

INTERIOR DA TERRA: MÉTODOS DE INVESTIGAÇÃO

META

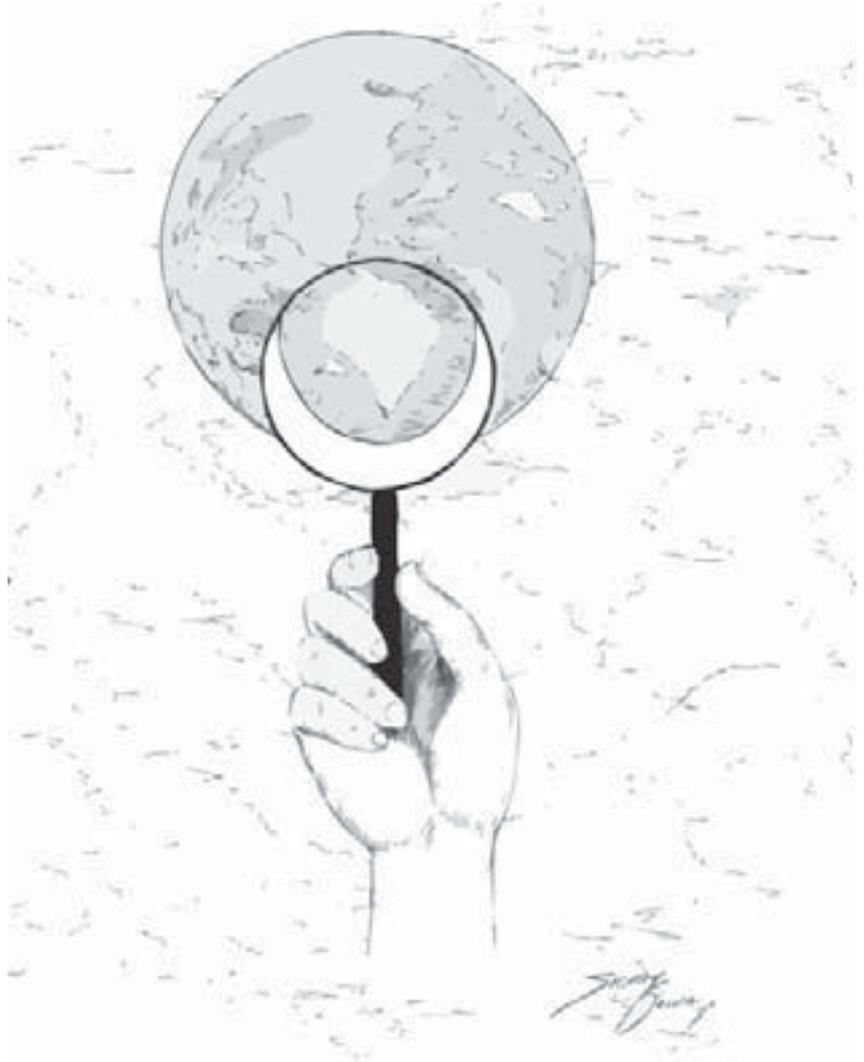
Iniciar o estudo do interior da Terra a partir da apresentação dos métodos de investigação diretos e indiretos, que fornecem informações da composição química e das características físicas em diferentes profundidades.

OBJETIVOS

Ao final desta aula, o aluno deverá:
reconhecer como são obtidas as informações sobre o interior da Terra;
identificar os diferentes métodos de investigação do interior da Terra e as informações que cada método apresenta;
distinguir alguns conceitos geológicos como isostasia, soerguimento e subsidência.

PRÉ-REQUISITOS

Conhecimento sobre a formação da



INTRODUÇÃO

Conforme vimos nas aulas anteriores, a Terra apresenta uma estrutura interna em camadas concêntricas, nas quais os elementos mais leves encontram-se na camada mais externa, enquanto que os mais densos encontram-se na camada mais interna.

Mas, como é que sabemos quais as características do interior da Terra que possui um raio de cerca de 6.370 km, sendo, por isso, inacessível ao homem? Para se investigar o interior da Terra, é necessário utilizar métodos diretos e indiretos. Mas o que são métodos diretos e indiretos?

A seguir você estudará os métodos de investigação do interior da Terra e, então, entenderá a importância de cada um deles para o atual conhecimento sobre este assunto.



Figura 7.1 - Terra (Fonte: <http://www.geocities.com>).

MÉTODOS DIRETOS

Os métodos diretos de investigação, como o próprio nome diz, referem-se àqueles nos quais os materiais do interior da Terra estão disponíveis na superfície ou próximos desta, permitindo uma análise direta destes. Os métodos diretos incluem o estudo de **afioramentos** rochosos, o estudo do material das partes mais profundas da **litosfera** trazidas à superfície pela atividade vulcânica e a análise de dados de minas e sondagens.

ESTUDO DE AFLORAMENTOS ROCHOSOS

O estudo compreende as rochas formadas a diferentes profundidades e sob condições de temperatura e pressão mais elevadas do que as condições da superfície, a exemplo das rochas ígneas plutônicas e das rochas metamórficas. Estas podem sofrer soerguimento e aflorar à superfície. Desta forma, o estudo destas rochas revela as condições físico-químicas do interior da Terra (Figura 7.3).



Figura 7.2 - Afioramento de rochas dobradas.

Afioramento rochoso

Parte de uma rocha exposta à superfície do solo.

Litosfera

Camada superficial do interior da Terra que tem comportamento sólido, rígido.

ESTUDO DO MATERIAL DA LITOSFERA

Erupção vulcânica

Extravasamento de material em fusão do interior da Terra (lava) na cratera de um vulcão.

Sílica

Composto oxigenado (SiO_2) do silício encontrado em minerais, areias e silicatos, usado na fabricação de vidro, sílica-gel etc.

As **erupções vulcânicas** podem incorporar e trazer à superfície fragmentos inalterados de rochas provenientes das partes mais profundas da litosfera. A análise deste material mostra que as rochas nesta profundidade contêm **sílica**, porém em menor proporção do que as rochas presentes na superfície terrestre.



Figura 7.3 - Sondagem realizada na planície costeira de Caravelas

ANÁLISE DE DADOS DE MINAS E SONDAGENS

Estas atividades permitem atingir e trazer à superfície materiais do interior da Terra. No entanto, a sondagem mais profunda realizada na província de Kola (Rússia) atingiu apenas cerca de 12 km de profundidade. Se compararmos este valor com o raio da Terra (cerca de 6.370 km), verificamos que apenas 0,19% do interior da Terra foi atingido. Além da obtenção de amostras das sondagens (Figura 7.3) para a análise, os cientistas podem utilizar o buraco da sondagem para inserir e baixar instrumentos para testar as propriedades elétricas das várias camadas; introduzir um gerador sônico para produzir fontes sonoras (semelhante ao princípio da sísmica de refração, como será visto a seguir); baixar sensores para registrar

diferenças entre as radioatividades naturais das camadas etc. Ao introduzir, porém, instrumentos no furo da sondagem, passa a ser um método indireto.

MÉTODOS INDIRETOS

Você acha que apenas as informações diretas são suficientes para dizer algo a respeito do interior da Terra? Claro que não! É necessário, então, lançar mão de outros métodos, os métodos indiretos. Os métodos indiretos baseiam-se na interpretação de dados de meteoritos, ondas sísmicas, estudos gravimétricos e magnetismo terrestre.

METEORITOS

Através da análise química dos meteoritos, é possível se fazer uma inferência a respeito da composição química da Terra, uma vez que o Sistema Solar e a própria galáxia (Via Láctea) têm a mesma origem. Acredita-se que os corpos celestes pequenos que orbitam em torno do Sol (meteoros) fazem parte de pedaços de pequenos corpos planetários (planetesimais), cuja origem está associada aos gases quentes das nebulosas que formaram as estrelas e os planetas. Eles são, algumas vezes, atraídos pelo campo gravitacional terrestre e, quando conseguem ultrapassar o calor e o atrito destrutivos da atmosfera terrestre, caem na Terra e passam a ser denominados de meteoritos.

Os meteoritos são classificados em dois principais grupos:

1. sideritos (ou meteoritos metálicos ou de ferro): são compostos por uma liga de ferro e níquel (90%Fe,10%Ni). Corresponderiam aos restos das substâncias que formaram o núcleo da Terra.
2. assideritos (aerólitos ou meteoritos rochosos): apresentam principalmente silicatos com centro (condritos) ou sem centro (acondritos) com quantidade variável de ferro metálico. Constituem os representantes do material do manto.

Desta forma, os meteoritos fornecem informações importantes sobre a origem, idade e composição interna dos planetas – principalmente Mercúrio, Vênus, Terra e Marte.

ONDAS SÍSMICAS

As principais inferências sobre as porções mais profundas do planeta só podem ser obtidas através da Sismologia, ciência que estuda as ondas sísmicas produzidas por terremotos.

Os terremotos geram onda, que se propagam através da terra. Estas ondas podem ser classificadas em ondas de superfície e ondas de corpo. As primeiras propagam-se próximas à superfície e causam danos no meio

ambiente e nas edificações devido à grande energia liberada na superfície. As ondas de corpo, importantes para o estudo do interior da Terra, propagam-se em direção ao interior da Terra e podem ser de dois tipos:

1. Onda P (primária ou longitudinal) - trafega mais rápido pelo interior da Terra, pois sua movimentação é no mesmo sentido da propagação da onda, que ocorre por compressões e distensões.
2. Onda S (secundária ou transversal) – movimento da onda é transversal ao sentido de propagação.

A chegada de ondas geradas pelos terremotos é registrada em diversas estações sismológicas espalhadas por todos os continentes, inclusive ilhas. A velocidade de propagação de ondas sonoras, geradas pelos abalos sísmicos (terremotos), variam ao atravessar o interior da Terra, por causa da variação de sua composição química, de densidade e de fase (sólido, líquido ou “plástico”). As ondas P são transmitidas em qualquer meio líquido, sólido ou gasoso, mas a velocidade de propagação é diferente num sólido e num líquido de igual composição; as ondas S só se propagam em meios sólidos.

Com base na análise da propagação das ondas P e S no interior da Terra, mostrada na Figura 7.4, é possível se chegar a algumas conclusões:

- a) a densidade da Terra aumenta com a profundidade;
- b) a cerca de 100 metros de profundidade, existe uma diminuição na velocidade das ondas P e S, sugerindo uma mudança de fase do meio. Como as ondas S não se propagam em meios líquidos, descarta-se a possibilidade desta zona ser líquida. Acredita-se que esta região, denominada de zona de baixa velocidade, apresenta um comportamento “plástico”. Esta zona corresponde à astenosfera.
- c) a cerca de 3.000 metros de profundidade, ocorre uma queda brusca na velocidade das ondas P, enquanto que as ondas S deixam de se propagar. Acredita-se que esta camada, que corresponde ao núcleo externo, seja líquida.
- d) a cerca de 2.900 km de profundidade ocorre um aumento na velocidade das ondas P. Inicia-se, então, o núcleo externo que é sólido.

ESTUDOS DA GRAVIDADE TERRESTRE

O estudo da gravidade terrestre fornece informações das dimensões, forma e massa da Terra, assim como esta se distribui no interior do planeta. Além disto, como veremos a seguir, várias inferências importantes do comportamento físico das porções mais externas do planeta (litosfera e astenosfera) são obtidas através dos estudos da gravidade terrestre.

O raio médio da Terra é de cerca de 6.370 km, e o valor da massa é de aproximadamente 5,327 g. Com esses valores, calcula-se a densidade média que é de cerca de 5,5 g/cm³. Este valor é mais elevado do que a densidade das rochas na superfície terrestre, que varia de 2,5 a 3,0 g/cm³. Isto sig-

nifica que o interior da Terra deve ter densidade bem maior. As causas da elevada densidade no interior da Terra devem-se às mudanças de estado físico decorrentes das elevadas pressões, mudança na composição química com a presença de materiais mais densos ou uma combinação dos dois.

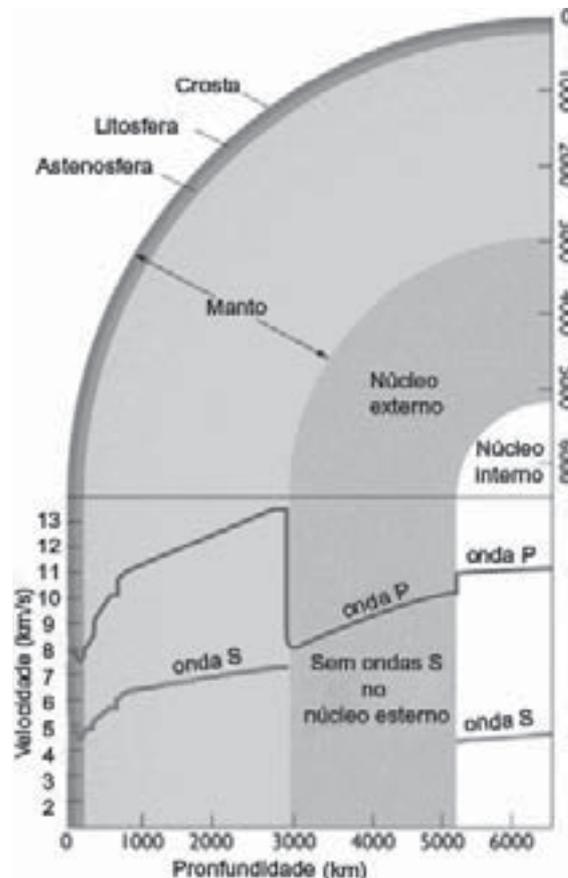


Figura 7.4 - Subdivisão do interior da Terra a partir de dados sísmológicos. A- Seção transversal do interior da Terra. B - Gráfico mostrando a relação entre a velocidade das ondas P e S, a densidade e a profundidade.

Por outro lado, inferências a respeito do comportamento físico da litosfera e astenosfera também puderam ser realizadas através do estudo da gravidade terrestre. A atuação da gravidade na litosfera e astenosfera faz com que porções menos densas, a exemplo dos continentes (composição granítica), fiquem mais elevadas do que as rochas mais densas do assoalho oceânico (composição basáltica). Da mesma forma, a carga sobre a superfície da Terra (gelo glacial, sedimentos em deltas de rios etc) pode causar um afundamento daquela região.

Para entender melhor o conceito de isostasia, você pode imaginar um isopor flutuando na água. Se você colocar uma moeda, o que acontecerá? O peso da moeda causará um afundamento do isopor. E se você retirar esta moeda? O isopor se elevará. O que acontece na litosfera é muito similar.

Um exemplo clássico é o degelo das geleiras iniciado há cerca de 10.000 anos na Escandinávia. Este fato causou uma diminuição no peso sobre o

Intemperismo

Alteração da rocha na superfície terrestre devido à ação do clima movida pela energia solar (insolação, precipitação pluviométrica etc).

Erosão

Remoção das partículas intemperizadas pela água, vento ou gelo.

Isostasia

Equilíbrio da litosfera ao flutuar sobre o substrato fluido da astenosfera.

Subsidência

A fundamento abrupto ou gradativo da superfície da terra, com pouco ou nenhum movimento horizontal.

continente, fazendo com que este se elevasse a uma taxa de cerca de 1 cm/ano. Em compensação, os países baixos estão afundando.

É por isso que as rochas metamórficas ou as rochas ígneas plutônicas formadas em níveis crustais mais profundos, onde a T e a P são elevadas, podem ser estudadas na superfície da Terra.

O **intemperismo** e **erosão** causam a diminuição do peso das rochas, causando o soerguimento da litosfera, fazendo com que as rochas que estavam em profundidade aflorem à superfície.

A litosfera responde à força da gravidade à medida que tenta manter um balanço gravitacional denominado de isostasia. É por isso que o peso causa um afundamento da litosfera (**subsidência**), e a retirada do peso causa um levantamento da litosfera (soerguimento) (Figura 7.5).

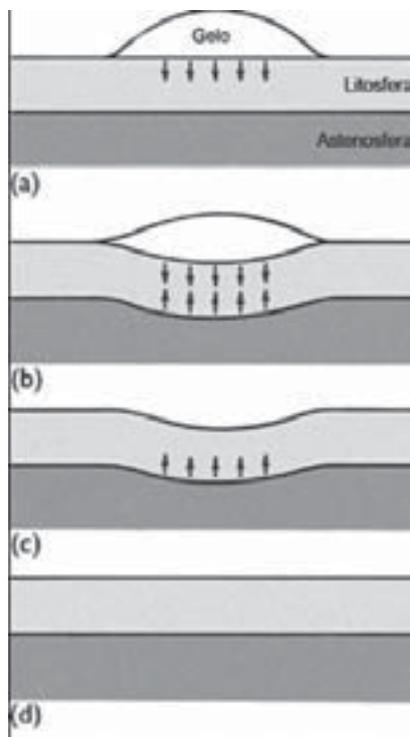


Figura 7.5 - Isostasia. (a) crescimento de uma geleira continental; (b) a litosfera afunda formando uma raiz na sua base que suporta a carga do gelo isostaticamente (derrete, mas a raiz permanece por causa da viscosidade da astenosfera); (c) flutuabilidade da raiz favorece ao lento soerguimento; (d) a superfície assume, assim, seu nível original. As setas indicam os movimentos de subsidência* (setas para baixo) e soerguimento (setas para cima) da litosfera.

Você entendeu até agora este processo? Então veja o conceito de isostasia!

A **isostasia** baseia-se no Princípio de Equilíbrio Hidrostático de Arquimedes, no qual um corpo de densidade menor flutua em um fluido de densidade maior, sendo que a massa de fluido deslocado é igual à massa do corpo. Airy (1855) e Pratt (1885) propuseram, assim, que a parte superior da Terra (litosfera) flutuaria sobre o substrato mais denso (astenosfera).

Segundo Airy (1855), as elevações topográficas e as depressões devem ser compensadas, respectivamente, pelo aumento ou diminuição da espessura

dos blocos de mesma densidade de modo a manter o equilíbrio (Figura 7.6).

De acordo com Pratt (1885), as elevações ou depressões devem ser compensadas em uma profundidade fixa. Neste caso, os blocos têm densidades distintas; as elevações possuem blocos menos densos, enquanto que as depressões apresentam blocos mais densos, obtendo-se, assim, o equilíbrio isostático (Figura 7.7).

Os dois modelos de compensação isostática ocorrem na natureza. As montanhas são mais elevadas, pois suas raízes são mais profundas na astenosfera. Os continentes situam-se acima do assoalho oceânico em função das diferenças composicionais e de densidade entre as rochas da litosfera continental e da litosfera oceânica.

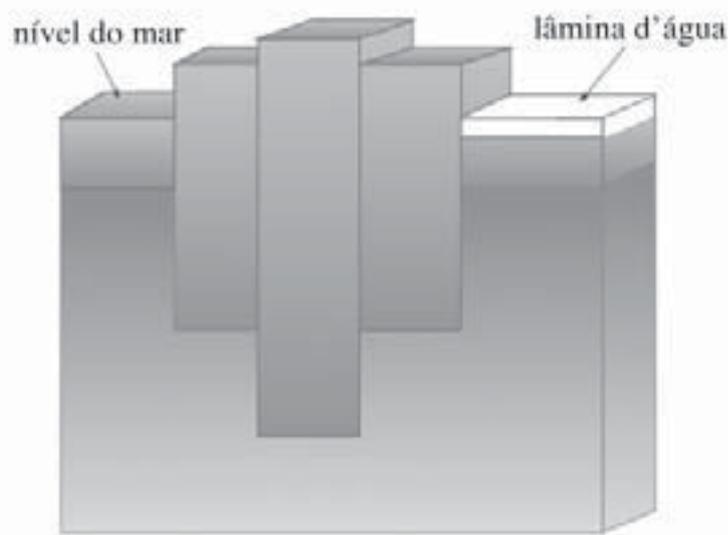


Figura 7.6 - Hipótese de Airy, na qual rochas de mesma densidade apresentam raízes em diferentes profundidades para compensar as elevações do terreno. (Fonte: TEIXEIRA, W. et al, 2000).

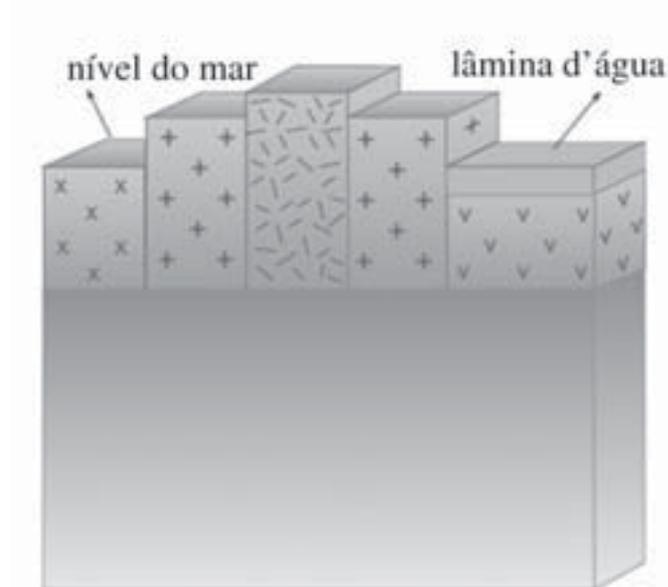


Figura 7.7 - Hipótese de Pratt, na qual rochas com raízes em mesma profundidade apresentam densidades diferentes para compensar as elevações do terreno (Fonte: TEIXEIRA et al, 2000).

Em resumo, além da diferença lateral de composição e densidade das rochas na superfície, estas informações nos permitem inferir o comportamento “plástico” da astenosfera e rígido da litosfera; pode-se dizer, assim, que a litosfera “flutua” sobre a astenosfera.

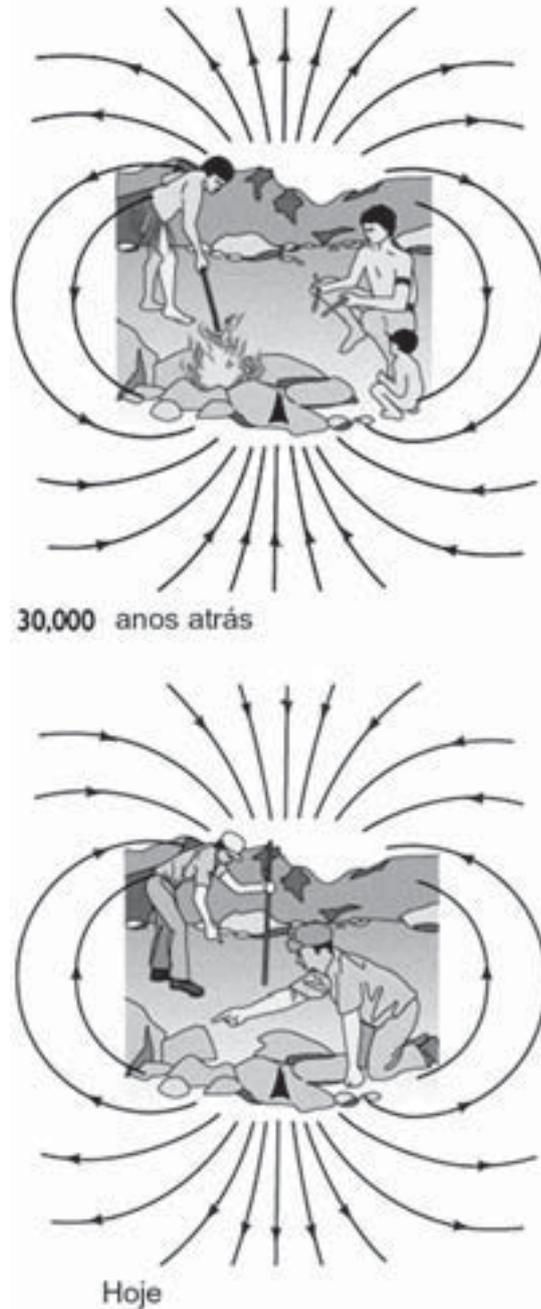


Figura 7.8 - O campo magnético terrestre, há cerca de 30.000 anos, era invertido em relação ao atual. Isto foi evidenciado em uma antiga aldeia aborígene, no local onde fogueiras eram acendidas. As rochas resfriadas, após a última fogueira, registraram o campo magnético da Terra. Este era contrário ao atual.

MAGNETISMO TERRESTRE

O campo magnético terrestre possui três componentes principais: campo interno (ou principal), campo externo (ou secundário) e campo local (ou crustal). O campo interno é responsável por praticamente 95% do campo magnético terrestre medido e se comporta como um imenso ímã, centrado no interior da Terra, com deslocamento de cerca de 11° em relação ao eixo polar, onde uma agulha imantada tende a se orientar na direção do norte magnético, diferente do norte geográfico. Esse campo varia ao longo do tempo geológico, em escala de milhões de anos, aumentando e diminuindo sua intensidade. Quando se aproxima de zero, por ser uma grandeza vetorial, ocorre a inversão do pólo norte magnético com o sul (Figura 7.8).

Por outro lado, o campo externo tem origem na ionosfera, camada mais externa da atmosfera terrestre, caracterizada por íons e partículas livres eletricamente condutoras. Segundo a lei da Indução de Faraday (1831), toda corrente elétrica gera um campo magnético e vice-versa. Desta forma, as correntes geradas na ionosfera colaboram para a constituição do campo magnético terrestre.

As rochas na superfície da Terra, ao se formarem, registram as informações do campo magnético terrestre (Figura 7.9). Isto ocorre em função da presença de minerais magnéticos, tais como a magnetita (Fe_3O_4) e a hematita (Fe_2O_3) que constitui o campo local.

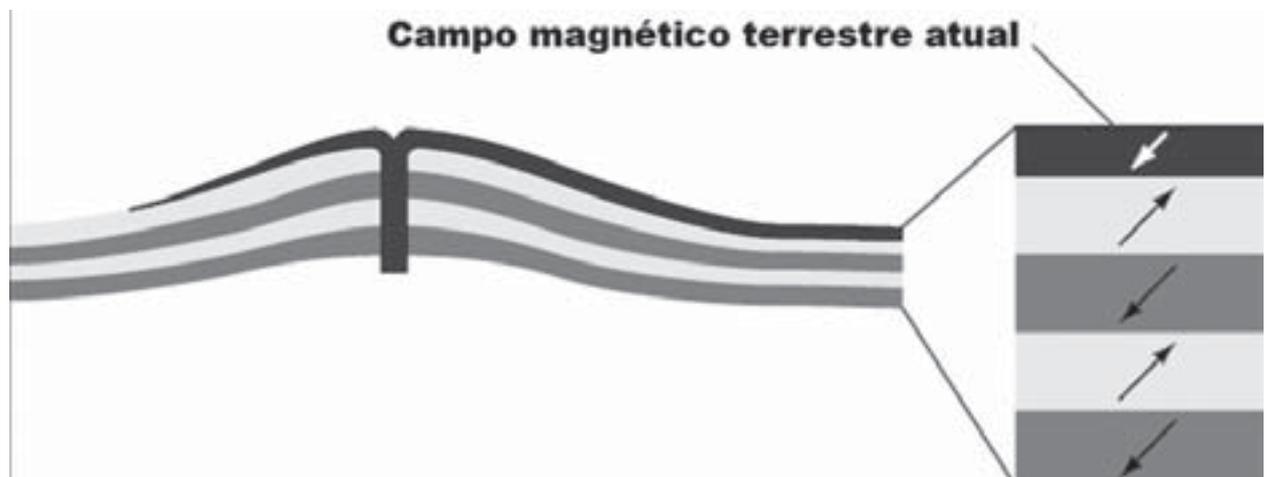


Figura 7.9 - Em atividades vulcânicas, os derrames de lava, ao se resfriarem e solidificarem, registram o campo magnético à época de sua formação. A camada mais superficial apresenta o campo atual; as camadas subjacentes registraram o campo pretérito. As setas indicam o sentido do campo magnético terrestre e mostram inversões ao longo do tempo geológico.

O estudo das variações do campo magnético terrestre permite inferir importantes propriedades do interior da Terra. O magnetismo terrestre implica na existência de fluxos de correntes elétricas em movimentos, gerando campos magnéticos. O conhecimento adquirido do estudo dos meteoritos e da propagação das ondas sísmicas sobre o interior da Terra sugere que o núcleo é o principal gerador do campo geomagnético e que o núcleo externo, líquido, é responsável por suas variações no tempo geológico, funcionando como uma espécie de dínamo (máquina rotativa que converte energia mecânica em elétrica) auto-sustentável.

CONCLUSÃO

Conforme foi visto no decorrer desta aula, as principais informações obtidas do interior da Terra provêm de métodos indiretos, uma vez que os métodos diretos fornecem dados apenas da parte mais superficial da Terra, cerca de 0,19% do raio da Terra. Os métodos indiretos, predominantemente geofísicos, tais como o estudo das ondas sísmicas, da gravidade terrestre e do magnetismo terrestre, fornecem informações sobre o comportamento físico e a composição química do material que compõe o interior da Terra. Destes, sem dúvida, o estudo das ondas sísmicas foi o que mais contribuiu para o entendimento do interior da Terra. Os conceitos de isostasia, soerguimento e subsidência são fundamentais para o entendimento da interação entre a dinâmica interna e externa da Terra, assim como para compreender o relevo terrestre e a presença na superfície de rochas formadas no interior da Terra.



RESUMO

Os métodos de investigação do interior da Terra incluem os diretos (estudo de afloramentos rochosos, material rochoso trazido à superfície através de atividades vulcânicas, dados de minas e sondagens) e indiretos (estudo dos meteoritos, da gravidade terrestre, do magnetismo terrestre e das ondas sísmicas). Estes estudos mostram que a Terra apresenta uma estrutura interna concêntrica em camadas, nas quais os materiais mais densos encontram-se em seu centro, e os menos densos, na superfície.

ATIVIDADES

1. Uma vez que apenas a camada mais superficial da Terra é acessível às investigações científicas diretas, com base em quais informações são inferidas as características físicas e composicionais do interior da Terra?
2. Por que o relevo terrestre não é plano, já que a Terra tem cerca de 4,5 bilhões de anos?

**COMENTÁRIOS SOBRE AS ATIVIDADES**

Atividade 1: reveja os métodos diretos e indiretos e indique como estes podem fornecer informações do interior da Terra.

Atividade 2: para responder a esta questão, você tem que rever os conceitos de isostasia, soerguimento e subsidência.

PRÓXIMA AULA

Na próxima aula, você conhecerá a estrutura interna da Terra, compreendendo as suas camadas, composição química e características físicas.

**LEITURA COMPLEMENTAR**

B. NETO, J. A.; PONZI, V. R. A.; SICHEL, S. E. (org.). Introdução à Geologia Marinha. Rio de Janeiro: Interciência, 2004.

**REFERÊNCIAS**

PRESS, F. et al. Para entender a Terra. Tradução: R. Menegat et al. Porto Alegre: Bookman, 2006.

TEIXEIRA, W. et al (org.). Decifrando a terra. São Paulo: Oficina de Texto, 2000.

B. NETO, J.A.; PONZI, V.R.A.; SICHEL, S.E. (org.). Introdução à Geologia Marinha. Rio de Janeiro: Interciência, 2004.

SUGUIO, K.; SUZUKI, U. A evolução geológica da Terra e a fragilidade da vida. São Paulo: Ed. Edgard Blücher Ltda, 2003.

WYLLIE, Peter J. A Terra: nova geologia global. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1979.