

Tectônica de placas

1. Histórico
 - 1.1. A deriva continental
 - 1.2. Expansão dos fundos oceânicos
 - 1.3. Tectônica de placa
 - 1.4. A descoberta da subducção
2. Estrutura dinâmica da Terra
3. As placas tectônicas
 - 3.1. As diferentes placas
 - 3.2. Os limites de placa
 - 3.2.1. Limites divergentes ou construtivos
 - 3.2.2. Limites convergentes ou destrutivos
 - 3.2.3. Limites transformantes ou conservativos
4. Causas dinâmicas do movimento das placas
 - 4.1. Atrito
 - 4.2. Gravidade
5. Supercontinentes

Tectônica de placas

1. Histórico

A teoria da tectônica de placas surgiu a partir da observação de dois fenômenos geológicos distintos: a deriva continental, identificada no início do século XX e a expansão dos fundos oceânicos, detectada pela primeira vez na década de 1960.

1.1. A deriva continental

A deriva continental foi uma das muitas idéias sobre tectônica propostas no final do século XIX e início do século XX. Esta teoria foi substituída pela tectônica de placas e os seus conceitos e dados igualmente incorporados nesta.

Em 1915 Alfred Wegener foi o primeiro a produzir argumentos sérios sobre esta idéia, na primeira edição de *The origin of continents and oceans*. Nesta obra ele sugeriu que a costa oriental da América do Sul e a costa ocidental de África pareciam ter estado unidas antes. No entanto, Wegener não foi o primeiro a fazer esta sugestão (precederam-no Francis Bacon, Benjamin Franklin e Snider-Pellegrini), mas sim o primeiro a reunir significativas evidências fosseis, paleo-topográficas e climatológicas que sustentavam esta simples observação. Porém, as suas idéias não foram levadas a sério por muitos geólogos, que realçavam o fato de não existir um mecanismo que parecesse ser capaz de causar a deriva continental. Mais concretamente, eles não entendiam como poderiam as rochas continentais atravessar as rochas mais densas da crosta oceânica.

Baseando-se em anomalias na deflexão de fios de prumo causadas pelos Andes no Peru, Pierre Bouguer deduziu que as montanhas, menos densas, teriam que ter uma projecção na camada subjacente, mais densa. A idéia de que as montanhas têm "raízes" foi confirmada cem anos mais tarde por George Biddell Airy, enquanto estudava o campo gravítico nos Himalaias, tendo estudos sísmicos detectado as correspondentes variações de densidade. Porém depois das décadas de 1950 permanecia sem resposta a questão sobre se as montanhas estavam ancoradas em basalto ou flutuando como icebergs.

1.2. Expansão dos fundos oceânicos

Em 1947 uma equipa de cientistas liderada por Maurice Ewing a bordo do navio de pesquisa oceanográfica *Atlantis* do *Woods Hole Oceanographic Institution*, confirmou a existência de uma elevação no Oceano Atlântico central e descobriu que o fundo marinho por baixo da camada de sedimentos era constituído por basalto e não granito, rocha comum nos continentes. Descobriram também que a crosta oceânica era muito mais delgada que a crosta continental. Estas descobertas levantaram novas e intrigantes

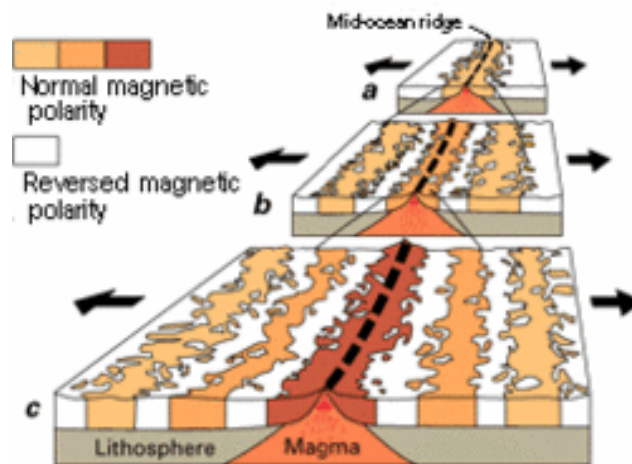
questões. A partir da década de 1950 os cientistas, utilizando instrumentos magnéticos (magnetómetros) adaptados de aeronaves desenvolvidas durante a Segunda Guerra Mundial para a detecção de submarinos, começaram a aperceber-se de estranhas variações do campo magnético ao longo dos fundos marinhos. Esta descoberta, apesar de inesperada, não era inteiramente surpreendente pois sabia-se que o basalto – uma rocha vulcânica rica em ferro - contém magnetita, um mineral fortemente magnético, podendo em certos locais causar distorção em leituras de bússolas. Esta distorção já era conhecida dos marinheiros islandeses desde o século XVIII. Mais importante ainda, uma vez que a magnetita dá ao basalto propriedades magnéticas mensuráveis, estas recém-descobertas variações magnéticas forneciam um novo meio de estudar os fundos marinhos. Quando se dá o arrefecimento de rochas portadoras de minerais magnéticos, estes orientam-se segundo o campo magnético terrestre existente nesse momento.

À medida que na década de 1950 se procedia à cartografia de cada vez maiores extensões de fundos marinhos, estas variações magnéticas deixaram de parecer isoladas e aleatórias, antes revelando padrões reconhecíveis. Quando se fez o levantamento destes padrões magnéticos numa área bastante alargada, o fundo do oceano mostrou um padrão de faixas alternantes. Estas faixas alternantes de rochas diferentes magneticamente estavam dispostas em linhas em cada um dos lados da crista meso-oceânica e paralelamente a esta: uma faixa com polaridade normal e a faixa adjacente com polaridade invertida.

A descoberta da alternância de polaridade magnética das rochas dos fundos marinhos e da sua simetria relativamente às cristas meso-oceânicas sugeria uma relação. Em 1961, os cientistas começaram a teorizar que as cristas meso-oceânicas corresponderiam a zonas estruturalmente débeis onde o fundo oceânico estava a ser rasgado em dois, segundo o comprimento ao longo da crista. O magma fresco proveniente das profundidades do interior da Terra sobe facilmente através destas zonas de fraqueza e eventualmente flui ao longo das cristas criando nova crosta oceânica. Este processo, mais tarde designado por expansão dos fundos oceânicos, em funcionamento há muitos milhões de anos é o responsável pela criação dum sistema de cristas meso-oceânicas com uma extensão de cerca de 50 000 km. Esta hipótese era apoiada por vários tipos de observações:

- Nas cristas ou nas suas proximidades, as rochas são muito jovens, tornando-se mais antigas à medida que nos afastamos delas;
- As rochas mais jovens presentes nas cristas apresentam sempre a polaridade actual (normal);
- Faixas de rocha paralelas às cristas com alternância de polaridade magnética (normal-inversa-normal...) sugerem que o campo magnético da Terra tem sofrido muitas inversões ao longo do tempo.

A hipótese da expansão dos fundos oceânicos ganhou adeptos e representou mais um grande avanço no desenvolvimento da teoria da tectônica de placas. Mais ainda, a crosta oceânica passou a ser vista como um registro magnético natural da história das inversões do campo magnético terrestre.



1.3. Tectônica de placa

Durante a década de 1960 fizeram-se grandes progressos e várias descobertas, sobretudo a da crista meso-atlântica. Saiu-se a publicação, em 1962, de uma comunicação do geólogo americano Harry Hess (Robert S. Dietz publicou a mesma ideia um ano antes na revista Nature. No entanto a prioridade deve ser dada a Hess, pois ele distribuiu um manuscrito não publicado do seu artigo de 1962, em 1960). Hess sugeriu que os continentes não se moveriam através da crosta oceânica (como sugerido pela deriva continental) mas que uma bacia oceânica e o continente adjacente moviam-se conjuntamente numa mesma unidade crustal ou placa. Nesse mesmo ano, Robert R. Coats do U.S. Geological Survey descreveu as principais características da subducção no arco insular das Ilhas Aleutas. Esta sua publicação, ainda que pouco notada na altura (tendo sido até ridicularizada), tem sido de então para cá considerada como seminal e presciente. Em 1967, Jason Morgan propôs que a superfície da Terra consiste de 12 placas rígidas que se movem umas em relação às outras. Dois meses mais tarde, em 1968, Xavier Le Pichon publicou um modelo completo baseado em 6 placas principais com os seus movimentos relativos.

A descoberta da subducção

Uma importante consequência da expansão dos fundos oceânicos era que nova crosta estava a ser (e é-o ainda hoje), formada ao longo das cristas oceânicas. Por alguns cientistas da época a deslocação dos continentes pode ser facilmente explicada por um grande aumento do tamanho da Terra desde a sua formação. Porém, esta chamada Teoria da Terra expandida, não era satisfatória, pois os seus defensores não podiam apontar um mecanismo geológico convincentemente capaz de produzir tão súbita e enorme expansão. A maioria dos geólogos acredita que o tamanho da Terra terá variado muito pouco ou mesmo nada

desde a sua formação há 4.6 bilhões de anos, levantando assim uma nova questão: como pode ser continuamente adicionada nova crosta ao longo das cristas oceânicas, sem aumentar o tamanho da Terra?

Esta questão intrigou particularmente Harry Hess, geólogo da Universidade de Princeton e Contra-Almirante na reserva e ainda Robert S. Dietz, um cientista do *U.S. Coast and Geodetic Survey*, que havia sido o primeiro a utilizar o termo expansão dos fundos oceânicos. Dietz e Hess estavam entre os muito poucos que realmente entendiam as implicações da expansão dos fundos oceânicos. Se a crosta da Terra se expandia ao longo das cristas oceânicas, teria que estar a encolher noutro lado, raciocinou Hess. Sugeriu então que a nova crosta oceânica se espalhava continuamente a partir das cristas oceânicas. Muitos milhões de anos mais tarde, essa mesma crosta oceânica acabará eventualmente por afundar-se nas fossas oceânicas – depressões muito profundas e estreitas ao longo das margens da bacia do Pacífico. Segundo Hess, o Oceano Atlântico encontrava-se em expansão enquanto que o Oceano Pacífico estava em retracção. Enquanto a crosta oceânica antiga era consumida nas fossas, novo magma ascendia e eruptava ao longo das cristas em expansão, formando nova crosta. Com efeito, as bacias oceânicas estavam perpetuamente a serem "recicladas", com a criação de nova crosta e a destruição de antiga crosta oceânica a ocorrerem simultaneamente. Assim, as idéias de Hess explicavam claramente porque é que a Terra não aumenta de tamanho com a expansão dos fundos oceânicos, porque é tão pequena a acumulação de sedimentos nos fundos oceânicos e porque é que as rochas oceânicas são muito mais jovens que as rochas continentais.

2. Estrutura dinâmica da Terra

A divisão do interior da Terra em litosfera e astenosfera baseia-se nas suas diferenças mecânicas. A litosfera é mais fria e rígida, enquanto que a astenosfera é mais quente e mecanicamente mais fraca. Esta divisão não deve ser confundida com a subdivisão *química* da Terra, do interior para a superfície, em: núcleo, manto e crosta. O princípio chave da tectônica de placas é a existência de uma litosfera constituída por placas tectônicas separadas e distintas, que flutuam sobre a astenosfera. A relativa fluidez da astenosfera permite que as placas tectônicas se movimentem em diferentes direções.

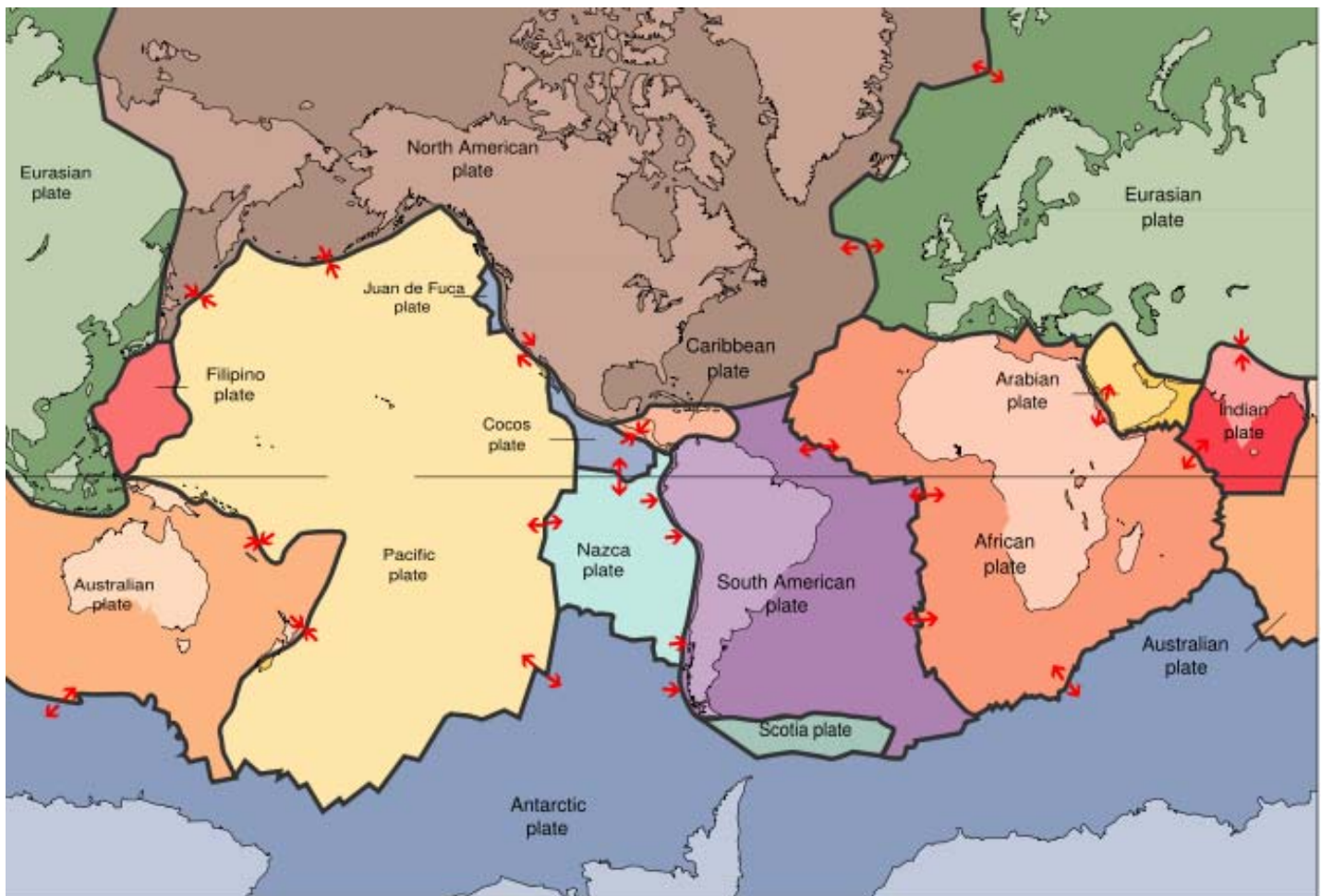
As placas estão em contato umas com as outras ao longo dos *limites de placa*, estando estes comumente associados a eventos geológicos como terremotos e a criação de elementos topográficos como cadeias montanhosas, vulcões e fossas oceânicas. A maioria dos vulcões ativos do mundo estão situados ao longo dos limites de placas, sendo a zona do Círculo de Fogo do Pacífico a mais conhecida. Estes limites são apresentados em detalhe mais adiante.

As placas tectônicas podem incluir crosta continental ou crosta oceânica, sendo que, tipicamente, uma placa contém os dois tipos. Por exemplo, a Placa Africana inclui o continente e parte dos fundos marinhos do Atlântico e do Índico. A parte das placas tectônicas que é comum a todas elas corresponde a camada sólida superior do manto, constituindo a litosfera conjuntamente com a crosta.

A distinção entre crosta continental e crosta oceânica baseia-se na diferença de densidades dos materiais que constituem cada uma delas; a crosta oceânica é mais densa devido às diferentes proporções dos elementos constituintes, em particular do silício. A crosta oceânica é mais pobre em sílica e mais rica em minerais máficos (geralmente mais densos), enquanto que a crosta continental apresenta maior percentagem de minerais félsicos (em geral menos densos).

3. As placas tectônicas

3.1. As diferentes placas

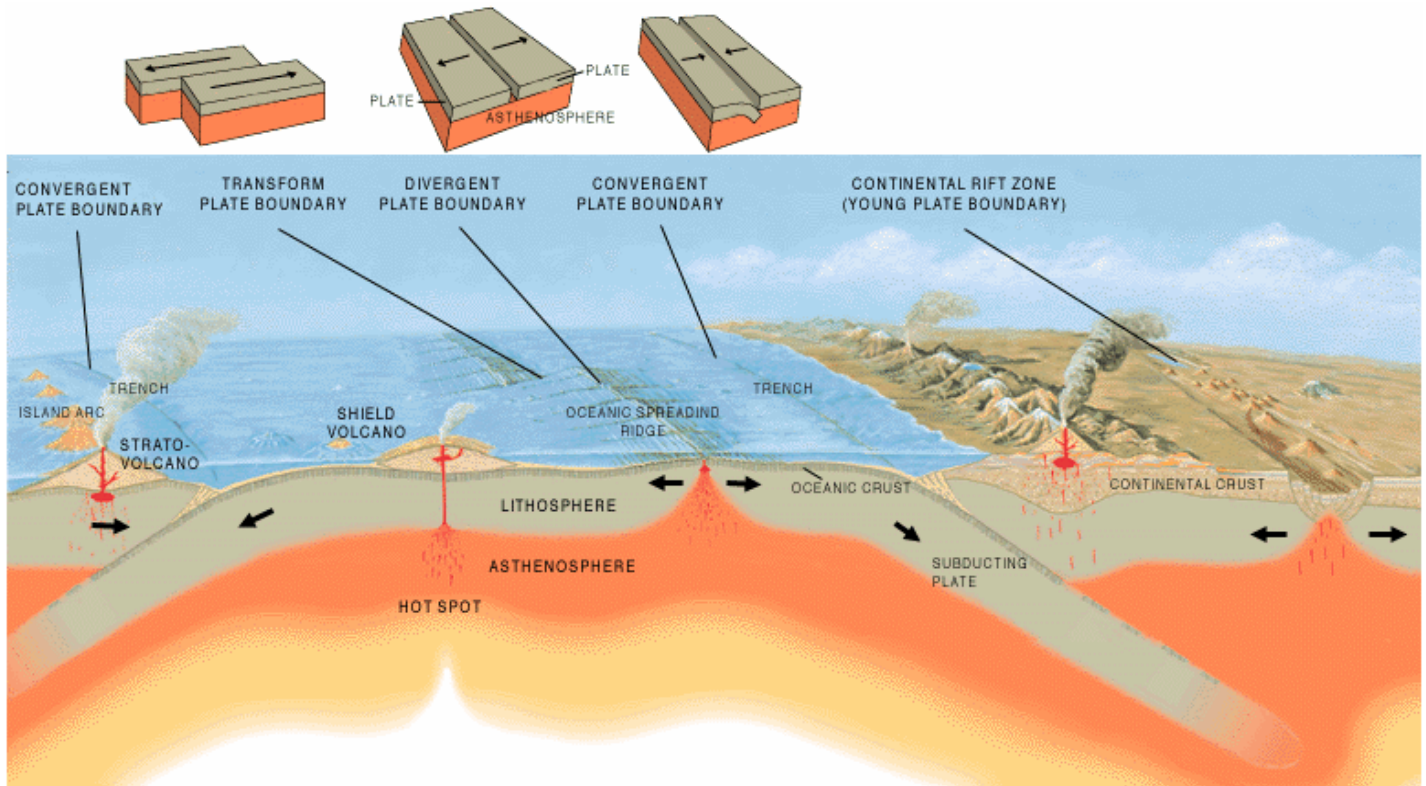


Basicamente, a litosfera como que flutua sobre a astenosfera, e encontra-se partida em pedaços que se designam por placas tectônicas. Abaixo se listam as principais placas tectônicas:

- Placa Africana
- Placa da Antártida
- Placa Euro-asiática
- Placa Norte-americana
- Placa Sul-americana
- Placa do Pacífico
- Placa Australiana

Existem ainda várias e mais numerosas placas menores. As placas tectônicas da Terra foram cartografadas na segunda metade do século XX.

3.2. Os limites de placa



Basicamente são três os tipos de limites de placas, caracterizados pelo modo de como as placas se deslocam umas relativamente às outras e aos quais estão associados diferentes tipos de fenômenos de superfície:

- Limites divergentes ou construtivos – ocorrem quando duas placas se afastam uma da outra (rift).
- Limites convergentes ou destrutivos – (também designados por margens ativas) ocorrem quando duas placas se movem uma em direção à outra, formando uma zona de subducção (interplaca) ou uma cadeia montanhosa (intraplaca).
- Limites transformantes ou conservativos - ocorrem quando as placas deslizam ou mais precisamente roçam uma na outra, ao longo de falhas transformantes. O movimento relativo das duas placas pode ser direito (dextro) ou esquerdo (senestro) em relação a um observador colocado num dos lados da falha.

Há limites de placas cuja situação é mais complexa, nos casos em que três ou mais placas se encontram, ocorrendo então uma mistura dos três tipos de limites anteriores.

3.2.1. Limites divergentes ou construtivos

Nos limites divergentes, duas placas afastam-se uma da outra sendo o espaço produzido por este afastamento preenchido com novo material crostal, de origem magmática. A origem de novos limites divergentes é por alguns vista como estando associada com os chamados pontos quentes. Nestes locais, células de convecção de grande dimensão transportam grandes quantidades de material astenosférico quente até próximo da superfície e pensa-se que a sua energia cinética poderá ser suficiente para produzir a fracturação da litosfera. O ponto quente que terá dado início à formação da crista meso-atlântica situa-se atualmente sob a Islândia, a qual se encontra em expansão à velocidade de vários centímetros por século.

Na litosfera oceânica, os limites divergentes são típicos da crista meso-oceânica, incluindo a crista meso-atlântica e a crista do Pacífico oriental; na litosfera continental estão tipificados pelas zonas de vale de *rift* como o Grande Vale do Rift da África Oriental. Os limites divergentes podem criar zonas de falhamento maciço no sistema de cristas oceânicas. As cristas dispostas paralelamente ao eixo de *rift* encontram-se situadas a maior profundidade e mais afastadas do eixo, quanto mais antigas forem (devido em parte à contração térmica e à subsidência).

Foi nas cristas meso-oceânicas que se encontrou uma das evidências chave que forçou a aceitação da hipótese de expansão dos fundos oceânicos. Levantamentos aeromagnéticos (medições do campo magnético terrestre a partir de um avião), mostraram um padrão de inversões magnéticas em ambos lados das cristas e simétricas em relação aos eixos destas. O padrão era demasiado regular para ser apenas uma coincidência, uma vez que as faixas de cada um dos lados das cristas tinham larguras idênticas. A alternância de polaridades tem correspondência direta com as inversões dos pólos magnéticos da Terra. Isto pode ser confirmado através da datação de rochas provenientes de cada uma das faixas. Estas faixas fornecem assim um mapa espaço-temporal da velocidade de expansão do assoalho oceânico das inversões dos pólos magnéticos.

Há pelo menos uma placa que não está associada a qualquer limite divergente, a Placa das Caraíbas. Julga-se que terá tido origem numa crista sob o Oceano Pacífico, entretanto desaparecida, e mantém-se ainda assim em movimento, segundo medições feitas com *GPS*. A complexidade tectônica desta região continua a ser objeto de estudo.

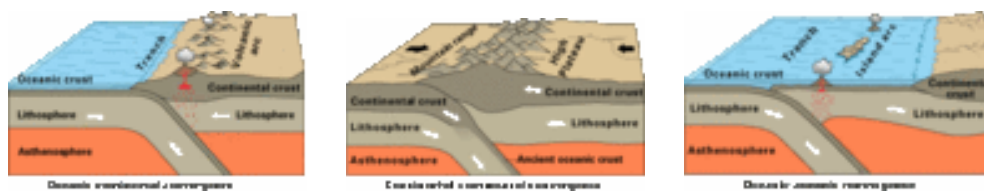
3.2.2. Limites convergentes ou destrutivos

A natureza de um limite convergente depende do tipo de litosfera que constitui as placas em presença. Quando a colisão ocorre entre uma densa placa oceânica e uma placa continental de menor densidade, geralmente a placa oceânica mergulha sob a placa continental, formando uma zona de subducção. À superfície, a expressão topográfica deste tipo de colisão é muitas vezes uma fossa, no lado oceânico e uma

cadeia montanhosa do lado continental. Um exemplo deste tipo de colisão entre placas é a área ao longo da costa ocidental da América do Sul onde a Placa de Nazca, oceânica, mergulha sob a Placa Sul-americana, continental. À medida que a placa subductada mergulha no manto, a sua temperatura aumenta provocando a libertação dos compostos voláteis presentes (sobretudo vapor de água). À medida que esta água atravessa o manto da placa sobrejacente, a temperatura de fusão desta baixa, resultando na formação de magma com grande quantidade de gases dissolvidos. Este magma pode chegar à superfície na forma de erupções vulcânicas, formando longas cadeias de vulcões para lá da plataforma continental e paralelamente a ela. A totalidade do limite da placa do Pacífico apresenta-se cercada por longas cadeias de vulcões, conhecidos coletivamente como *Círculo de Fogo do Pacífico*.

Onde a colisão se dá entre duas placas continentais, ou elas se fragmentam e se comprimem mutuamente ou uma mergulha sob a outra ou (potencialmente) sobrepõe-se à outra. O efeito mais dramático deste tipo de limite pode ser visto na margem norte da placa Indiana. Parte desta placa está a ser empurrada por baixo da placa euro-asiática, provocando o levantamento desta última, tendo já dado origem à formação dos Himalaias e do planalto do Tibete. Causou ainda a deformação de partes do continente asiático a este e oeste da zona de colisão.

Quando há convergência de duas placa de crosta oceânica, tipicamente ocorre a formação de um arco insular, à medida que uma placa mergulha sob a outra. O arco é formado a partir de vulcões que erupitam através da placa sobrejacente à medida que se dá a fusão da placa mergulhante. A forma de arco aparece devido à esfericidade da superfície terrestre. Ocorre ainda a formação de uma profunda fossa submarina em frente a estes arcos, na zona em que o bloco descendente se inclina para baixo. Bons exemplos deste tipo de convergência de placas são as ilhas do Japão e as Ilhas Aleutas, no Alasca.

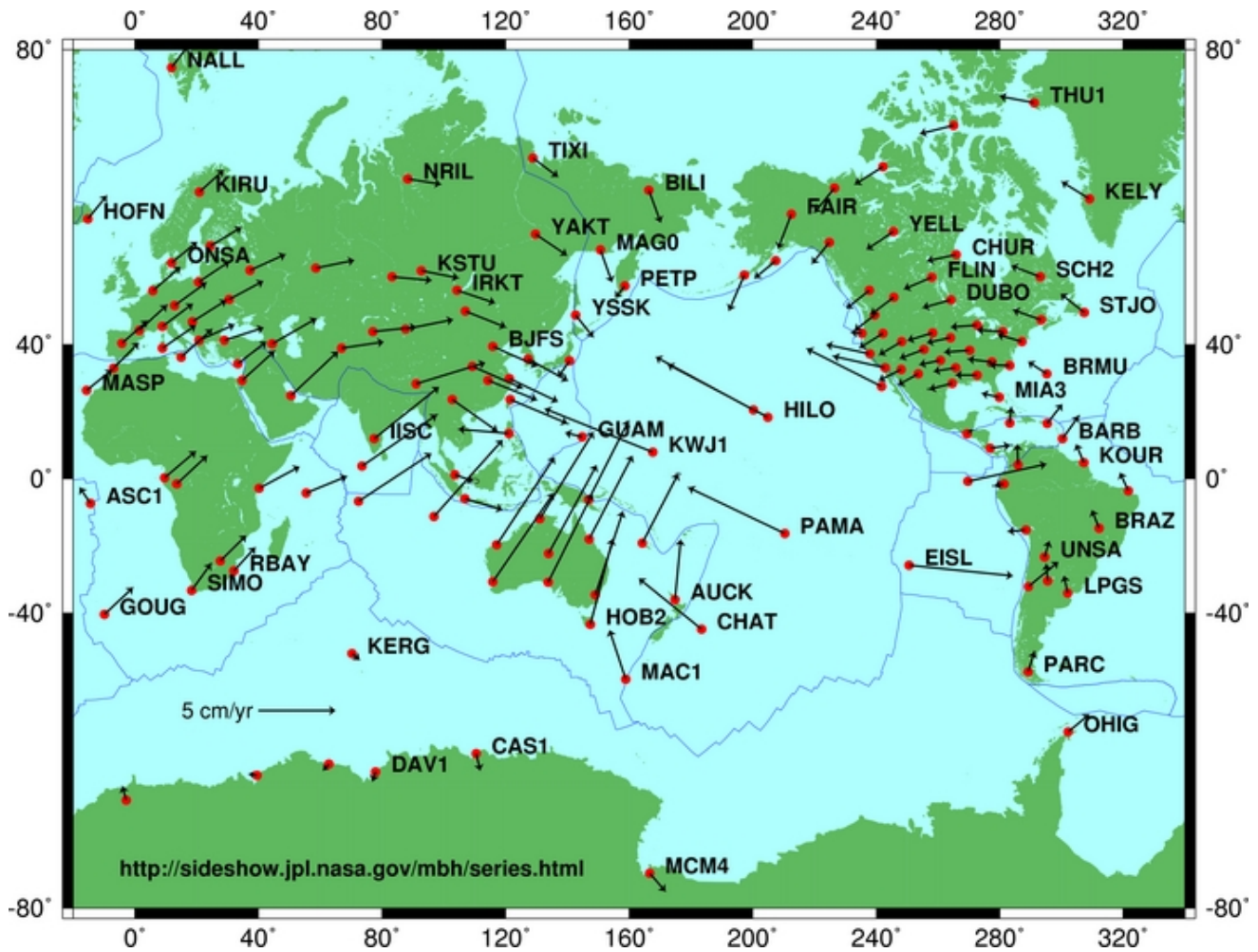


3.2.3. Limites transformantes ou conservativos

O movimento lateral esquerdo ou direito entre duas placas ao longo de uma falha transformante pode produzir efeitos facilmente observáveis à superfície. Devido à fricção, as placas não podem simplesmente deslizar uma pela outra. Em vez disso, a tensão acumula-se em ambas placas e quando atinge um nível tal, em qualquer um dos lados da falha, que excede a força de atrito entre as placas, a energia potencial acumulada é libertada sob a forma de movimento ao longo da falha. As quantidades maciças de energia libertadas neste processo são causa de terremotos, um fenómeno comum ao longo de limites transformantes.

Um bom exemplo deste tipo de limite de placas é o complexo da Falha de Santo André, localizado na costa oeste da América do Norte o qual faz parte de um complexo sistema de falhas desta região. Neste local, as placas do Pacífico e norte-americana movem-se relativamente uma à outra, com a placa do Pacífico a mover-se na direção noroeste relativamente à América do Norte. Dentro de aproximadamente 50 milhões de anos, a parte da Califórnia situada a oeste da falha será uma ilha, próxima do Alasca.

4. Causas dinâmicas do movimento das placas



Movimento das placas baseado em dados de satélite GPS (NASA) JPL. Os vetores mostram a direção e a magnitude do movimento.

O movimento das placas é medido directamente pelo sistema GPS. As placas movem-se graças à fraqueza relativa da astenosfera. Pensa-se que a fonte da energia necessária para produzir este movimento seja a dissipação de calor a partir do manto. Imagens tridimensionais do interior da Terra (tomografia sísmica), mostram a ocorrência de fenómenos de convecção no manto. A forma como estes fenómenos de convecção estão relacionados com o movimento das placas é assunto de estudos em curso bem como de

discussão. De alguma forma, esta energia tem de ser transferida para a litosfera de forma a que as placas se movam. Há essencialmente duas forças que o podem conseguir: o atrito e a gravidade.

4.1. Atrito

- Atrito do manto: é gerado pelas correntes de convecção que são transmitidas através da astenosfera; o movimento é provocado pelo atrito entre a astenosfera e a litosfera.
- Atrito de sucção de fossas: as correntes de convecção locais exercem sobre as placas uma força de arrasto friccional, dirigida para baixo, em zonas de subducção nas fossas oceânicas.

4.2. Gravidade

- Ridge-push: O movimento das placas é causado pela maior elevação das placas nas cristas meso-oceânicas. A maior elevação é causada pela relativamente baixa densidade do material quente em ascensão no manto. A verdadeira força produtora de movimento é esta ascensão e a fonte de energia que a sustenta. No entanto é difícil explicar a partição dos continentes a partir desta ideia.
- Slab pull: o movimento das placas é causado pelo peso das placas frias e densas, afundando-se nas fossas. Há evidências consideráveis de que ocorre convecção no manto. A ascensão de materiais nas cristas meso-oceânicas é quase de certeza parte desta convecção. Alguns modelos mais antigos para a tectónica de placas previam as placas sendo levadas por células de convecção, como bandas transportadoras. Porém, hoje em dia, a maior parte dos cientistas acreditam que a astenosfera não é suficientemente forte para produzir o movimento por fricção. Pensa-se que o arrasto causado por blocos será a força mais importante aplicada sobre as placas. Modelos recentes mostram que a sucção nas fossas também tem um papel importante. No entanto, é de notar que a placa norte-americana, não sofre subducção em parte alguma e ainda assim move-se. O mesmo se passa com as placas africana, euro-asiática e da Antártida. As forças que realmente estão por detrás do movimento das placas bem como a fonte de energia por detrás delas continuam a ser tópicos de aceso debate e de investigações em curso.
- Atrito lunar: num estudo publicado em Janeiro-Feveireiro de 2006 no boletim da Geological Society of America, uma equipa de cientistas italianos e americanos defendem a tese de que uma componente do movimento para oeste das placas tectónicas é devida ao efeito de maré provocado pela atracção da lua. À medida que a Terra gira para este, segundo eles, a gravidade da Lua vai a pouco e pouco puxando a camada superficial da Terra de volta para oeste. Isto poderá também explicar porque é que Vénus e Marte não têm placas tectónicas, uma vez que Vénus não tem luas e as luas de Marte são demasiado pequenas para produzirem efeitos de maré sobre Marte. Ainda assim, não se trata de uma

ideia nova. Foi pela primeira vez avançada pelo "pai" da hipótese da tectónica de placas, Alfred Wegener e desafiada pelo físico Harold Jeffreys que calculou que a magnitude do atrito provocado pelo efeito de maré que seria necessária, teria causado a paragem da rotação da Terra há muito tempo. De notar também que muitas das placas na realidade movem-se para norte e este, não para oeste.

5. Super continentes

Ao longo do tempo o movimento das placas tem causado a formação e separação de continentes, incluindo a formação ocasional de um supercontinente contendo todos ou quase todos os continentes. O super continente Rodínia terá sido formado há cerca de 1000 milhões de anos atrás contendo todos ou quase todos os continentes da Terra, tendo-se fragmentado em aproximadamente oito continentes há cerca de 600 milhões de anos. Posteriormente, estes oito continentes voltaram a formar um outro super continente chamado Pangea. Este super continente acabaria por dividir-se em dois, Laurasia (que daria origem à América do Norte e Eurásia) e Gondwana (que daria origem aos restantes continentes atuais).