

Movimento de placas



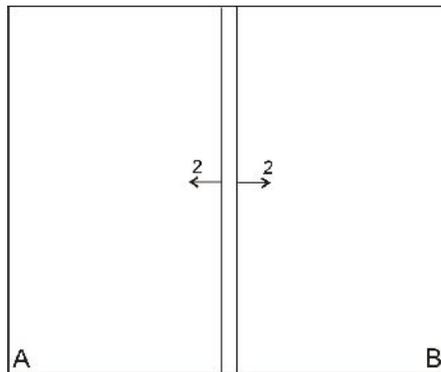
Movimento relativo
Terra plana

Movimento relativo entre as placas

- Para representar o movimento relativo entre duas placas usamos notação vetorial:
- ${}_A\mathbf{V}_B = - {}_B\mathbf{V}_A$
- ${}_B\mathbf{V}_A \Rightarrow \mathbf{V}_A$ em relação a B; estou na placa B e vejo A se movimentando;
- ${}_A\mathbf{V}_B \Rightarrow \mathbf{V}_B$ em relação a A; estou na placa A e vejo B se movimentando.
- O azimute da velocidade permite determinar a direção e sentido. Azimute é o ângulo, no sentido horário, entre o Norte geográfico e o vetor velocidade.
- Quando três placas com um ponto em comum estão envolvidas, podemos calcular a velocidade de uma delas com respeito às outras duas através da soma vetorial das velocidades:
- ${}_C\mathbf{V}_B = {}_C\mathbf{V}_A + {}_A\mathbf{V}_B$ pois ${}_A\mathbf{V}_B + {}_C\mathbf{V}_B + {}_C\mathbf{V}_A = 0$.

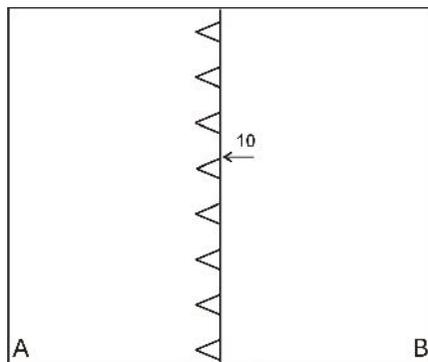
Movimento relativo entre as placas - Zona de acreção (dorsal)

- velocidade de cada lado da dorsal: termo taxa de espalhamento, indicando quanto de material está sendo agregado em cada placa.
- velocidade em apenas uma das placas, o valor é o dobro da taxa de espalhamento.
- A velocidade é sempre perpendicular à borda de acreção.



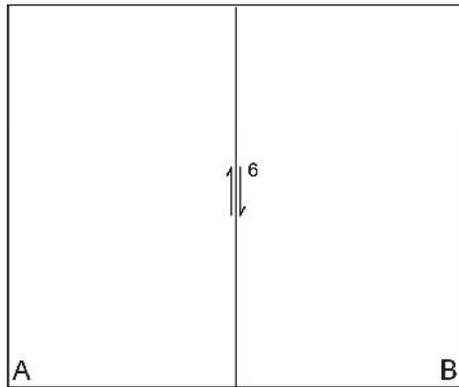
Movimento relativo entre as placas - Zona de subducção (trincheira)

- ❑ marcas gráficas indicam a subducção
- ❑ são colocadas sobre a placa que fica por cima e as pontas indicam a direção do movimento
- ❑ velocidade pode ser perpendicular ou não à trincheira. Quando a velocidade forma um ângulo oblíquo, parte do movimento é usado como movimento lateral e não de subducção



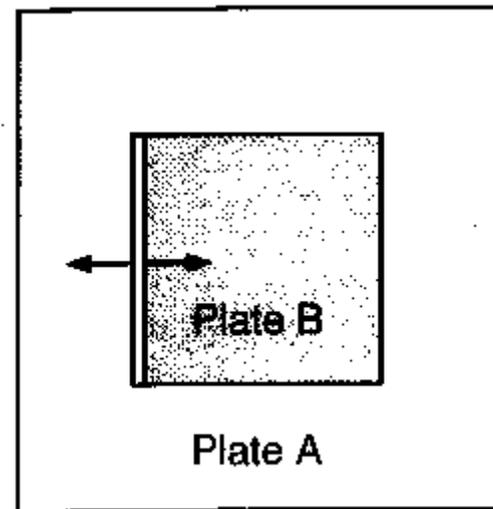
Movimento relativo entre as placas - Falha Transformante

- velocidade é paralela à direção da falha



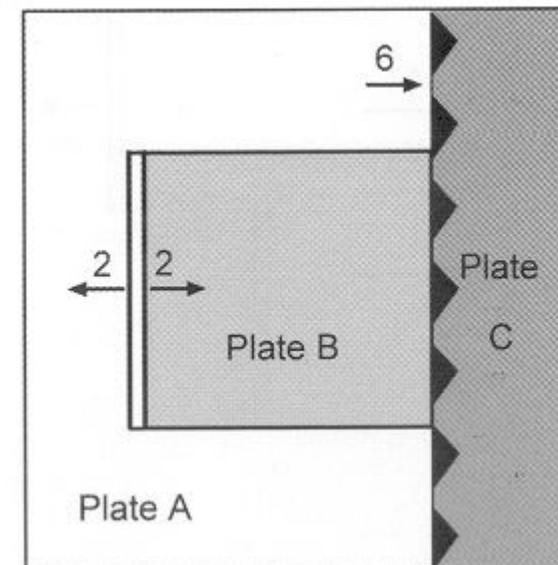
Estudo de casos:

- ❑ **1)** Duas placas A e B. O limite oeste da placa B é uma dorsal oceânica, com taxa de espalhamento de 2 cm/ano, ou ${}_A\mathbf{V}_B = -{}_B\mathbf{V}_A = 4$ cm/ano.
- ❑ Que tipo de borda deve existir ao norte e ao sul da placa B? Como é o limite leste da placa B com respeito à placa A? Quais são as velocidades nesses limites?



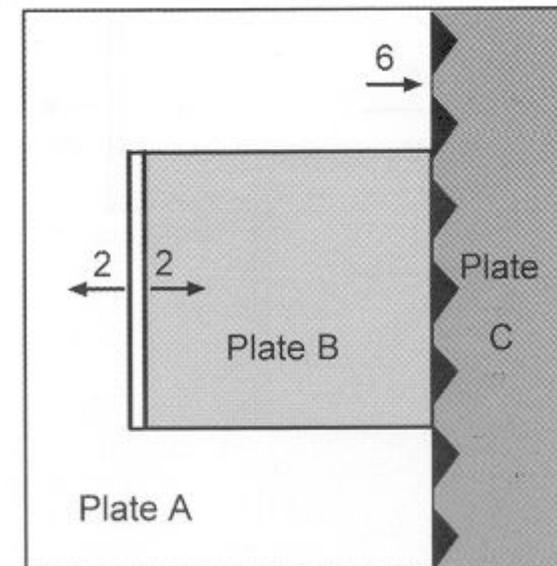
Estudo de casos:

- ❑ **2)** Três placas com movimentos perpendiculares às margens de acreção e destruição. O limite oeste entre as placas A e B é uma dorsal oceânica, com taxa de espalhamento de 2 cm/ano, ou ${}_A\mathbf{V}_B = -{}_B\mathbf{V}_A = 4$ cm/ano. O limite leste entre as placas A e C é a subducção da placa A sob a placa C com velocidade de 6 cm/ano.
- ❑ Que tipo borda deve existir ao norte e ao sul da placa B? Qual é a velocidade nesses limites? O que acontece com a placa B?



Estudo de casos:

- ❑ **3)** Três placas com movimento ao longo das bordas. O limite oeste entre as placas A e B é uma dorsal oceânica, com taxa de espalhamento de 2 cm/ano, ou ${}_A\mathbf{V}_B = -{}_B\mathbf{V}_A = 4$ cm/ano. O limite entre as placas A e C é uma falha transformante dextral (a placa A move-se para direita visto de C) com velocidade de 3 cm/ano.
- ❑ Que tipo de borda existe entre a placa B e C? Qual é a velocidade nesse limite?

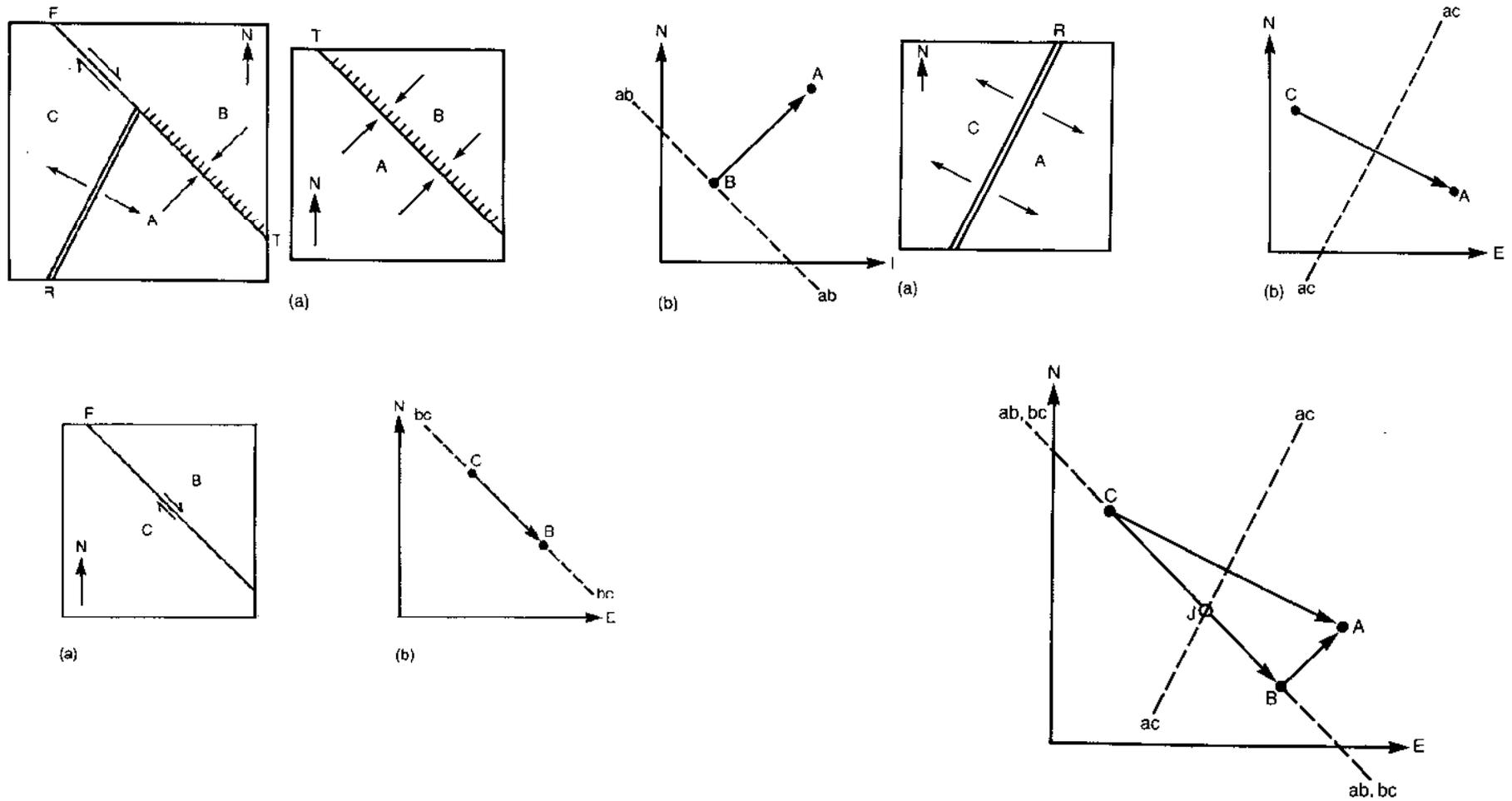


Junção tríplice

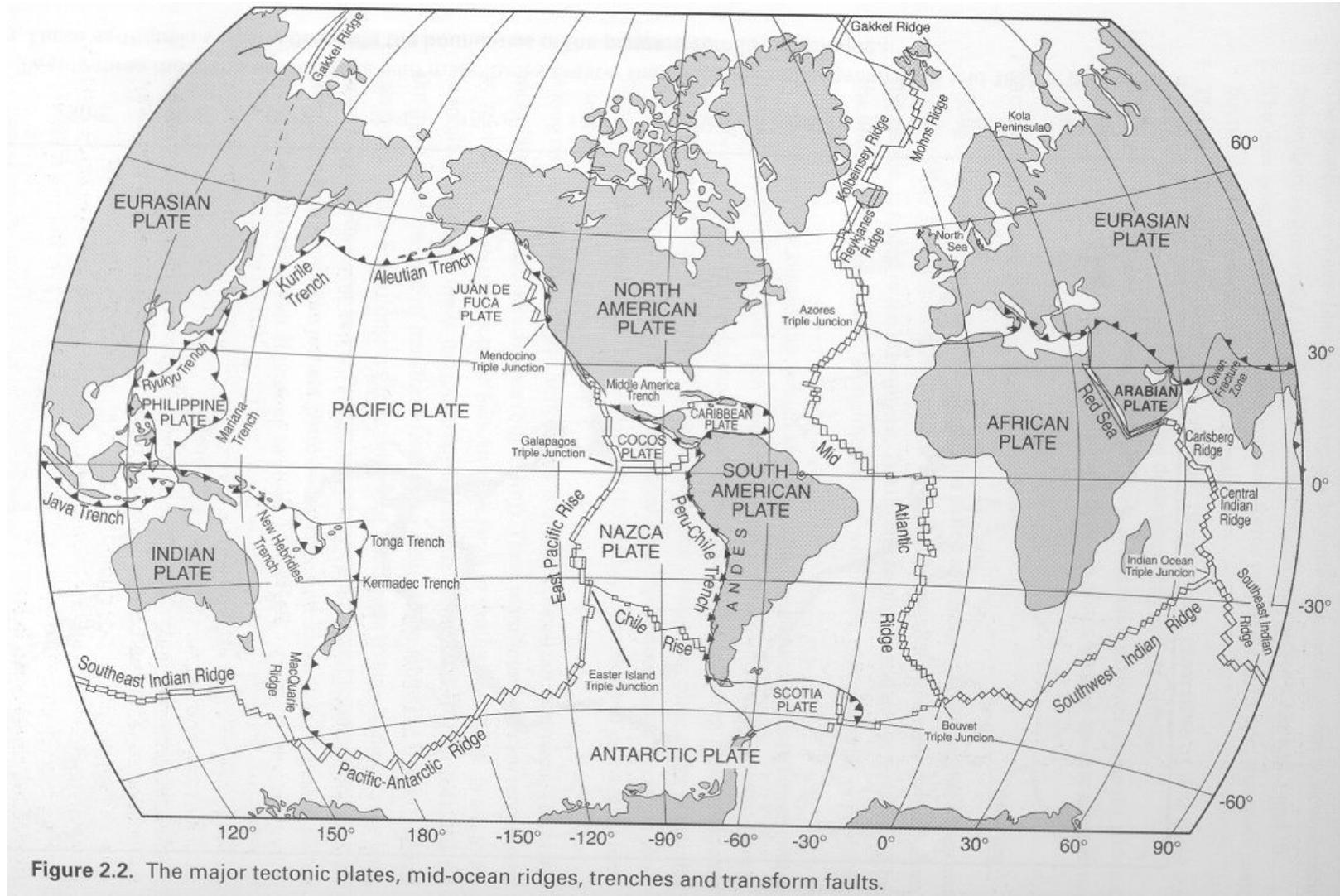
- ❑ No sistema atual de placas é comum termos três placas com um ponto comum de contato. Esse ponto é chamado de junção tríplice.
- ❑ A junção tríplice pode ou não ser estável.
- ❑ Estabilidade: Uma junção tríplice só é estável no tempo quando a orientação das três placas permite que a soma das velocidades seja nula:
 - ❑ ${}_A\mathbf{V}_B + {}_B\mathbf{V}_C + {}_C\mathbf{V}_A = 0$
 - ❑ Quando a relação de velocidade não é verdadeira, dizemos que a junção tríplice é instável. Ela muda de configuração e evolui para uma configuração estável.
 - ❑ O caso DDD (dorsal - dorsal - dorsal) é sempre estável. O caso FFF (falha transformante - falha transformante - falha transformante) nunca é estável.

Junção tríplice

- junção tríplice DTF entre as placas A, B e C



Junção tríplice



Junção tríplice

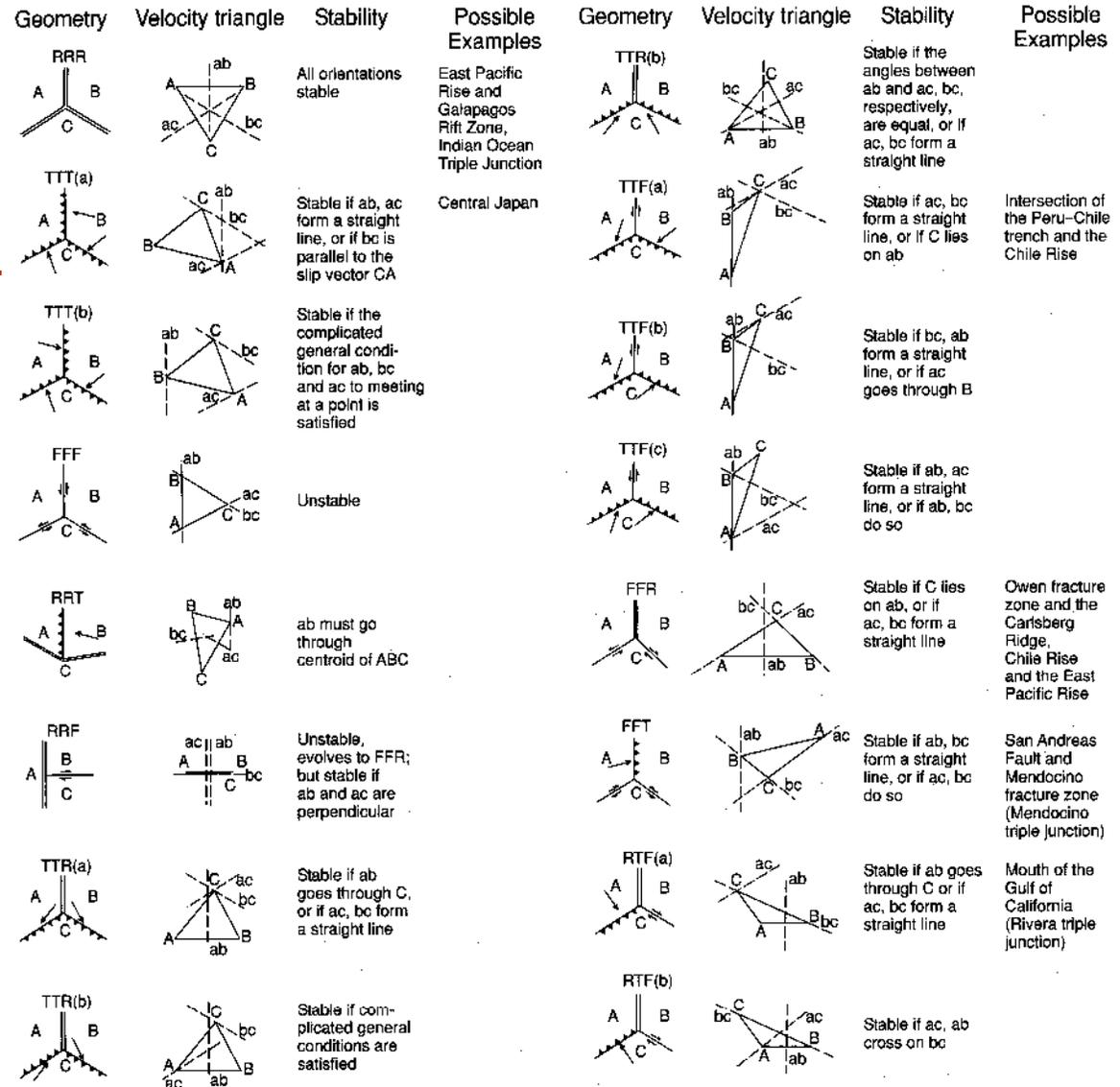


Figure 2.16. The geometry and stability of all possible triple junctions. In the categories represented by RRR, RTT, RTF and so on, R denotes ridge, T trench and F transform fault. The dashed lines ab, bc and ac in the velocity triangles represent velocities that leave the geometry of the boundary between plates A and B, B and C and A and C, respectively, unchanged. A triple junction is stable if ab, bc and ac meet at a point. Only an RRR triple junction (with ridges spreading symmetrically and perpendicular to their strikes) is always stable. (After McKenzie and Morgan (1969).)

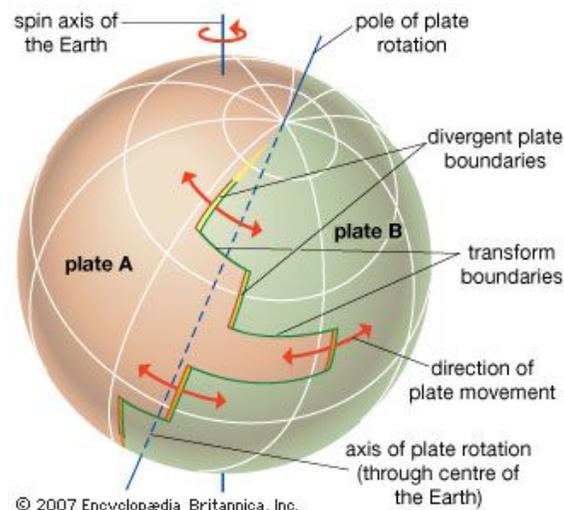
Movimento de placas



Movimento relativo
Terra esférica

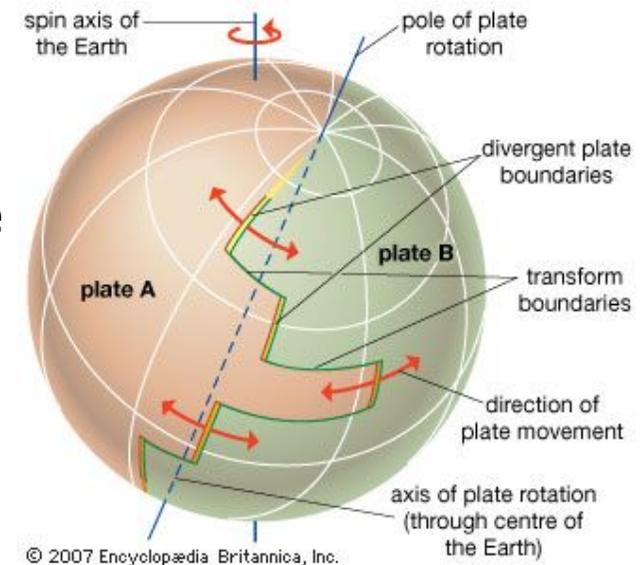
Vetores de Rotação e Pólos de Rotação

- ❑ Teorema de Euler: O deslocamento mais geral de um corpo rígido com um ponto fixo é equivalente a uma rotação em relação a um eixo que passa por esse ponto fixo.
- ❑ Analogia com o caso da Terra
- ❑ placa \Rightarrow corpo rígido
- ❑ centro da Terra \Rightarrow ponto fixo
- ❑ "Todo deslocamento de uma posição a outra sobre a superfície da Terra pode ser considerado como uma rotação em relação a um eixo conveniente que passa pelo centro da Terra".



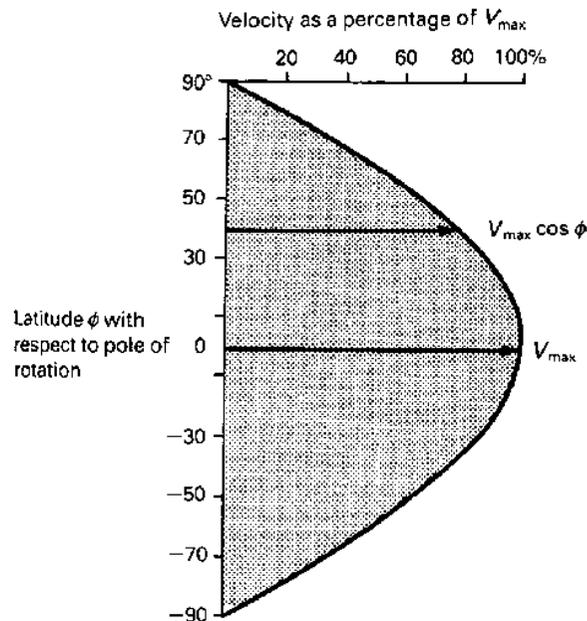
Vetores de Rotação e Pólos de Rotação

- ❑ O movimento relativo é descrito pela velocidade angular ω : $\omega = \omega \mathbf{k}$, onde \mathbf{k} é o vetor unitário ao longo do eixo de rotação.
- ❑ Convenção de sinal: o polo de rotação é positivo se o movimento de uma das placas considerando a outra fixa, for anti-horário quando observado de um ponto fora da superfície da Terra. Portanto, tem-se um polo positivo e um negativo.
- ❑ latitudes de rotação: pequenos círculos, falhas transformantes são arcos de um pequeno círculo de rotação, são perpendiculares às dorsais meso-oceânicas.
- ❑ longitude de rotação são grandes círculos perpendiculares às latitudes de rotação; encontro de várias longitudes de rotação de um par de placas marca o polo de rotação.

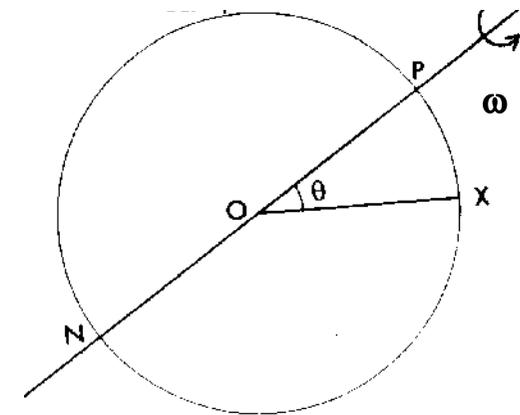
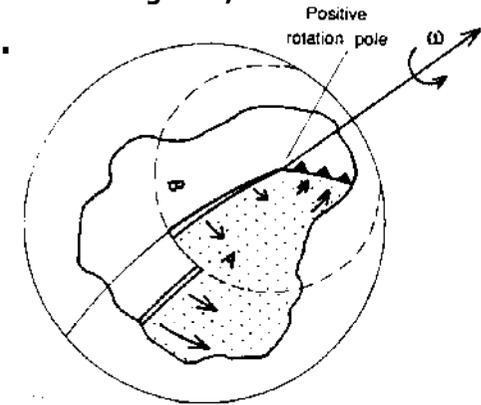


Vetores de Rotação e Pólos de Rotação

- Quando uma borda divergente passa pelo polo de rotação, o seu movimento muda para convergente e vice-versa.
- A velocidade dos pontos ao longo da borda aumenta com o aumento da distância entre a sua posição e o polo de rotação, será máxima no equador de rotação.



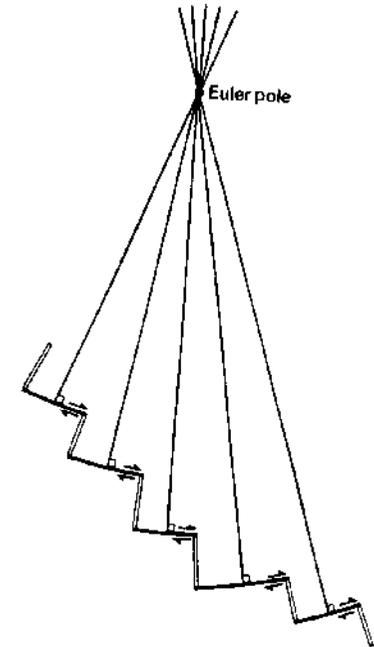
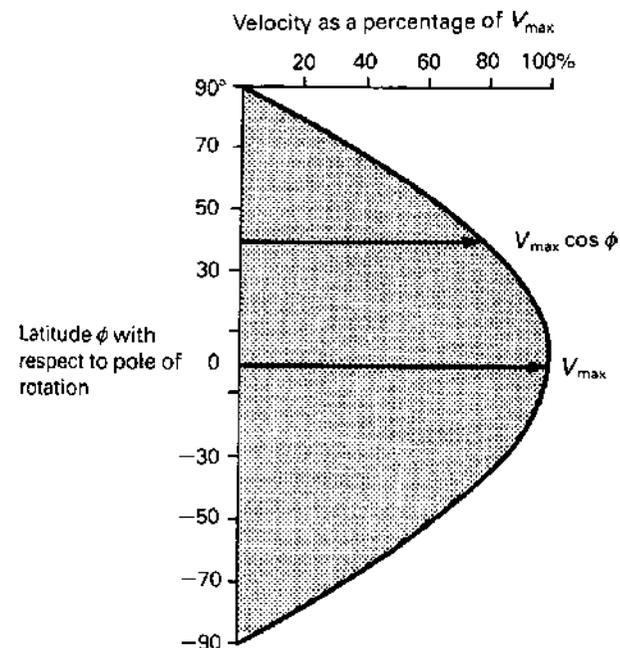
centro O e o polo de rotação positivo P e negativo N e o ponto X na superfície da Terra, em X a velocidade relativa entre as duas placas é V : $V = \omega R \sin \theta$ onde θ é a distância angular entre o polo de rotação (P) e o ponto X, que dista R (raio da Terra) do centro O.

$$V = \omega R \cos \lambda$$


Determinação de polos e velocidade de rotação

- ▣ direção do movimento nas falhas transformantes ativas entre duas placas.

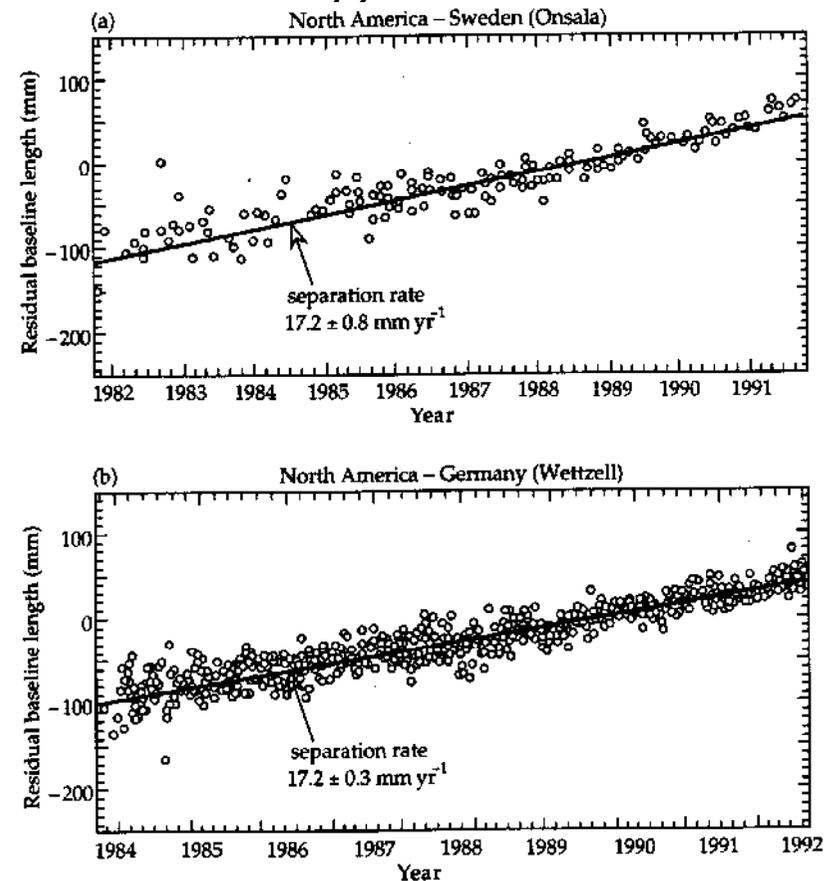
- ▣ usando a velocidade de deslocamento para cadeias meso-oceânicas



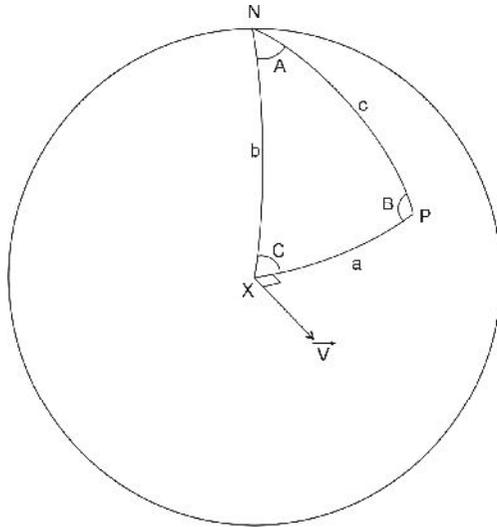
Determinação de polos e velocidade de rotação

- ❑ mecanismo focal de terremoto ao longo das bordas das placas
- ❑ medidas diretas através de satélites (laser e posicionamento por rádio) ou VLBI (very long line base interferometry) e GPS

Fig. 1.16 Changes in separation between Westcott (Massachusetts, USA) and (a) Onsala (Sweden) and (b) Wettzell (Germany), as determined by very long baseline interferometry (after Ryan *et al.*, 1993).



Cálculo do movimento relativo na borda das placas



N - polo norte geográfico

P - polo de rotação positivo de coordenadas (λ_p, ϕ_p)

X - ponto da borda da placa com coordenada (λ_x, ϕ_x)

\mathbf{V} - o vetor velocidade no ponto X, com magnitude $|\mathbf{V}| \Rightarrow$ desconhecida!

β - o azimute (ângulo que o vetor forma com a direção Norte-Sul) da velocidade com respeito a N (>0 no sentido horário) \Rightarrow desconhecido

ω - a velocidade angular

R - o raio da Terra

lados do triângulo esférico:

$$b = 90^\circ - \lambda_x \Rightarrow \textit{conhecido}$$

$$c = 90^\circ - \lambda_p \Rightarrow \textit{conhecido}$$

$$a \Rightarrow \textit{desconhecido}$$

ângulos do triângulo esférico:

$$A = \Phi_p - \Phi_x \Rightarrow \textit{conhecido}$$

$$B \Rightarrow \textit{desconhecido}$$

$$C \Rightarrow \textit{desconhecido}$$

velocidade em X:

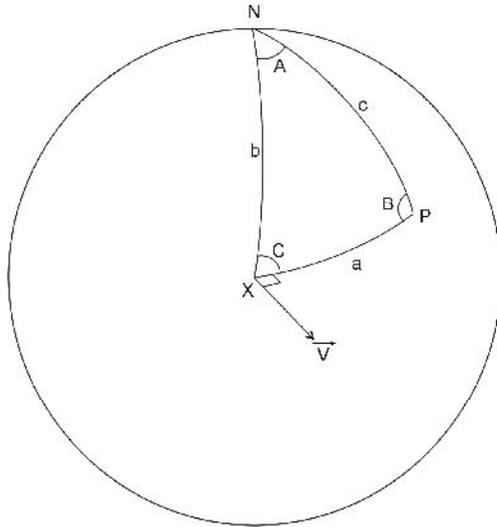
$$\text{magnitude: } V = \omega R \sin \theta = \omega R \sin a$$

a é a distância angular entre X e P

$$\text{azimute (com respeito ao norte): } \beta = 90^\circ + C$$

Conhecendo a e C é possível determinar V e β e o movimento relativo na borda da placa.

Cálculo do movimento relativo na borda das placas



Relações entre senos e cossenos para a geometria esférica:

$$\cos a = \cos b \cos c + \sin b \sin c \cos A$$

$$\frac{\sin a}{\sin A} = \frac{\sin c}{\sin C} = \frac{\sin b}{\sin B}$$

$$b = 90^\circ - \lambda_X \Rightarrow \text{conhecido}$$

$$c = 90^\circ - \lambda_P \Rightarrow \text{conhecido}$$

$$a \Rightarrow \text{desconhecido}$$

$$A = \Phi_P - \Phi_X \Rightarrow \text{conhecido}$$

$$B \Rightarrow \text{desconhecido}$$

$$C \Rightarrow \text{desconhecido}$$

$$\cos a = \cos(90^\circ - \lambda_X) \cos(90^\circ - \lambda_P) + \sin(90^\circ - \lambda_X) \sin(90^\circ - \lambda_P) \cos(\Phi_P - \Phi_X)$$

$$\cos a = \sin \lambda_X \sin \lambda_P + \cos \lambda_X \cos \lambda_P \cos(\Phi_P - \Phi_X)$$

$$\frac{\sin a}{\sin(\Phi_P - \Phi_X)} = \frac{\sin(90^\circ - \lambda_P)}{\sin C}$$

$$\sin C = \frac{\cos \lambda_P \sin(\Phi_P - \Phi_X)}{\sin a}$$

Combinação dos vetores de rotação de duas placas para calcular o movimento de outra placa

□ ${}_A\omega_B + {}_B\omega_C + {}_C\omega_A = 0$

- A soma dos vetores velocidade pode ser escrita no sistema retangular usando as componentes:

$$x_{CA} = x_{CB} + x_{BA}$$

$$y_{CA} = y_{CB} + y_{BA}$$

$$z_{CA} = z_{CB} + z_{BA}$$

$$x = r \operatorname{sen} \theta \cos \phi$$

$$y = r \operatorname{sen} \theta \operatorname{sen} \phi$$

$$z = r \cos \theta$$

$$x_{CA} = \omega_{CB} \operatorname{sen}(90 - \lambda_{CB}) \cos \phi_{CB} + \omega_{BA} \operatorname{sen}(90 - \lambda_{BA}) \cos \phi_{BA} = \omega_{CB} \cos \lambda_{CB} \cos \phi_{CB} + \omega_{BA} \cos \lambda_{BA} \cos \phi_{BA}$$

$$y_{CA} = \omega_{CB} \operatorname{sen}(90 - \lambda_{CB}) \operatorname{sen} \phi_{CB} + \omega_{BA} \operatorname{sen}(90 - \lambda_{BA}) \operatorname{sen} \phi_{BA} = \omega_{CB} \cos \lambda_{CB} \operatorname{sen} \phi_{CB} + \omega_{BA} \cos \lambda_{BA} \operatorname{sen} \phi_{BA}$$

$$z_{CA} = \omega_{CB} \cos(90 - \lambda_{CB}) + \omega_{BA} \cos(90 - \lambda_{BA}) = \omega_{CB} \operatorname{sen} \lambda_{CB} + \omega_{BA} \operatorname{sen} \lambda_{BA}$$

- A magnitude do vetor velocidade é dada por:

- A posição do polo de rotação entre A e C: $|\omega_{CA}| = \sqrt{(x_{CA})^2 + (y_{CA})^2 + (z_{CA})^2}$

$$\lambda_{CA} = \operatorname{sen}^{-1}(z_{CA} / \omega_{CA})$$

$$\phi_{CA} = \tan^{-1}(y_{CA} / x_{CA})$$

Posição atual dos polos

Table 2.1. *Rotation vectors for the present-day relative motion between some pairs of plates*

Plates	Positive pole position		Angular velocity
	Latitude	Longitude	(10^{-7} deg yr $^{-1}$)
Africa–Antarctica	5.6°N	39.2°W	1.3
Africa–Eurasia	21.0°N	20.6°W	1.3
Africa–North America	78.8°N	38.3°E	2.5
Africa–South America	62.5°N	39.4°W	3.2
Australia–Antarctica	13.2°N	38.2°E	6.8
Pacific–Antarctica	64.3°S	96.0°E	9.1
South America–Antarctica	86.4°S	139.3°E	2.7
Arabia–Eurasia	24.6°N	13.7°E	5.2
India–Eurasia	24.4°N	17.7°E	5.3
Eurasia–North America	62.4°N	135.8°E	2.2
Eurasia–Pacific	61.1°N	85.8°W	9.0
Pacific–Australia	60.1°S	178.3°W	11.2
North America–Pacific	48.7°N	78.2°W	7.8
Cocos–North America	27.9°N	120.7°W	14.2
Nazca–Pacific	55.6°N	90.1°W	14.2
Nazca–South America	56.0°N	94.0°W	7.6

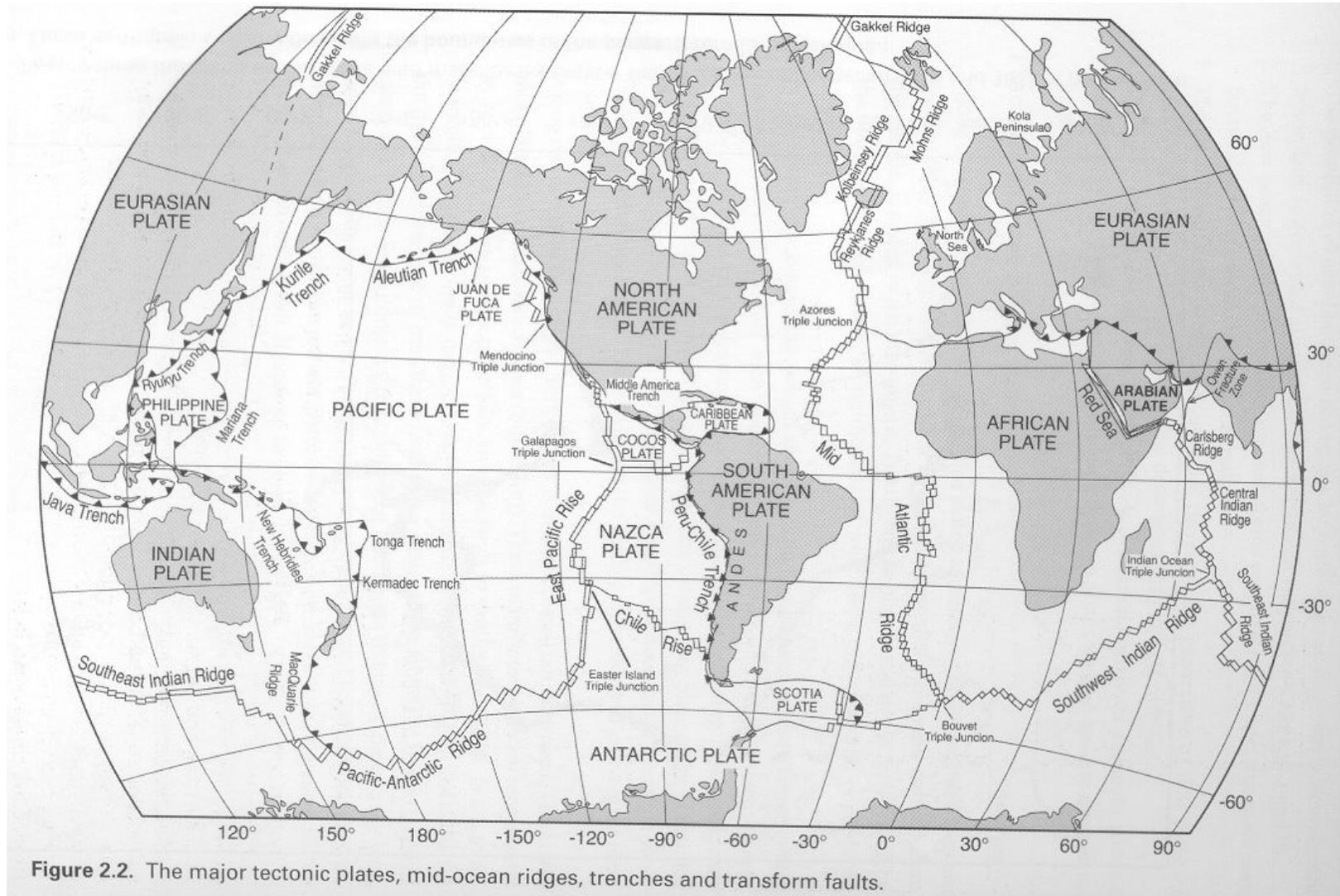
Note: The first plate moves anticlockwise with respect to the second plate as shown.
Source: After DeMets, Gordon, Argus and Stein (1990). *date! 1989*

Movimento de placas



Movimento absoluto
Terra esférica

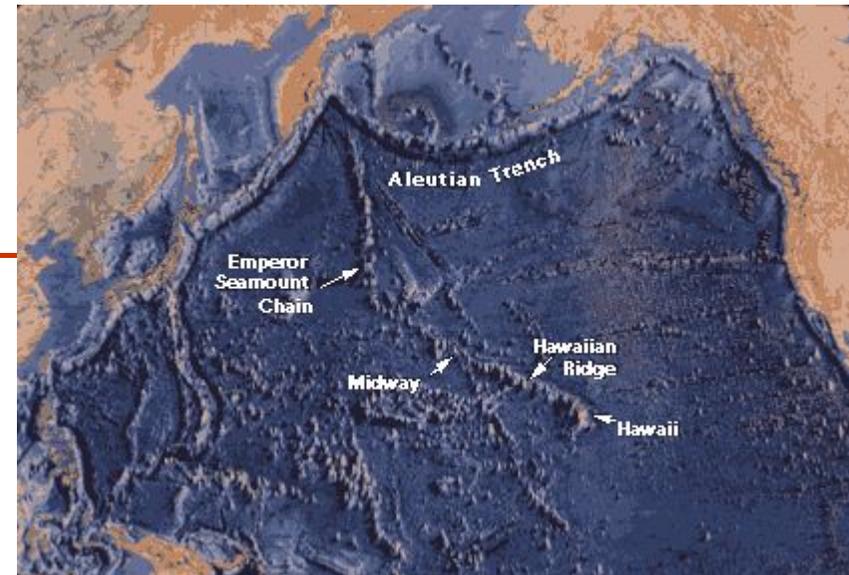
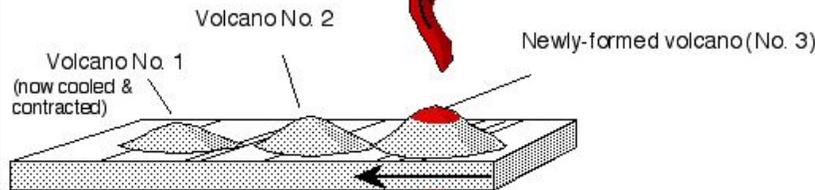
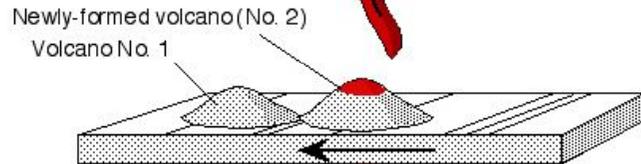
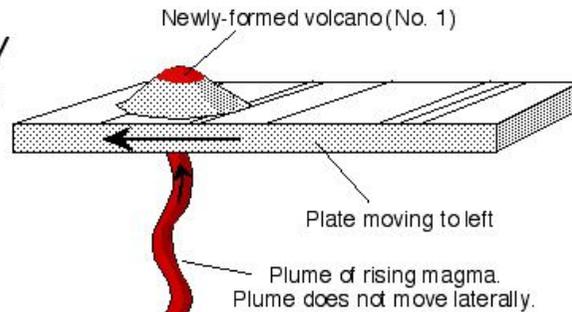
Mapa das maiores placas



Uso de hot-spot

Volcanic Chains:
*The Hot Spot /
Mantle Plume
model*

Three sketches
in a time series



Cadeia Emperor – Hawaii no oceano Pacífico. A idade aumenta com o afastamento de Loihi, o vulcão submarino mais jovem e atualmente ativo.

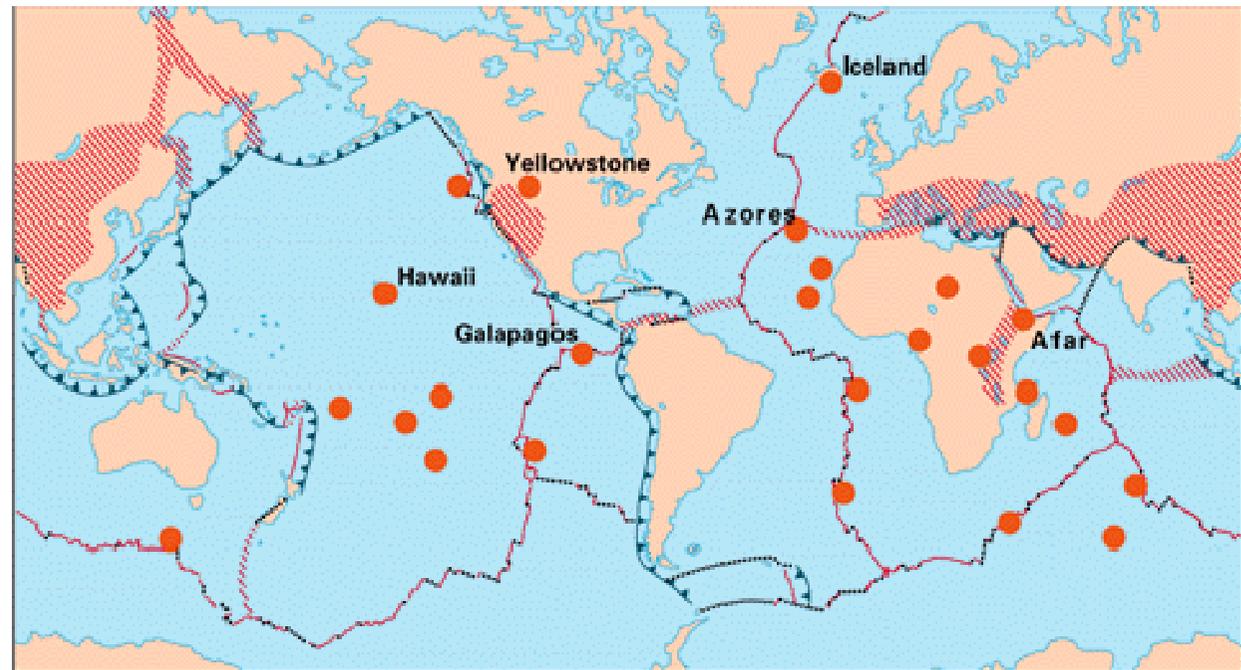
Mudança na direção da cadeia na idade de 43 Ma.

Vulcanismo mais antigo da cadeia do tem 78 Ma e ao norte da cadeia.

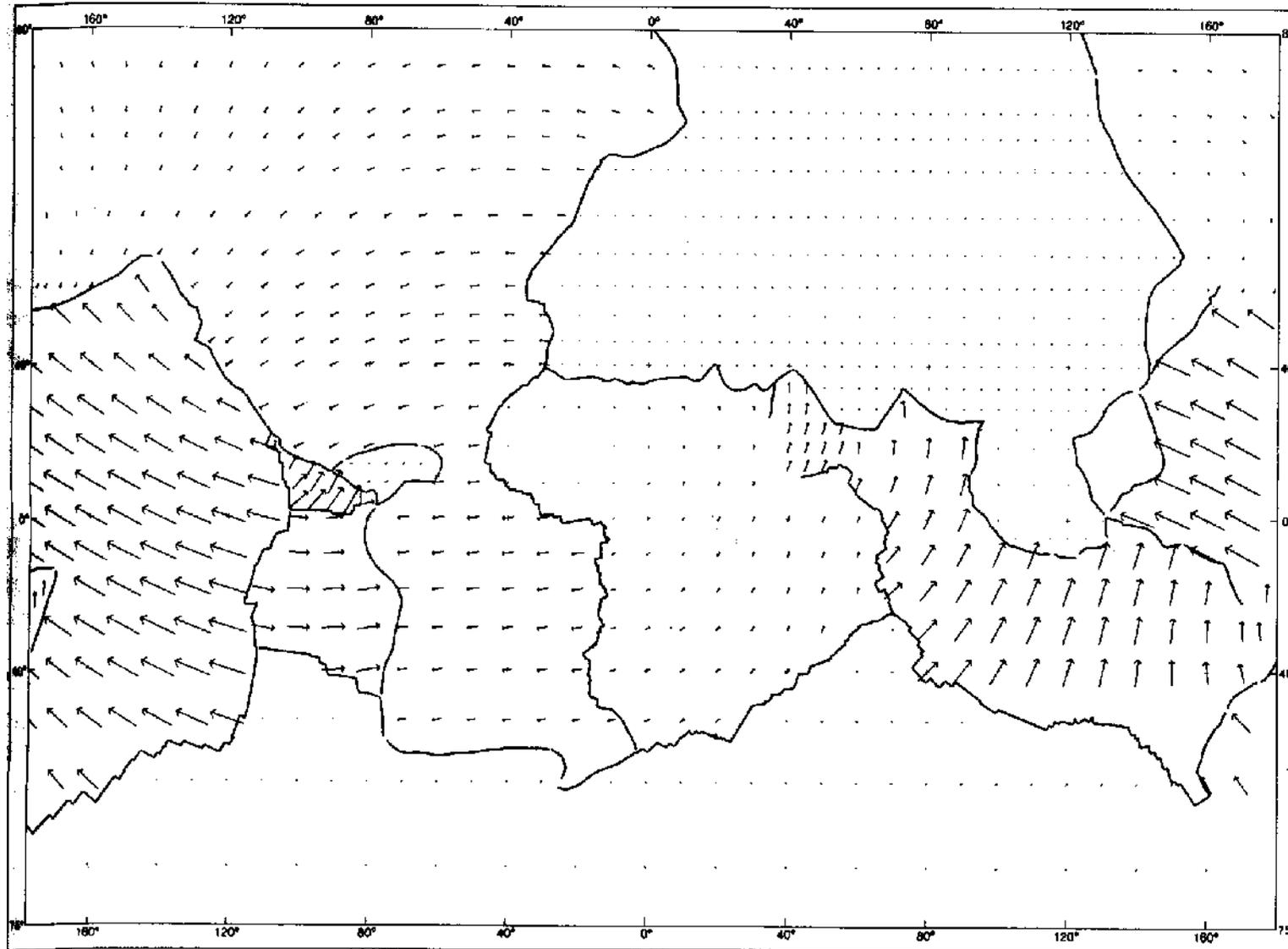
Hot spots usados

EXPLANATION

-  **Divergent plate boundaries**—Where new crust is generated as the plates pull away from each other.
-  **Convergent plate boundaries**—Where crust is consumed in the Earth's interior as one plate dives under another.
-  **Transform plate boundaries**—Where crust is neither produced nor destroyed as plates slide horizontally past each other.
-  **Plate boundary zones**—Broad belts in which deformation is diffuse and boundaries are not well defined.
-  **Selected prominent hotspots**

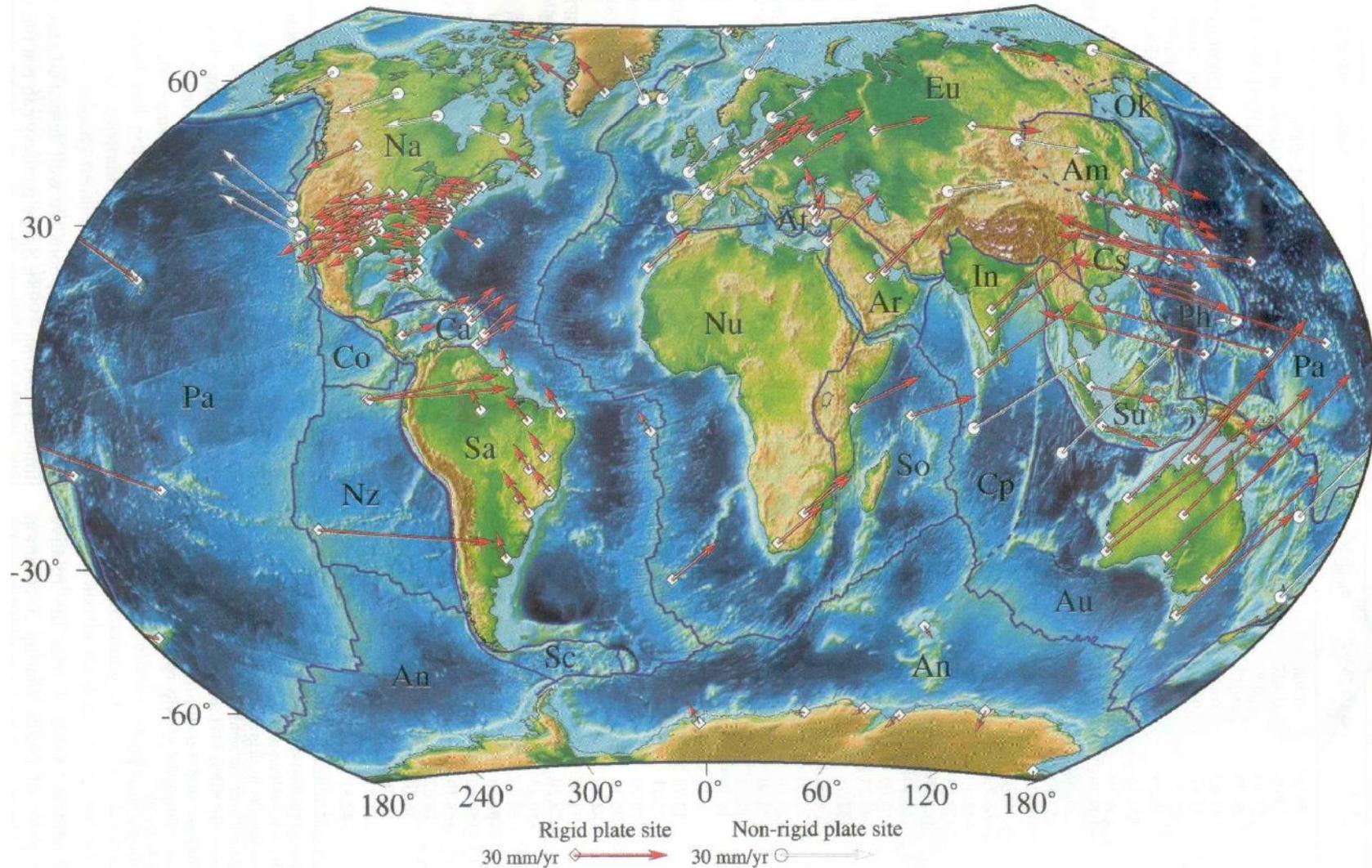


Movimento absoluto



Movimento absoluto

REVEL-2000

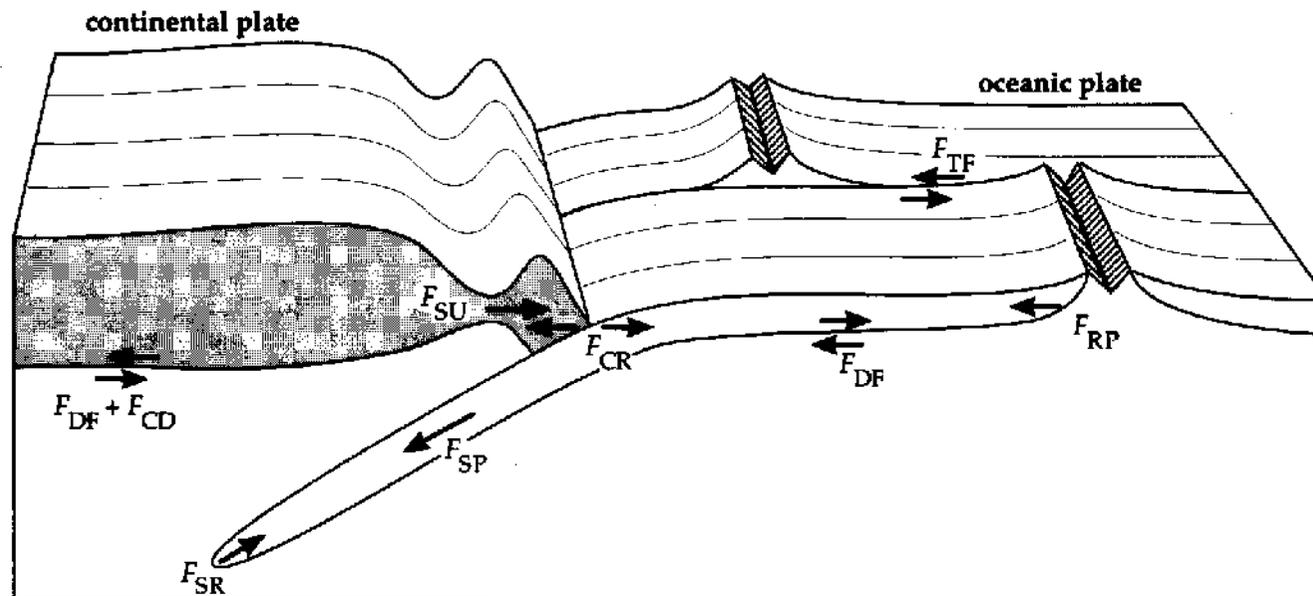


Movimento de placas



Forças atuando nas placas

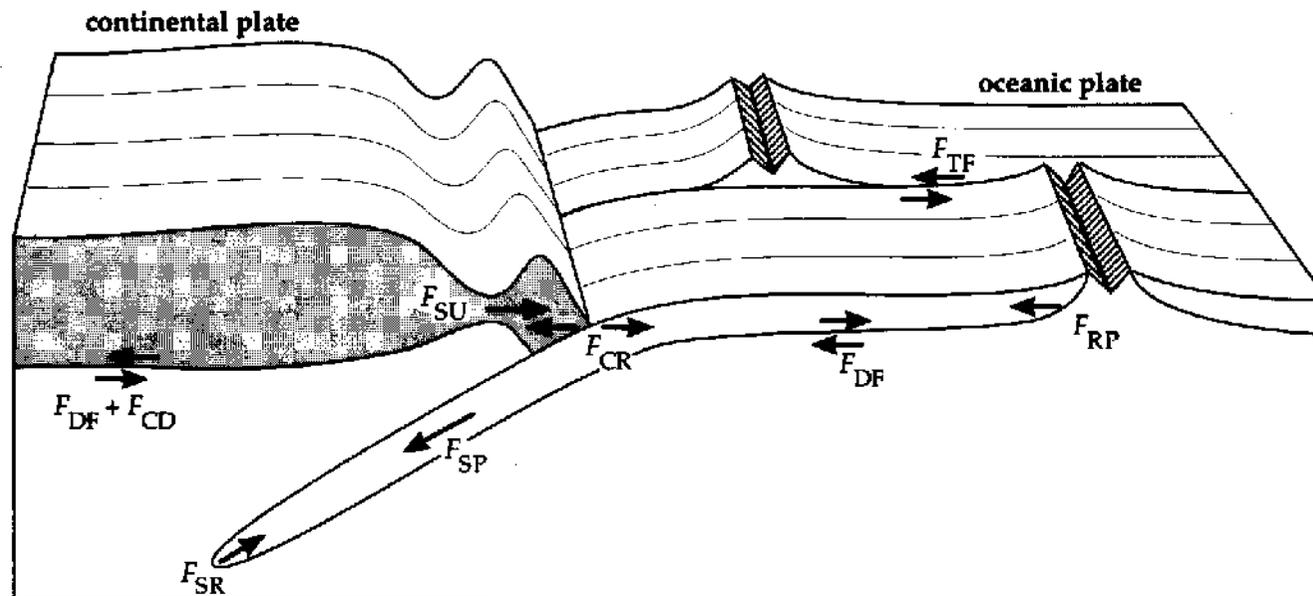
Forças facilitadoras



Empurrão da cadeia (ridge-push) F_{RP} : ascensão do material quente proveniente do manto e a tendência do material recém formado, mais frio, em escorregar e afundar. Litosfera da ordem de 85 km de espessura e dorsal da ordem de 3 km de elevação acima da placa fria $\Rightarrow 2 \times 10^{-2}$ N/m.

Puxão da placa em subducção (slab-pull) F_{SP} : placa em subducção é fria e mais densa que o manto. Essa força tende a diminuir com a profundidade, sendo máxima na superfície; da ordem de 10^{13} N/m.

Forças resistivas



Resistência da astenosfera à penetração da placa descendente, F_{SR} .

Força de colisão entre duas placas tem magnitude igual nas duas placas, mas agem em sentidos opostos, F_{CR} .

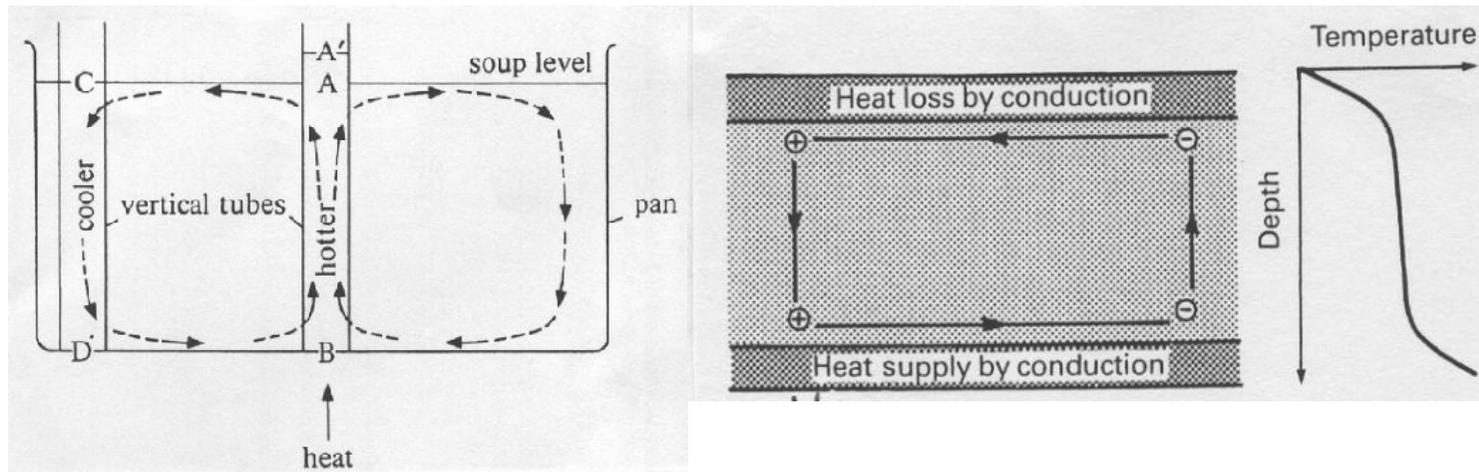
Força de sucção, que tende a puxar a placa que está por cima em direção à trincheira, F_{SU} .

Força de atrito nas falhas transformantes, resistindo ao movimento, F_{TF} .

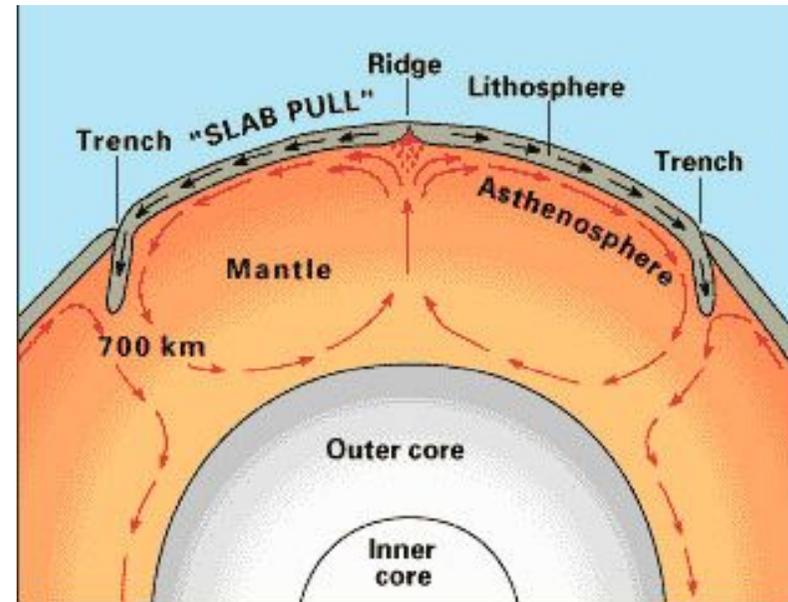
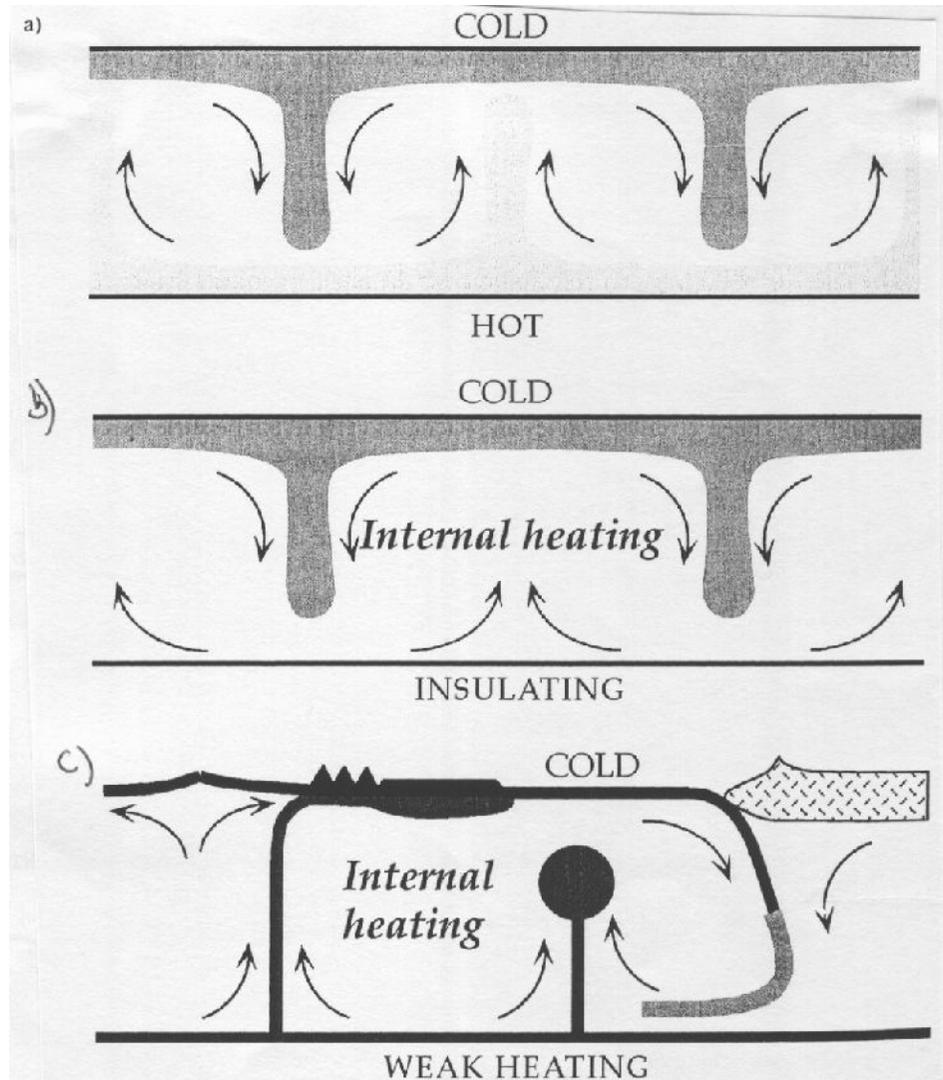
Força basal ou força de arrasto do manto, F_{DF} , (drag force) que atua na base da placa litosférica.

Motor das placas

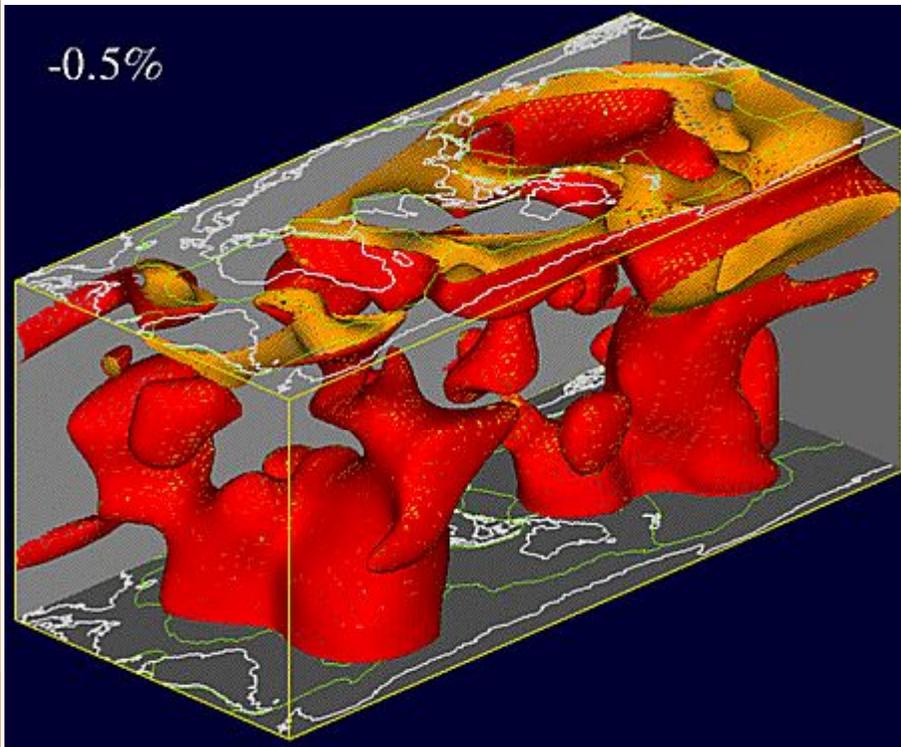
- A fonte principal de energia: calor produzido pelo decaimento dos elementos radioativos U, Th e K. O modelo mais simples para a conversão direta de calor em movimento é a convecção térmica.



Convecção na Terra

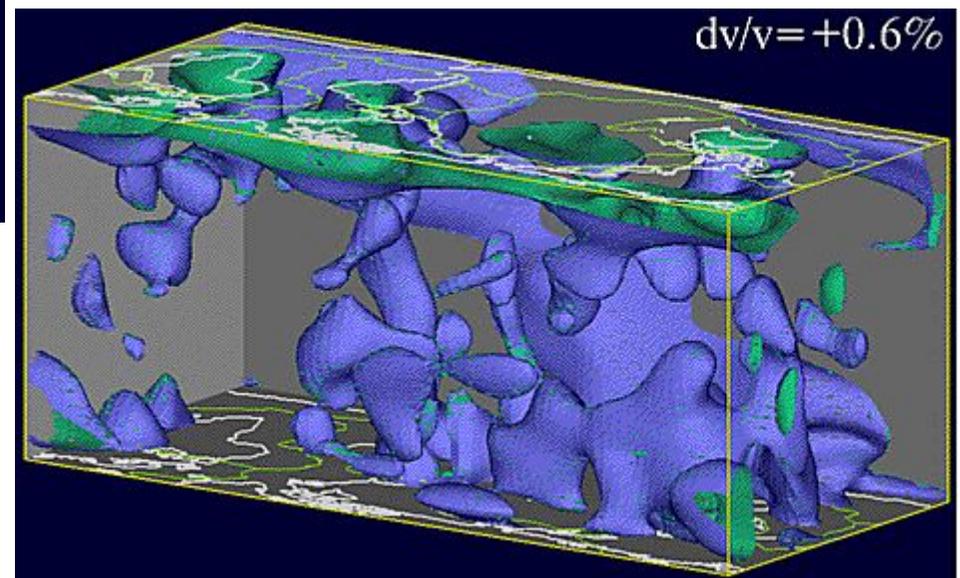


Convecção na Terra



Slab – material mais frio caindo da superfície para o interior do manto. Velocidade das ondas P é maior.

- Pluma – material mais quente vindo da base do manto. Velocidade das ondas P é menor.



Movimento de placas



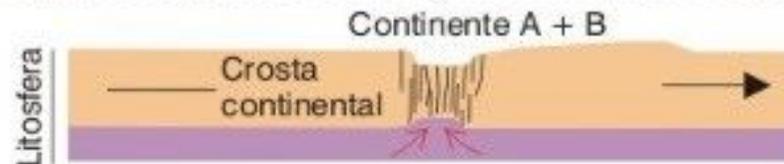
Ciclo de Wilson

Formação de um novo oceano

Modelo simplificado da quebra de um continente e abertura de um oceano

Estágio 1:

Crosta continental é estirada e começa a se fraturar e afinar no centro.



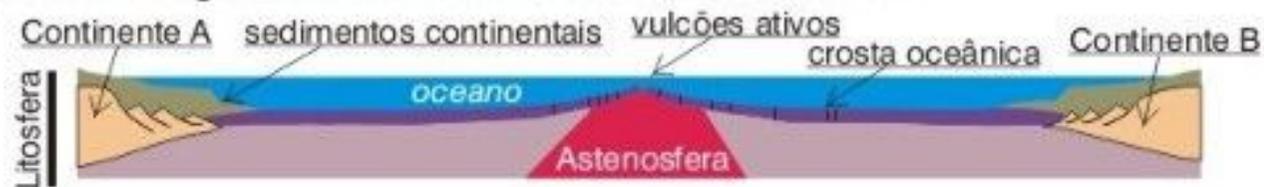
Estágio 2:

Continente se separa em dois. O magma basáltico que vem da astenosfera forma a crosta oceânica.

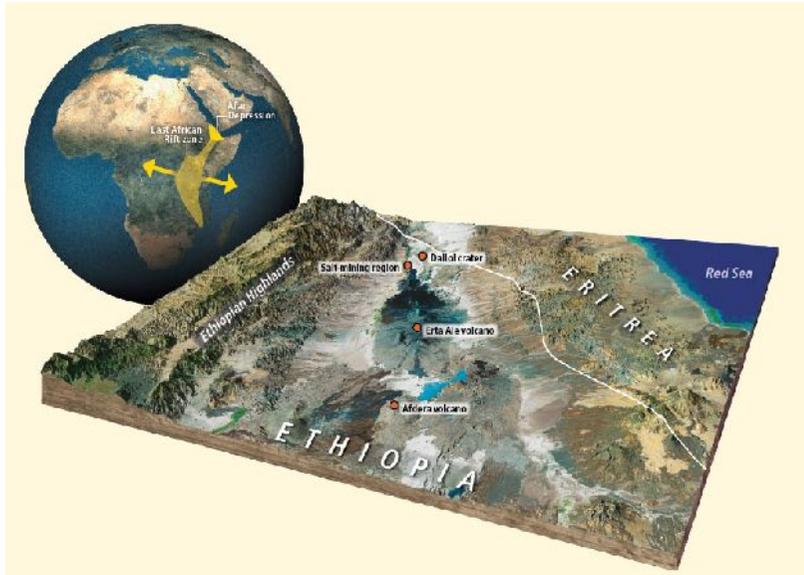


Estágio 3:

Os sedimentos que vêm dos continentes cobrem a plataforma continental. O oceano alarga e uma cadeia meso-oceânica se forma.



Formação de um novo oceano



Fechamento de um oceano e colisão continental

