

# HISTÓRICO E EVOLUÇÃO DO CONCEITO DE PLACAS TECTÔNICAS

7  
TÓPICO

Umberto G. Cordani

- 7.1** Introdução
- 7.2** As primeiras ideias mobilistas
- 7.3** A contribuição de Alfred Wegener
- 7.4** Deriva continental: da hipótese para a confirmação
  - 7.4.1** Paleomagnetismo e Geocronologia
  - 7.4.2** Geofísica marinha: as anomalias magnéticas nos oceanos.
  - 7.4.3** O teste da comparação geocronológica
  - 7.4.4** Da deriva continental à tectônica global
- 7.5** O conceito de Tectônica de Placas – Situação Atual

## 7.1 Introdução

A superfície do planeta que habitamos parece-nos estável, e as feições que aparecem nos mapas são indicadas como permanentes. O senso comum diz-nos que a noção de lugar, seja o bairro em que vivemos, a nossa cidade ou o nosso país, tem em si embutido o conceito de estabilidade. Na história da humanidade, a geografia do globo é permanente, e as posições relativas de continentes e oceanos são mantidas e reconhecidas como imutáveis.

Por outro lado, o acima exposto não corresponde à realidade, visto que a dinâmica interna do planeta impõe modificações na distribuição das grandes feições de sua superfície. Os afastamentos ou aproximações entre continentes são diminutos, no máximo poucos centímetros por ano, de modo que só podem ser verificados através de medições por instrumentos de grande precisão. Consequentemente, na escala de tempo de uma vida humana, eles não acarretam modificações importantes nas posições relativas de continentes e oceanos. Entretanto, no tempo geológico, produzem modificações fantásticas, como o desaparecimento de oceanos inteiros ou a formação de novos oceanos. O processo de afastamento relativo entre continentes foi denominado “*deriva continental*”.

Pelo exposto, é fácil entender por que, na história da ciência, continentes e oceanos foram sempre considerados como feições maiores permanentes, e as estruturas geológicas, como originárias de movimentos verticais da superfície, para cima ou para baixo, ocasionando a recorrência entre erosão e sedimentação. Durante os anos 60 do século XX, essas ideias de estabilidade na escala global foram destruídas pela maior revolução científica das Geociências, com a emergência dos paradigmas da Tectônica de Placas. Estes produziram a integração de todos os aspectos da dinâmica da Terra na escala global, e reconheceram o “*mobilismo*” como a principal manifestação de superfície do planeta, em contraposição ao “*verticalismo*” até então existente. Em outras palavras, pela primeira vez na história da Geologia, foi elaborada uma teoria unificadora para o funcionamento do planeta, que produziu uma mudança completa na mentalidade da comunidade geocientífica mundial, comparável à revolução “*copernicana*” da Astronomia.

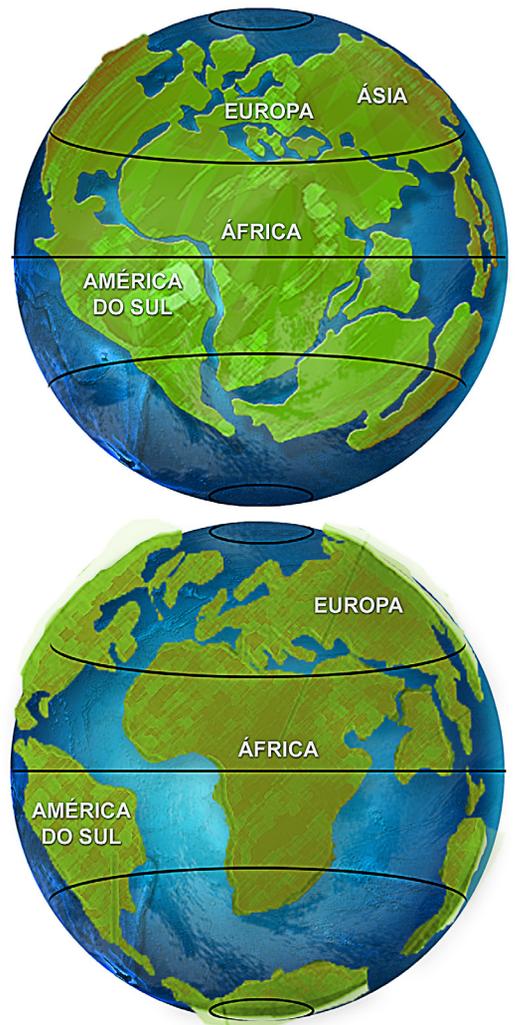
Além de estudar os processos geológicos presentes, a Geologia é também uma Ciência Histórica. Seu propósito é o de caracterizar a origem e a evolução do planeta Terra, desde a sua formação até os dias de hoje. O objetivo deste trabalho é o de apresentar um histórico resumido a respeito do advento do mobilismo, indicando aspectos da concepção e evolução dos conceitos que levaram à tectônica global. A mudança de paradigma, do verticalismo para o mobilismo, foi,

evidentemente, fruto de um esforço coletivo, em que participaram centenas de geocientistas. Procuraremos relacionar e comentar as principais evidências que levaram à tectônica de placas, bem como os geocientistas que as caracterizaram, para em seguida descrever as feições na escala maior que caracterizam a geodinâmica do planeta.

## 7.2 As primeiras ideias mobilistas

Entendemos que os primeiros passos na formulação de ideias sobre as grandes movimentações de continentes se deram por ocasião das grandes circum-navegações e dos descobrimentos das potências europeias do século XVI, quando o Oceano Atlântico em sua plenitude começou a comparecer nos primeiros mapas geográficos em escala global. Como exemplo, o grande cientista e literato inglês do século XVII, Francis Bacon, em sua obra mestra *Novanum Organum*, olhando para a forma do Brasil e África ocidental delineada nesses mapas, ficou intrigado com o seu bom encaixe aparente e sugeriu que tais similaridades dificilmente seriam acidentais. Será que esses continentes já teriam estado ligados num passado distante?

Mais tarde, já no século XIX e no início do século XX, algumas ideias mobilistas apareceram devido a vários cientistas ligados de alguma forma à geologia. Por exemplo, Antonio Snider-Pellegrini produziu uma hipótese especulativa em 1858, acompanhada de uma figura em que as Américas, a Europa e a África estavam unidas, para explicar a ocorrência de plantas fósseis idênticas nos carvões europeus e norte-americanos (**Figura 7.1**). Por sua vez, Frank Taylor e Howard Baker, mais ou menos ao mesmo tempo, mas de modo independente, ao considerar as estruturas dobradas das camadas sedimentares das montanhas modernas, expuseram suas ideias sobre deriva



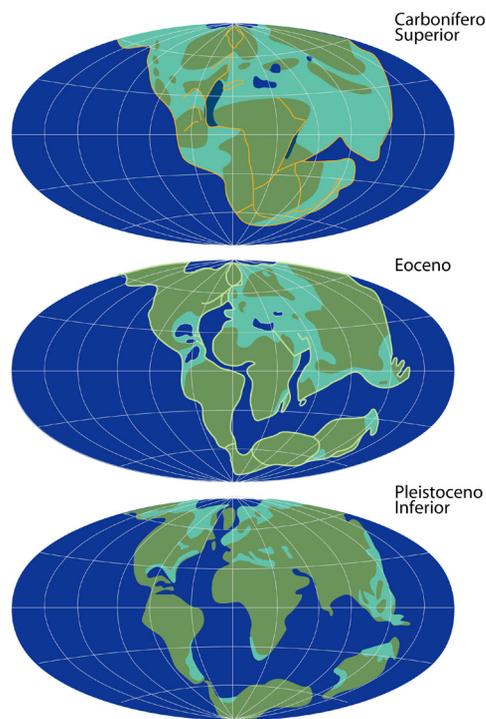
**Figura 7.1:** Mapas publicados por A. Snider em 1858 para ilustrar as suas ideias sobre deriva continental.

continental. O movimento de continentes seria necessário para explicar as grandes compressões tangenciais à superfície da Terra, que produziriam as estruturas maiores observadas na escala global.

## 7.3 A contribuição de Alfred Wegener

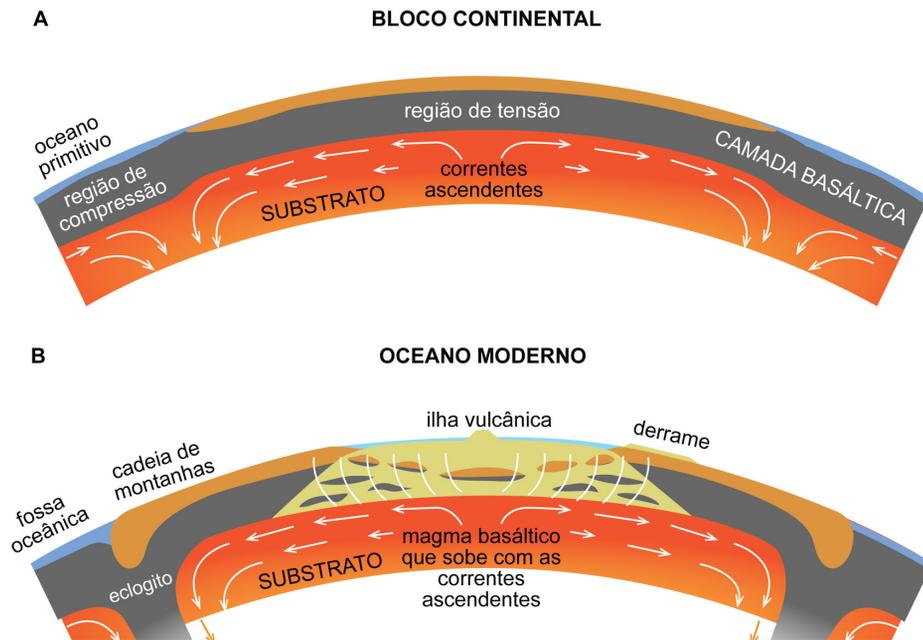
O grande criador da teoria da deriva continental foi o alemão Alfred Wegener, ativo como meteorologista, astrônomo e geofísico, que, no início do século XX, escreveu um minucioso estudo comparativo dos continentes que ladeiam o Oceano Atlântico, descrevendo similaridades muito específicas em diversos aspectos geológicos, e sugerindo, inclusive, algumas ideias para os possíveis mecanismos da movimentação dos continentes (WEGENER, A. 1924). Entre outras coisas, imaginou a existência de uma grande e única massa continental há cerca de 300 milhões de anos, que denominou “Pangeia”, formada por todos os continentes atuais, Américas, Eurásia, África, Austrália e Antártica (**Figura 7.2**). Esse supercontinente ter-se-ia fragmentado há cerca de 160 milhões de anos e seus fragmentos foram “derivando” gradativamente para as posições ocupadas pelos continentes atuais.

Wegener tornou-se um adepto fervoroso de sua teoria, que defendeu durante décadas; muitas das evidências por ele relacionadas foram confirmadas posteriormente e somente algumas se revelaram incorretas. Entretanto, menos por causa dos aspectos comparativos, e mais pela dificuldade em aceitar os mecanismos sugeridos para o seu funcionamento, as suas ideias ficaram adormecidas na comunidade geocientífica internacional. Wegener postulava o movimento das massas continentais deslizando sobre o seu substrato, o que foi considerado impossível, em virtude da rigidez do material crustal. Nas décadas de 30 e 40, a ideia de uma deriva continental chegou a ser ridicularizada pelos geofísicos, e apenas alguns geólogos, trabalhando essencialmente nas correlações Brasil – África, continuaram acompanhando as ideias de Wegener. Entre eles, Alex Du Toit



**Figura 7.2:** Caracterização da Pangeia e dispersão de seus fragmentos continentais, de acordo com Wegener, em seu livro de 1924.

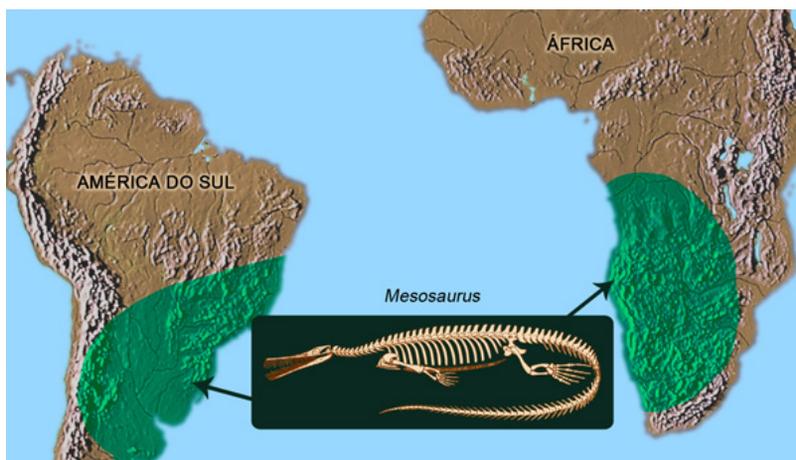
e Henno Martin na África, e Reinhardt Maack e Karl Beurlen no Brasil. Por outro lado, o geólogo inglês Arthur Holmes, entre muitos outros legados que deixou para a geologia, foi fundamental para a teoria com sua sugestão de um mecanismo viável para a movimentação dos continentes (HOLMES, A. 1945). Ele propôs a existência de correntes de convecção no manto, originadas do calor produzido por radioatividade no interior da Terra, que seriam o motor responsável pelos grandes movimentos continentais (**Figura 7.3**). Com o devido aperfeiçoamento, o modelo de correntes de convecção permanece essencialmente o mesmo que é hoje considerado pela comunidade geocientífica.



**Figura 7.3:** Concepção de A Holmes a respeito de correntes de convecção no interior da Terra. (Holmes, 1945)

Entre as muitas evidências geológicas que foram apresentadas por Wegener, bem como pelos seus seguidores que trabalhavam essencialmente no Hemisfério Sul, destacamos apenas duas, muito difíceis de serem atribuídas ao simples acaso: **1)** As similaridades notáveis entre as rochas e os fósseis das grandes bacias sedimentares que se encontram hoje na América do Sul e na África meridional, separadas por diversos milhares de quilômetros, e **2)** As evidências de glaciação continental de latitude que afetou, há cerca de 300 milhões de anos, grandes regiões da África, América do Sul, Índia, Austrália e Antártica.

A primeira evidência refere-se à correlação existente entre as sequências estratigráficas que integram as Bacias sedimentares do Paraná, na América do Sul, e do Karoo, na África do Sul, que indica terem passado pelos mesmos eventos geológicos. Originadas ao mesmo tempo, essas bacias tiveram grande incursão marinha no período Devoniano, com fósseis invertebrados similares. Posteriormente, no Carbonífero, ambas sofreram glaciação de tipo continental, que será comentada a seguir. Sucessivamente, no Permiano, ocorreram nas duas bacias novas incursões marinhas, em muitos lugares com águas rasas, onde viviam, entre outros animais, pequenos lagartos do gênero *Mesosaurus*, e mais tarde, já na Era Mesozoica, mudanças climáticas levaram ao aparecimento de grandes desertos, que foram seguidos de manifestações vulcânicas gigantescas, em ambas as bacias, expelindo sequências de derrames de basalto com milhares de metros de espessura. A similaridade na evolução geológica das bacias do Paraná e do Karoo já é impressionante, mas, a meu ver, a evidência mais palpável de que elas estiveram ligadas no passado, no mesmo continente, é a do pequeno *Mesosaurus*, que seguramente não teria como atravessar um oceano inteiro para aparecer nas camadas Permianas de ambas as bacias (**Figura 7.4**).



**Figura 7.4:** O pequeno réptil do Permiano, encontrado no Brasil e na África do Sul, que representou uma das melhores evidências em favor da deriva dos continentes.

A segunda evidência corresponde exatamente à já mencionada grande glaciação continental, cujos registros se encontram não só nas bacias sedimentares da América do Sul e da África, mas também em bacias análogas da Índia, Austrália e Antártica (**Figura 5a**). A idade das camadas com origem glacial é a mesma nesses lugares todos, como demonstram os fósseis de plantas

nelas encontrados, que caracterizam a *Flora Glossopteris*, ancestral de muitas plantas atuais. Assim como no caso dos fósseis de *Mesosaurus*, esses fósseis vegetais indicam que as regiões onde foram encontrados estiveram ligadas no mesmo continente. Mais ainda, o registro da glaciação do tipo continental indica latitude baixa, próxima de um dos polos terrestres. É difícil escapar da ideia de ligação dessas massas continentais pelo menos durante o Período Carbonífero, e em situação polar, tomando parte do que veio a ser denominado *Glaciação Gondwânica* (**Figura 5b**).



**A - Situação atual**



**B - Pangea Permiano**

**Figura 7.5:** **A)** Registros de glaciação do tipo continental, encontrados em latitudes muito diferentes. **B)** Reconstrução da "Glaciação Gondwânica" como imaginada por Wegener.

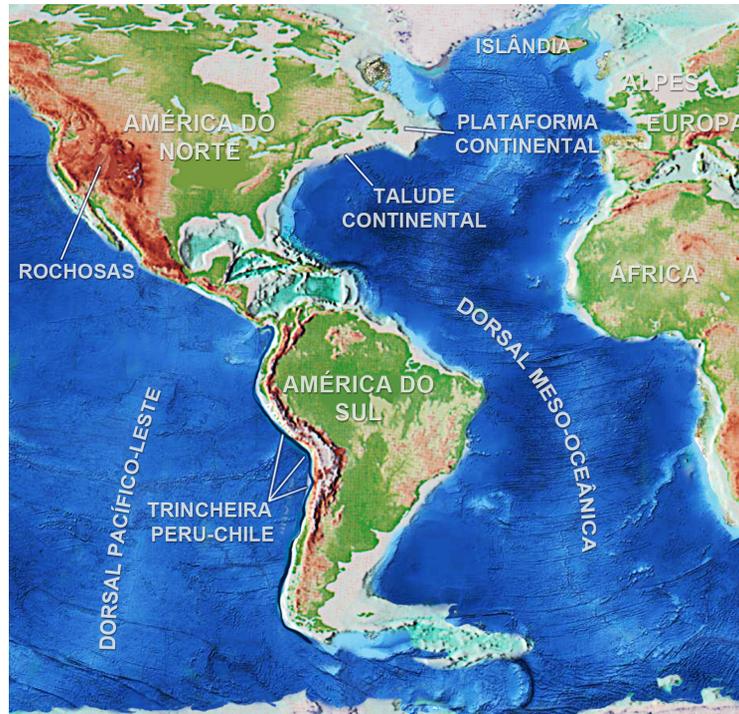
## 7.4 Deriva continental: da hipótese para a confirmação

Até a primeira metade do século XX, ideias verticalistas predominavam no tocante ao funcionamento do planeta, sugerindo a permanência de continentes e oceanos. Para os processos de formação das rochas magmáticas, os modelos preferidos eram os que traziam material fundido e quente das profundezas do planeta, de baixo para cima, como é o caso dos assim chamados “hotspots” e “plumas”, cujos produtos podem ser observados em várias localidades da superfície terrestre. Apenas alguns poucos geocientistas pregavam as ideias mobilistas, seguindo as pegadas de Alfred Wegener, e permaneciam mantendo viva a teoria da deriva continental. São paradigmáticos os trabalhos de Alex Du Toit (DUTOIT, A.L. 1937), do já mencionado Arthur Holmes e, posteriormente, de Henno Martin (MARTIN, H. 1961).

A partir dos anos 50 e na década seguinte, as evidências em favor da deriva continental foram se avolumando. Além das evidências geológicas relacionadas com a Pangeia de Wegener, permanecia a interrogação dos geocientistas a respeito do encurtamento das camadas superficiais da Terra, evidenciado pelas estruturas dobradas observadas ao longo das maiores cadeias montanhosas existentes, como os Alpes e os Himalaias (ver na **Figura 7.6**). Acresce que boa parte da atividade relacionada com a dinâmica interna do planeta, demonstrada pela existência de terremotos e erupções vulcânicas, ocorre justamente ao longo dessas cadeias montanhosas.

Surpresa adicional apareceu com os resultados advindos da ciência dos oceanos, pelos estudos efetuados, nos anos 50, pelo Lamont Geological Observatory (*Columbia University*) e pela Scripps Institution of Oceanography (*University of California*). Os levantamentos sistemáticos de reconhecimento da topografia dos fundos oceânicos mostraram claramente a existência de imensas cadeias de montanhas submersas, as “dorsais médio-oceânicas”, assim chamadas por estarem localizadas em regiões afastadas das margens dos oceanos Pacífico, Atlântico, Índico e Antártico (MAXWELL, A.E. (ED.). 1971). Essas dorsais formam um sistema muito coerente, com muitos milhares de quilômetros de extensão, que concentra grande parte das atividades vulcânicas e sísmicas atuais. Desde que os oceanos cobrem cerca de dois terços da superfície da Terra, é óbvio que o seu conhecimento é crucial para o entendimento do funcionamento do planeta na escala maior. Logo após a divulgação do mapa mundial da topografia oceânica (**Figura 7.6**), o Prof. H.H. Hess externou a sua hipótese do crescimento do assoalho oceânico (*sea floor spreading*), que viria a se tornar um dos pilares

principais da tectônica de placas (HESS, H.H. 1962). Em poucas palavras, seu modelo sugeria que os espaços formados ao longo das cristas das dorsais médio-océânicas seriam preenchidos por material vulcânico, basáltico, proveniente do manto. Esse material iria progressivamente se afastando de sua posição central, e os novos espaços formados, sempre ao longo das dorsais, seriam sucessivamente preenchidos por basaltos mais jovens.

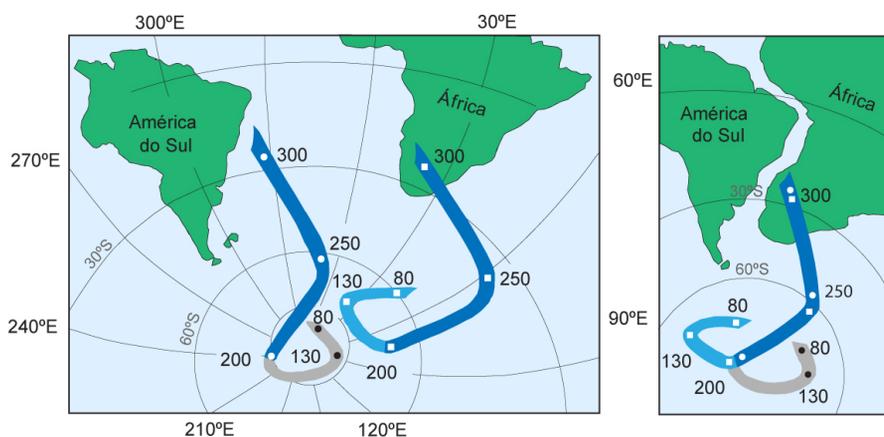


**Figura 7.6:** Cadeias montanhosas (Andes e Rochosas) na parte ocidental das Américas, e dorsais médio-océânicas no Atlântico e no Pacífico oriental.

## 7.4.1 Paleomagnetismo e Geocronologia

Paralelamente às pesquisas oceanográficas, os anos 50 viram o desenvolvimento de dois campos que vieram a contribuir grandemente para a revitalização da teoria da deriva continental: geocronologia e paleomagnetismo. No caso da geocronologia, foram criados vários laboratórios no mundo, entre os quais alguns que se especializaram na utilização do método Potássio-Argônio para a determinação da idade das rochas vulcânicas, crucial para permitir as interpretações das pesquisas paleomagnéticas. Na época, sabia-se que rochas vulcânicas como,

por exemplo, basaltos, podem manter-se magnetizadas nas direções do campo magnético préterito da época em que se formaram, permitindo assim a medição dos vetores magnéticos a ele relacionados. Vários pesquisadores ingleses da *University of Newcastle Upon Tyne*, entre os quais um prêmio Nobel, P.M. Blackett, tiveram a ideia de obter amostras orientadas de rochas vulcânicas de vários continentes para determinar a direção do campo magnético pretérito correspondente à época de sua formação, e ao mesmo tempo datá-las pelo método Potássio-Argônio. Os resultados dessas investigações permitiram a construção de diagramas, mostrando a variação da posição de cada continente em relação ao polo magnético ao longo do tempo. Verificou-se que as assim chamadas *polar wandering curves*, PWC, ou “curvas de deriva polar” eram diferentes para cada continente, mas guardavam entre si certas semelhanças que poderiam ser correlacionadas numa escala de tempo (MCELHINNY, N.W. 1973). Por exemplo, na **figura 7.7**, as PWCs



**Figura 7.7:** Curvas de deriva polar para América do Sul e África, sugerindo a união dos dois continentes no passado.

relativas à América do Sul e à África podem ser reunidas de modo que mostre um trecho comum em que esses continentes estiveram unidos. Ao serem válidos os princípios do paleomagnetismo e, particularmente, o que declara que, em qual-

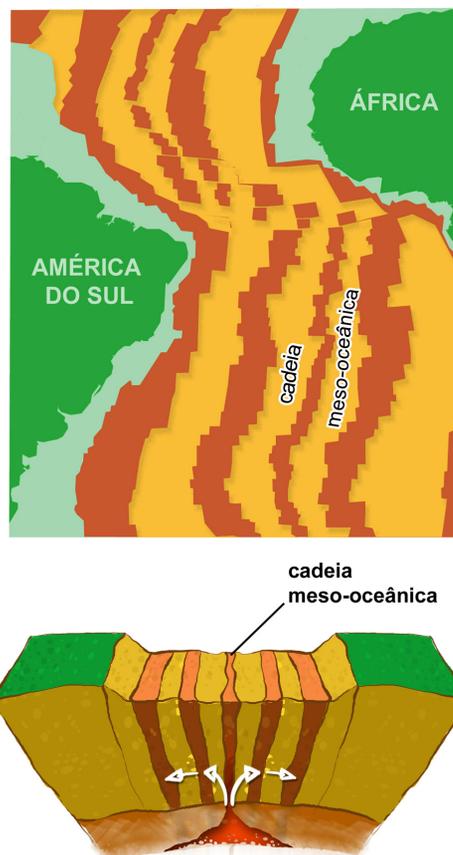
quer tempo, o planeta possui um único polo magnético, a única conclusão seria a de que os continentes estiveram de fato unidos no passado, mas foram gradativamente se afastando um do outro, conforme preconiza a teoria da deriva continental.

Ao mesmo tempo, no início dos anos 60, ao medir as idades K-Ar de materiais provenientes de regiões oceânicas, ilhas vulcânicas ou montes submarinos, verificou-se que, em todos os casos, as idades se revelaram jovens, não mais antigas do que o período Jurássico. Ou seja, a história dos oceanos estaria resumida aos últimos 100-150 milhões de anos, o que contrasta grandemente com a história dos continentes, cujas rochas mais antigas podem chegar a 4.000 milhões de anos. Na mesma época, os dados paleomagnéticos em rochas vulcânicas muito jovens, associados a

determinações precisas de idade pelo método K-Ar, mostraram outra novidade científica que se revelou crucial para a teoria da deriva continental: o campo magnético terrestre inverteu diversas vezes a sua polaridade nos últimos 4 ou 5 milhões de anos (COX, A., DALRYMPLE, G.B. & DOELL, R.R. 1967). Em outras palavras, os polos norte magnético e sul magnético terrestres trocaram mutuamente de lugar em várias ocasiões bem estabelecidas no tempo. Essa evidência surpreendente levaria, meses mais tarde, em conjunção com as evidências trazidas pela geofísica marinha, à caracterização quantitativa do mecanismo de crescimento do assoalho oceânico, segundo o modelo preconizado por H.H. Hess. Grande parte dessas evidências foi produzida sob os auspícios de um grande programa científico internacional das Ciências da Terra, o *Upper Mantle Program*, ou Programa do Manto Superior, instituído na década de 60 pela colaboração entre as Uniões Internacionais de Geofísica e Geodésia, e de Ciências Geológicas.

## 7.4.2 Geofísica marinha: as anomalias magnéticas nos oceanos

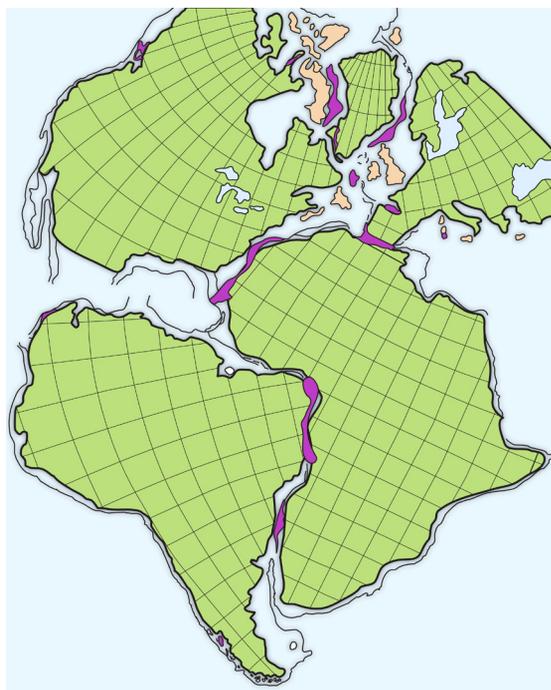
Os levantamentos geofísicos efetuados numa extensa região do Atlântico Norte, ao longo da dorsal médio-Atlântica a SW da Islândia, foram decisivos para o que se considera a confirmação da hipótese de Hess. Nos mapas magnéticos do fundo oceânico resultantes desses levantamentos, aparece claramente um padrão zebrado, de faixas paralelas, correspondentes a anomalias positivas e negativas, que se alternam acompanhando a dorsal (**Figura 7.8**). Em 1963, os dois pesquisadores ingleses F.J. Vine e D.H. Mathews publicaram o trabalho seminal para a confirmação da hipótese de Hess, no qual relacionaram essas anomalias magnéticas do Atlântico Norte com as reversões do campo magnético terrestre dos últimos milhões de anos, já mencionadas (VINE, F.J. & MATTHEWS, D.H. 1963). Levando em conta o modelo do crescimento do assoalho oceânico, propuseram que as anomalias positivas e negativas encontradas pela geofísica seriam decorrentes da magnetização oposta de regiões formadas em épocas



**Figura 7.8:** Anomalias magnéticas em faixas paralelas de polaridade normal e reversa, acompanhando a dorsal médio-oceânica, dando suporte à teoria de crescimento do assoalho oceânico preconizada por Hess (1962).

diferentes, em que o campo magnético terrestre seria alternadamente normal ou invertido. Ao ser correta a hipótese de Hess, em virtude do material basáltico acentuadamente magnético formado sucessivamente no fundo oceânico, e magnetizado ao longo de alguns milhões de anos, enquanto ocorriam as reversões alternadas do campo magnético, deveriam aparecer exatamente as anomalias verificadas, paralelas à dorsal e simétricas em relação a ela. Muitos levantamentos de geofísica marinha foram efetuados nos anos seguintes, ao longo de todas as dorsais médio-oceânicas do planeta, para testar a sugestão de Vine e Mathews. Em todos eles todos foi encontrado o mesmo padrão zebrado, dando o suporte necessário para a confirmação do mecanismo do *sea floor spreading*.

Em síntese, havia sido encontrado um mecanismo adequado para a deriva continental, reabilitando a hipótese de Wegener. Com o *sea floor spreading*, e a formação de grandes oceanos, as massas continentais poderiam ser consideradas como passivas, sendo levadas no movimento mais geral do substrato. Portanto, elas não se moveriam em relação à parte inferior da crosta, como postulava Wegener, mas seriam levadas passivamente nos movimentos convectivos do manto subjacente, seguindo aproximadamente o modelo de correntes de convecção que havia sido sugerido por Holmes.

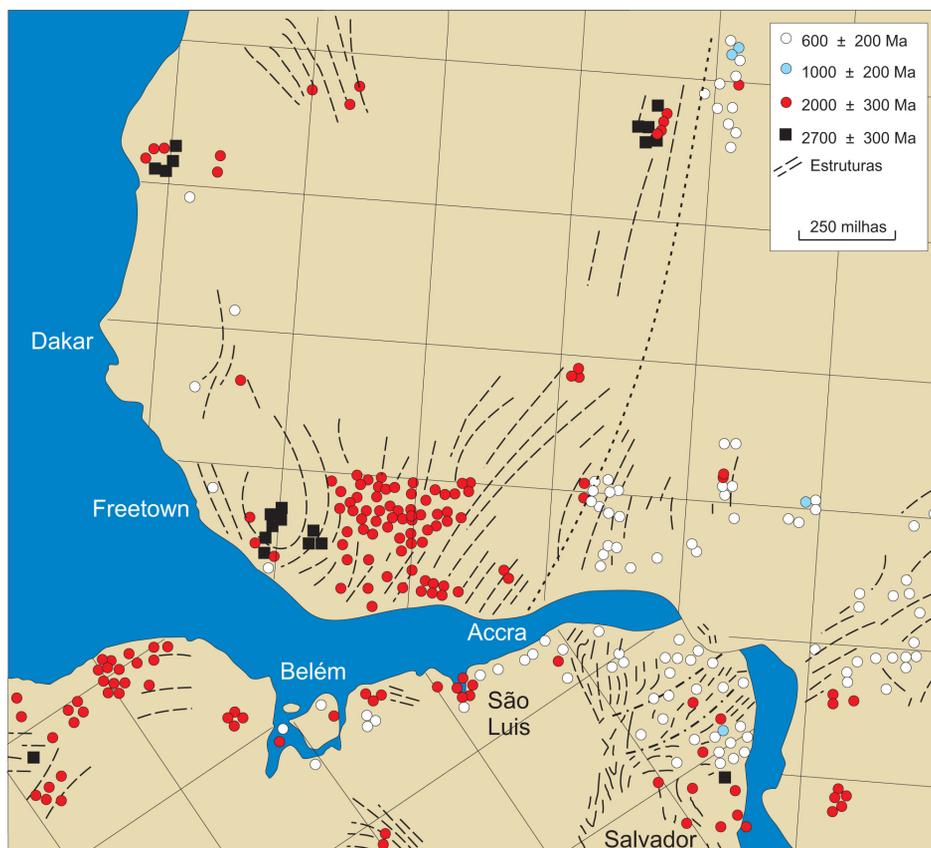


**Figura 7.9:** Reconstrução da posição "pré-deriva" dos continentes ao redor do Oceano Atlântico, efetuada pelos primeiros computadores (Bullard et al., 1965).

### 7.4.3 O teste da comparação geocronológica

Com o renascimento da teoria da deriva continental, foi planejado, em meados dos anos 60, um teste de importância fundamental, em que novamente a geocronologia foi chamada como protagonista. Mediante a utilização dos primeiros computadores, já havia sido feita uma reconstrução dos continentes em volta do Oceano Atlântico, com base em sua forma e dimensões, a qual resultou num ajuste muito satisfatório além da expectativa inicial (BULLARD, E.C., EVERETT, J.E. & SMITH, A.G. 1965) (**Figura 7.9**). Em consequência, pensou-se que seria muito oportuno testar

as possíveis correlações entre regiões continentais hoje separadas pelo Atlântico, mas que estiveram adjacentes na reconstrução pré-deriva. O teste aparentemente mais adequado seria justamente a



**Figura 7.10:** Teste geocronológico para a correlação das províncias tectônicas de América do Sul e África (Hurley et al., 1967)

comparação geocronológica entre as áreas de rochas antigas, que cobrem grande parte da região setentrional da América do Sul, com as de vários países da África Ocidental.

Tendo em vista que muitas amostras de rochas das regiões africanas, e também da parte noroeste da América do Sul, já se encontravam disponíveis no Massachusetts Institute of Technology (MIT), e muitas outras poderiam ser facilmente obtidas no nordeste brasileiro, uma colaboração científica foi instituída entre o próprio MIT e o recém-criado laboratório de geocronologia da Universidade de São Paulo. O MIT seria responsável pelas datações pelo método Rubídio-Estrôncio, em desenvolvimento na época, e o Centro de Pesquisas Geocronológicas da USP seria

responsável pela coleta de amostras no Brasil, nas regiões litorâneas entre o Amapá e a Bahia, e também pelas datações, através do método Potássio-Argônio, das amostras brasileiras e africanas.

Realizadas as coletas de amostras, e efetuadas as determinações geocronológicas em São Paulo e no MIT, os resultados revelaram-se de uma coerência impressionante e mostraram, além de qualquer dúvida, a excelente correlação existente entre províncias tectônicas intercontinentais (HURLEY, P.M. e outros. 1967) (**Figura 7.10**). Os resultados do teste foram publicados na revista Science em 1967, e a repercussão na comunidade internacional da época foi muito grande, visto que as conclusões do artigo se inseriam de modo perfeito nas ideias mobilistas então emergentes e relacionadas com a deriva continental. Em 1968, P.M. Hurley, que liderou o grupo de pesquisadores do MIT, foi convidado pela revista Scientific American a escrever um texto a respeito do tema, o qual teve por título *The confirmation of Continental Drift*.

#### 7.4.4 Da deriva continental à tectônica global

Dessa forma, com as evidências acima descritas, e com muitos outros resultados obtidos pelo Programa do Manto Superior, o mobilismo finalmente triunfou, com o advento do novo paradigma da Tectônica de Placas. A metade final dos anos 60 e o início dos anos 70 foram pródigos em trabalhos de grande importância, provenientes de quase todos os campos das Ciências da Terra. Mencionaremos aqui apenas alguns. O trabalho de Isacks et al (ISAKS, B., OLIVER, J. & SYKES, L. 1968), com as contribuições fundamentais da sismologia, o de Morgan (MORGAN, W.J. 1968), com suas novas interpretações de cunho geológico, o de Le Pichon (LE PICHON, X. 1968), com a sua excelente síntese sobre os mecanismos, e mais tarde o livro-síntese de Takeuchi et al. (TAKEUCHI, H., UYEDA, S. & KANAMORI, H. 1970), o artigo de divulgação de Dewey (DEWEY, J.F. 1972) sobre a tectônica global, e finalmente o livro-texto de Willie (WYLLIE, P.J. 1971) sobre a dinâmica do planeta. Durante toda a década de 70, o *Geodynamics Project*, ou Projeto Geodinâmica, sucessor do Upper Mantle Project, instituído pelas mesmas uniões científicas que patrocinaram o programa anterior, dedicou-se a produzir evidências adicionais para comprovar a tectônica global, que foram obtidas principalmente em regiões oceânicas.

## 7.5 O conceito de Tectônica de Placas – Situação Atual

Sabe-se que a Terra se formou há 4,57 bilhões de anos, ao mesmo tempo que o Sol e os demais planetas do Sistema Solar, através da condensação do gás e da poeira cósmica que constituíam a nebulosa solar. Portanto, o nosso planeta, nos primórdios de sua formação, consistia de uma mistura caótica de materiais, mantida coesa pela atração gravitacional. A sua evolução resultou da transformação dessa mesma mistura em um corpo estruturado em camadas concêntricas diferentes entre si. O material mais denso afundou e concentrou-se no interior do planeta, ao passo que o material menos denso constituiu a parte mais superficial. Nesse contexto, formaram-se os dois sistemas fundamentais da estrutura terrestre: um **núcleo interno** e um **manto envolvente**.

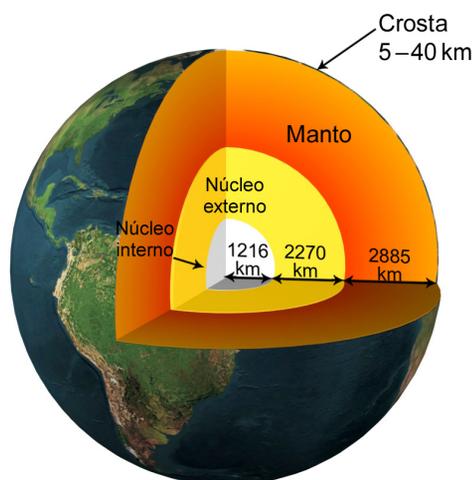


Figura 7.11: Estrutura interna da Terra.

Figura 7.11, que deriva do conhecimento produzido pela sismologia, mostra a situação do interior da Terra, um núcleo externo (líquido), um núcleo interno (sólido), ambos de composição metálica, essencialmente ferro e níquel, e um manto (sólido), de composição silicática. A crosta terrestre, camada mais externa do planeta, onde estamos situados e cujo material pode ser acessado diretamente, originou-se posteriormente por modificações e diferenciações sucessivas do material do manto.

A crosta inclui todas as rochas conhecidas, como, por exemplo, granitos, basaltos, arenitos, xistos etc., formadas pelos diversos processos petrogenéticos. Por outro lado, se podemos conhecer bem o material da crosta, não temos acesso direto ao material do manto, que se situa a algumas dezenas de quilômetros abaixo de nossos pés. As perfurações mais profundas efetuadas na Terra atingem, no máximo, uns dez quilômetros de profundidade, de modo que é preciso utilizar outras armas para a investigação da composição e das condições físico-químicas dos materiais existentes nas camadas mais internas do planeta. Tudo o que sabemos é estabelecido com base em poucas amostras trazidas por alguns vulcões de fontes profundas e em evidências indiretas, tais como estudos de meteoritos, planetologia comparada, petrologia experimental, bem como medidas geofísicas de fluxo térmico do planeta, de comportamento de ondas sísmicas e magnetismo terrestre.

A dinâmica interna do planeta, que comanda a tectônica de placas, tem suas origens na mobilidade do material do manto, apesar de este ser quase totalmente sólido. A temperatura interior aumenta em direção ao centro da Terra, sendo de cerca de 4.000°C no limite manto/núcleo. Nas proximidades do centro da Terra, a temperatura atinge por volta de 5.500°C. O calor interno do planeta é produzido essencialmente pela desintegração dos elementos radioativos de meia-vida longa existentes no manto, tais como Urânio, Tório, Potássio e outros, e é transportado para a superfície, para em seguida ser dissipado para fora do planeta. Conseqüentemente, com a diminuição progressiva e inexorável dos elementos radioativos, a Terra vai se resfriando lentamente. O transporte do calor interno pode ser por condução ou por convecção, e este último modo consiste da movimentação de massa das zonas mais quentes para as mais frias. As correntes de convecção no manto, embora muito lentas, são o motor da dinâmica interna do planeta, sendo responsáveis pelo fluxo térmico observado na superfície e pelos movimentos das placas tectônicas, que serão descritos a seguir.

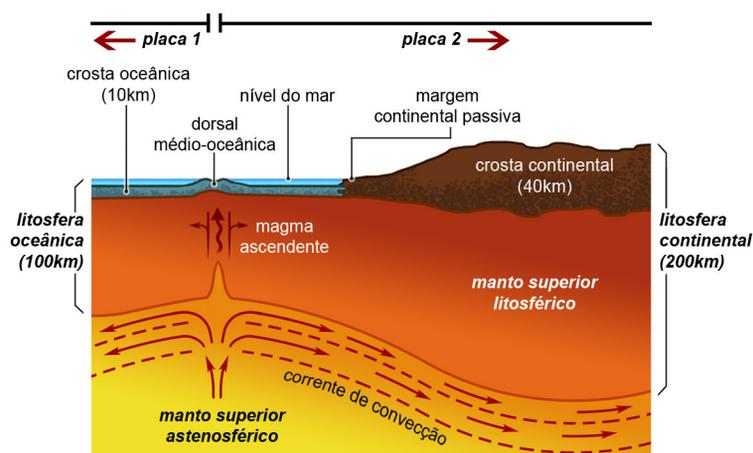


Figura 7.12: Esquema das camadas superficiais da Terra com as denominações pertinentes.

A **figura 7.12** mostra um perfil genérico das camadas superficiais da Terra com as denominações pertinentes. Há dois tipos de crosta terrestre: a crosta continental, de natureza granítica e espessura média maior, e a crosta oceânica, de natureza basáltica e espessura média menor. Esta última se situa nos extensos domínios oceânicos, e seu topo corresponde ao assoalho marinho. Há também dois tipos de litosfera, continental e oceânica, que incluem inteiramente os dois tipos de crosta correspondentes, além de parte do assim chamado manto superior. Ela possui comportamento rígido e sobre-põe-se a uma zona com características físicas mais plásticas, denominada astenosfera, cujo topo se

situa a aproximadamente 100 a 200km de profundidade, sempre dentro do manto superior. Na astenosfera, ocorre pequena percentagem de material rochoso fundido, o assim chamado magma.

Como resultado principal do advento da Tectônica Global, sabemos que a litosfera é compartimen-



Figura 7.13: As principais placas tectônicas, com suas respectivas denominações e seus limites.

tada em cerca de uma dúzia de placas tectônicas grandes e muitas placas menores (TEIXEIRA, W. E OUTROS. 2009) (Figura 7.13). Essas placas se movimentam tangencialmente à superfície do planeta, deslizando sobre a astenosfera, com velocidades distintas, que podem variar de menos de um centímetro por ano a uma dezena de centímetros por ano. Esse movimento depende das correntes de convecção mantélicas subjacentes, que se originam nas zonas mais quentes do manto, onde o material busca migrar para níveis superiores. Ao mesmo tempo, para compensar essa ascensão, rochas mais frias descem e preenchem o espaço deixado pelo material que subiu, completando o ciclo das células de convecção (Figura 7.14).

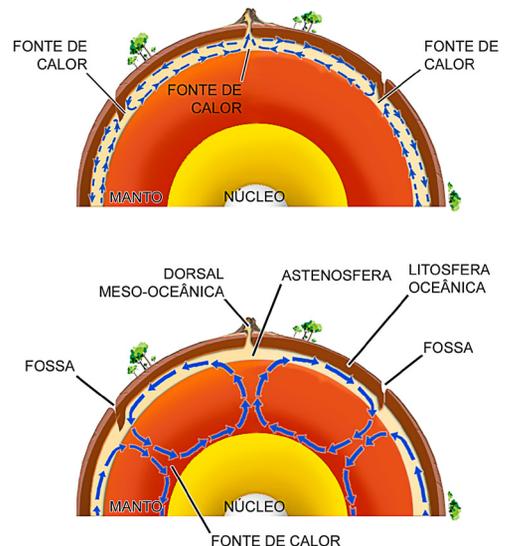
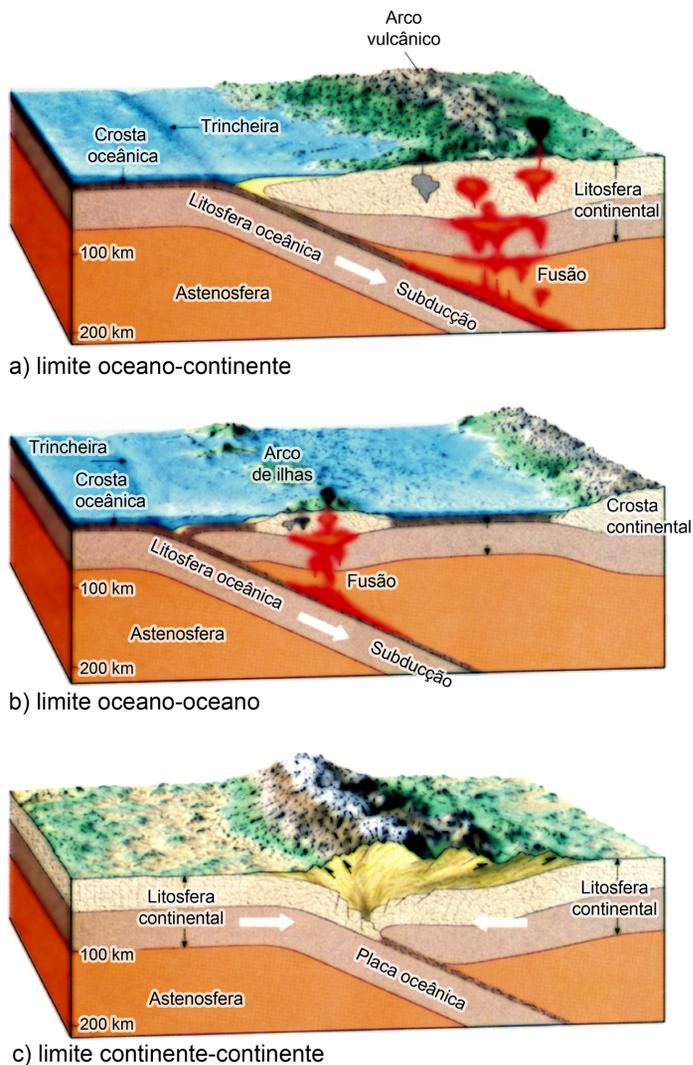


Figura 7.14 (A, B): Padrões esquemáticos alternativos dos movimentos de convecção no manto.

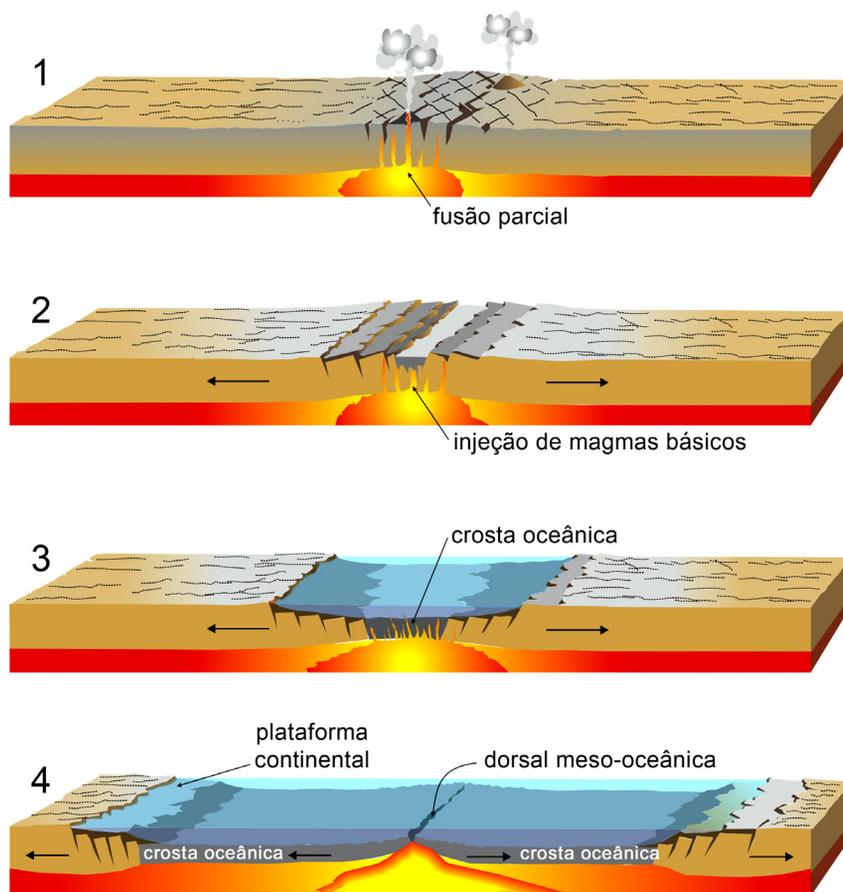
Ao longo dos limites das placas litosféricas concentram-se, praticamente, todos os terremotos de grande intensidade e a grande maioria dos vulcões ativos do planeta. Esses limites podem ser convergentes, divergentes ou conservativos. Nos limites convergentes, ocorre a interação entre duas placas que se aproximam e se chocam. No caso de choque entre duas placas com litosfera oceânica, uma delas irá mergulhar por debaixo da outra, ao longo de uma zona de subducção (**Figura 7.15b**). Essa placa, à medida que mergulha, se aquece, perde consistência e se integra no manto. Ao mesmo tempo, com o aquecimento, serão gerados magmas, e formados arcos de ilhas constituídos de material de natureza máfica a intermediária, como é o caso do Japão, das ilhas Aleutas ou das ilhas Fiji.

No caso de um processo colisional, envolvendo duas placas de natureza continental, uma das placas poderá mergulhar no manto, mas não de forma acentuada, uma vez que possui densidade significativamente menor (**Figura 7.15c**). Nesse caso de subducção rasa, envolvendo material continental, serão geradas cordilheiras de montanhas do tipo Himalaia. Seus magmas serão mais silicosos, dando origem a rochas predominantemente graníticas, cujo material seria formado em grande parte por processos de retrabalhamento crustal. Ao mesmo tempo, a placa sobrejacente sofreria deformação e enrugamento em escala de centenas a milhares de quilômetros, construindo cordilheiras elevadas. Por fim, se o limite convergente



**Figura 7.15:** (A, B, C) – Perfis esquemáticos de limites convergentes entre placas tectônicas, indicando as zonas de subducção.

envolver uma placa oceânica e uma placa continental, serão gerados arcos magmáticos, como ocorre presentemente na Cordilheira Andina (**Figura 7.15a**). Nos três casos de limites convergentes, a presença de sismos é bastante comum, incluindo-se aí terremotos de magnitude muito alta, catastróficos para as comunidades afetadas. Vulcanismo também é comum, sendo mais evidente quando há o envolvimento de litosfera oceânica no processo de subducção.



**Figura 7.16:** Evolução esquemática para um limite divergente de placas, com a formação de uma bacia oceânica nova.

No caso de limites divergentes entre placas tectônicas, aberturas na crosta são formadas ao longo de grandes sistemas de fraturamento, sendo preenchidas por magmas provenientes da astenosfera, que caracterizam vulcanismo de fissura, como ocorre na Islândia ou em muitos vulcões

submarinos. É o caso das chamadas dorsais meso-oceânicas, as cordilheiras submersas que atravessam todos os oceanos, e que representam os locais de geração de crosta oceânica nova pela subida de magmas basálticos provenientes do manto. (**Figura 7.16**) Se o movimento divergente durar muitos milhões de anos, o que é comum, poderão ser formados fundos oceânicos inteiros. A título de exemplo, pode ser mencionada a Dorsal Meso-Atlântica, que divide o Atlântico inteiro, norte e sul, em duas partes simétricas. Por sua vez, os limites de placas conservativos apresentam grandes sistemas de falhamentos, em que as placas contíguas deslizam horizontalmente, uma em relação a outra, com movimentações opostas. O exemplo mais conhecido e mais característico é o sistema de falhas de San Andrés na costa ocidental da América do Norte.

O acima exposto indica que se situa no manto o motor de todos os processos maiores que afetam a litosfera, e produzem as maiores modificações na fisiografia da superfície da Terra. O manto inteiro participa das grandes convulsões do planeta, e a dinâmica das placas litosféricas atuais é o melhor registro da atuação da astenosfera plástica e geradora de magmas primários. Por outro lado, na sua parte inferior, na região adjacente ao núcleo externo, formam-se anomalias térmicas e originam-se as correntes ascendentes de material aquecido. Pela sua importância geodinâmica, as correntes de convecção mantélica, que já tinham sido aventadas por A. Holmes desde os anos 40 (**Figura 7.3**), constituem o paradigma fundamental da revolução mobilista da tectônica global, explicando de maneira coerente e integrada as principais feições e os principais processos geodinâmicos observados na escala maior do planeta (por exemplo, ver Le Pichon<sup>14</sup> ou Teixeira et al<sup>18</sup>).

Finalmente, esse motor interno que produz a tectônica de placas é também responsável pela existência do relevo, ou seja, das terras emersas no planeta, sem as quais não haveria plantas nem animais terrestres, e muito menos nós, humanos. Com efeito, o relevo é continuamente atacado e desbastado pelos agentes da dinâmica externa e, se não houvesse um mecanismo adequado para a sua contínua reposição, não existiriam continentes, e o fundo do único oceano global estaria situado por volta de 2,5km de profundidade.

## Bibliografia

- . The fit of the Continents around the Atlantic – In: Blackett, P.M.S., Bullard, E. & Runcorn, S.K. (Eds.) – 1965 – A Symposium on Continental Drift – – Philosophical Transactions of the Royal Society, London, A258 : 41–51.
- BULLARD, E.C., EVERETT, J.E. & SMITH, A.G. 1965. The fit of the Continents around the Atlantic – In: Blackett, P.M.S., Bullard, E. & Runcorn, S.K. (Eds.) – 1965 – A Symposium on Continental Drift – – Philosophical Transactions of the Royal Society, London, A258 : 41–51.
- COX, A., DALRYMPLE, G.B. & DOELL, R.R. 1967. Reversals of the Earth's magnetic field – Scientific American, Feb. 1967 : 44–54.
- DEWEY, J.F. 1972. Plate Tectonics – Scientific American, May 1972 : 56–58.
- DU TOIT, A.L. 1937. Our Wandering Continents – Oliver & Boyd.
- HESS, H.H. 1962. History of Ocean Basins – In: A.E.J. Engel, H.L. James & B.F. Leonard (Eds.), Petrologic Studies: A volume in honor of A.F. Buddington. – Geological Society of America, Boulder, USA : 599–620.
- HOLMES, A. 1945. Principles of Physical Geology. London, T. Nelson & Sons.
- HURLEY, P.M.; ALMEIDA, F.F.M.; MELCHER, G.C.; CORDANI, U.G.; RAND, J.; KAWASHITA, K.; VANDOROS, P.; PINSON, W.H.; FAIRBARN, H.W. 1967. Test of continental drift by radiometric ages. – Science, 144 : 495–500.
- ISAKS, B., OLIVER, J. & SYKES, L. 1968. Seismology and the new Global Tectonics. – Journal of Geophysical Research, 73 : 5855–5899.
- LE PICHON, X. 1968. Sea-floor spreading and Continental Drift. – Journal of Geophysical Research, 73 : 3661–3697.
- MARTIN, H. 1961. The Hypothesis of Continental Drift in the light of recent advances of geological knowledge in Brazil and South West Africa. – Trans. Geol. Society of South Africa – 64 : 1–47.
- MAXWELL, A.E. (ED.). 1971. The sea: Ideas and Observations on Progress in the Study of the Seas. New York: Wiley-Interscience, volume 4, part 1, 664 p.
- MCELHINNY, N.W. 1973. Paleomagnetism and Plate Tectonics – London: Cambridge Univ. Press – 357 p.
- MORGAN, W.J. 1968. Rises, Trenches, Great Faults and Crustal Blocks – Journal of Geophysical Research, 73 : 1959–1982.
- TAKEUCHI, H., UYEDA, S. & KANAMORI, H. 1970. Debate about the Earth – San Francisco: Freeman & Co, 281 p.
- TEIXEIRA, W.; FAIRCHILD, T.R.; TOLEDO, M.C.M. DE; TAIOLI, F. (ORGANIZADORES). 2009. Decifrando a Terra – 2ª Ed. – Cia. Editora Nacional, São Paulo. – 624 p.
- VINE, F.J. & MATTHEWS, D.H. 1963. Magnetic Anomalies over Oceanic Ridges – Nature, 199 : 947–949.
- WEGENER, A. 1924. The Origin of Continents and Oceans – London: Methuen
- WYLLIE, P.J. 1971. The Dynamic Earth : Textbook in Geosciences. New York: Wiley, 416 p.