os sismogramas foram deslocados verticalmente e, portanto, a escala de amplitudes é apenas relativa.

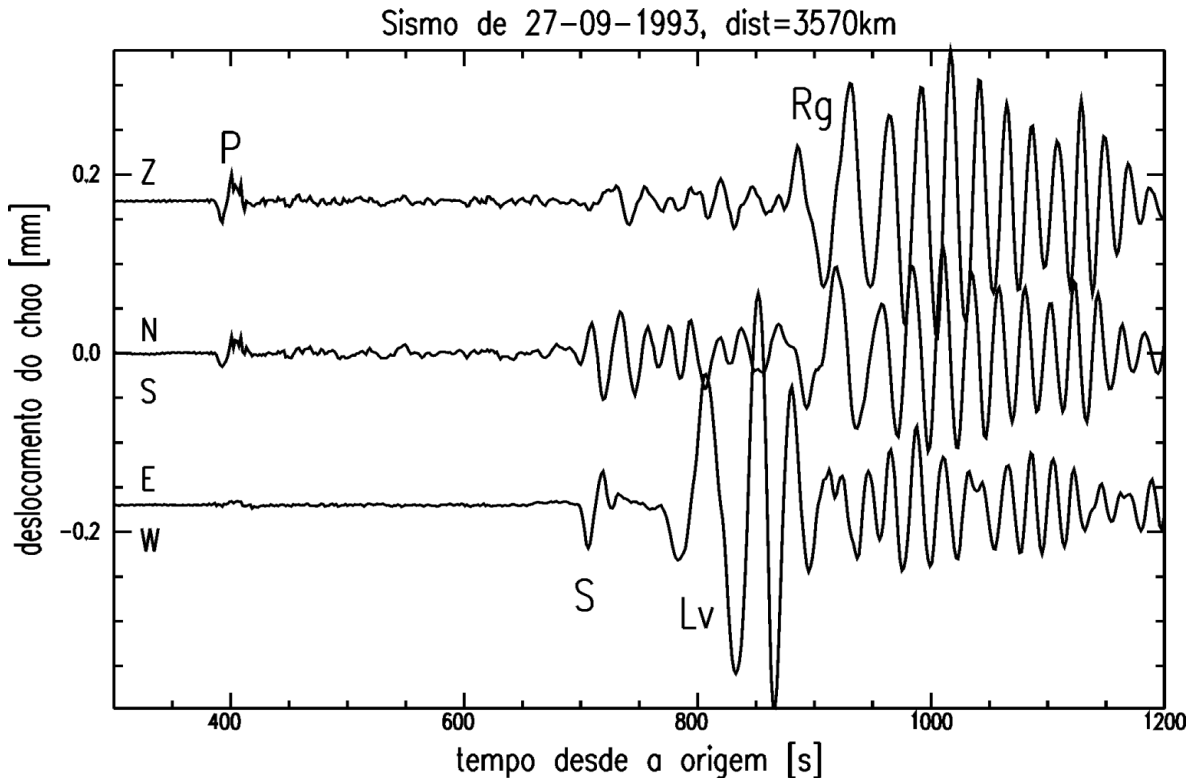


Fig. 1.10. Sismogramas de um terremoto de magnitude 6,1 m_b registrado em Poços de Caldas, MG. Rg é onda de superfície Rayleigh, Lv é a Love.

7. Velocidade média de propagação. Suponha que as ondas P e S tenham uma trajetória retilínea (linha tracejada na Fig. 1.11) entre o foco (estrela) e a estação (triângulo) e que o foco do terremoto seja superficial (i.e. que o sismo tenha profundidade focal 0 km). O percurso medido ao longo da superfície (X) e o ângulo medido no centro da Terra (Δ) estão relacionados por X (km) = 111.1 Δ ($^\circ$).

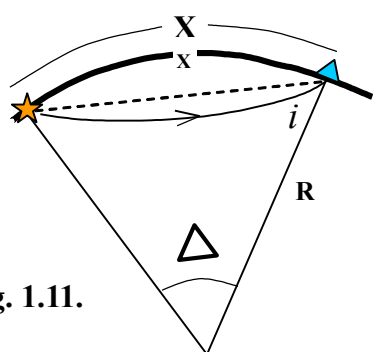


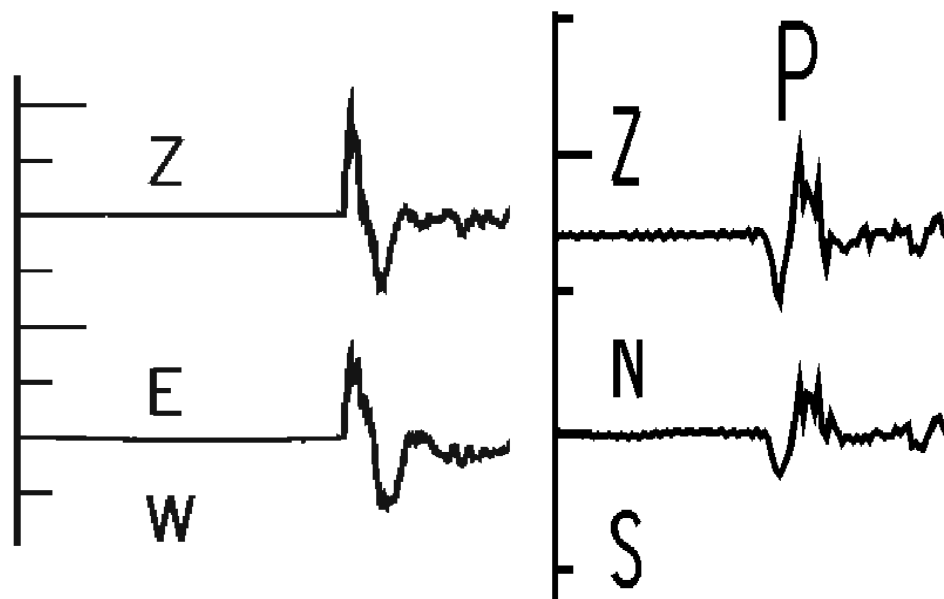
Fig. 1.11.

O raio da Terra, R , é 6.371 km. Para os dois sismos analisados nos exemplos anteriores, determine a velocidade média das ondas P e S. Primeiro calcule as distâncias percorridas (trajeto linear). Leia o tempo de percurso das ondas P e S nas Figs. 1.5 e 1.10.

Para o sismo da Argentina, Fig. 1.5, $\Delta=17.3^\circ$. Para o sismo de 1993, Fig. 1.10, $\Delta=10.5^\circ$.

- Por que a velocidade média das ondas P e S são maiores para o sismo mais distante? Como isso explicaria o fato de que a trajetória real (linha contínua) é uma curva? Qual a relação V_p/V_s ?
- A Fig. 1.6 abaixo mostra um zoom da onda P dos dois sismos estudados. Faça um diagrama do movimento da partícula no plano vertical-radial, para cada um deles, medindo com precisão as amplitudes nos sismogramas (desconte a espessura da linha!). Estime assim o ângulo de incidência, i , das ondas P na superfície sob as estações.

Por que o ângulo de incidência do sismo do Atlântico, de 1993, é menor do que o da Argentina?



a) Argentina 1997

b) Atlântico Sul, 1993

Fig. 1.12. Ampliação da onda P dos sismos da Argentina (Fig. 1.5.) e do Atlântico Sul (Fig. 1.10.) para estimativa do ângulo de incidência na superfície.