



Estrutura interna da Terra

Acredita-se que a causa das atividades dinâmicas do nosso planeta esteja oculta em seu interior. Entretanto as tecnologias atualmente disponíveis ainda não permitem uma observação direta das características internas da Terra. A seguir são apresentados os conhecimentos sobre sua estrutura interna, bem como as propriedades das camadas componentes.

Perfurações superprofundas

O progresso alcançado pelas técnicas de sensoriamento remoto tem proporcionado um grande avanço no conhecimento da superfície terrestre. Entretanto somente há pouco tempo tornou-se possível vislumbrarmos o interior do planeta.

Mas como é possível investigar o interior da Terra a partir da superfície? Seria muito bom se pudéssemos executar furos profundos em áreas continentais e submarinas para observação direta. Porém essa tecnologia esbarra no limite de possibilidades técnicas, pois não permite ir além de alguns milhares de metros.

Nas modernas perfurações petrolíferas, as sondagens mecânicas atingem profundidades consideráveis. Mas, em áreas emersas, não ultrapassam 8 a 10 km e, em campos petrolíferos submarinos, chegam a apenas 5 ou 6 km (ver boxe), em vista da dificuldade acrescentada pela lâmina de água dos oceanos.

Projetos envolvendo perfurações superprofundas, com objetivos essencialmente científicos, vêm sendo implementados por alguns países da Europa. A antiga União Soviética executava um projeto desse tipo na Península de Kola (próxima à articulação desta com a Península da Escandinávia). Iniciado em 1970, objetivava atingir 14 km de profundidade, mas foi interrompido, em 1990, após atingir 12.260 m; as rochas cada vez mais duras tornaram a perfuração muito dispendiosa. As rochas no local são compostas de anfibolitos e gnaisses com cerca de 3 bilhões de anos, formadores dos continentes. Desse modo, não foi possível perfurar profundamente nem mesmo as rochas “sob os nossos pés”.

Os mais profundos poços de prospecção petrolífera

O mais profundo poço de prospecção de petróleo e/ou gás natural, no mundo inteiro, de que se tem registro foi perfurado nos Estados Unidos, no estado do Oklahoma, na década de 70. Era uma sondagem em busca de gás e atingiu 9.583 m. No Japão, um poço estratigráfico perfurado na Província de Niigata chegou a 6.310 m.

A Alemanha também empreendeu uma perfuração superprofunda a partir de 1990. Tratava-se do Projeto KTB, que visava estudar a estrutura do embasamento rochoso do continente europeu. O furo foi interrompido em 10 de outubro de 1994, à profundidade 9.109 m, pelas mesmas razões que o da Península de Kola.

A tais profundidades, as rochas se tornam extremamente duras, podendo reduzir a velocidade de perfuração à irrisória marca de 1 cm/dia. Além disso, a temperatura chega a ultrapassar os 200°C e os instrumentos de medição também ficam mais sujeitos a danos. Portanto a observação direta das rochas mais profundas do interior da Terra é, no momento, praticamente impossível.

Sendo o raio da Terra (metade do diâmetro) de 6.400 km, mesmo uma perfuração de 14 km não passa de um “arranhão superficial”, muito longe portanto de oferecer um acesso ao interior da Terra.

Como sempre haverá um limite nas profundidades dos poços, hoje em dia são executadas várias perfurações relativamente rasas, pelas quais se tenta obter as informações. Entre esses projetos internacionais temos o Projeto de Perfuração Submarina Profunda (sigla em inglês: DSDP) e o Projeto de Perfuração Oceânica (sigla correspondente, ODP) (ver boxes).

Perfurações profundas têm sido executadas não apenas para pesquisar a estrutura interna da Terra, mas também para investigar as possibilidades de formação de petróleo e/ou gás natural nessas profundidades. Uma perfuração ligada ao Projeto de Perfuração Profunda (DDP, em inglês) foi iniciada na Suécia, em julho de 1986, em um astroblema de 360 milhões de anos (ver box). Um astroblema é a “marca” impressa na superfície do planeta, em geral na forma de cratera preenchida, pelo impacto de um meteorito.

O terreno que originou o astroblema compõe-se de granito, que é uma rocha isenta de matéria orgânica, portanto sem relação natural com petróleo e/ou gás natural. Assim, se esses materiais ocorressem nas rochas locais, ficaria comprovada a possibilidade de sua formação em ausência de matéria orgânica,

Perfurações submarinas profundas

O DSDP e o ODP são projetos internacionais, iniciados sob a liderança dos Estados Unidos e com participação de vários países, com vistas ao estudo científico de regiões submarinas profundas. No início dos anos 2000, relatos davam conta de que alguns desses furos teriam ultrapassado a crosta oceânica e atingido o manto superior. As perfurações continuavam em várias áreas com resultados muito diversos.

Projeto Científico de Perfuração Continental Profunda

Esse é um projeto análogo ao DSDP e ao ODP, mas em área continental. Seu objetivo é pesquisar fenômenos de vulcanismos e terremotos, além do mecanismo de movimentação das placas. O Japão participa desse projeto. As perfurações em áreas terrestres de vários países, inclusive no Japão, foram iniciadas em 1996.

o que seria uma grande descoberta!

A escolha do local deveu-se não somente à presença do granito, mas também à possível presença de rocha muito fraturada, que funcionaria como armazenadora de eventuais hidrocarbonetos gerados pelo

impacto. A sondagem enfrentou muitas dificuldades e acabou interrompida, a 6.337m de profundidade, em setembro de 1987. Infelizmente nenhum indício de petróleo e/ou gás natural foi encontrado.

Interpretação de ondas sísmicas

Um dos métodos mais eficientes na investigação interna da Terra consiste na interpretação de registros de ondas sísmicas relacionadas a terremotos, que ocorrem em vários pontos do planeta. Os métodos gravimétricos ou magnetométricos são eficientes até cerca de 100 km; os dados de profundidades maiores, até aproximadamente 600 km, são obtidos por ondas sísmicas.

Durante um terremoto, as vibrações verticais são precursoras das vibrações horizontais; quanto menor for o intervalo entre esses abalos, mais superficial será o hipocentro. As ondas sísmicas podem ser verticais (ondas P) e horizontais (ondas S), e sua velocidade de propagação difere conforme o tipo e a dureza das rochas. Ao se propagar através das rochas, as ondas podem sofrer reflexão ou refração; além disso, enquanto as ondas verticais são transmitidas através de quaisquer materiais, as horizontais são absorvidas pelos fluidos.

O emprego dessas propriedades das ondas sísmicas permite estudos a até 10 mil km de distância. Podemos, portanto, utilizar as ondas sísmicas de terremotos produzidos no outro lado da Terra para inferir dados sobre sua estrutura interna. Na pesquisa petrolífera, as prospecções sísmicas também são importantes e, nesse caso, os abalos são produzidos artificialmente pela detonação de explosivos. Estudando as ondas refletidas e refratadas é possível deduzir a existência ou não de prováveis trapas (armadilhas) petrolíferas até cerca de 10 km de profundidade.

Projeto de Perfuração Profunda (DDP)

Empreendimento executado na Suécia, baseado na hipótese do dr. Thomas Gold (Universidade de Cornell, Estados Unidos) sobre a possível origem do petróleo e/ou gás natural no interior da Terra. A perfuração visava atingir quatro camadas, eventualmente contendo petróleo e/ou gás natural. O trabalho foi iniciado em julho de 1986 e prosseguiu até setembro de 1987, mas teve de ser interrompido a 6.337m de profundidade, após atravessar três camadas.

Origem da dinâmica terrestre: crosta, manto e núcleo

O primitivo planeta Terra pode ser visualizado como um corpo celeste remanescente da origem do Sol. Ele teria sofrido repetidas colisões com corpos menores e, servindo-se de sua própria força gravitacional, teria agregado outros planetas menores adjacentes, reunindo assim os diversos elementos químicos componentes desses astros.

No interior da Terra, as diferenças entre algumas propriedades físicas, como temperatura, pressão e densidade, dão origem a diversas camadas (Fig. 2-1). No centro temos o núcleo, onde podem ser reconhecidos o núcleo externo e o núcleo interno (ver boxe).

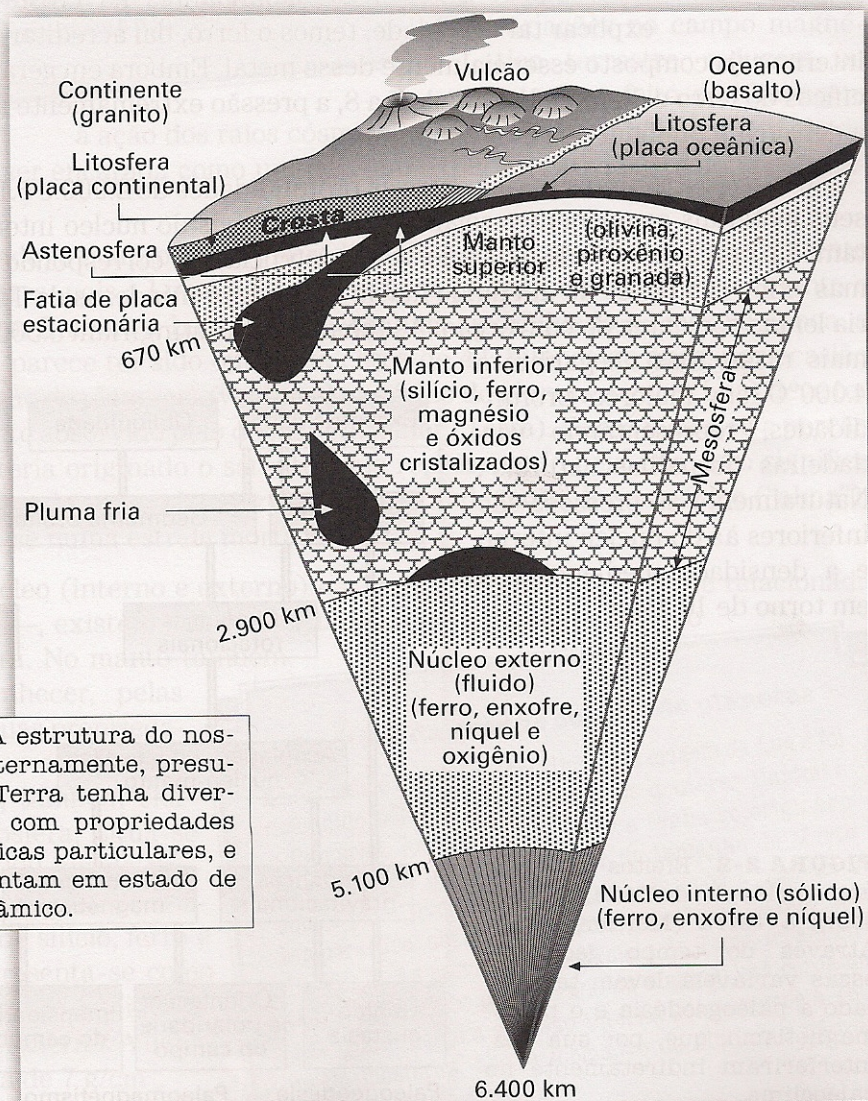


FIGURA 2-1 A estrutura do nosso planeta. Internamente, presume-se que a Terra tenha diversas camadas, com propriedades físicas e químicas particulares, e que se apresentam em estado de equilíbrio dinâmico.

Núcleo interno e núcleo externo

O núcleo interno é sólido e tem um raio de cerca de 1.300 km, formando uma bola de ferro no centro da Terra. A massa do núcleo interno corresponde a 1/30 de todo o núcleo. Estima-se que sofreu um resfriamento de cerca de 300°C em 4,6 bilhões de anos. Teria havido segregação do ferro a partir do fluido e, por questões de densidade, no centro formou-se o núcleo interno. O núcleo externo apresenta-se em estado fluido e possuiria um raio de 3.500 km. A massa do núcleo externo representaria cerca de 1/30 de toda a Terra.

O núcleo interno encontra-se a 5.100 km de profundidade, sendo formado por compostos metálicos de ferro, níquel e enxofre. Apesar da altíssima temperatura (ultrapassaria os 5.000°C), permanece em estado sólido em função também da altíssima pressão, que chega a 3 milhões de atmosferas. Sua densidade é de 13 g/cm³.

Entre os elementos químicos abundantes na crosta que poderiam

explicar tal densidade, temos o ferro, daí acreditar-se que o núcleo interno seja composto essencialmente desse metal. Embora em geral os pesos específicos do ferro e do níquel sejam de 7 a 8, a pressão extremamente alta faz com que a densidade também seja muito mais alta.

O núcleo externo situa-se entre as profundidades de 2.900 e 5.100 km. Embora seus materiais componentes sejam quase iguais aos do núcleo interno, ele contém também cerca de 10% de oxigênio. A consistência não corresponde à de um sólido, mas exibe condições de um fluido macio que, nas profundezas da Terra, apresentaria lentas correntes de convecção. As temperaturas atingiriam 3.500°C nas porções mais rasas, mas chegariam a 4.000°C em maiores profundidades, representando verdadeiras "fornalhas naturais". Naturalmente as pressões são inferiores às do núcleo interno e a densidade média estaria em torno de 10 g/cm³.

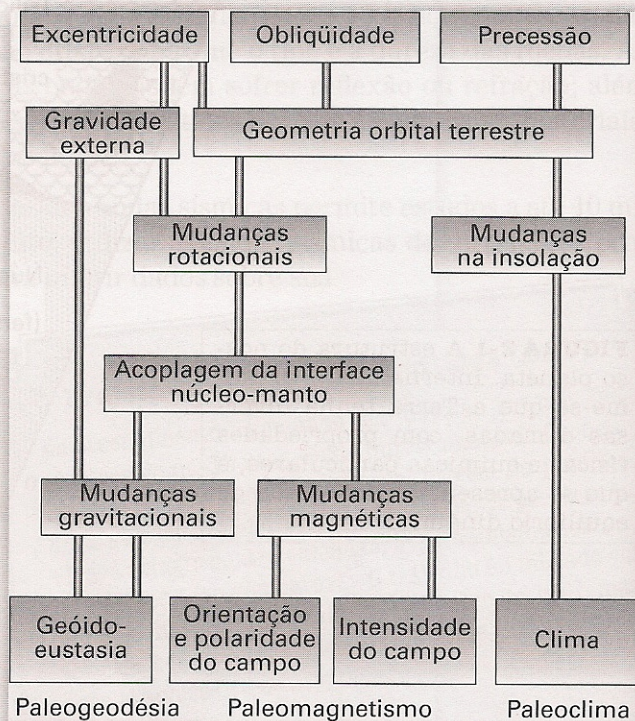


FIGURA 2-2 Efeitos múltiplos das variáveis de Milankovitch sobre a Terra (Mörner, 1981). Através do tempo geológico, essas variáveis devem ter afetado a paleogeodésia e o paleomagnetismo, que, por sua vez, interferiram indiretamente no paleoclima.

O núcleo de outros planetas

A densidade de Marte é muito baixa; portanto, mesmo que ele tenha um núcleo, acredita-se que seja muito pequeno. O planeta é desprovido de campo magnético e, por ser pequeno, deve ter sofrido um rápido resfriamento; provavelmente tem um núcleo sólido.

Merúrio apresenta densidade semelhante à da Terra e, desse modo, seu núcleo deve ser muito grande. Como possui campo magnético fraco, acredita-se que na superfície do núcleo reste uma delgada camada de fluido.

Vênus possui tamanho e densidade média semelhantes aos da Terra e acredita-se que seu núcleo seja também semelhante ao da Terra. Não exibe campo magnético e, desse modo, provavelmente o núcleo é sólido.

à ação dos raios cósmicos (Fig. 2-2). Portanto a existência do núcleo poderia ser encarada como um fato que explica as atividades do nosso planeta (ver boxe).

Por outro lado, e quanto à Lua? Acredita-se que seu núcleo seja bem diferente do núcleo da Terra, pois a Lua não possui um campo magnético tão forte quanto o do nosso planeta. Embora a Lua e a Terra tenham se originado na mesma época, a história da Lua parece ter sido outra. Há cerca de 4,5 bilhões de anos, por ocasião da “grande colisão de planetas” (ver boxe), o núcleo do planeta menor (Lua) deve ter sido parcialmente absorvido pelo do planeta maior (Terra). Desse modo, só a porção remanescente teria originado o satélite, hoje representado pela Lua. Isso significa que há 4,5 bilhões de anos, a Lua teria perdido grande parte de seu núcleo (“alma”), transformando-se numa estrela morta.

Entre o núcleo (interno e externo) e a crosta — mais diretamente relacionada ao ser humano —, existe o manto (ver boxe), que representa 80% do volume da Terra. No manto também podemos reconhecer, pelas diferenças de suas propriedades, o superior e o inferior. O manto inferior, também chamado de mesosfera, situa-se entre 670 e 2.900 km de profundidade. Compõe-se de cristais de óxidos de silício, ferro e magnésio e apresenta-se como que flutuando sobre o fluido viscoso do núcleo externo. A densidade é de cerca de 7 g/cm^3 .

Hipótese da grande colisão de planetas

Esse modelo explicaria totalmente a origem da Lua e foi defendido por astrofísicos como os doutores Hartman e Cameron. Acredita-se que a Lua tenha se originado da colisão de um corpo celeste do tamanho de Marte com o primitivo planeta Terra. Logo após a colisão, a temperatura absoluta da Terra se elevou acima dos 10.000°C . As camadas superficiais da Terra foram então ocupadas por um “oceano de magma” até cerca de 1.000 km. Como a pressão interna era superior a 150 mil atmosferas, houve formação de olivina e não de plagioclásio (feldspato).



FIGURA 2-3 Comportamento do manto. Essa camada da Terra começa na base da litosfera ou crosta (a poucas dezenas de quilômetros, no máximo) e vai até 2.900 km de profundidade. Seu estado físico é o de um fluido muito viscoso, que confere ao planeta propriedades físicas muito peculiares.

Embora o manto inferior seja sólido, estranhamente exibe também características de fluido. Desse modo, se algo pesado for colocado sobre a superfície da Terra por um tempo suficientemente longo, o peso será transmitido ao manto, formando uma depressão. Segundo medições realizadas, as alterações no peso da calota glacial da Groenlândia, por exemplo, têm causado deformações no manto. Se ele fosse essencialmente sólido, não deveria haver deformação; mas ao longo do tempo o manto (ver boxe) comporta-se como um fluido de altíssima viscosidade (Fig. 2-3). O manto inferior, que apresenta essa propriedade, deforma-se com uma velocidade de alguns centímetros por ano, influenciando diretamente na atividade vulcânica e na tectônica de placas, que se desenvolvem no manto superior.

Manto

Abaixo da placa litosférica, até 670 km de profundidade, temos o manto superior e, abaixo deste, até 2.900 km, o manto inferior. No contato entre os dois mantos, ocorre uma descontinuidade, devido à variação de densidade. Falta esclarecer se as correntes de convecção do manto formam uma ou duas camadas. A densidade média do manto é de 5 g/cm^3 .

Placa crustal: bloco continental que flutua sobre o manto

O manto superior tem a mesma composição do manto inferior, sendo, em termos mineralógicos, formado por olivina, piroxênio e granada. A 670 km de profundidade há um nítido limite com manto inferior. O manto superior apresenta uma porção mais “fluida”, denominada astenosfera, que, tal como um fluido muito viscoso, exhibe lentas correntes de convecção. Em termos de profundidade, situa-se entre 100 e 400 km. Sobrepondo-se à astenosfera temos o substrato rochoso que constitui a litosfera ou placa (ver boxe).

Comumente são designadas também por crostas continentais, porções da superfície formadas pelo acúmulo de depósitos em bacias sedimentares. Essas crostas possuem até 100 km de espessura. A espessura média da crosta é de 30 km sobre os continentes e de 5 km no fundo oceânico. O fato de a crosta continental — sobre a qual se desenvolve toda a vida do planeta — flutuar sobre a astenosfera fluida pode causar algum temor. Porém a velocidade de movimentação das placas sobre o manto é muito lenta, não ultrapassando 5 a 10 cm/ano.

Comportamento do manto

Os períodos das ondas sísmicas variam de 1 segundo a 1 hora e, dentro desse intervalo de tempo, a crosta terrestre e o manto comportam-se como corpos elásticos. Entretanto, sob influência de esforços mais moderados, o sólido comporta-se como fluido. Por exemplo, a Groenlândia está sofrendo deformação à velocidade de 1 cm/ano.

Em termos de composição mineralógica, a placa oceânica exhibe muita diferença em relação à placa continental, sendo a primeira essencialmente basáltica e a segunda principalmente granítica. A placa basáltica, mais pesada, mergulha por sob a placa granítica, que é mais leve, mas permanecem ambas estacionárias por algum tempo (Fig. 2-3).

O Arquipélago Japonês situa-se no limite entre as placas da Eurásia e do Pacífico. Esta última, relativamente mais pesada, está sofrendo subducção. Esse fato explica a grande frequência de terremotos no Arquipélago Japonês, que acaba se constituindo num privilegiado local para se estudar o interior da Terra.

Mas para onde se movimentam as placas litosféricas, que flutuam sobre o manto?

Placas

Constituem algumas dezenas de corpos tabulares situados sobre a camada fluida do manto. Formam a estrutura chamada litosfera, que é composta pelo manto superior e pela crosta. As placas estendem-se até o limite superior da astenosfera, que é uma camada de baixa velocidade.