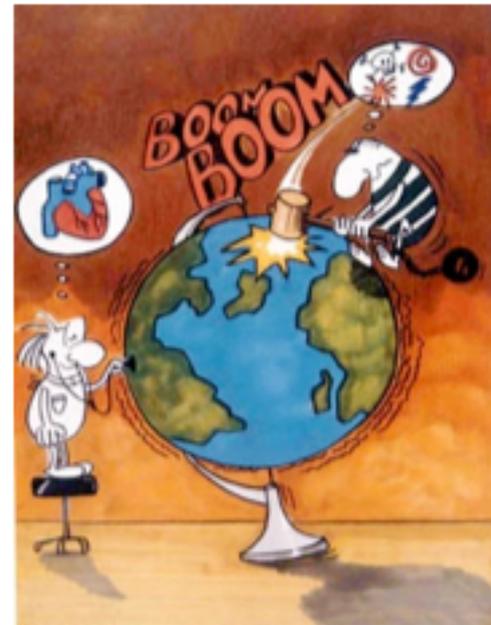


Origem do Universo e Sistema Solar, Terra e Estrutura Interna da Terra

Christine L.M. Bourotte

Dinâmica do Sistema Terra I - LiGEA

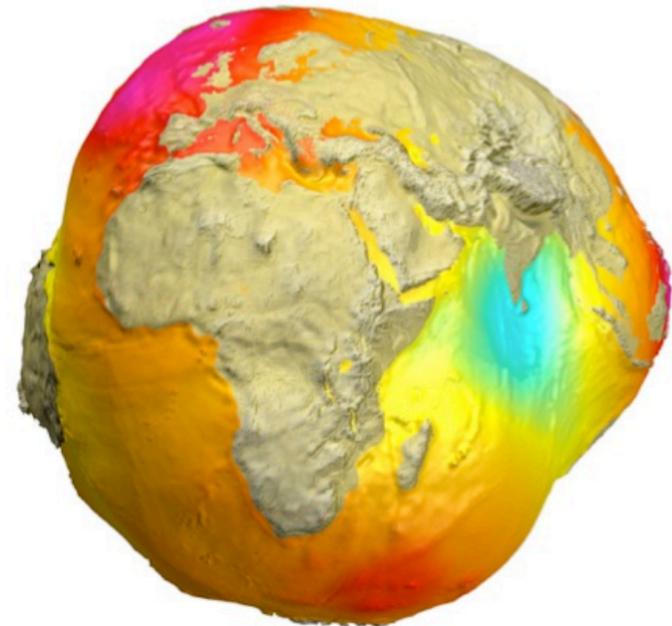




O mundo subterrâneo de Athanasius Kircher (1602-1680)

ESTRUTURA INTERNA DA TERRA

O Que sabemos?



Raio polar: 6370 km

Raio equatorial: 6378 km

Circunferência: 40 075 km

Massa: $5,96 \cdot 10^{24}$ kg

Volume: $1,08 \cdot 10^{24}$ km³

Densidade média: 5,52 kg/dm³

Como explorar o interior da Terra?

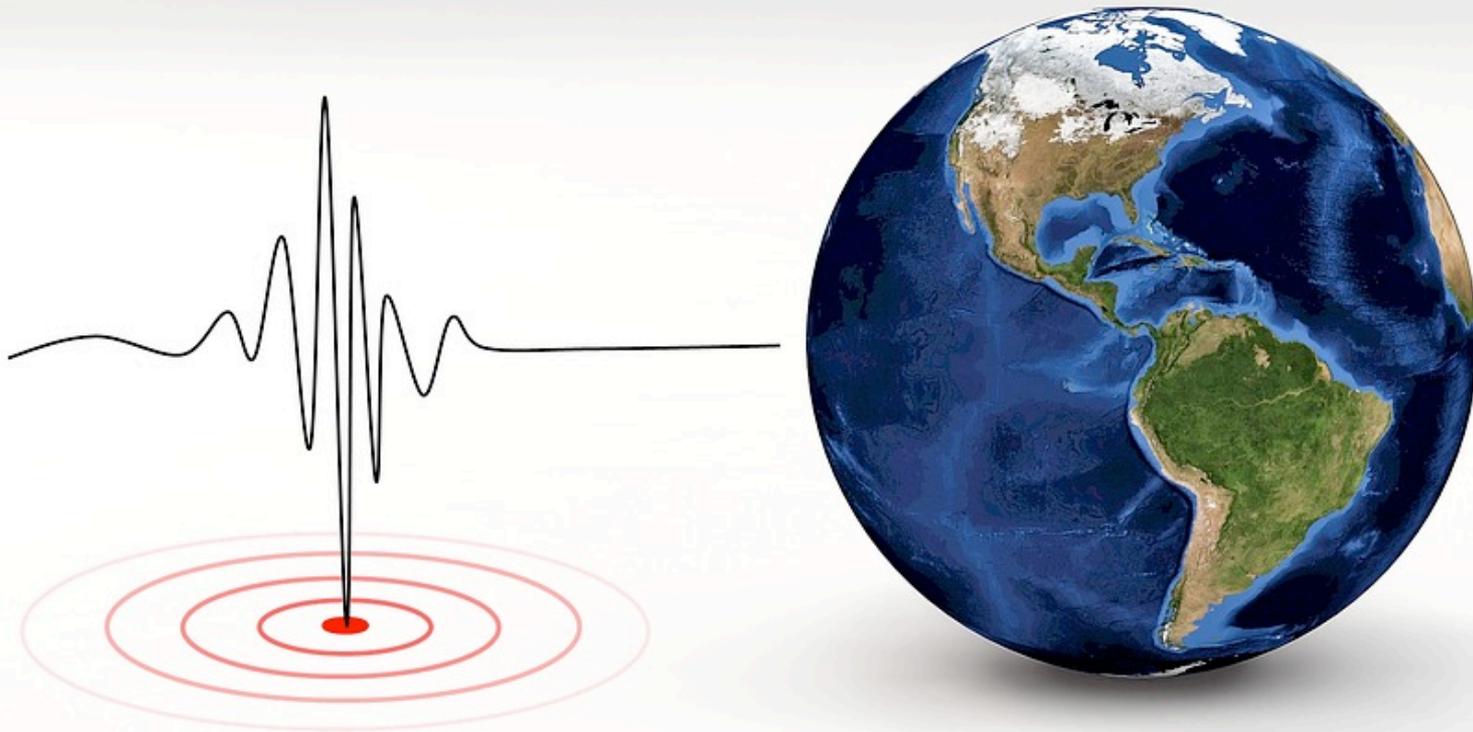
- Minas mais profundas: 3,6 km (África do Sul)
- Sondagens: 8 a 10 km
 - Recorde: 12.260 m na península de Kola, Rússia, ou seja, 0,2% do raio do planeta (6370 km)



Cava da mina de fosfato em Cajati, Vale do Ribeira, SP

Métodos indiretos

- A principal evidência sobre a estrutura da Terra, incluindo as profundidades dos limites, o estado e a composição do material vem das ondas sísmicas.
- Outras evidências incluem:
 - o estudo do campo magnético terrestre,
 - a massa, a densidade e a inércia de rotação do planeta,
 - a abundância relativa dos elementos químicos no Sol e nos meteoritos,
 - os fragmentos sólidos trazidos por erupções vulcânicas ou colisões de continente,
 - os estudos experimentais que simulam a geração dos diferentes tipos de magmas que vem do interior do planeta.

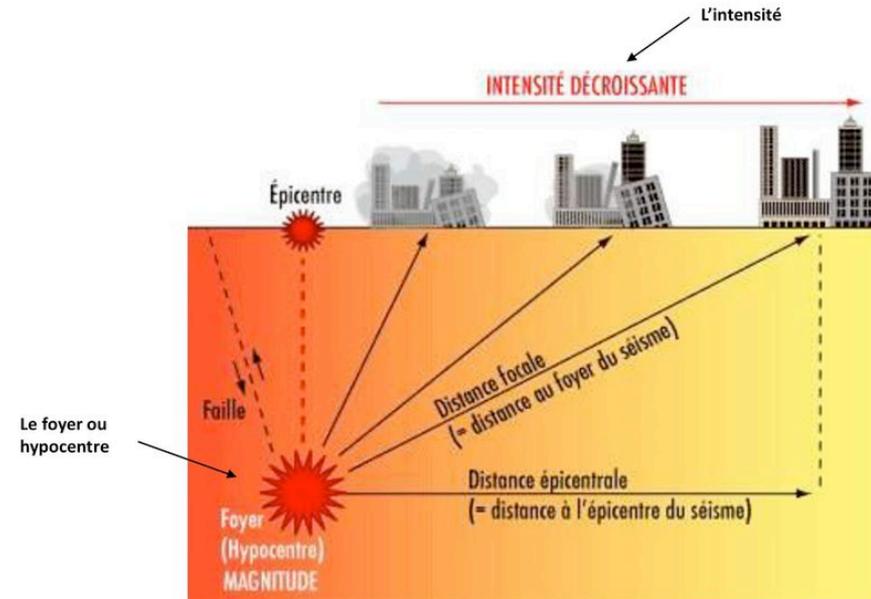
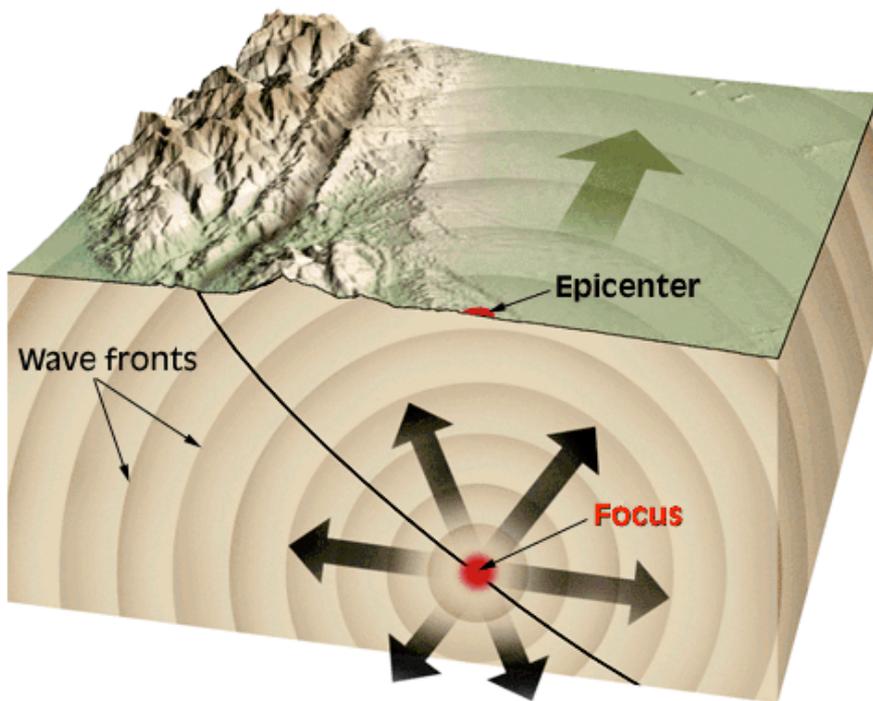


ESTRUTURA INTERNA DA TERRA

Contribuição das Ondas sísmicas

Ondas sísmicas - Terremotos

Um terremoto resulta da liberação súbita de energia



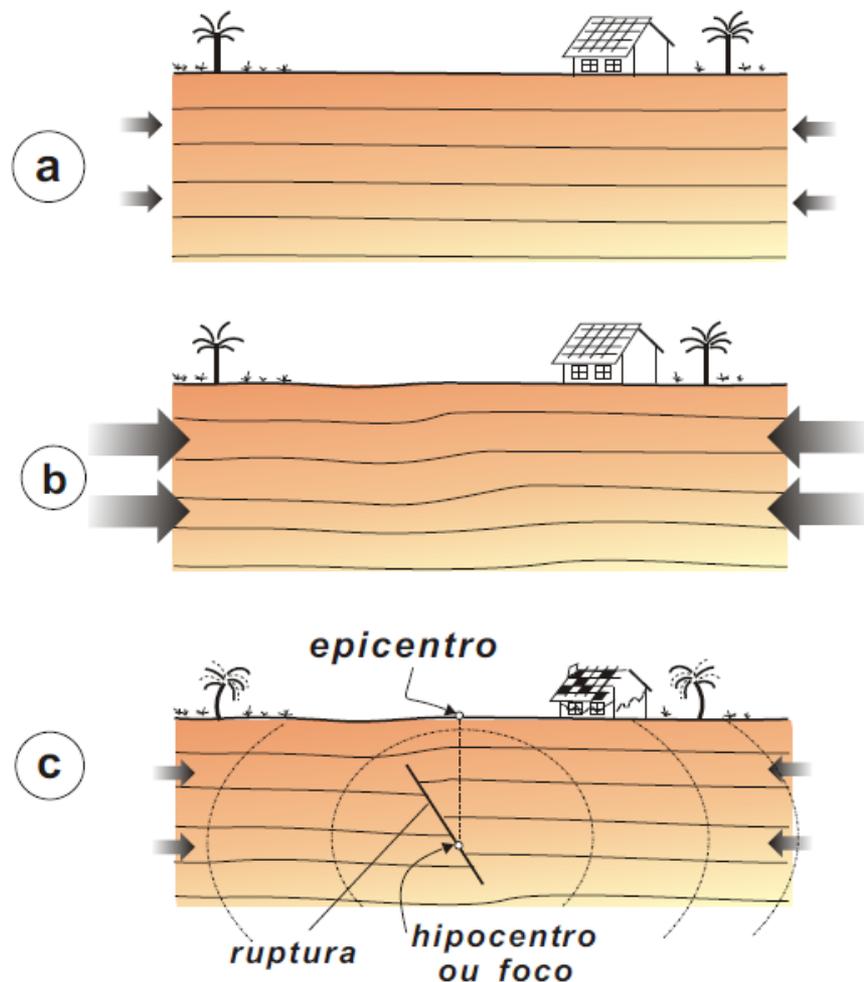
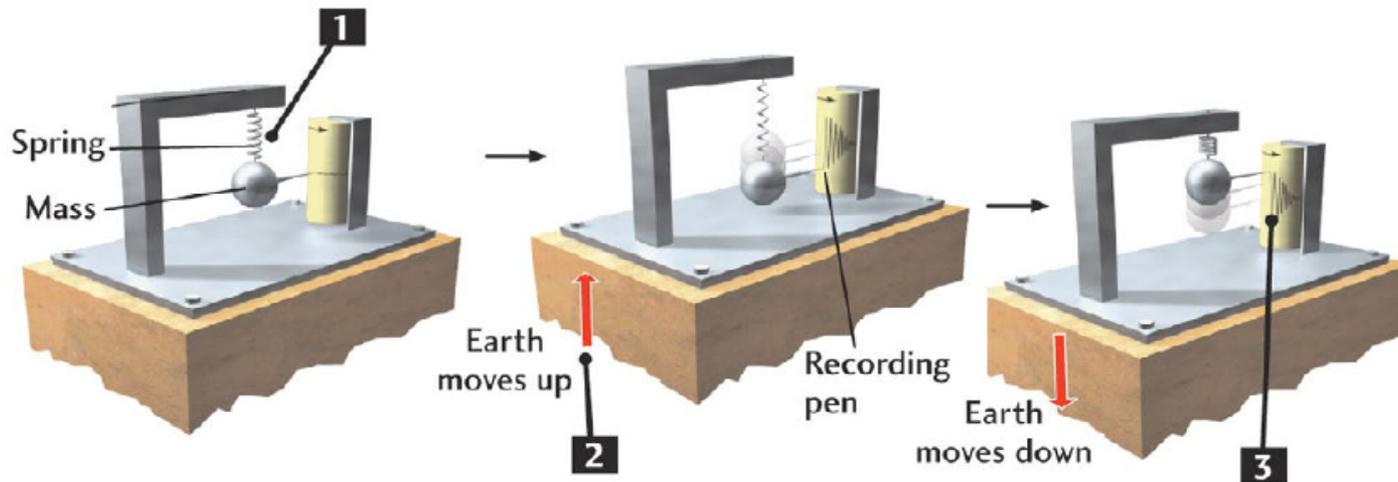


Fig. 3.2 Geração de um sismo por acúmulo e liberação de esforços em uma ruptura. A crosta terrestre está sujeita a tensões (a) compressivas que se acumulam (b); quando o limite de resistência das rochas é atingido, ocorre uma ruptura abrupta, gerando vibrações (c). O deslocamento (ruptura) se dá em apenas uma parte de uma fratura maior pré-existente (falha geológica). O ponto inicial da ruptura é chamado foco, e sua projeção na superfície é o epicentro.

Fonte: Decifrando a Terra / TEIXEIRA, TOLEDO, FAIRCHILD e TAIOLI - São Paulo: Oficina de Textos, 2000.

(a) Seismograph designed to detect vertical movement



(b) Seismograph designed to detect horizontal movement

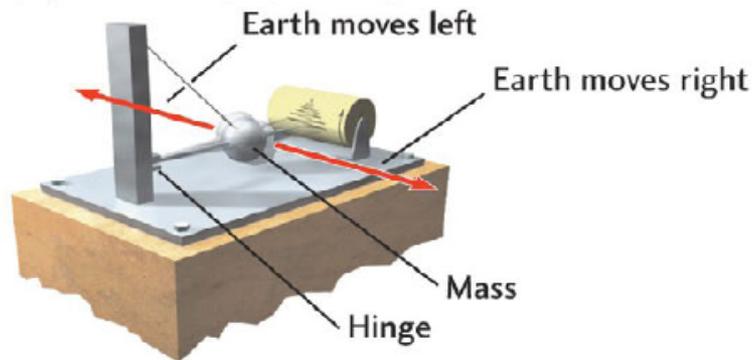


Fig. 19.4

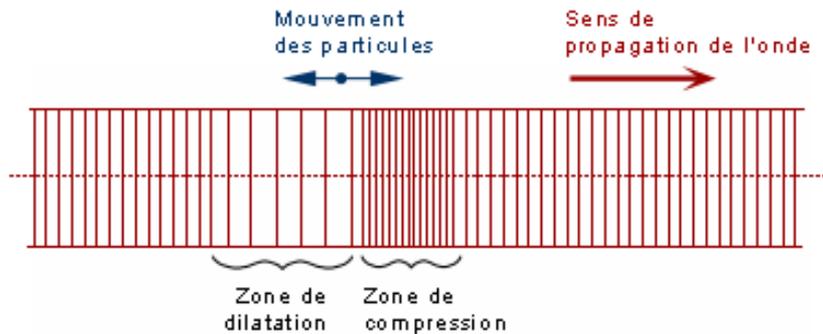
Tipos de ondas e modos de propagação

- 3 famílias:
 - Ondas P (primárias)
 - Ondas S (secundárias)
 - Ondas L (longas)

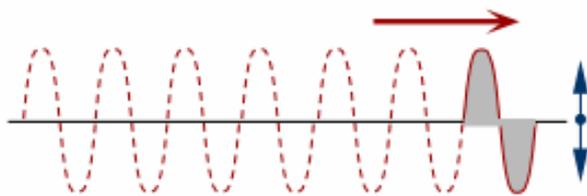
OU

- Ondas de volume (P e S) – propagam-se em todas as direções e atravessam o planeta segundo linhas sísmicas
- Ondas de superfície (L) – circulam paralelamente à superfície terrestre

Onde P (compression)



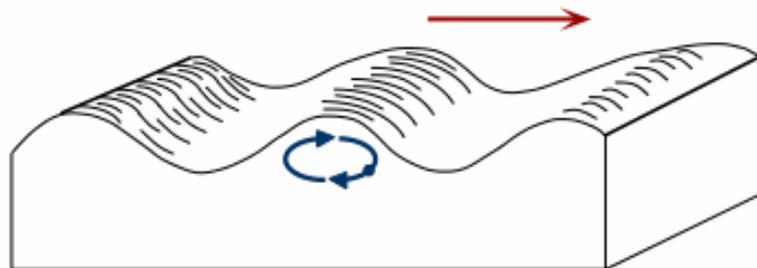
Onde S (cisaillement)



Onde L (de Love) (cisaillement)



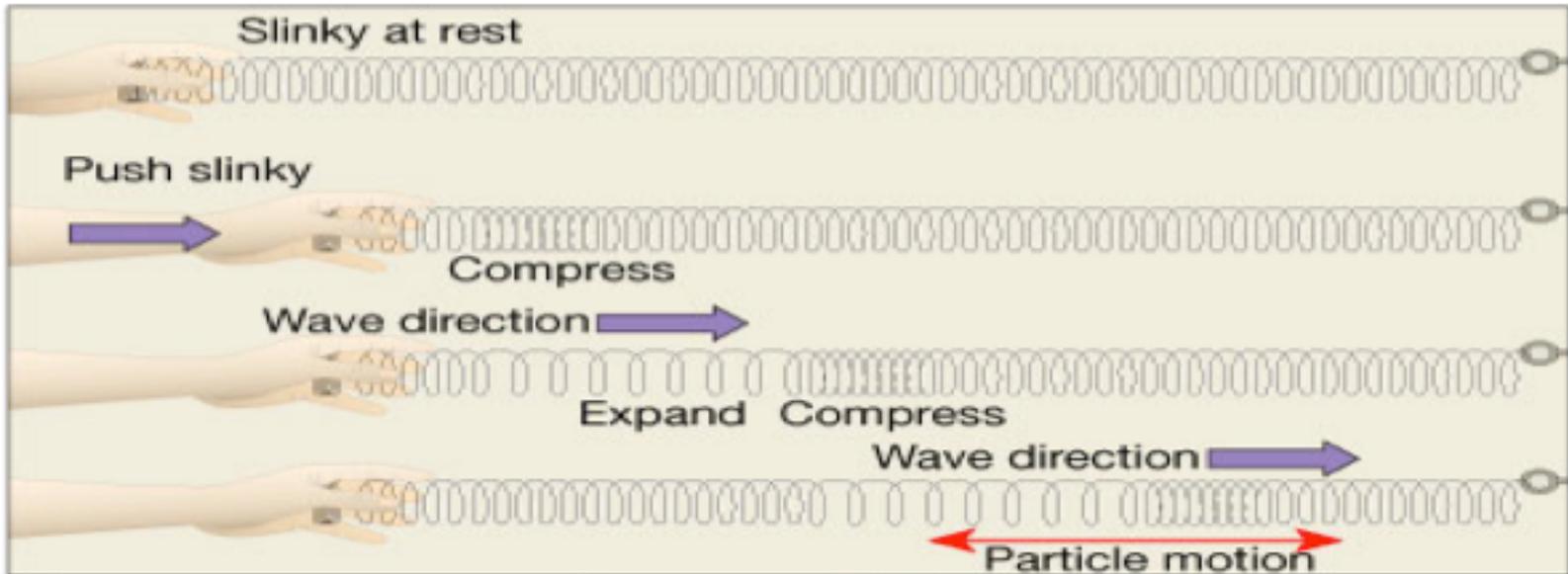
Onde de Rayleigh



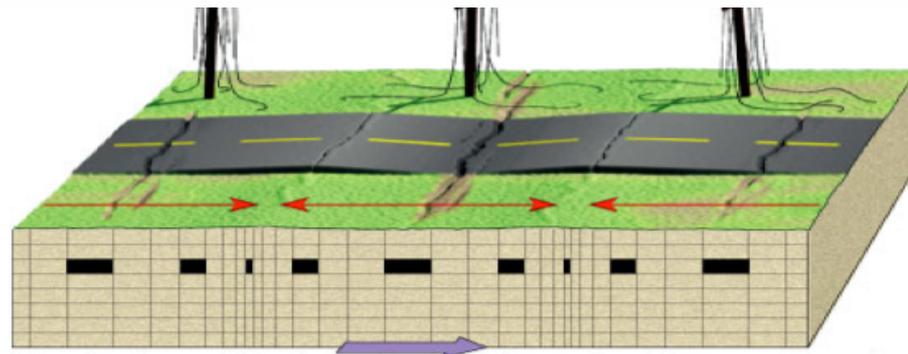
- **Ondas P:** longitudinais, // direção de propagação, de dilatação / compressão.
- **Ondas S:** transversais, \perp direção de propagação, de cisalhamento.
- **Ondas L** superficiais X Ondas de Love (L) (hz transversal) e
- ondas de Rayleigh (R) (movimento elíptico)

Ondas P (primárias)

$$V_p = \sqrt{(k + 4/3 \mu) / \rho}$$

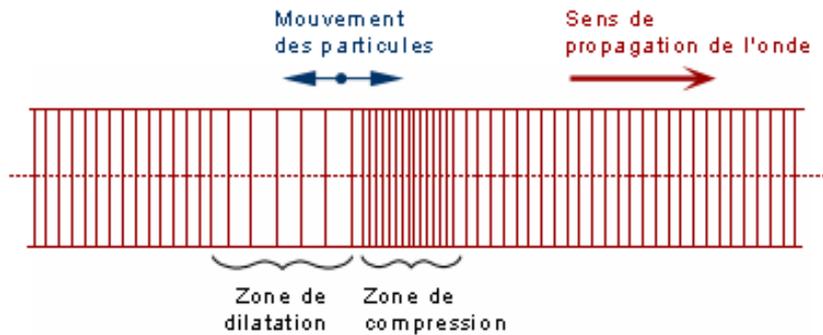


P waves are compression waves that alternately compress and expand the material through which they pass.

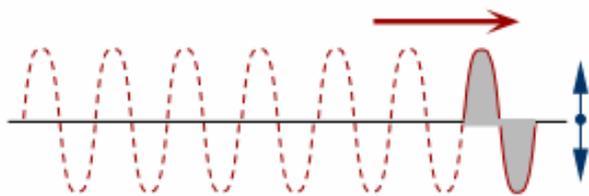


The back-and-forth motion produced as P waves travel along the surface can cause the ground to buckle and fracture.

Onde P (compression)



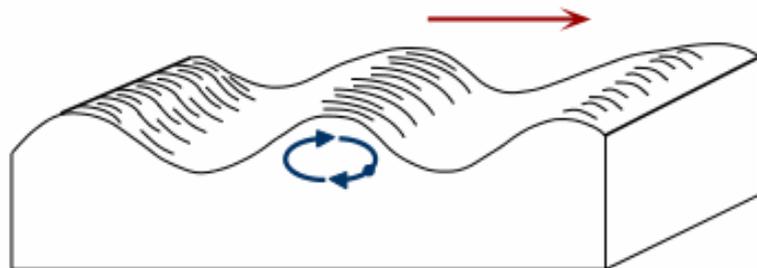
Onde S (cisaillement)



Onde L (de Love) (cisaillement)



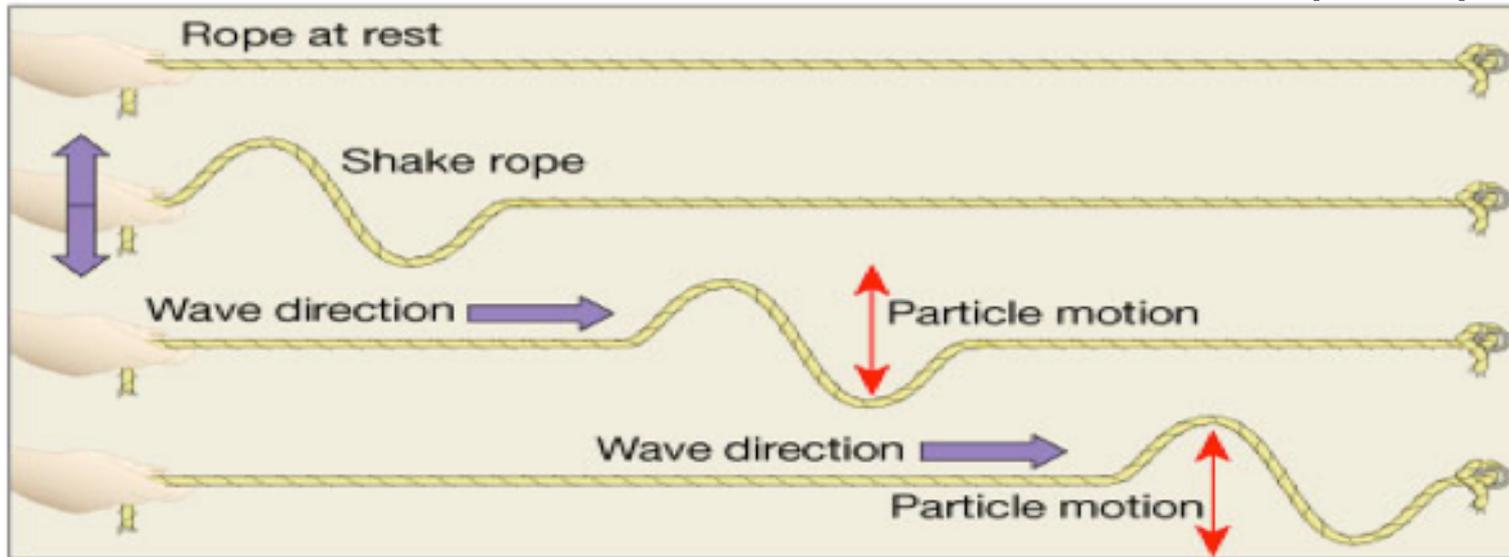
Onde de Rayleigh



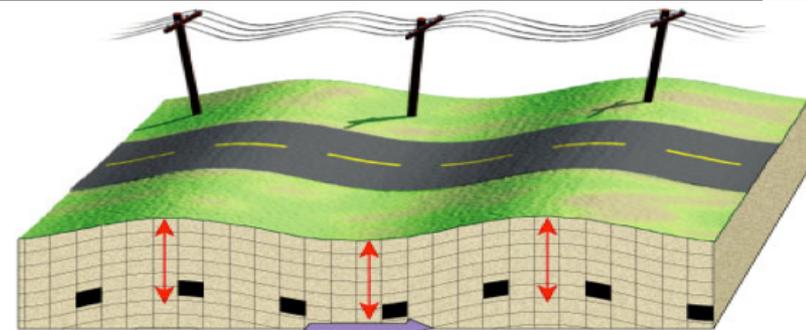
- **Ondas P:** longitudinais, // direção de propagação, de dilatação / compressão.
- **Ondas S:** transversais, \perp direção de propagação, de cisalhamento.
- **Ondas L** superficiais X Ondas de Love (L) (hz transversal) e
- ondas de Rayleigh (R) (movimento elíptico)

Ondas S (secundárias)

$$V_p = \sqrt{\mu/\rho}$$

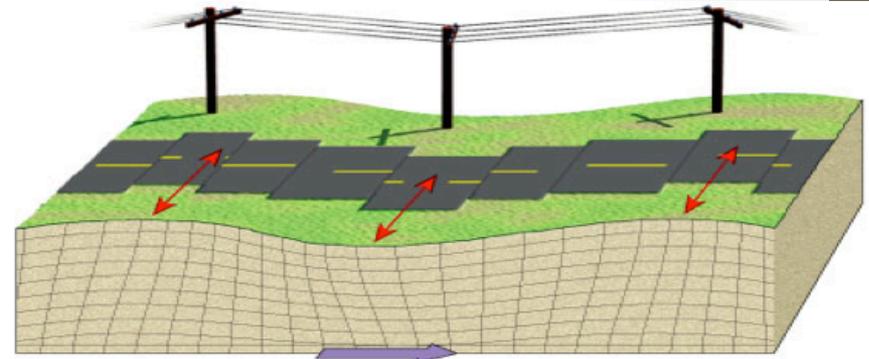


S waves are transverse waves which cause material to shake at right angles to the direction of wave motion. The length of the red arrow is the displacement, or amplitude, of the S wave.



S waves cause the ground to shake up-and-down and sideways.

- **Ondas L** superficiais X Ondas de Love (L) (hz transversal) e
- ondas de Rayleigh (R) (movimento elíptico)

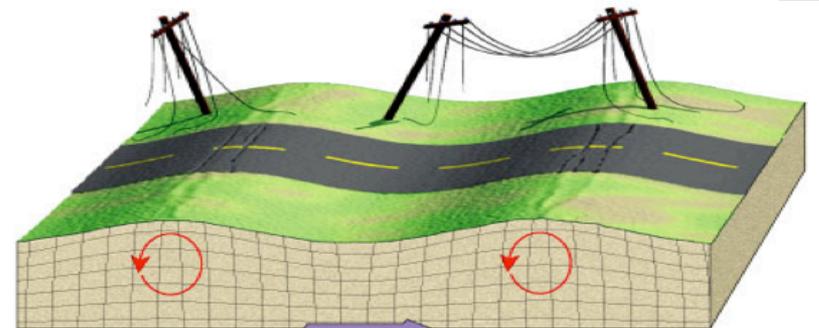
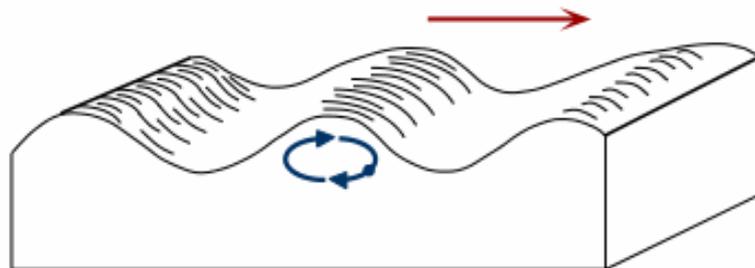


One type of surface wave moves the ground from side to side and can damage the foundations of buildings.

Onde L (de Love) (cisaillement)



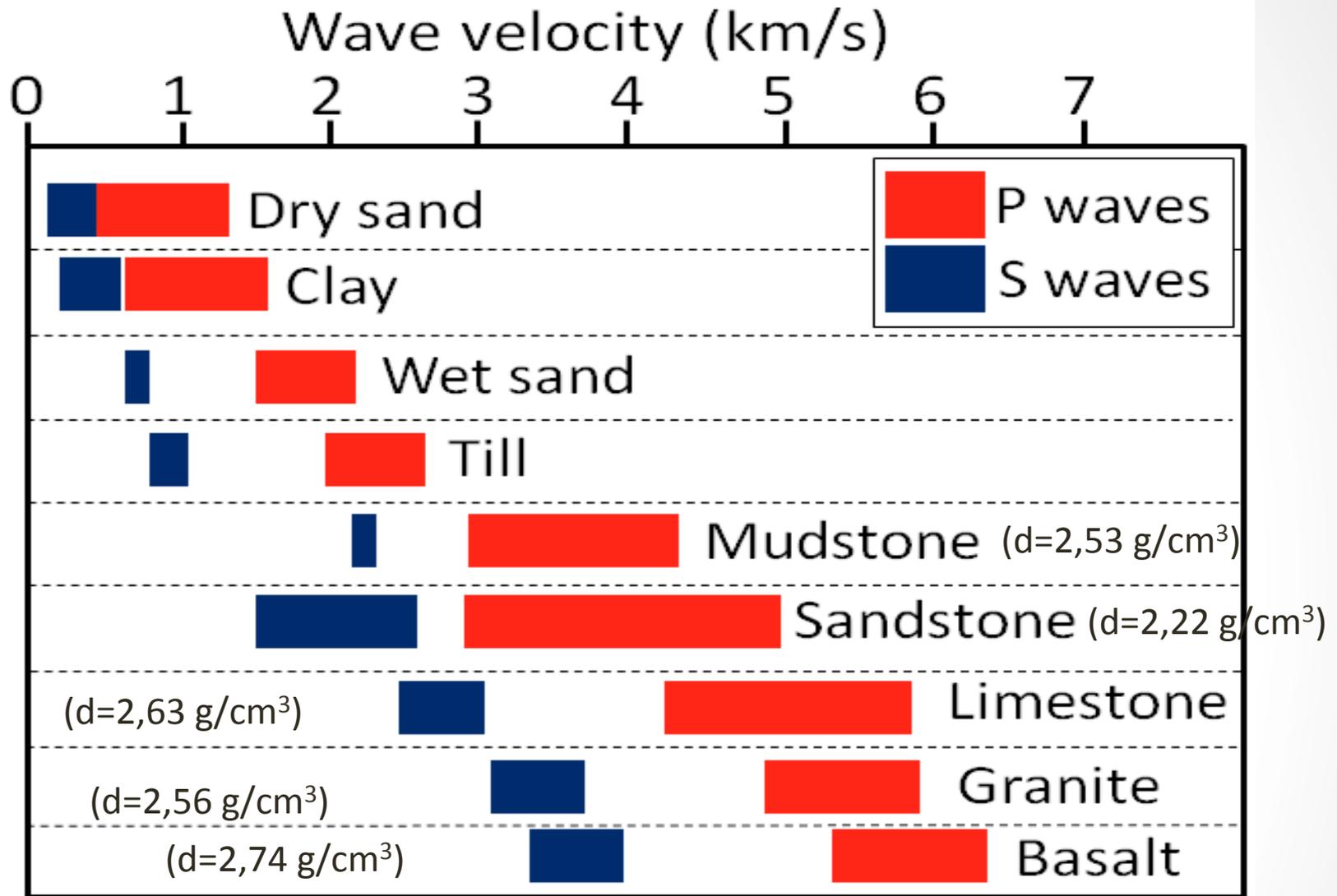
Onde de Rayleigh



Another type of surface wave travels along Earth's surface much like rolling ocean waves. The arrows show the movement of rock as the wave passes. The motion follows the shape of an ellipse.

Velocidade das ondas sísmicas

- Velocidades diferentes: ondas P mais rápidas que ondas S.
- **As ondas S não se propagam em líquidos.**
- Diferença de velocidade em função da distância: ondas L, $V=cste$. Ondas P e S, velocidade varia.
- Velocidade de propagação = função da natureza e da densidade do meio
 - ☞ Maior a densidade – maior a velocidade

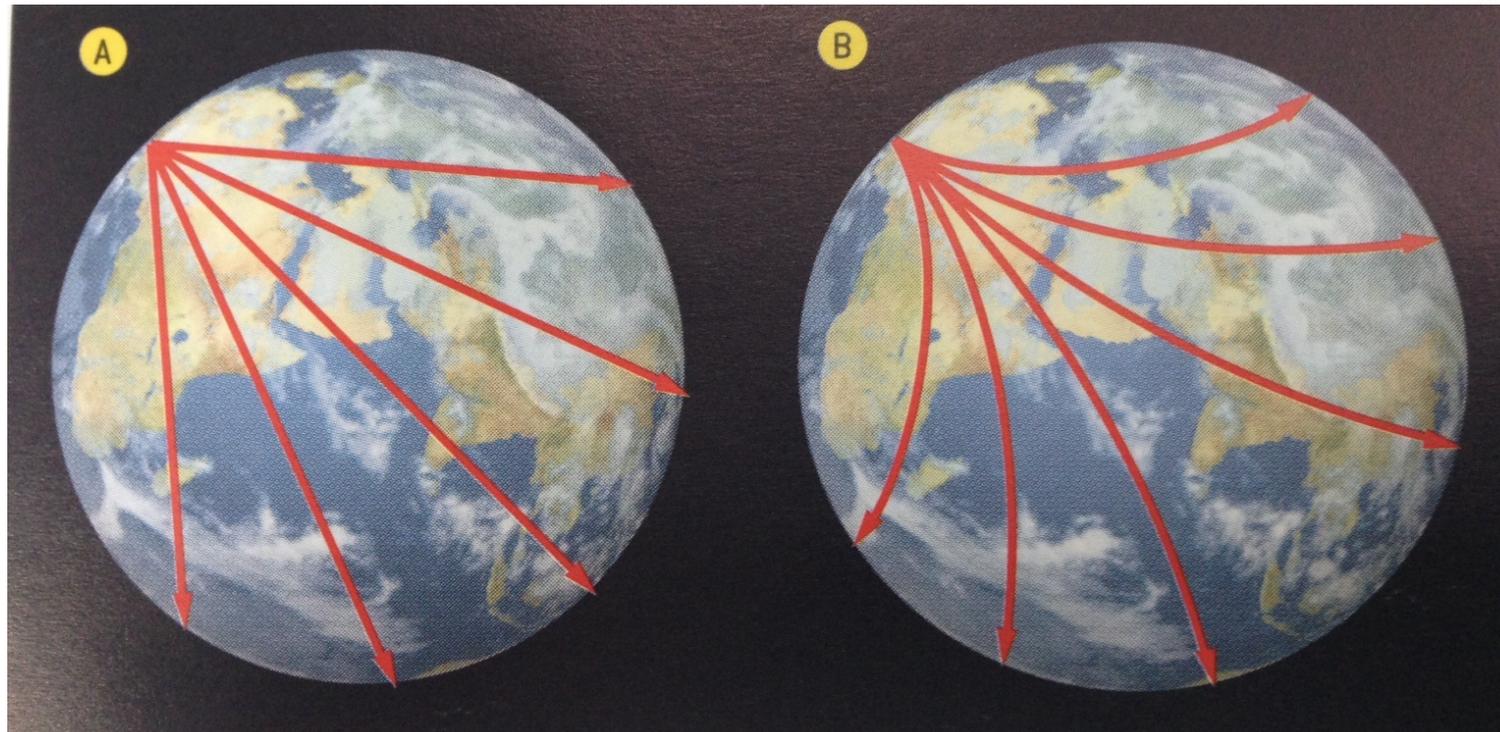


Typical velocities of P-waves (red) and S-waves (blue) in sediments and in solid crustal rocks [SE after: US Env. Prot. Agency [http://www.epa.gov/esd/cmb/GeophysicsWebsite/pages/reference/properties/Geomechanical_\(Engineering\)_Properties.htm](http://www.epa.gov/esd/cmb/GeophysicsWebsite/pages/reference/properties/Geomechanical_(Engineering)_Properties.htm)]

Propagação das ondas sísmicas

Corpo homogêneo

Corpo heterogêneo



http://webgeology.alfaweb.no/webgeology_files/brazil/earthinterior_bra.html

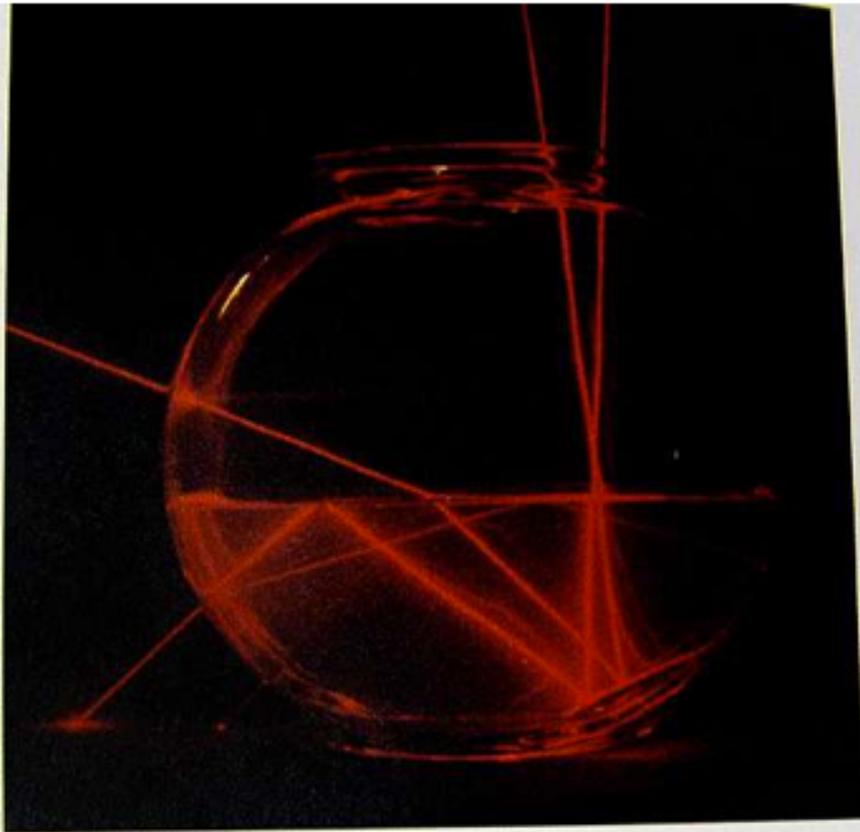


Figura 21.1 Neste experimento, os dois feixes de *laser* entram num globo com água pelo topo. Ambos são refletidos em um espelho posicionado no fundo do globo. Um, então, é refletido na interface ar-água e passa através da parede do globo, originando um ponto brilhante na mesa. A maior parte da energia do outro é desviada para baixo (refratada) quando ele passa da água para o ar, e uma pequena quantidade é refletida para formar um segundo ponto brilhante na mesa. Você pode traçar o caminho de outros feixes refletidos pelas interfaces. [Susan Schwartzberg/The Exploratorium]

Refração e reflexão de ondas



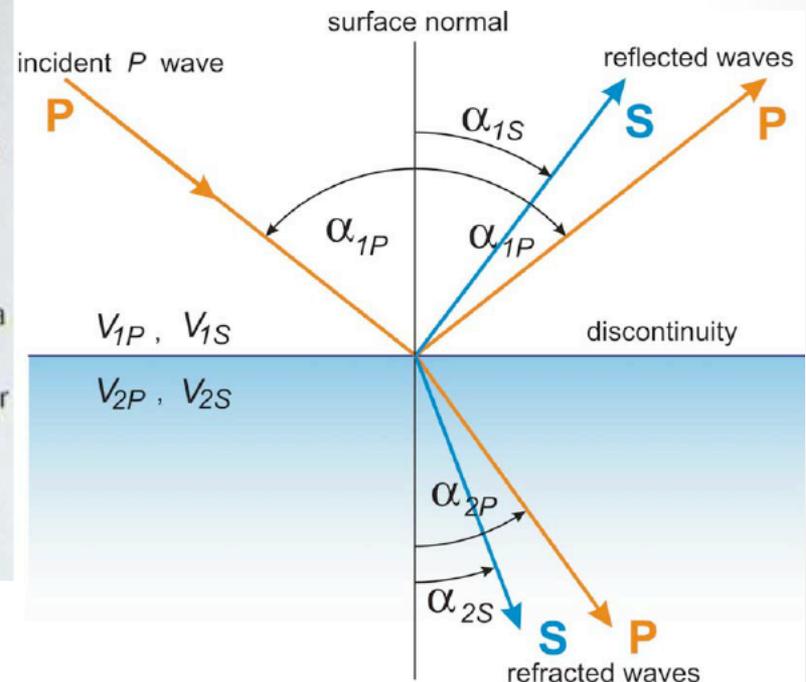
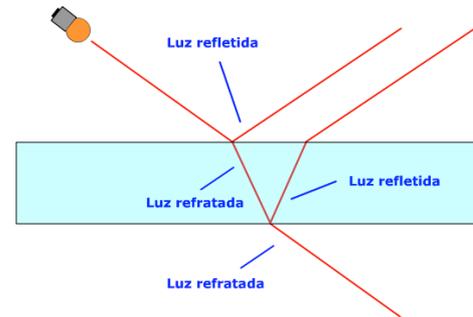
Lâmpada

Ar

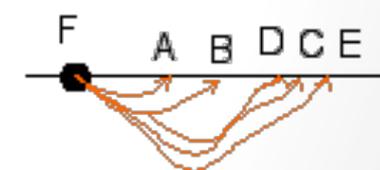
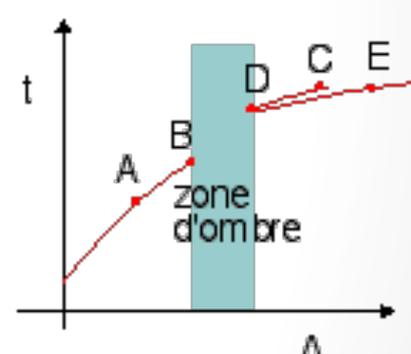
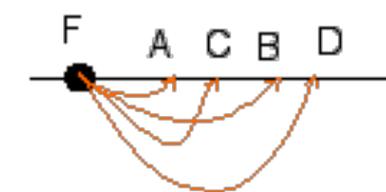
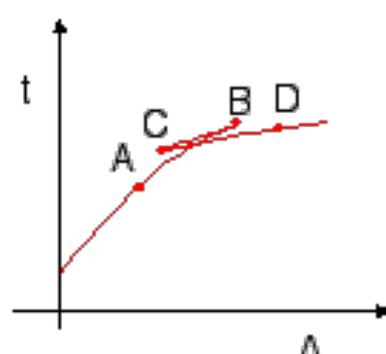
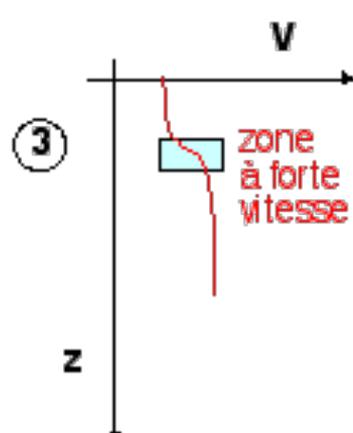
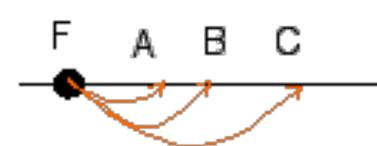
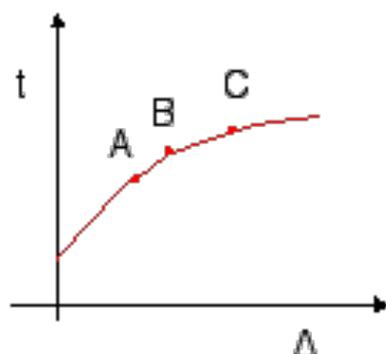
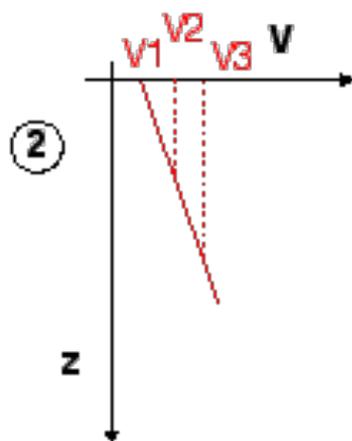
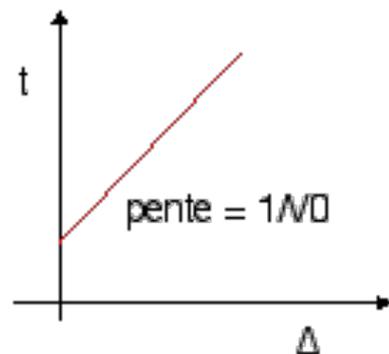
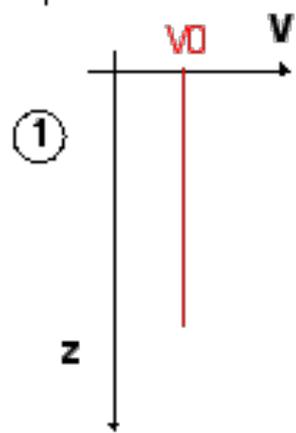


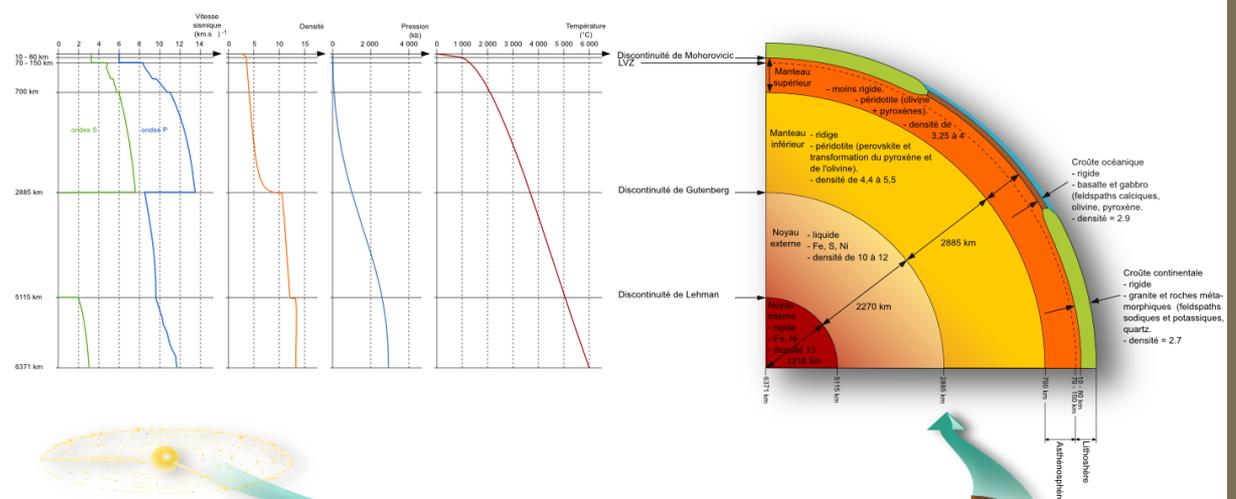
Ar

Refração e reflexão de ondas

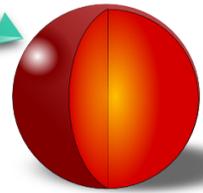


V = vitesse de l'onde élastique sismique
 z = profondeur

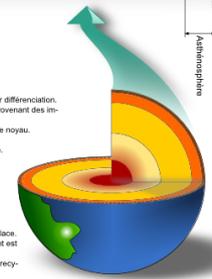




- 4.5 milliards d'années, formation du système solaire à partir d'un nuage de matière interstellaire (nébuleuse) et formation d'une proto-Terre homogène par accretion de matière.
- l'essentiel des éléments de la nébuleuse, se condensent au centre pour former le soleil.
- les éléments denses concentré autour du soleil, s'agglomèrent et sont à l'origine des planètes telluriques comme la Terre.



De - 4.6 à - 4.4 milliards d'années, le manteau et le noyau commencent leur différenciation.
- sous l'action de la chaleur issue de la géodynamique interne et de celle provenant des impacts météoritiques, un volume important de la Terre fond.
- les éléments les plus denses (Fe et Ni) migrent vers le centre pour former le noyau.
- les silicates, moins denses, cristallisent dans le manteau.
- l'intense activité interne provoque un dégazage à l'origine de l'atmosphère.



De - 4.4 à l'époque actuelle, la croûte terrestre se met en place.
- la croûte continentale, se forme mais sont renouvellement est lent et partiel.
- la croûte océanique se forme et demeure en perpétuelle recyclage.

Erwan Le Fol 2010

www.svt-monde.org

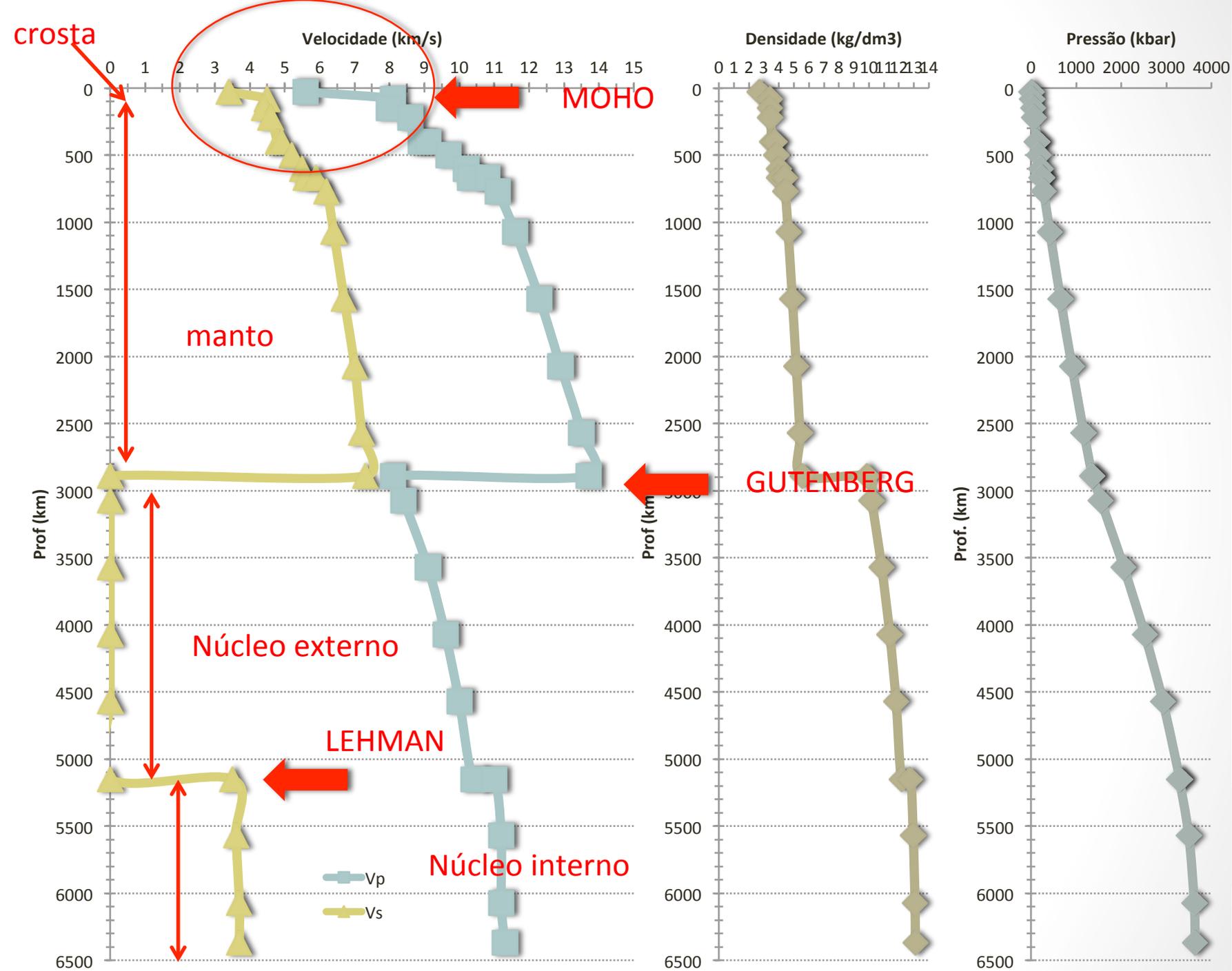
Modelos geofísico e químico

ESTRUTURA INTERNA DA TERRA

Exercício

km	km/s	km/s	kg/dm ³	kbar
Prof	Vp	Vs	d	p
30	5,6	3,4	2,7	10
80	8,1	4,5	3,37	25
150	8	4,4	3,37	48
220	8,6	4,6	3,44	71
400	8,9	4,8	3,54	134
400	9,1	4,9	3,72	134
500	9,7	5,2	3,85	171
600	10,2	5,5	3,98	210
670	10,3	5,6	3,99	238
670	10,8	5,9	4,38	238
771	11,1	6,2	4,44	283
1071	11,6	6,4	4,62	419
1571	12,3	6,7	4,9	655
2071	12,9	7	5,16	908
2571	13,5	7,2	5,41	1173
2891	13,7	7,3	5,57	1359
2891	8,1	0	9,9	1358
3071	8,4	0	10,18	1547
3571	9,1	0	10,85	2056
4071	9,6	0	11,39	2521
4571	10	0	11,81	2922
5150	10,4	0	12,17	3299
5150	11	3,5	12,76	3289
5571	11,2	3,6	12,95	3497
6071	11,2	3,7	13,07	3617
6371	11,3	3,7	13,09	3639

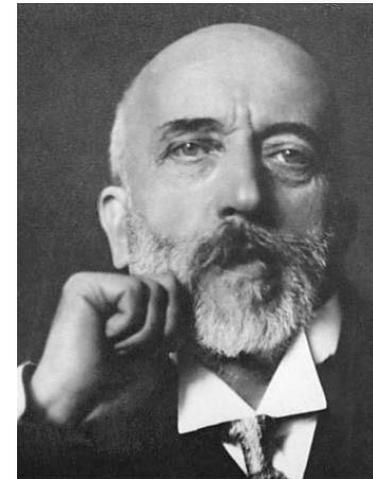
Fonte: PREM
(Preliminary
Reference Earth
Model)



O que observamos?

- **3 descontinuidades maiores**
 - A **descontinuidade de *Mohorovicic, ou Moho***, que separa, entre 0 e 70 km de profundidade a crosta e o manto.
 - A **descontinuidade de *Gutenberg***, que separa a 2900 km de profundidade o manto e o núcleo.
 - A **descontinuidade de *Lehman***, que separa o núcleo externo do núcleo interno a 5100 km de profundidade.

1909 – Andrija Mohorovicic: aumento
velocidade ondas sísmicas abaixo da
Croacia, 54 km de profundidade e
Interpretado como limite manto-
crosta

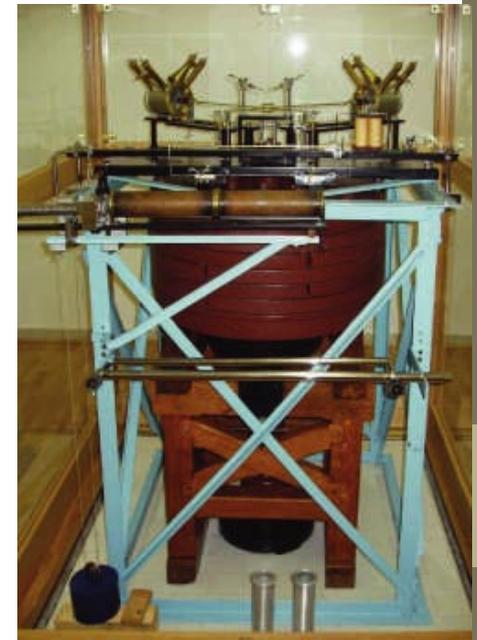
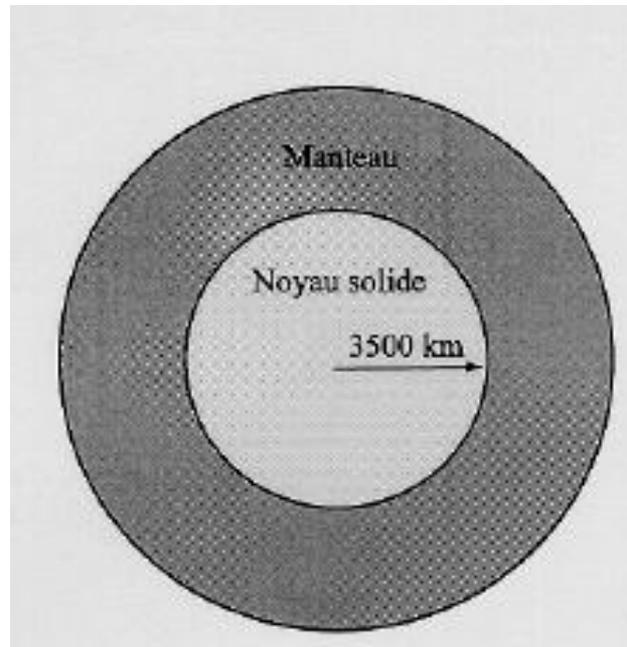


iugoslavo Andrija Mohorovičić

1912 – Beno Gutenberg:
descontinuidade a 2900 km (manto-
núcleo)



Beno Gutenberg (1889-1960)



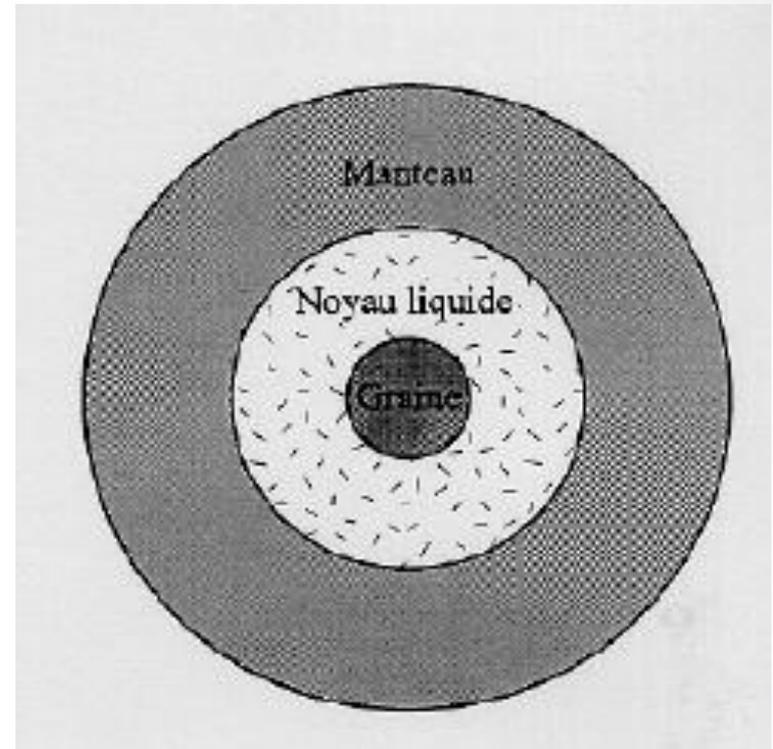
1926 - Jeffreys: núcleo fluido



Harold Jeffreys
(1891-1989)



Inge Lehman
(1888-1993)



1936 - Lehman: limite núcleo externo-núcleo interno

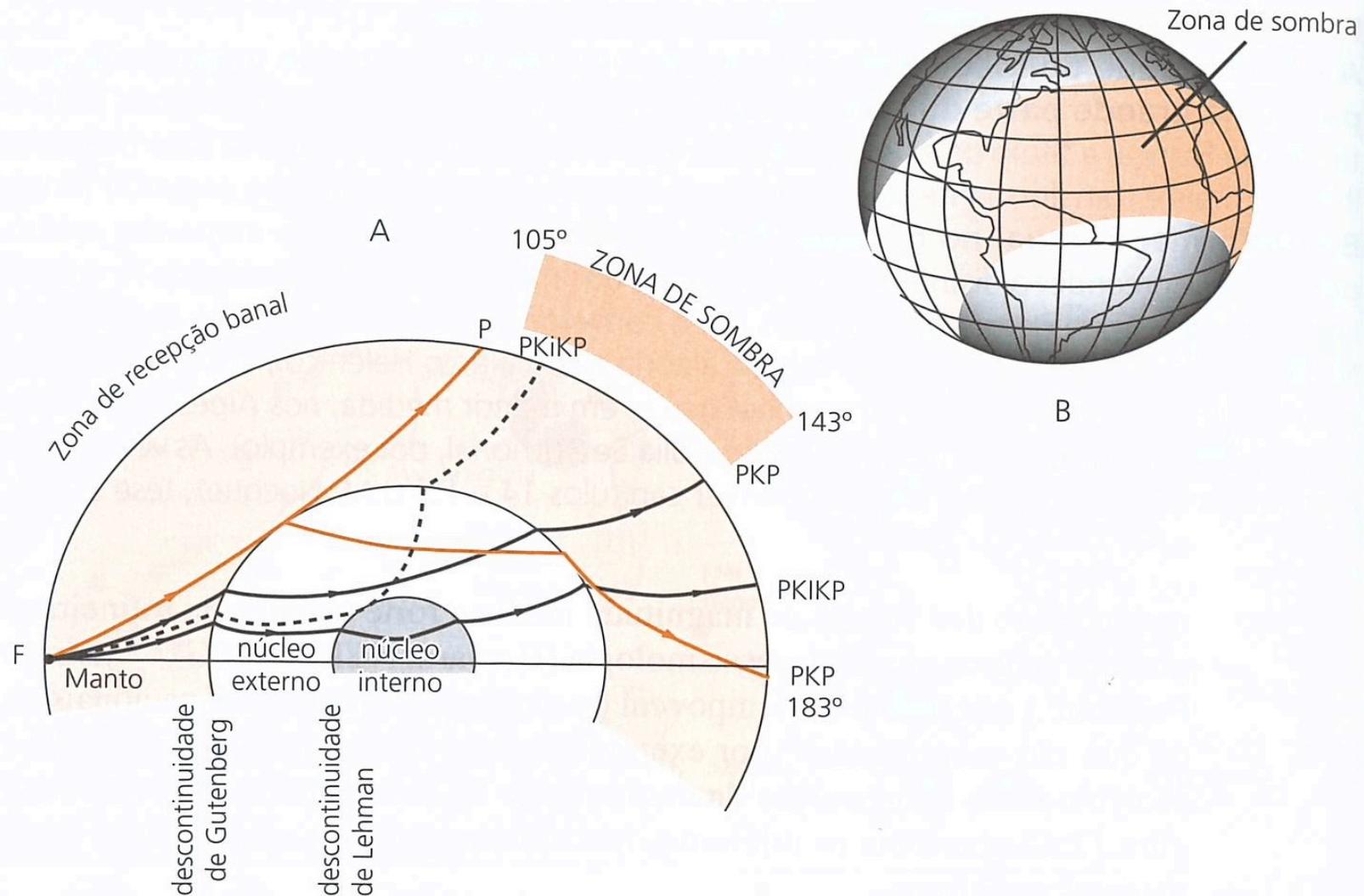


FIGURA 12.26

A – Trajetórias seguidas pelas ondas P no globo terrestre a partir de um foco superficial (simplificado de Coulomb, 1977).

B – Zona de sombra no caso de um sismo ocorrido no Japão.

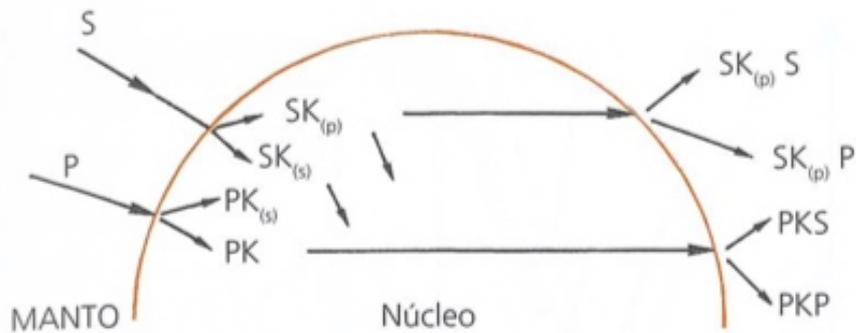


FIGURA 12.27 Os diferentes tipos de ondas que podem sair do núcleo. As ondas SKS, SKP propagaram-se no núcleo sob forma P (designa-se esse trajeto no núcleo pela letra K, de *Kern*, núcleo, em alemão).

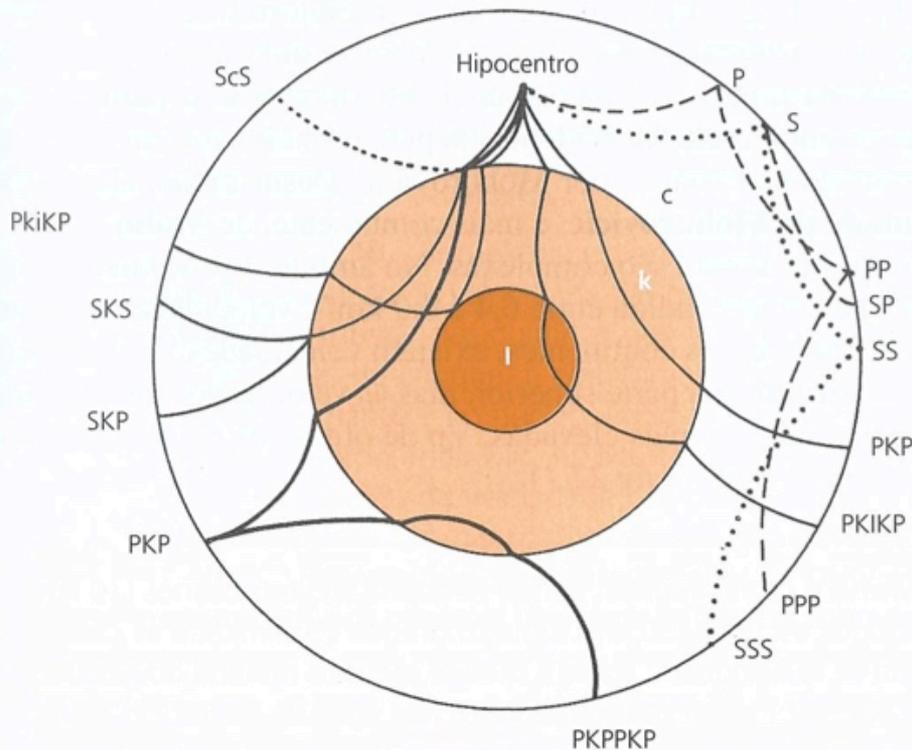
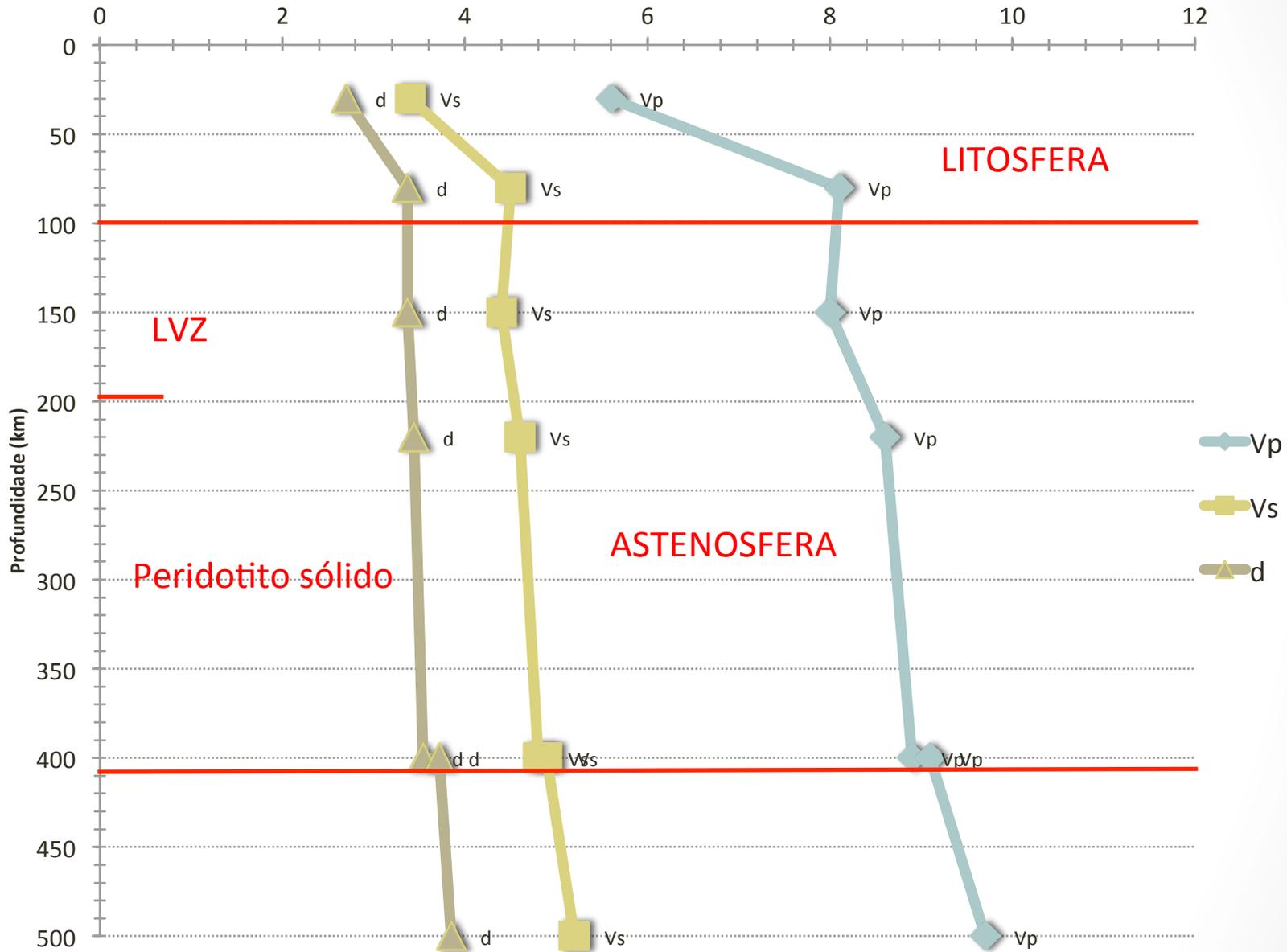
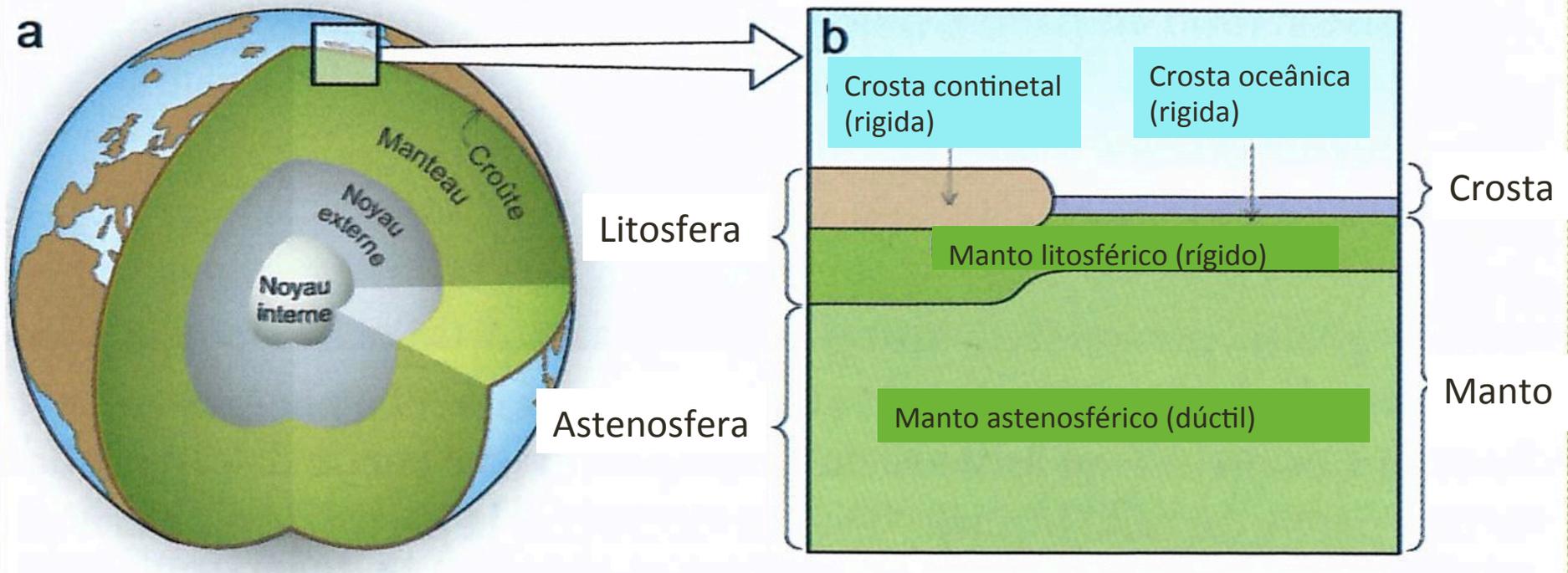


FIGURA 12.28 Exemplos de trajetórias seguidas pelas ondas P e S em função das diversas possibilidades de reflexão e refração na crosta e no manto, no núcleo externo e interno. Para a explicação das siglas das diferentes trajetórias sísmicas, reportar-se ao texto.



- **LVZ** (low velocity zone) ou **Zona de Baixa Velocidade** onde ocorre uma diminuição da velocidade das ondas P e S a partir de 100km. Se estende de 125-140 km até 235 km de profundidade.
- **Litosfera** = crosta + parte superior do manto
- **Astenosfera** = manto menos rígido
- O resto do manto = **mesosfera**

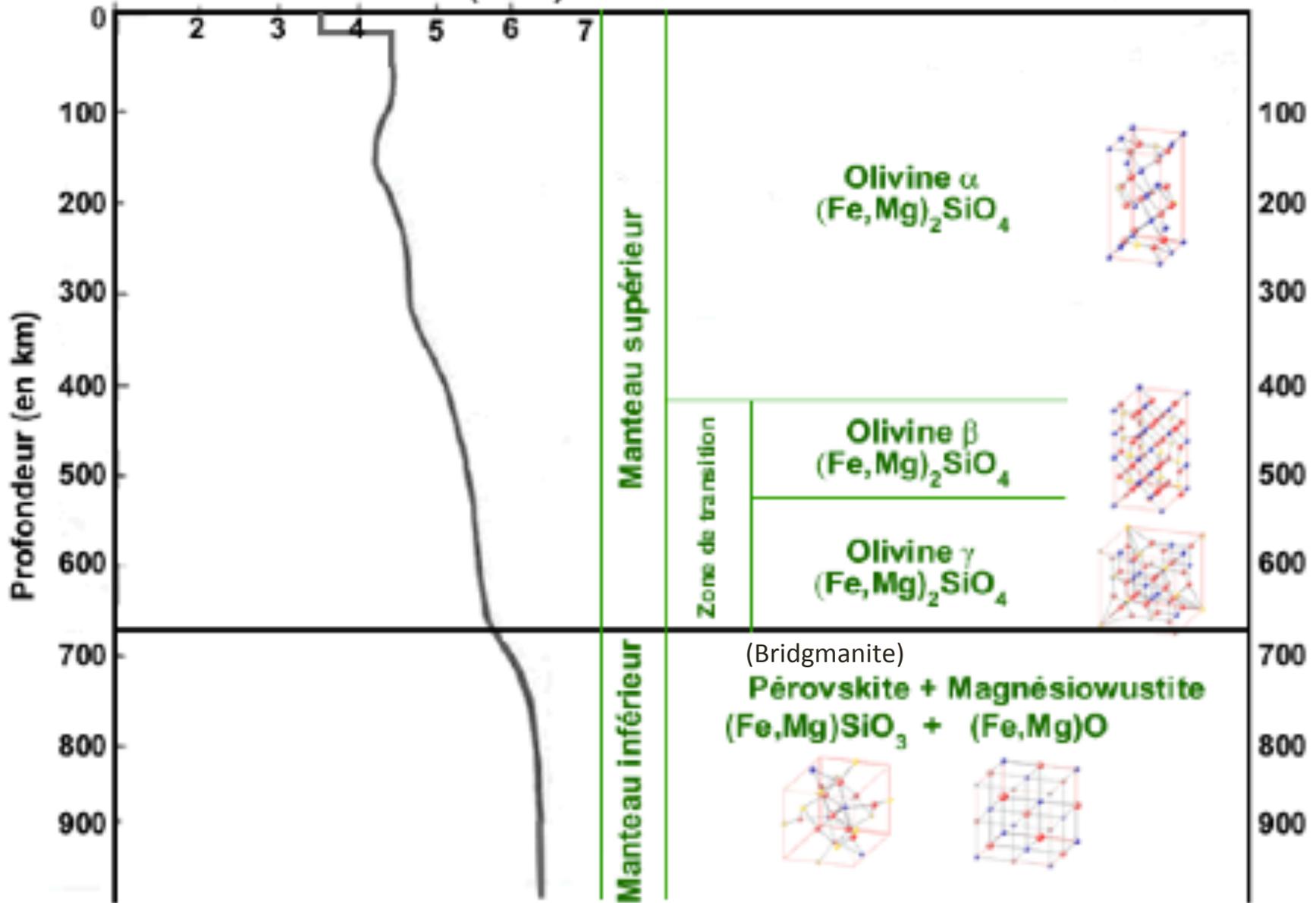


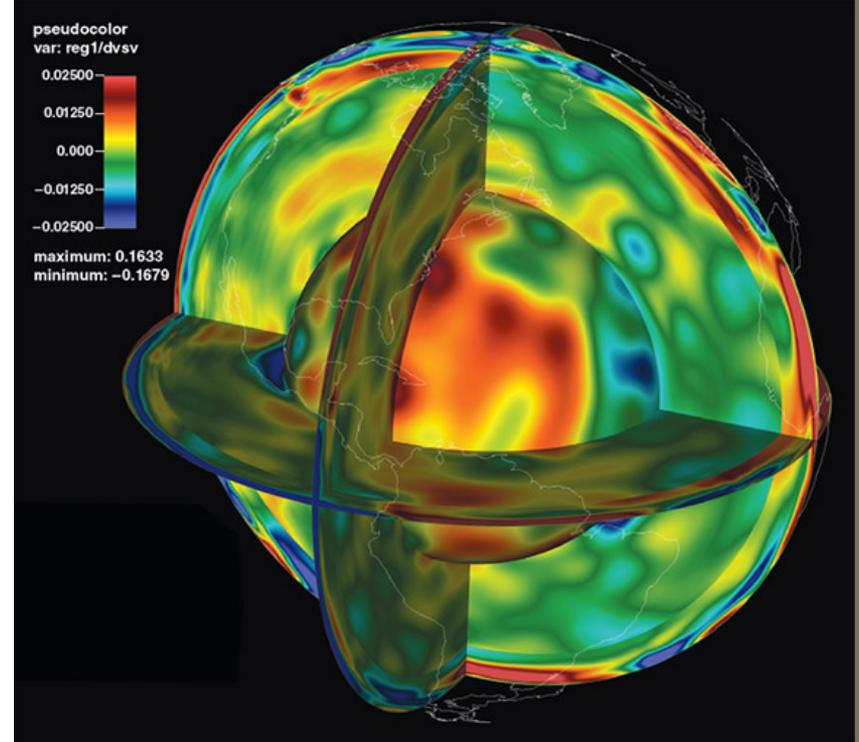
Estimativas composição química

- Ondas sísmicas: estimativa composicional por variação de densidade
- Observação direta: amostras de rochas da crosta e do manto (xenólito em peridotitos)
- Petrologia experimental: simulação em laboratório das condições elevadas de P e T no interior da Terra
- **Meteoritos:** análise comparativa



Vitesse des ondes S (km/s)



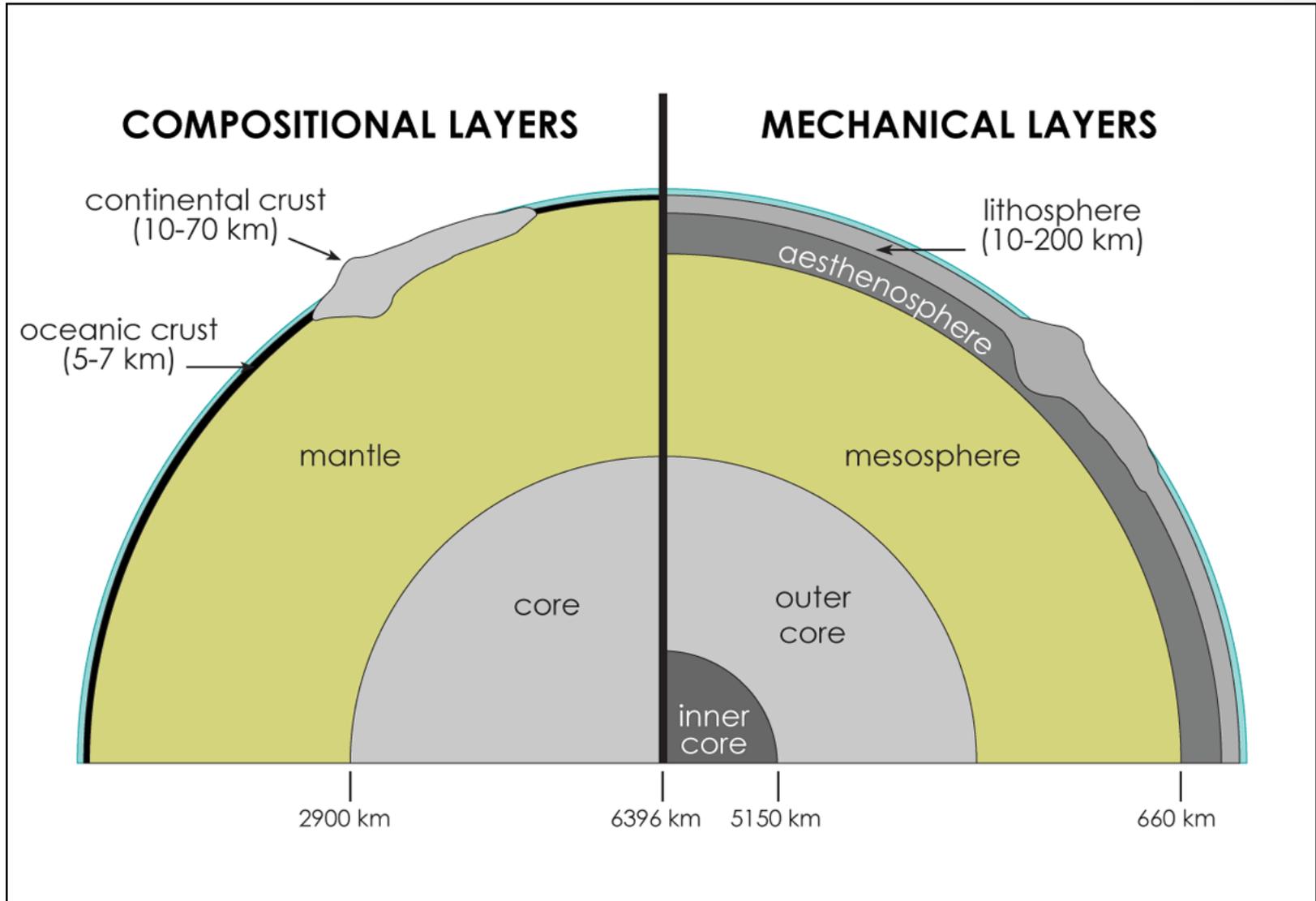


Using a technique that is similar to a medical CT ("CAT") scan, researchers at Princeton are using seismic waves from earthquakes to create images of the Earth's subterranean structures — such as tectonic plates, magma reservoirs and mineral deposits — which will help better understand how earthquakes and volcanoes occur. The team is using the Titan supercomputer at the U.S. Department of Energy's Oak Ridge National Laboratory in Tennessee to map the entire mantle, creating a three-dimensional map of the Earth to a depth of 1,800 miles below the surface. (Image courtesy of Ebru Bozdağ, University of Nice Sophia Antipolis, and David Pugmire, Oak Ridge National Laboratory)

<http://www.princeton.edu/main/news/archive/S42/59/33Q27/index.xml?section=featured>

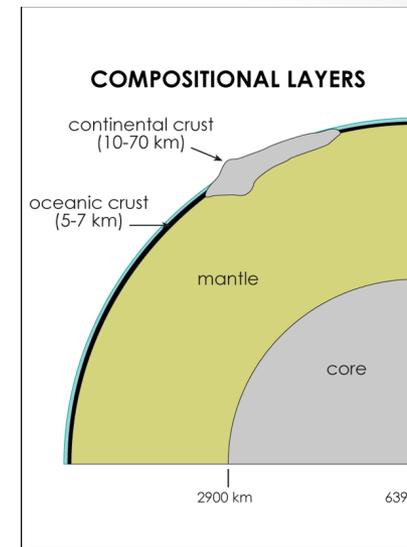
SÍNTESE

Estrutura em Camadas da Terra



Crosta

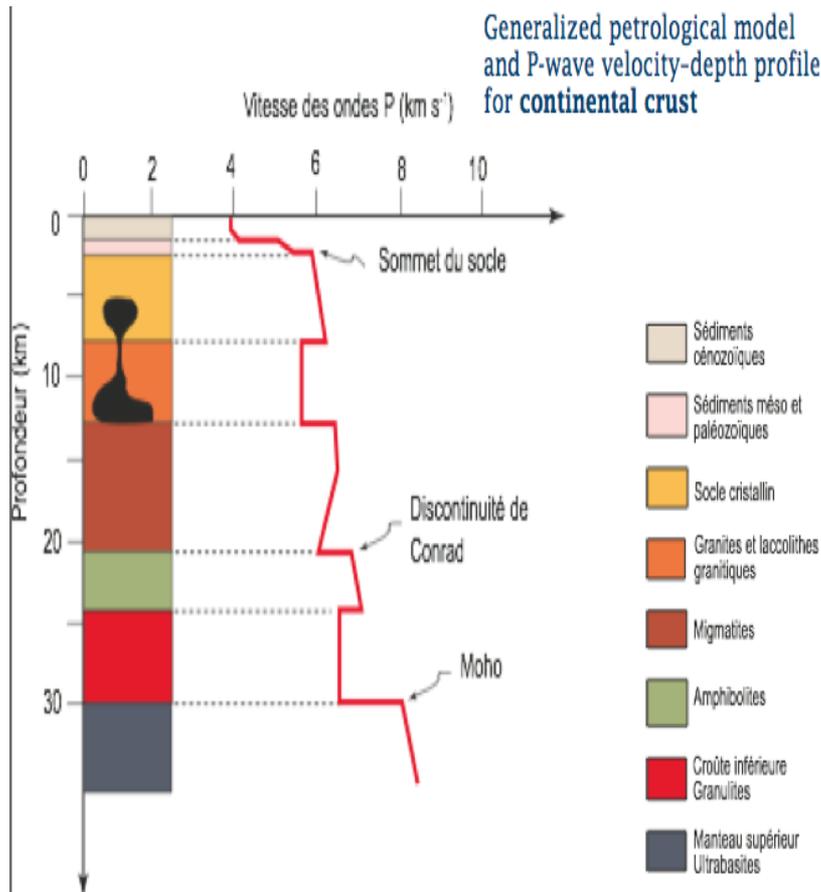
- A camada de rochas mais fina e mais externa do planeta
- Rochas relativamente frias ($<1000^{\circ}\text{C}$)
- Divide-se em **crosta oceânica** e **crosta continental**



Crosta

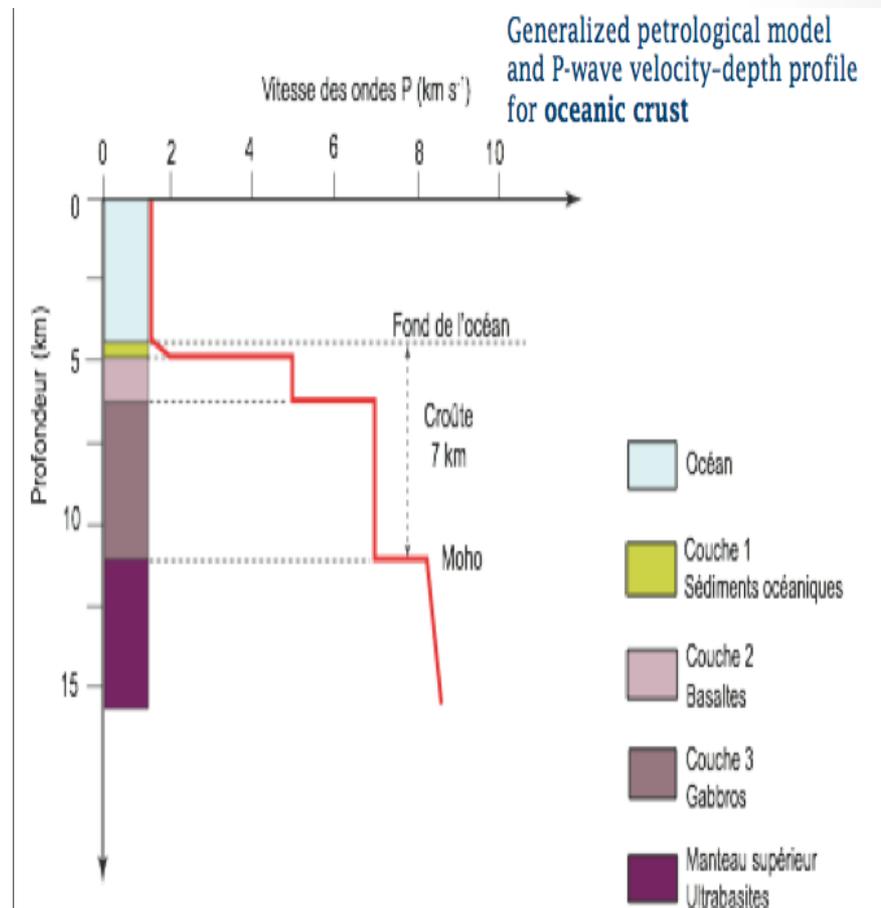
continental

Generalized petrological model and P-wave velocity-depth profile for **continental crust**



océânica

Generalized petrological model and P-wave velocity-depth profile for **oceanic crust**



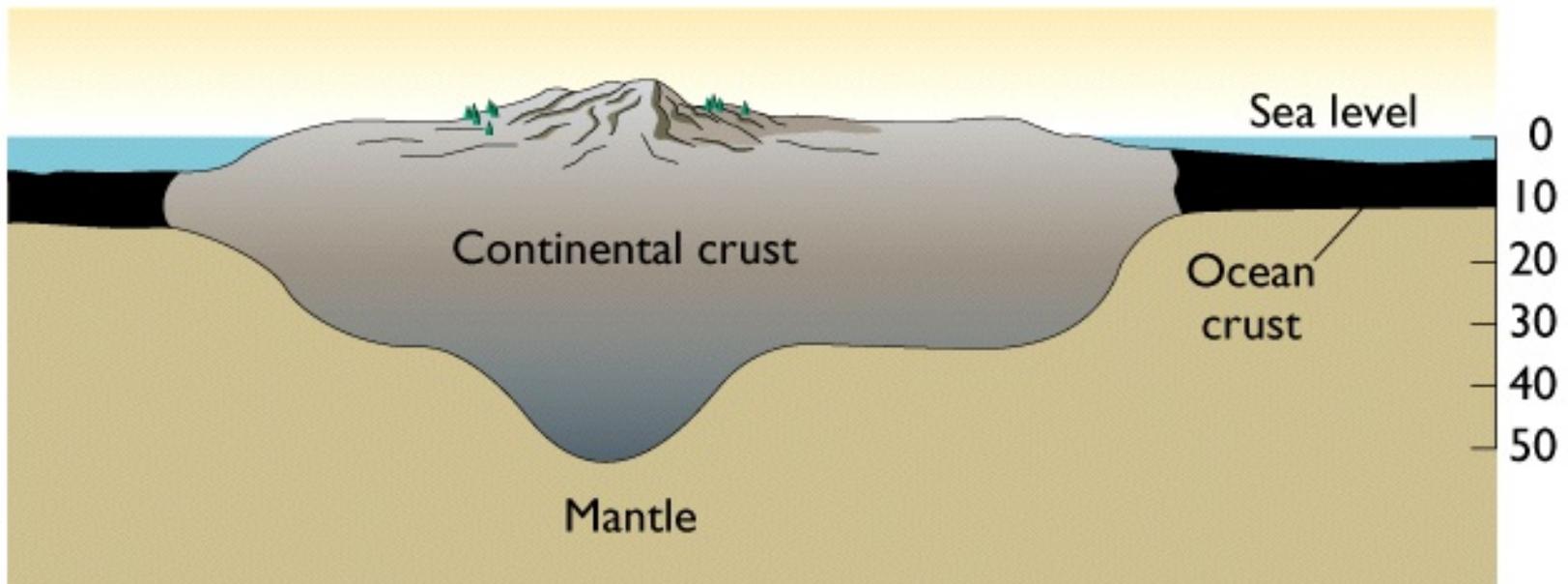
Crosta

continental

- Espessura 30-60 km
- Densidade $2,7 \text{ g/cm}^3$
- Idade 3,8 Ga
- Composição granítica

oceânica

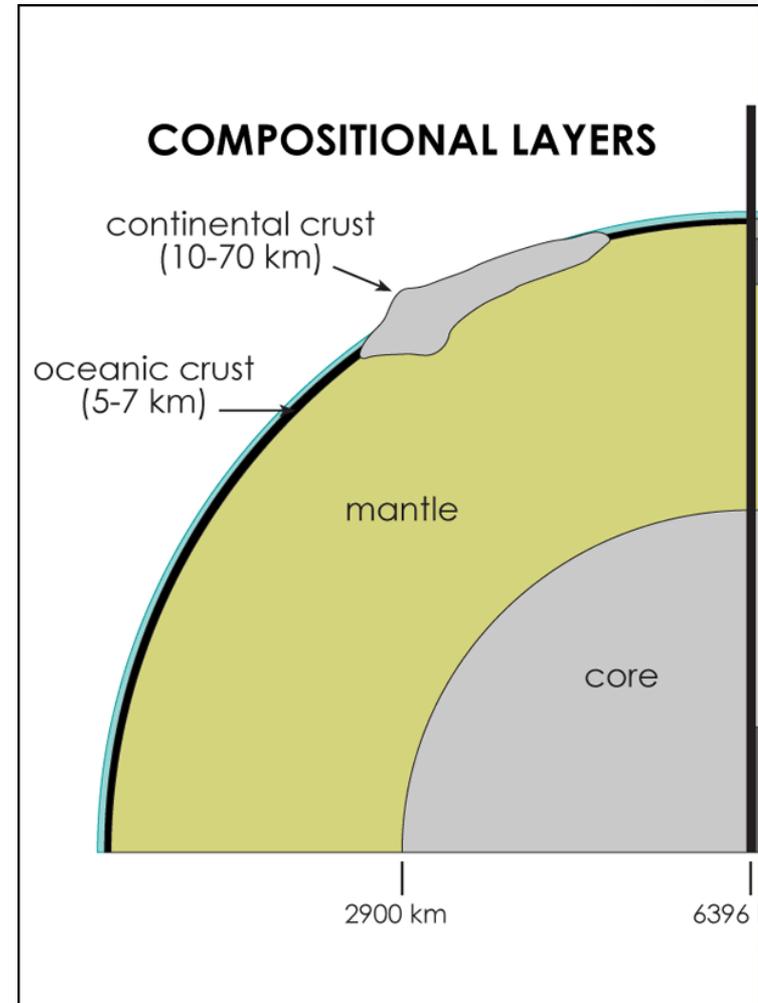
- Espessura 5-10 km
- Densidade $3,2 \text{ g/cm}^3$
- Idade 200 Ma
- Composição basáltica



Horizontal distance not to scale

Manto

- Corresponde a 82% do volume do planeta.
- Camada sólida de rochas que se estende até 2900 km de profundidade.
- Pode ser dividido em **manto superior** (até 400 km), **zona de transição** (até 660 km) e **manto inferior**.
- A temperatura varia de $<1000^{\circ}\text{C}$ no manto superior, para até 3500°C no manto inferior.



Manto

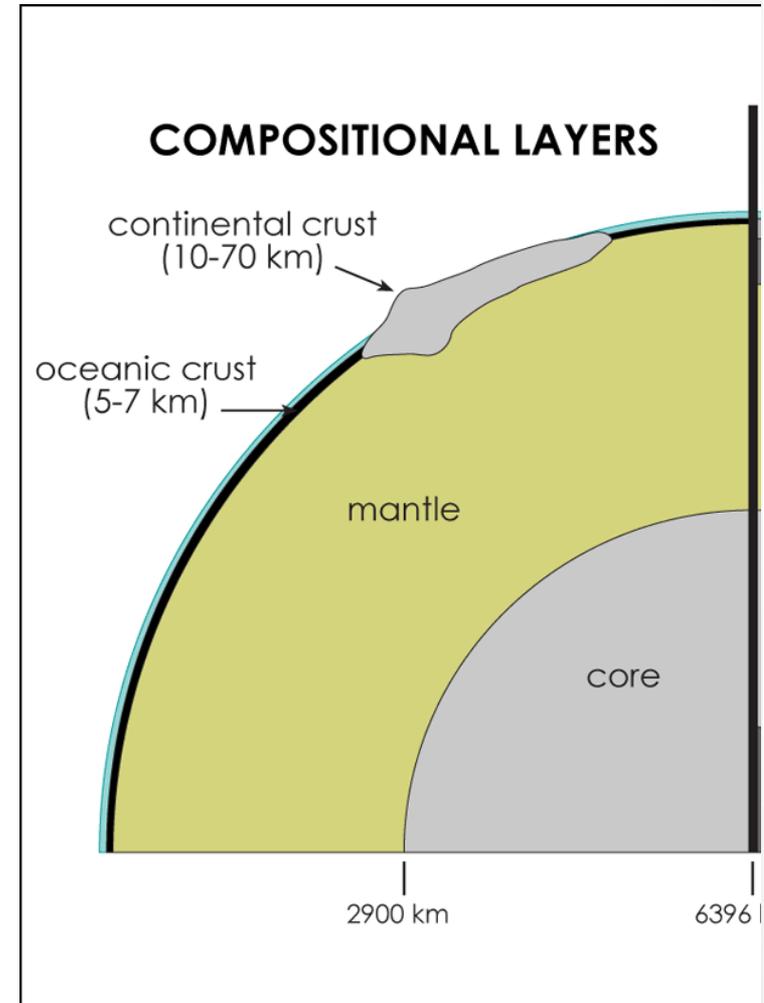
- Composição homogênea, com rochas formadas principalmente por **minerais de silicato de Mg**:
 - no manto superior predomina a rocha ***peridotito***, com densidade $3,5 \text{ g/cm}^3$.
 - no manto inferior os minerais que formam a rocha mudam, assumindo formas cristalinas mais compactas de maior densidade ($5,5 \text{ g/cm}^3$).



Fragmentos de **peridotito** do manto (verde) inclusos em rocha vulcânica (cinza)

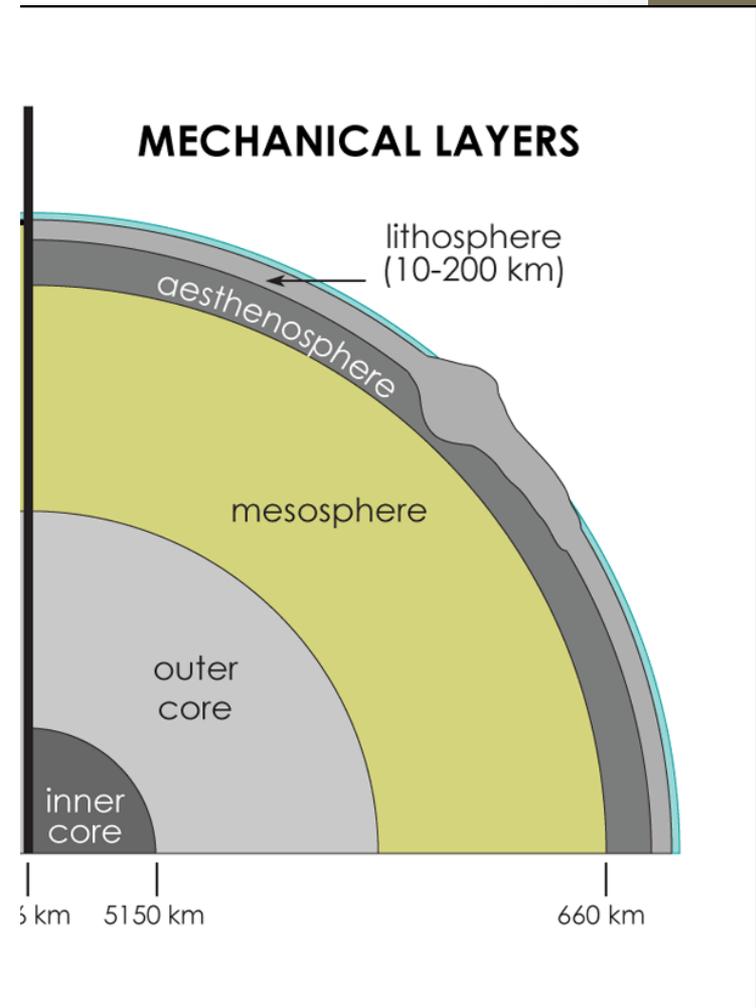
Núcleo

- Esfera composta de uma **liga de ferro e níquel**.
- Raio de 3486 km.
- Densidade entre 10 e 12 g/cm³.
- Temperaturas altas (4500 a <6000°C)



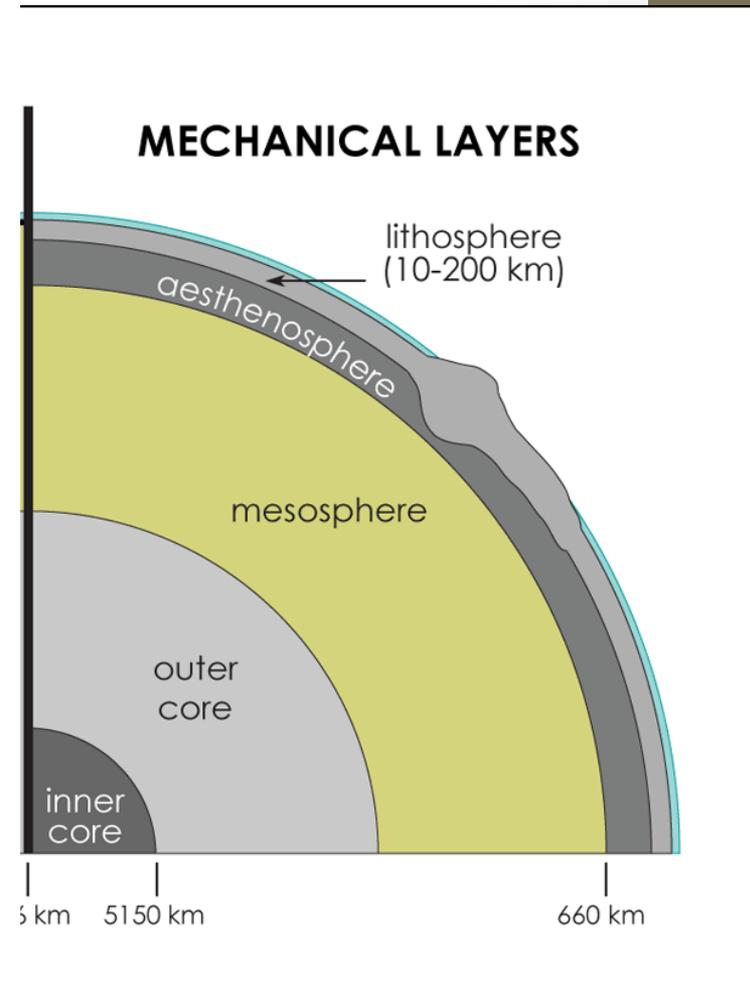
Camadas segundo as propriedades físicas

- Aumento gradual da **temperatura**, **pressão e densidade** com a profundidade no planeta
 - Afetam as propriedades físicas dos materiais terrestres.
- Tem-se cinco camadas:
- litosfera,
- astenosfera,
- mesosfera (manto inferior),
- núcleo externo e
- núcleo interno.



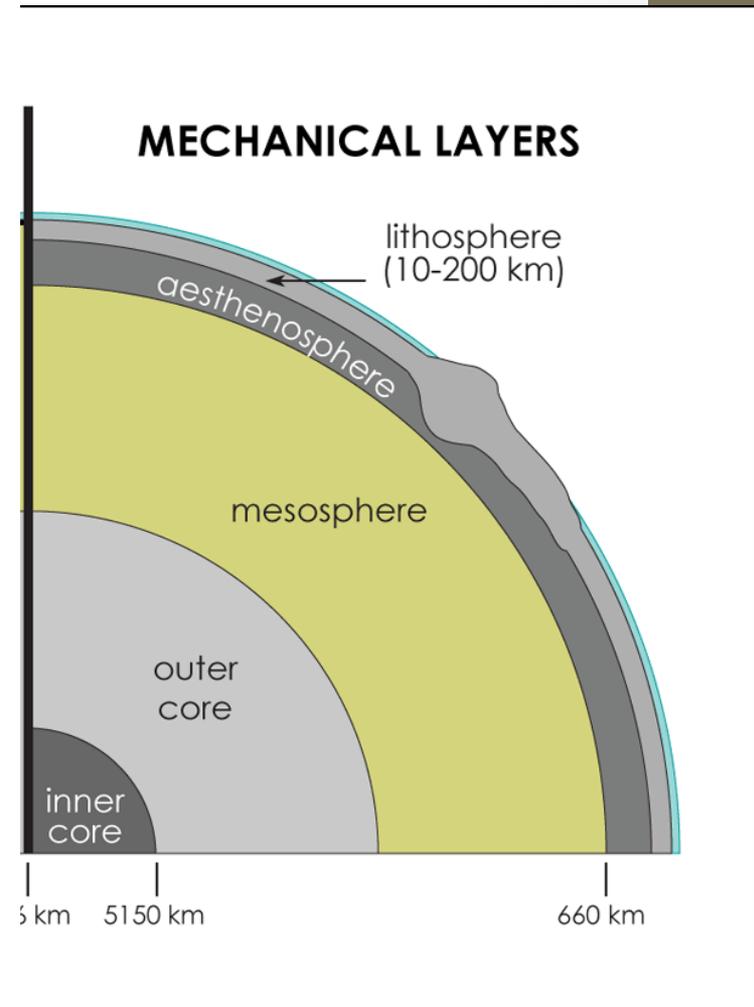
Litosfera

- Camada mais externa.
- Mais fria.
- Rígida.
- com média de 100 km de espessura, mas pode chegar a 250 km,
- inclui a crosta e parte do manto superior.



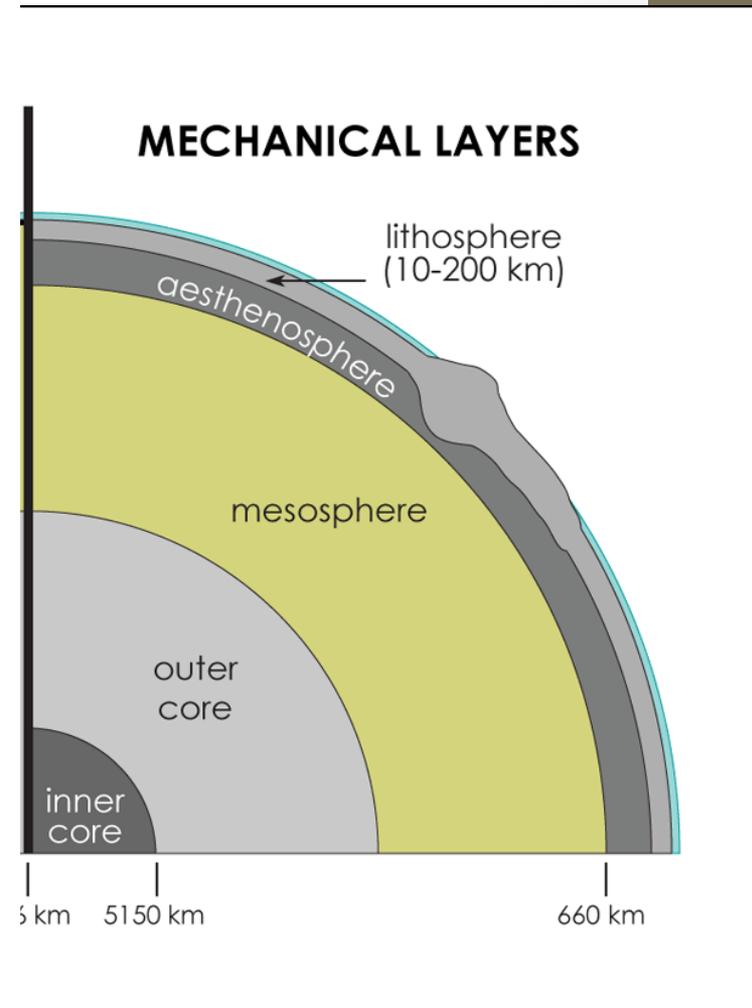
Astenosfera

- Camada mais plástica (sólida), que inclui o restante do manto superior.
- A porção superior possui temperatura e pressão tal, que pode haver pequenas quantidades de fusão da rocha silicática (em geral < 10% líquido).
- Devido à sua plasticidade, é mecanicamente separada da litosfera.
- Importante para a Teoria da Tectônica de Placas.



Mesosfera

- Camada abaixo da astenosfera, entre 660 e 2900 km, correspondente ao Manto Inferior.
- O aumento da temperatura se contrapõe à altíssima pressão – mantem-se sólido.
- Rígida, porém capaz de uma movimentação muito lenta.



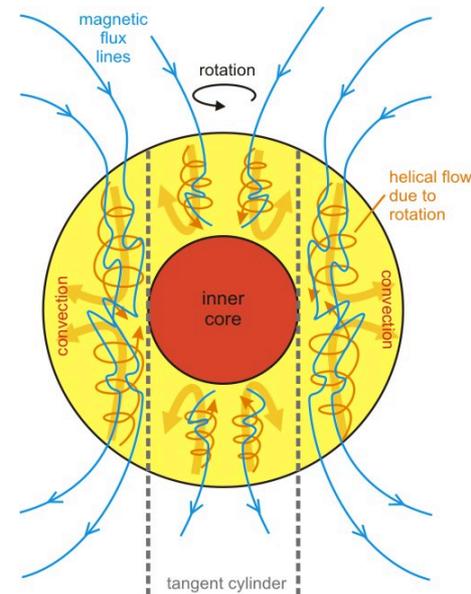
Núcleo

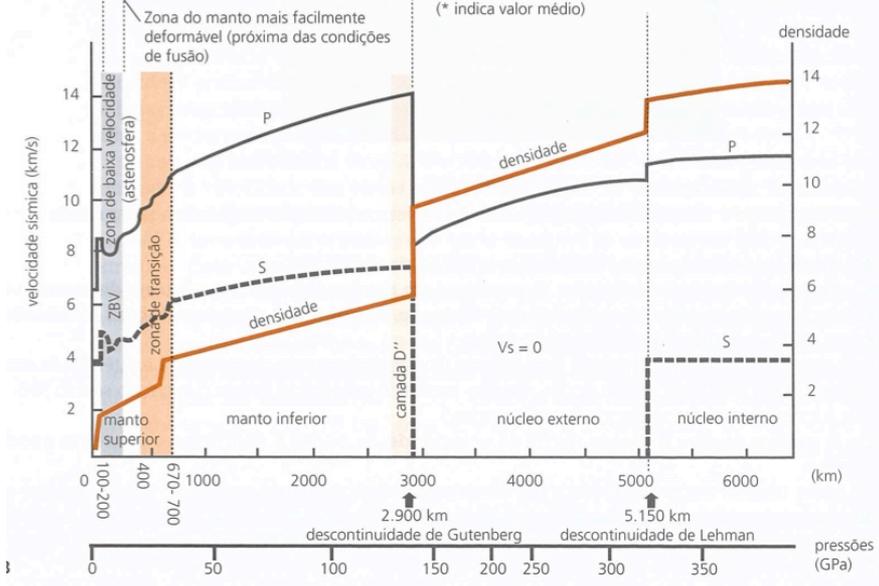
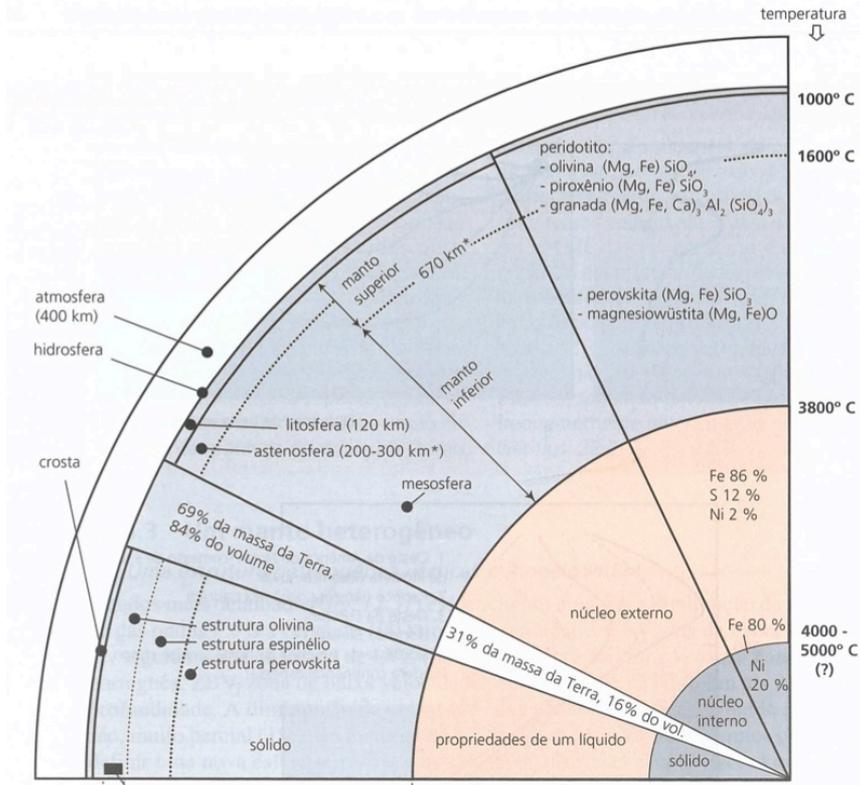
Externo

- 2270 km de espessura
- Densidade 10 g/cm^3
- Composição Fe+Ni
- Líquido
- A convecção deste líquido de ferro é responsável pelo campo magnético terrestre.

Interno

- Espessura 1216 km
- Densidade $11,5 \text{ g/cm}^3$
- Composição Fe+Ni
- Sólido





- Diferenciação química entre as camadas internas da Terra (que foi formado como um corpo homogêneo) → composição e densidade diferentes
- Diferença de temperatura e de comportamento entre litosfera e astenosfera → **consequências na dinâmica interna da Terra (Tectônica de Placas)**
- Atenção com o senso comum sobre o estado físico do manto!!

• **O MANTO É SÓLIDO**