



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI TRIESTE

Fisica Terrestre

Tettonica delle placche

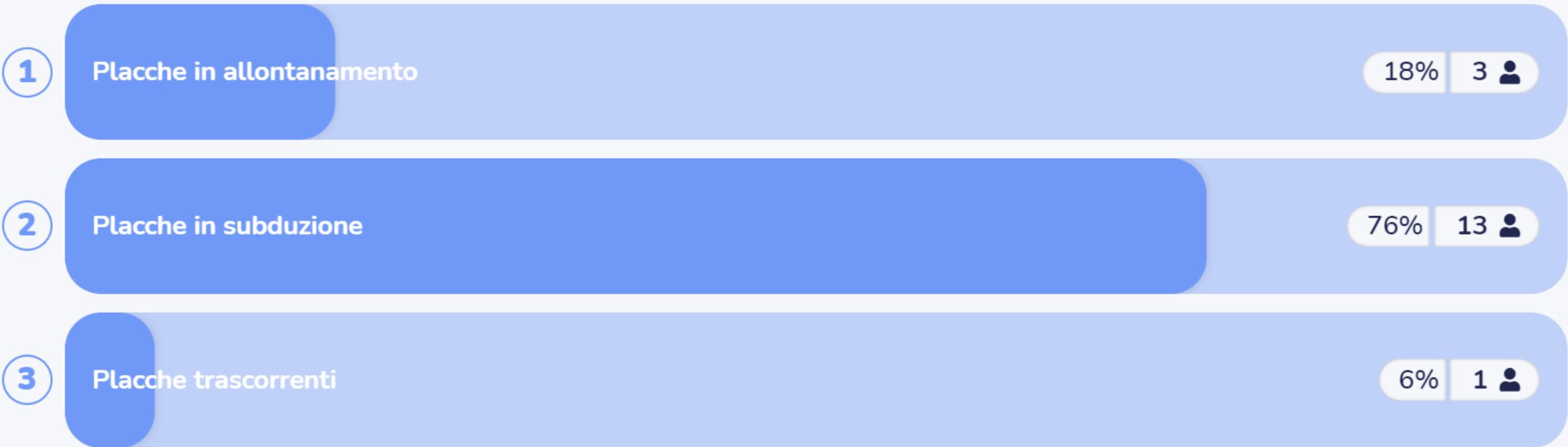
Veronica Pazzi - veronica.pazzi@units.it

Tettonica delle placche: il territorio italiano

Domande iniziali

- La forma attuale dell'Italia dipende da:

La forma attuale dell'Italia dipende da:



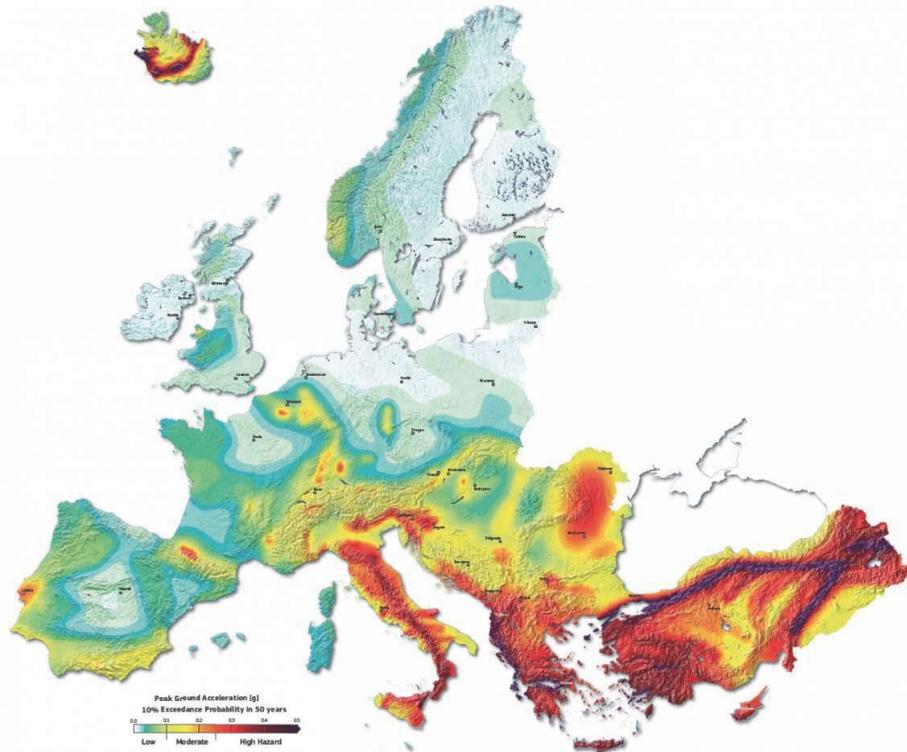
Tettonica delle placche: il territorio italiano

Il territorio italiano è localizzato nella zona di collisione tra **la placca africana** e quella **euroasiatica**



Tettonica delle placche: il territorio italiano

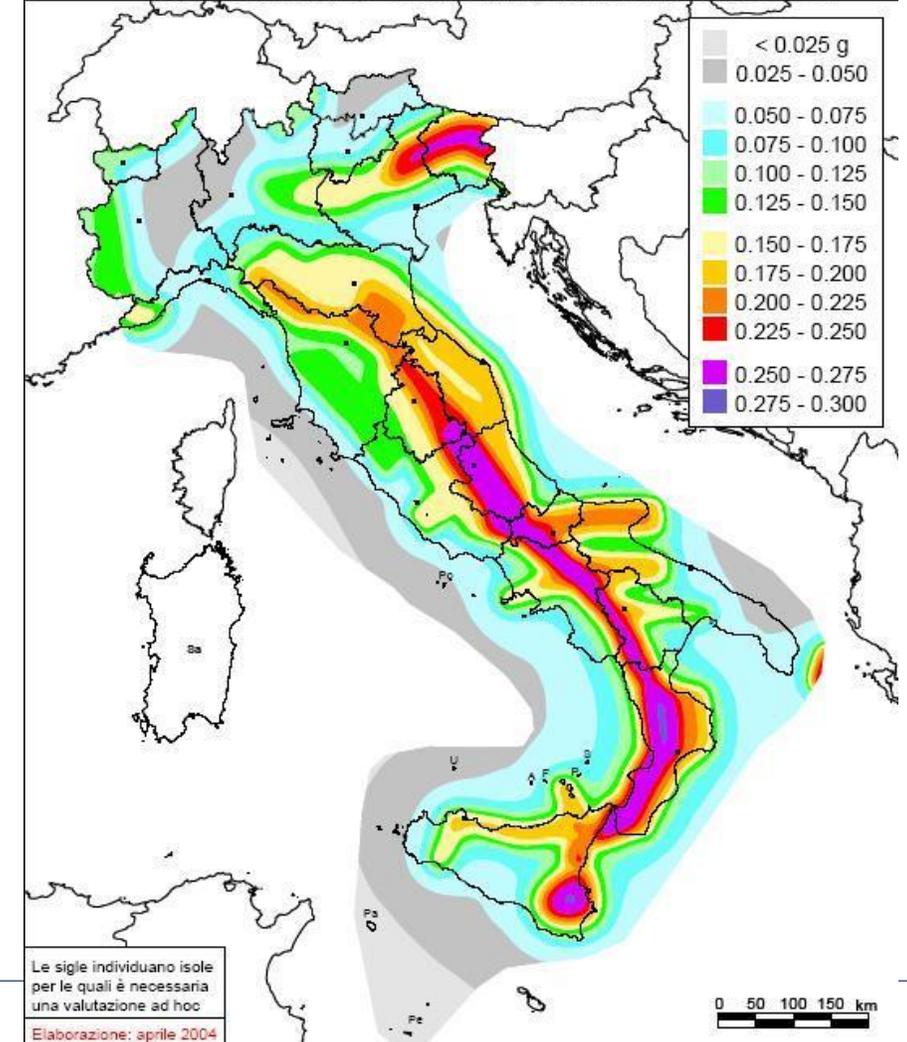
Lo scontro ed il movimento relativo tra le due placche sono all'origine della dinamica geologica della penisola, che si caratterizza per la presenza di **vulcanismo attivo** sul margine tirrenico e per la **diffusa sismicità** lungo la catena appenninica e davanti alla costa tirrenica della Calabria.



ISTITUTO NAZIONALE DI GEOFISICA E VULCANOLOGIA

Mapa di pericolosità sismica del territorio nazionale

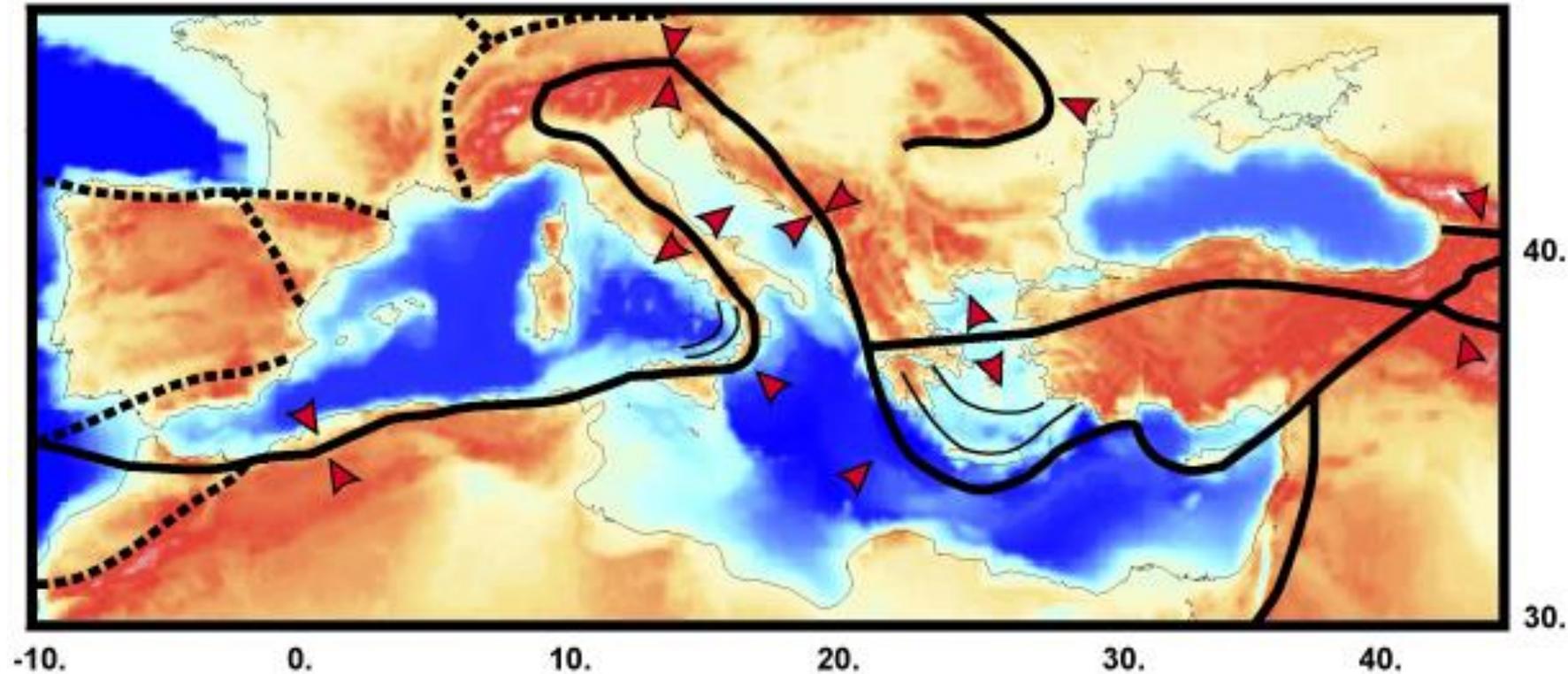
(riferimento: Ordinanza PCM del 28 aprile 2008 n.3519, All.1b)
espressa in termini di accelerazione massima del suolo
con probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni
riferita a suoli rigidi ($V_{s20} > 800$ m/s; cat.A, punto 3.2.1 del D.M. 14.09.2005)



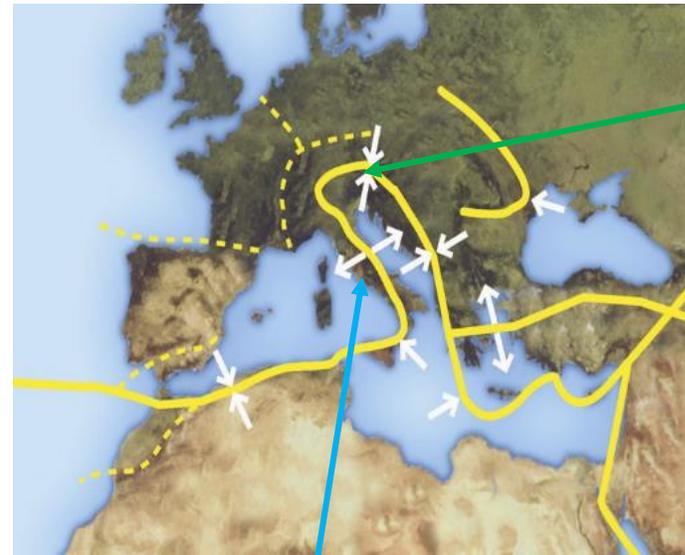
Tettonica delle placche: il territorio italiano

La **collisione** tra le due placche litosferiche è di tipo **convergente** ed ha determinato il sollevamento delle catene montuose delle Alpi e delle Dinaridi.

Nel corso di questo processo la litosfera si deforma accumulando energia elastica nelle rocce, che viene liberata istantaneamente con la sua fratturazione ed i terremoti.



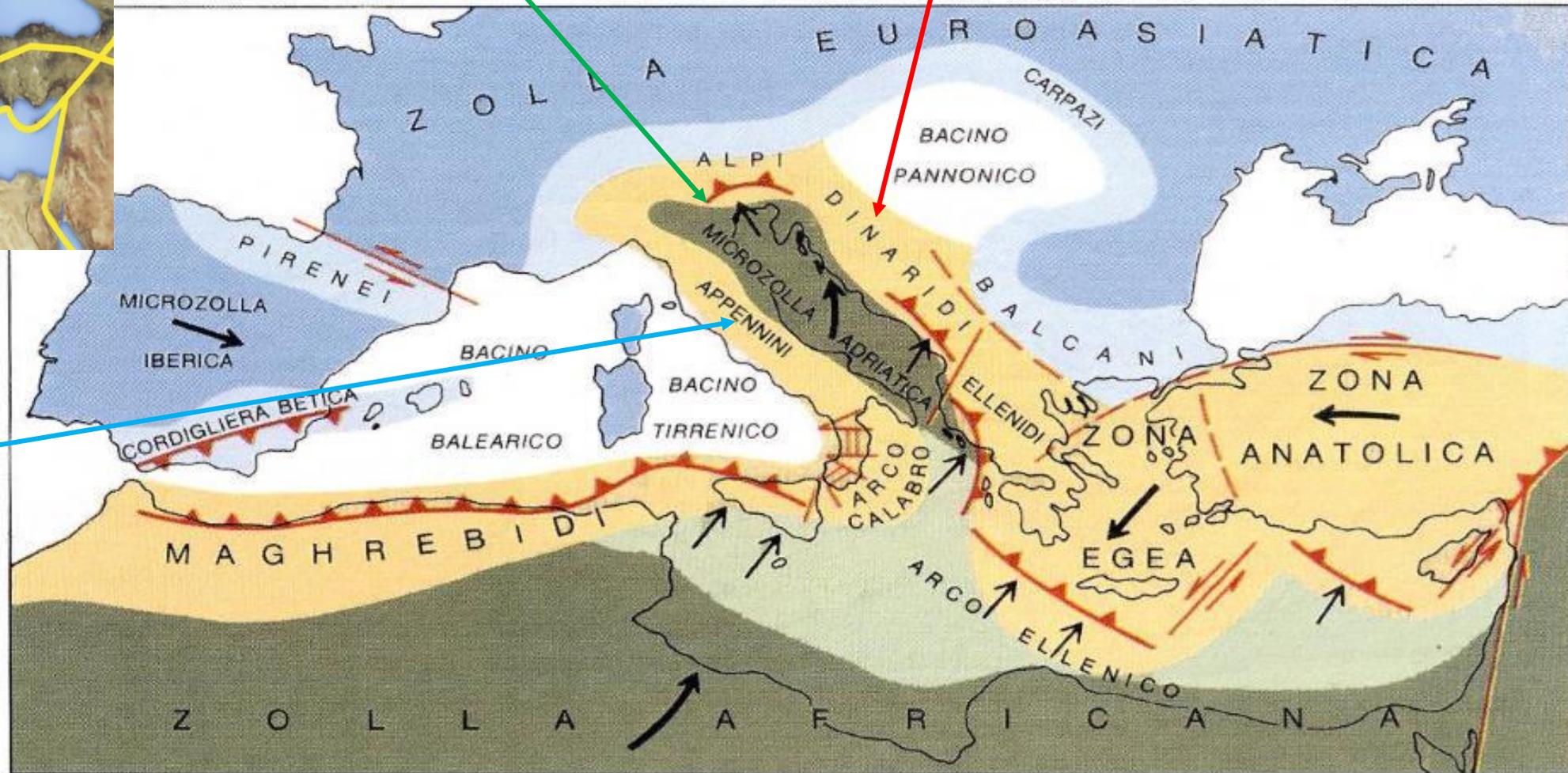
Tettonica delle placche: il territorio italiano



Alpi: zona compressiva
(Terremoto del Friuli del 1976)

Dinaridi: zona compressiva con
faglie trascorrenti (Terremoto
dell'Idrija del 1511)

Appennini:
zona distensiva
(terremoto
dell'Aquila del
2009 e del
Centro Italia del
2016)



Tettonica delle placche: il territorio italiano

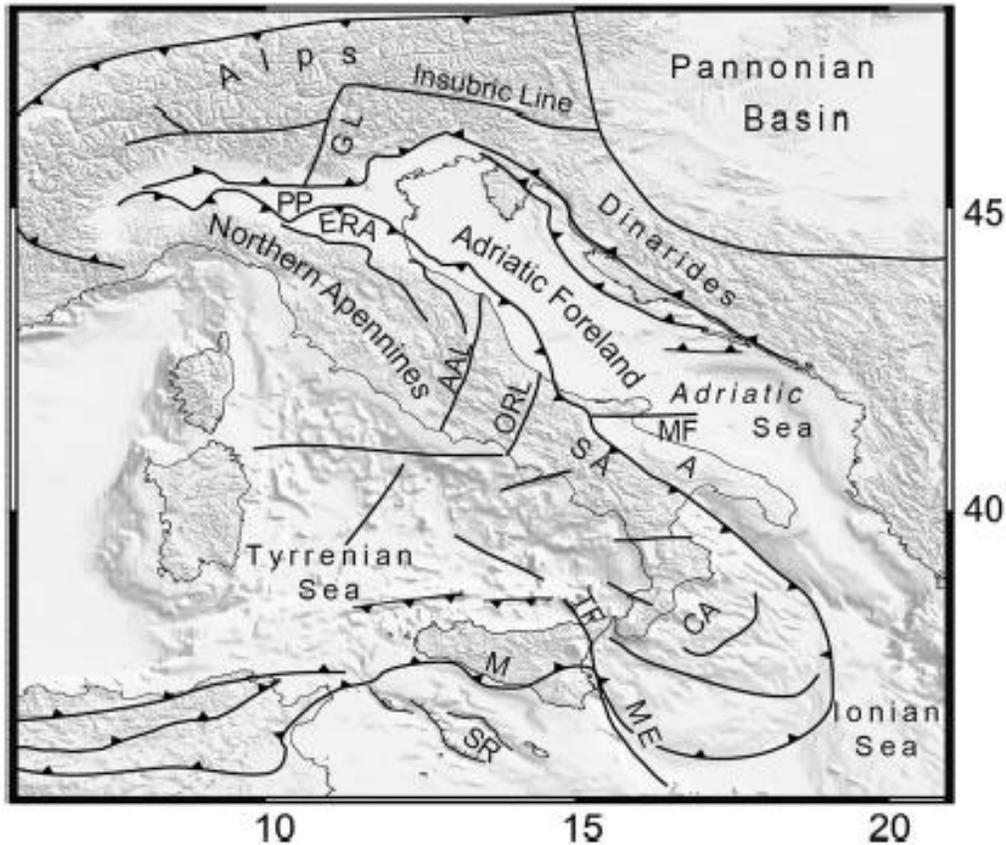


Fig. 8 Map of main tectonic lineaments in the Alpine Mediterranean area. Thrusts faults are shown with *lines* and *hanging wall triangles*. Major undifferentiated faults are shown with simple *lines*. A Apulia, AAL Ancona-Anzio Line, CA Calabrian Arc, ERA Emilia Romagna Arc, GL Giudicarie Line, M Maghrebides, ME Malta Escarpment, MF Mattinata Fault, ORL Ortona-Roccamonfina Line, PP Po Plain, SA Southern Apennines, SR Sicilian Rift, TF Tindari Fault

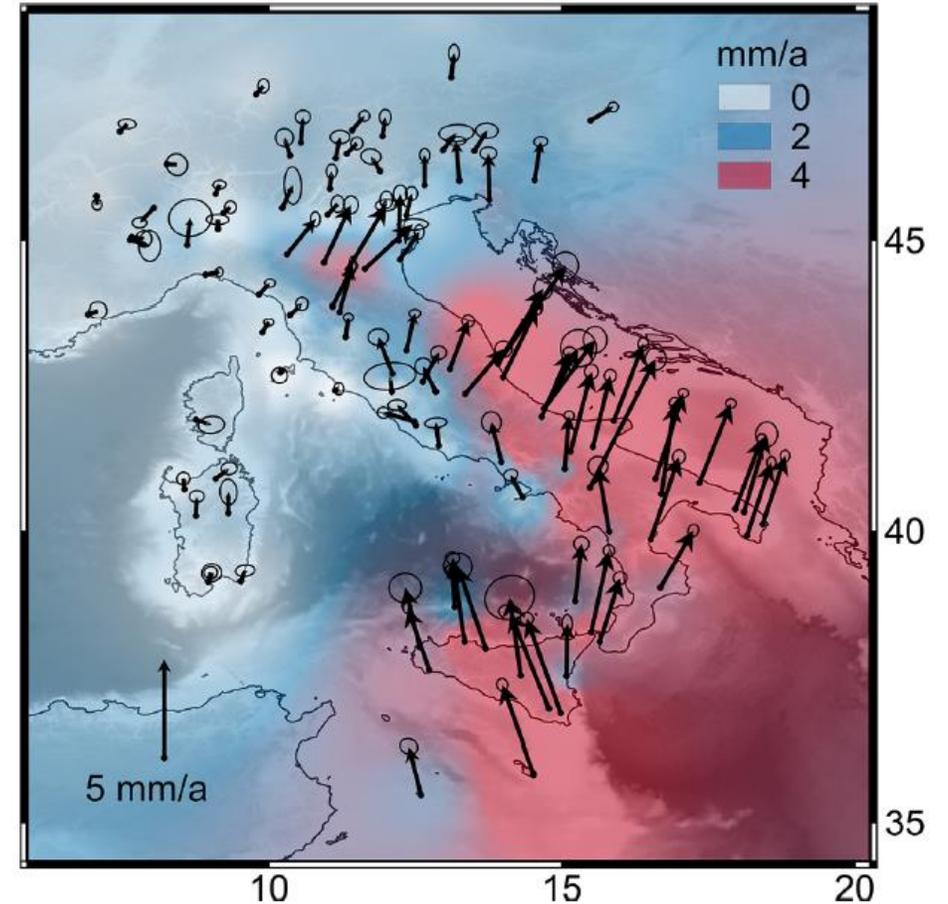
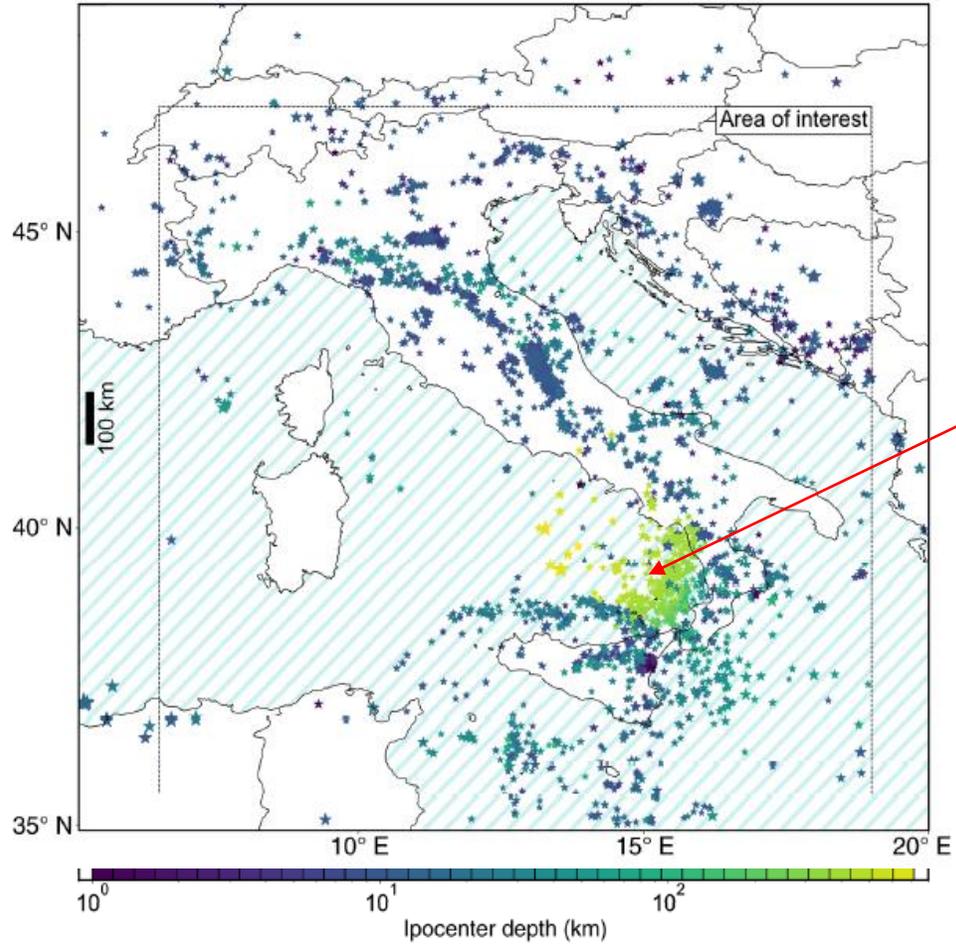
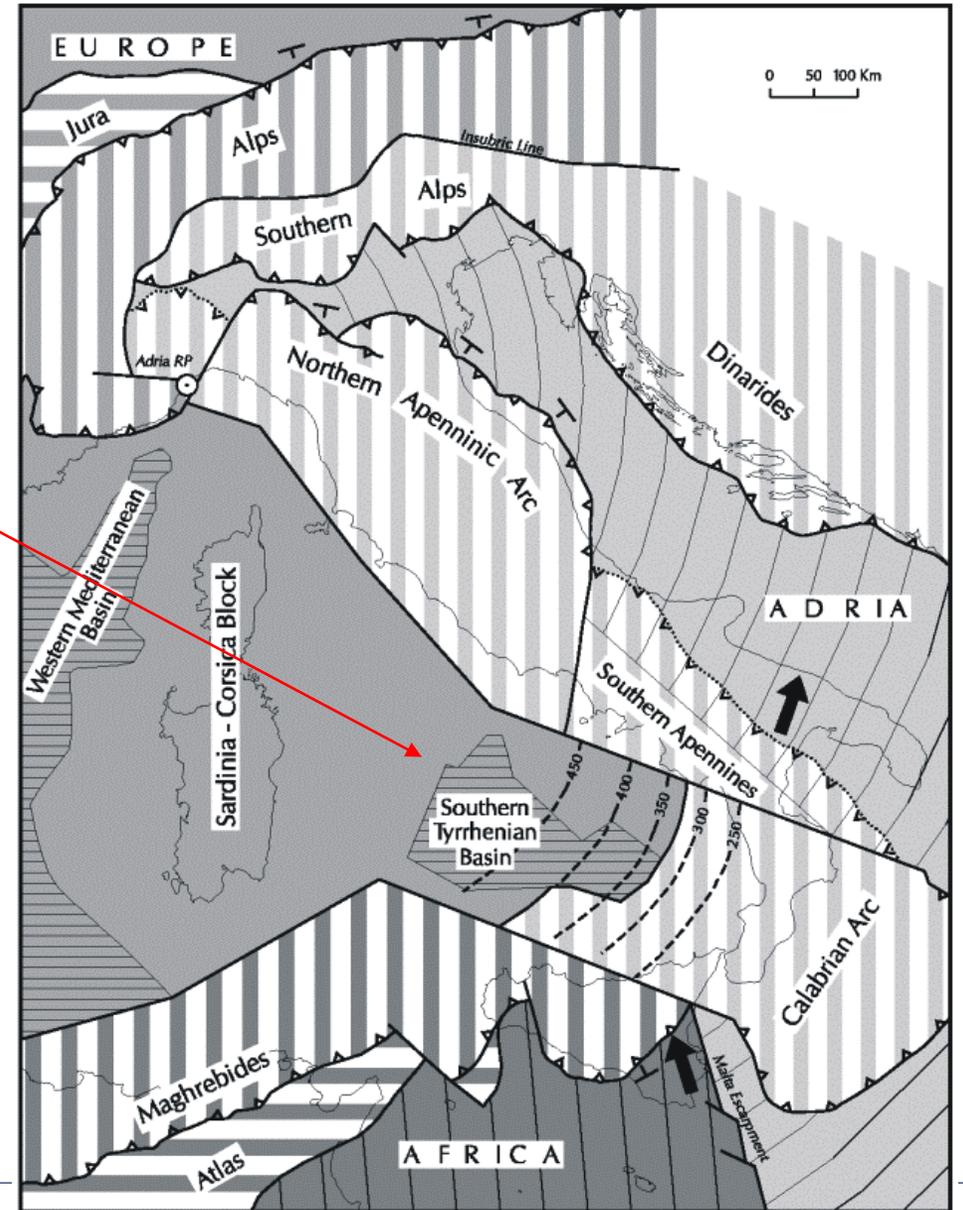


Fig. 3 Intra-plate horizontal velocities and error ellipses of 95 % confidence level in the Eurasian reference frame. Interpolated horizontal velocity field is displayed by a graduated color scale. *White* represents stable part, *blue* 2 mm/a and *red* up to 4 mm/a

Tettonica delle placche: il territorio italiano

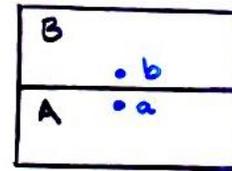
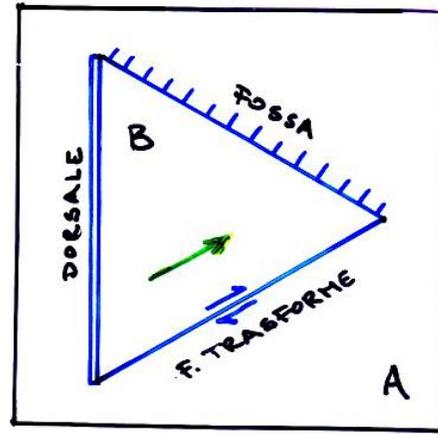
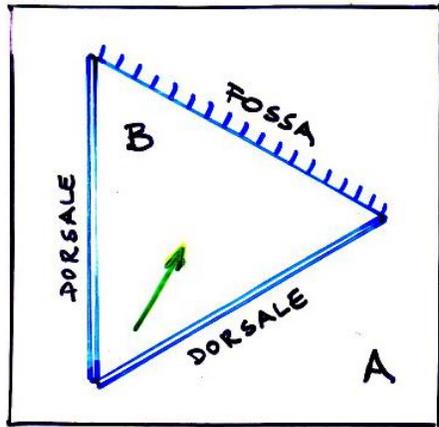
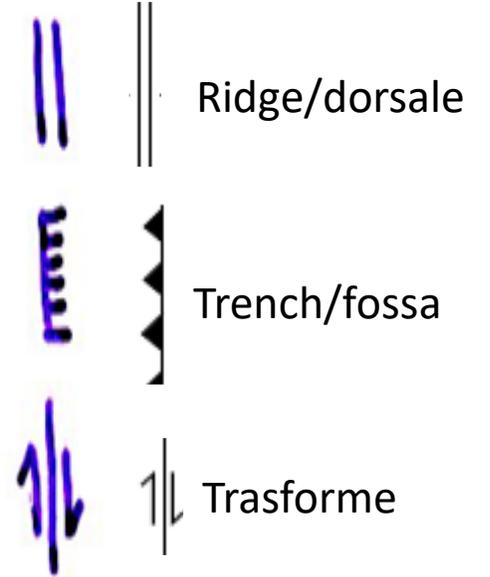
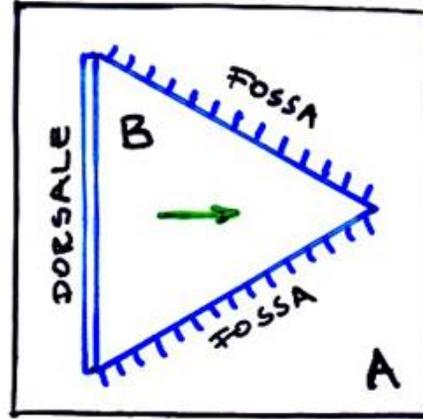
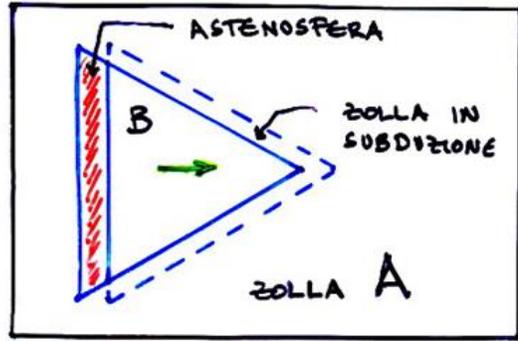
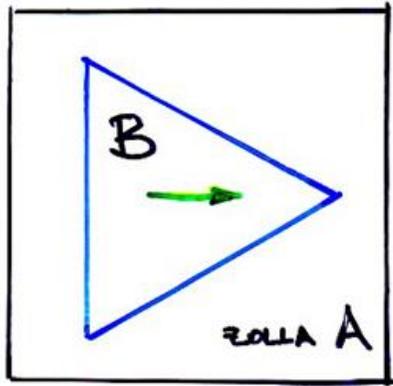


Arco calabro: Zona in subduzione caratterizzata da terremoti più profondi

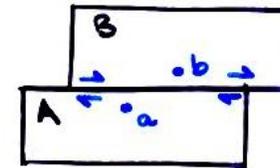


Tettonica delle placche:
calcolo dei movimenti reciproci delle placche
e diagrammi di velocità

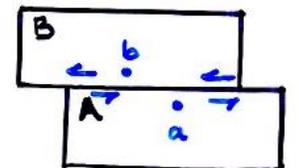
Tettonica delle placche: movimenti reciproci



Posizione iniziale



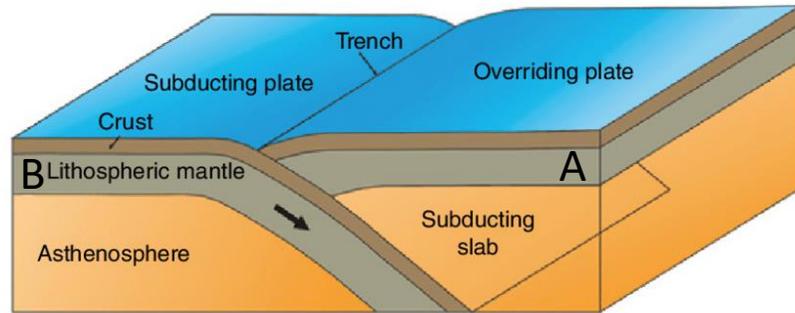
Trasforme destrorsa



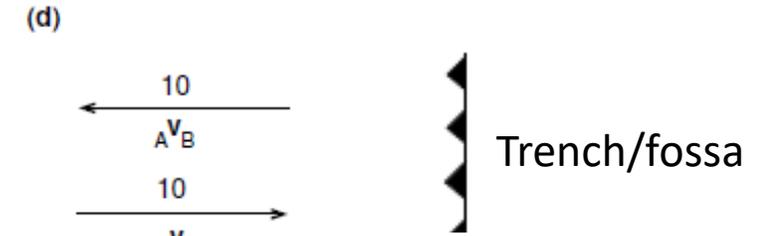
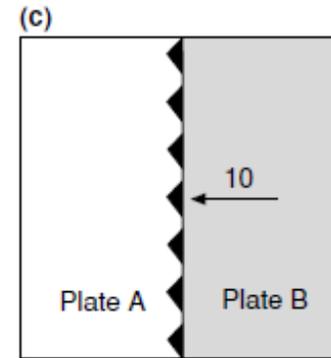
Trasforme sinistrorsa

Tettonica delle placche: movimenti reciproci – Terra piatta

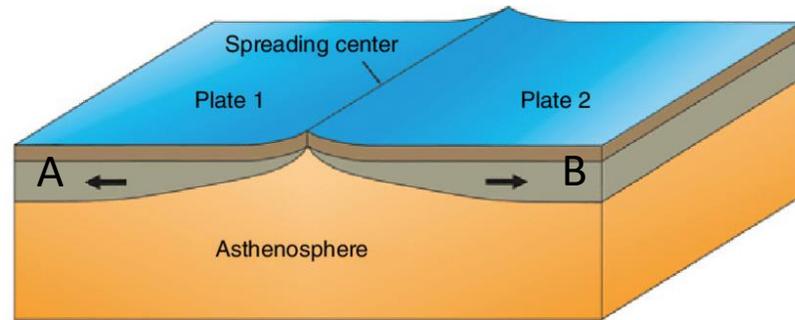
Convergent plate boundary: subduction zone



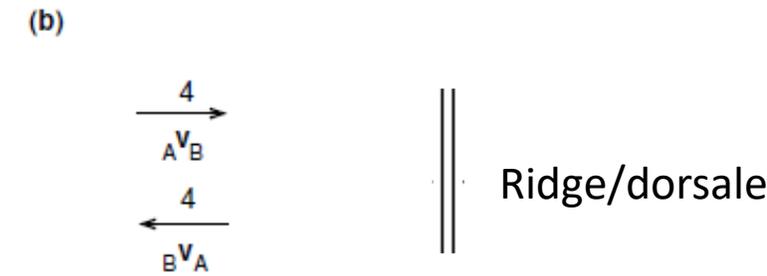
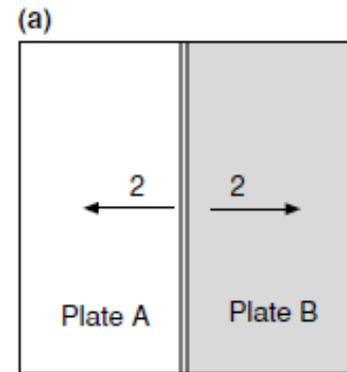
Margini convergenti



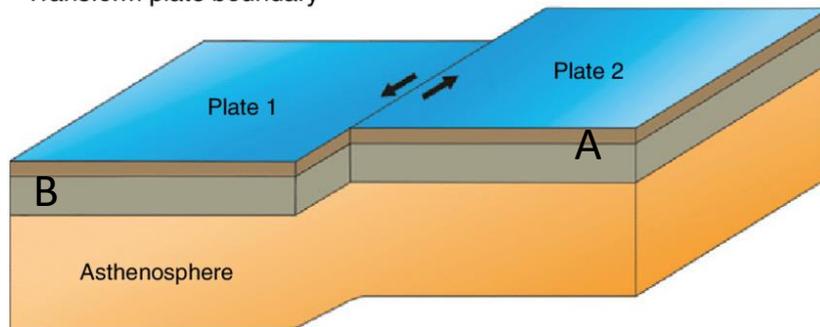
Divergent plate boundary



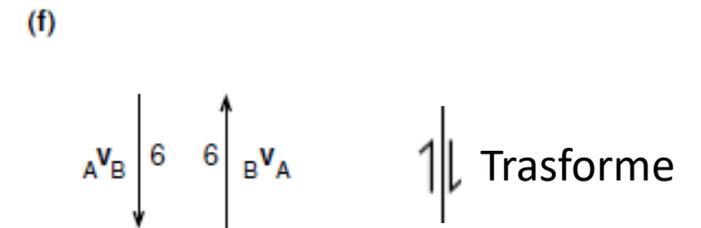
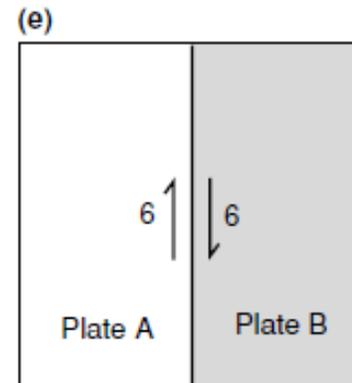
Margini divergenti



Transform plate boundary



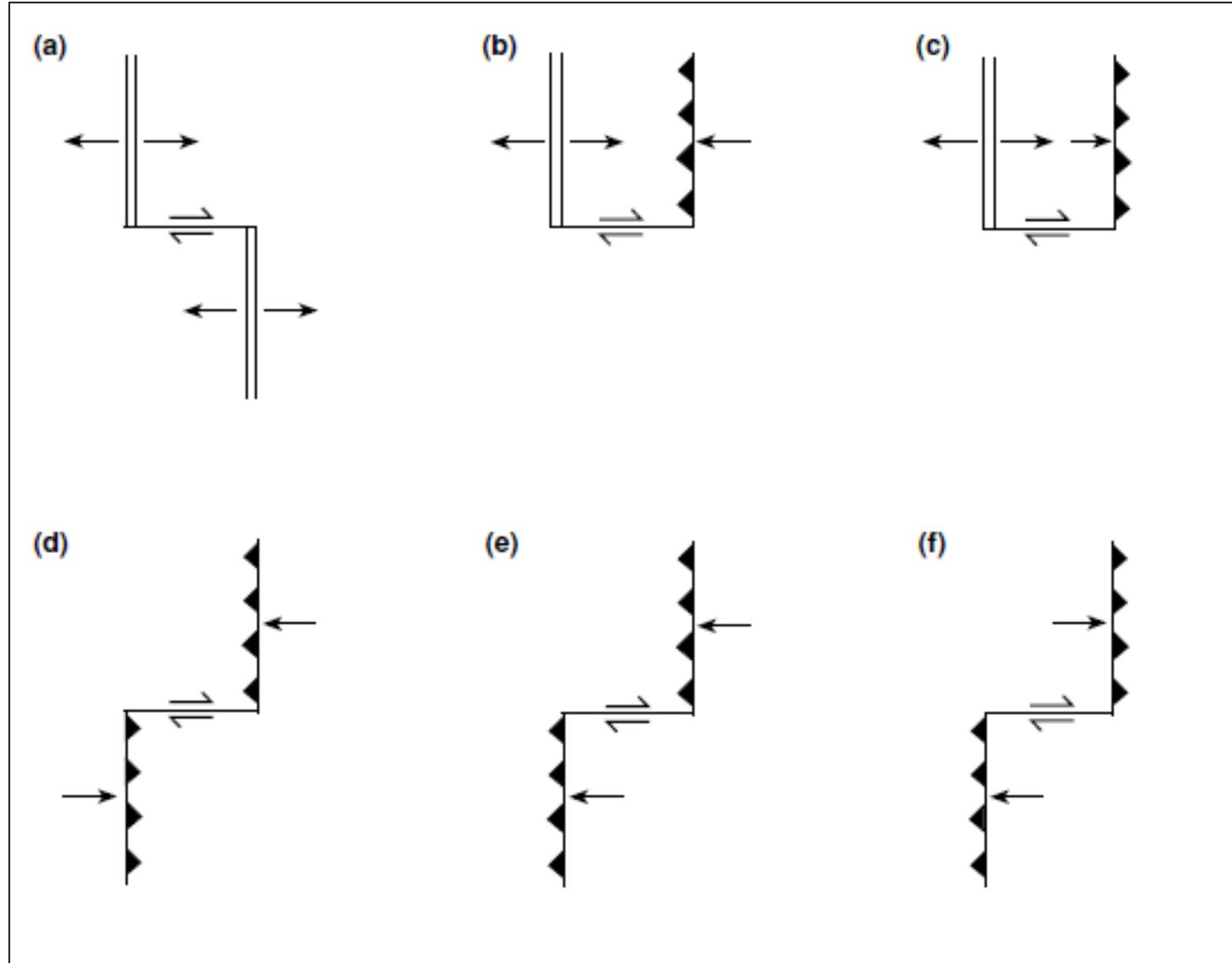
Margini conservativi



Tettonica delle placche: movimenti reciproci

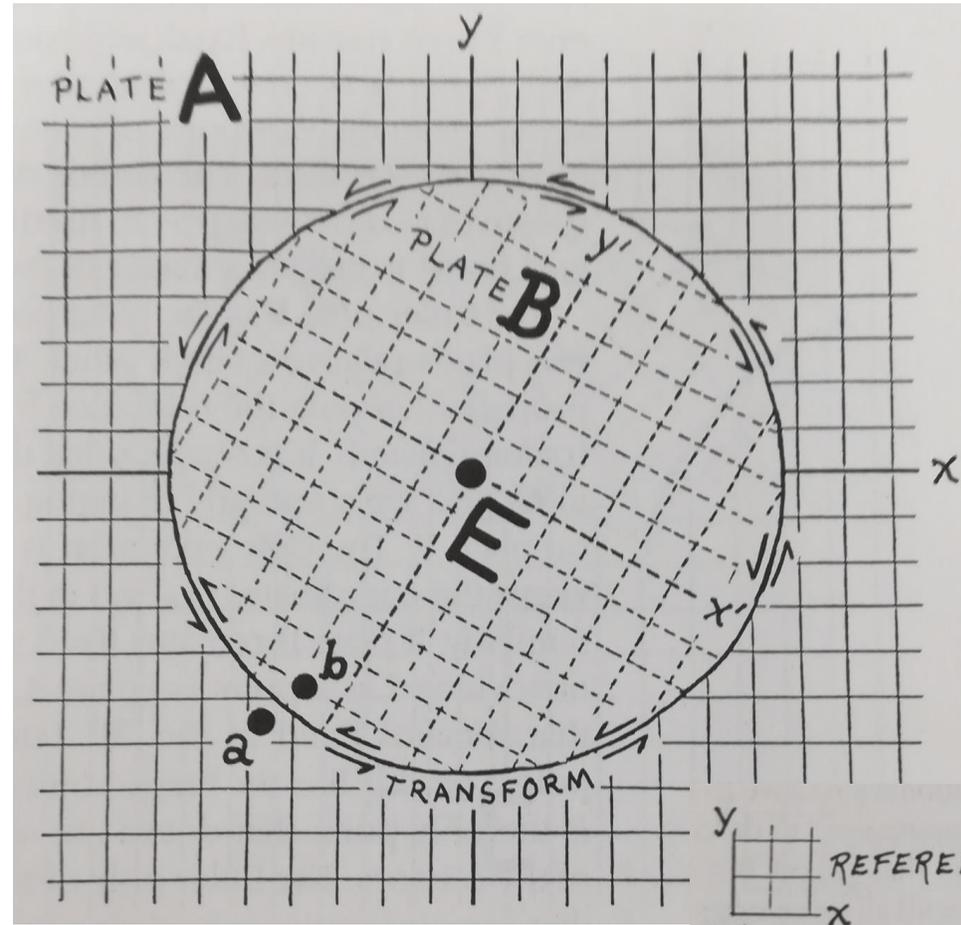
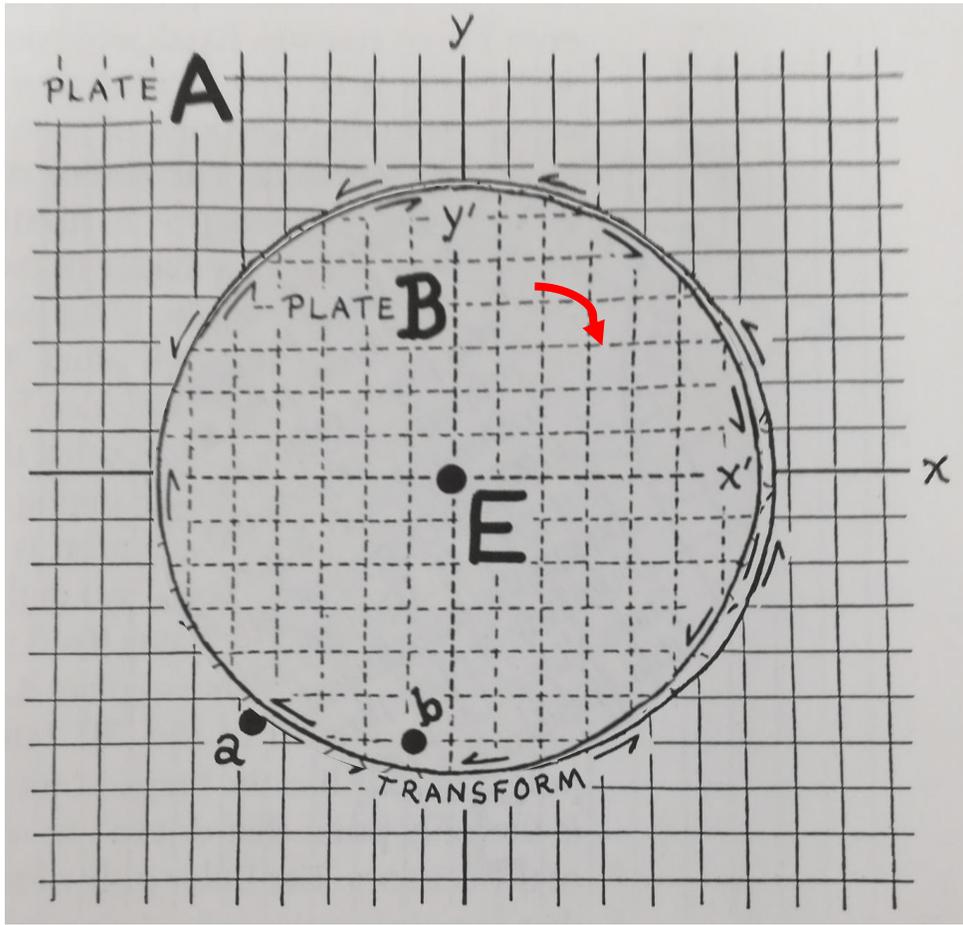
Le faglie trasformi (margini trascorrenti) possono essere raggruppati in sei classi

Il tipo di gran lunga più comune di faglia trasformi è quello dorsale-dorsale (ridge-ridge, tipologia (a) a lato)



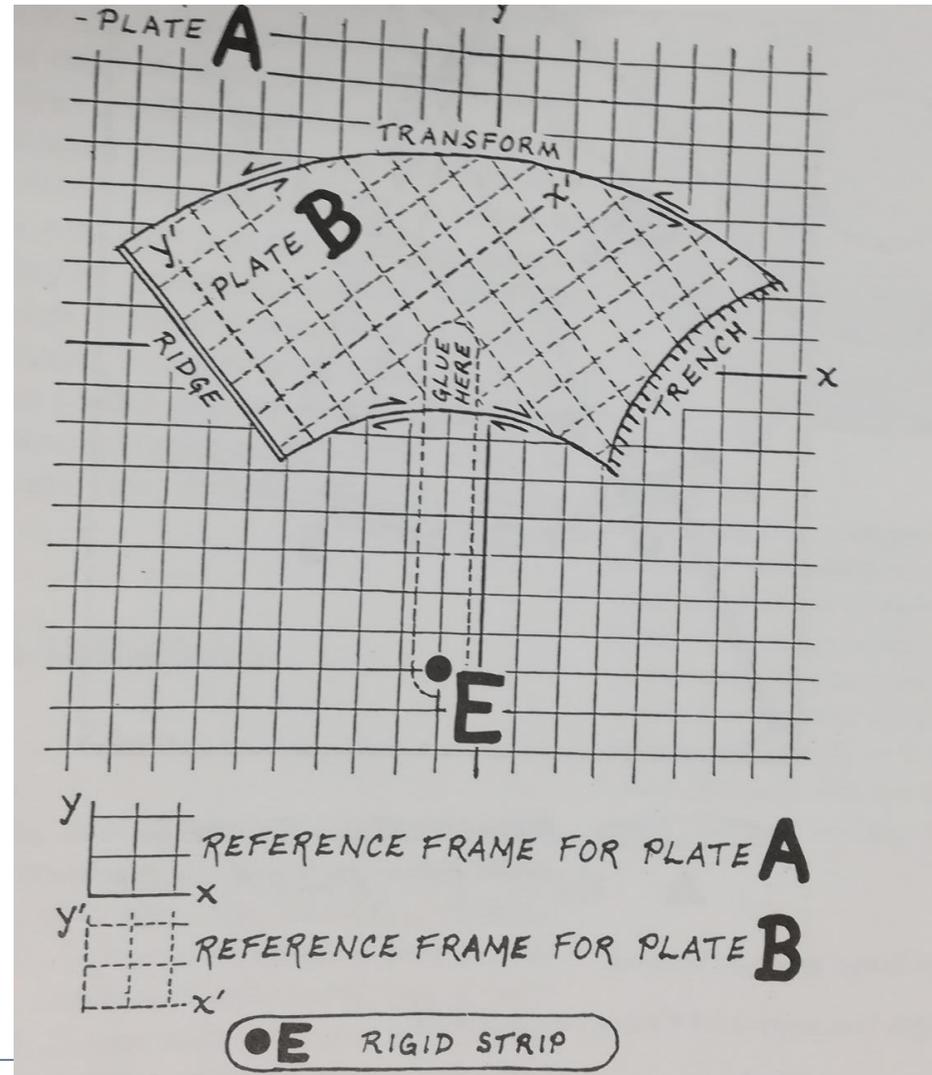
Tettonica delle placche: movimenti reciproci

Cosa succede realmente sulla Terra che è una sfera?



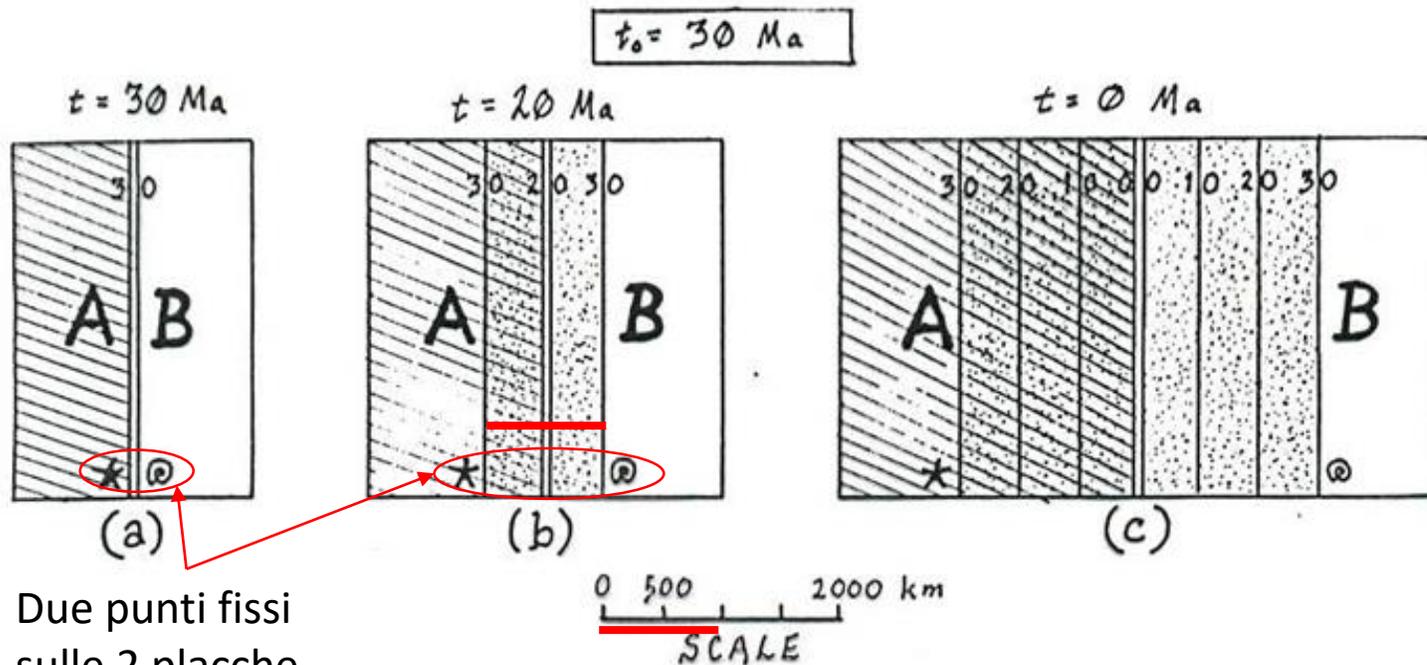
Tettonica delle placche: movimenti reciproci

Cosa succede realmente sulla Terra che è una sfera?



Tettonica delle placche: movimenti reciproci

Dall'osservazione delle **isocrone** si può dedurre la velocità di espansione del fondale oceanico



Due punti fissi sulle 2 placche

Nell'esempio a lato (placche che si allontanano in direzione ortogonale alla dorsale) isocrone di 10 Ma (Δt , i due punti fissi) sono separate da 1000 km (Δx , linea rossa), per cui la velocità di espansione (moto reciproco di allontanamento) è pari a:

Velocità di B (V_B) rispetto ad A vale la relazione

$${}^A V_B = - {}^B V_A$$

$${}^A V_B = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{1000 \text{ km}}{10 \text{ Ma}} = \frac{10^6 \text{ m}}{10 \cdot 10^6 \text{ a}} = 100 \text{ mm/a}$$

Tettonica delle placche: movimenti reciproci

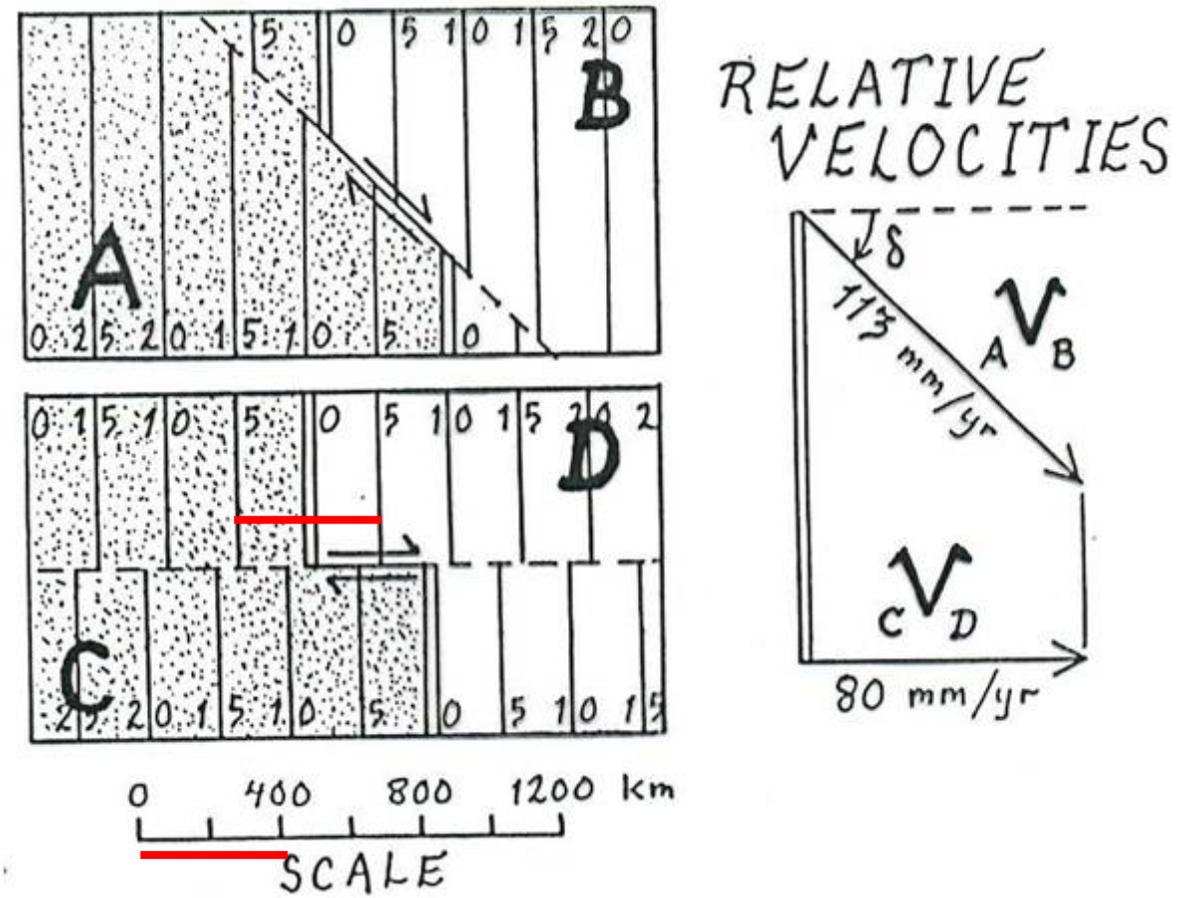
Dall'osservazione delle **isocrone** si può dedurre la velocità di espansione del fondale oceanico

Nell'esempio a lato la dorsale è interrotta da una faglia trascorrente. Per le placche C e D isocrone di 5 Ma (Δt) sono separate da 400 km (Δx), per cui la velocità è pari a:

$${}_C v_D = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{400 \text{ km}}{5 \text{ Ma}} = 80 \text{ mm/a}$$

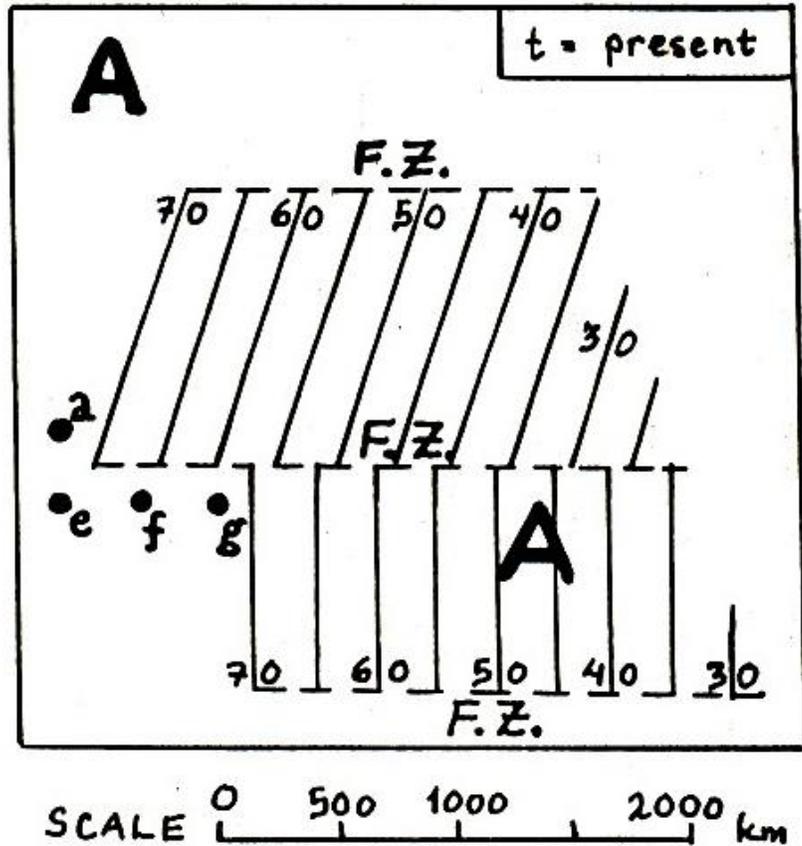
Per le placche A e B, invece dobbiamo introdurre l'angolo di inclinazione della faglia:

$${}_B v_A = \frac{v}{\cos \delta} = 113 \text{ mm/a}$$

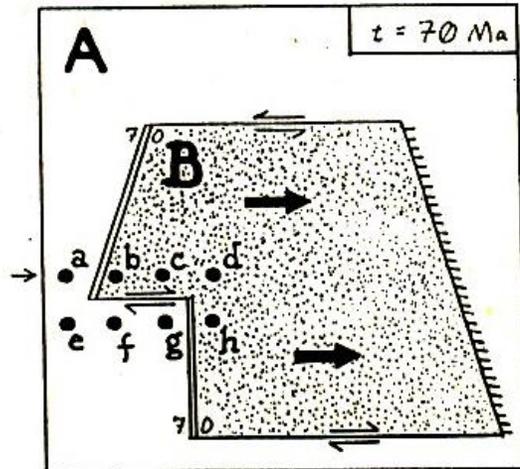
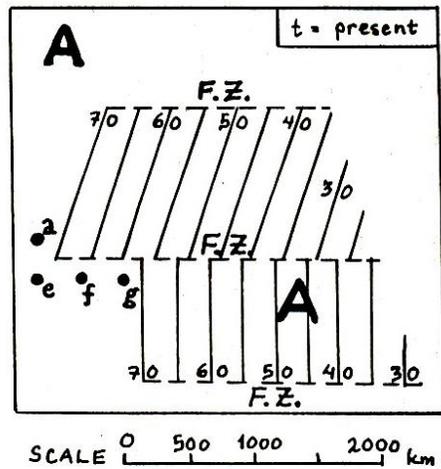


Tettonica delle placche: movimenti reciproci

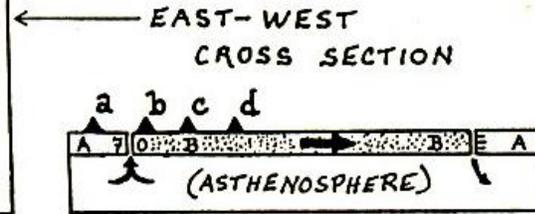
Come si è creato il pattern a lato?



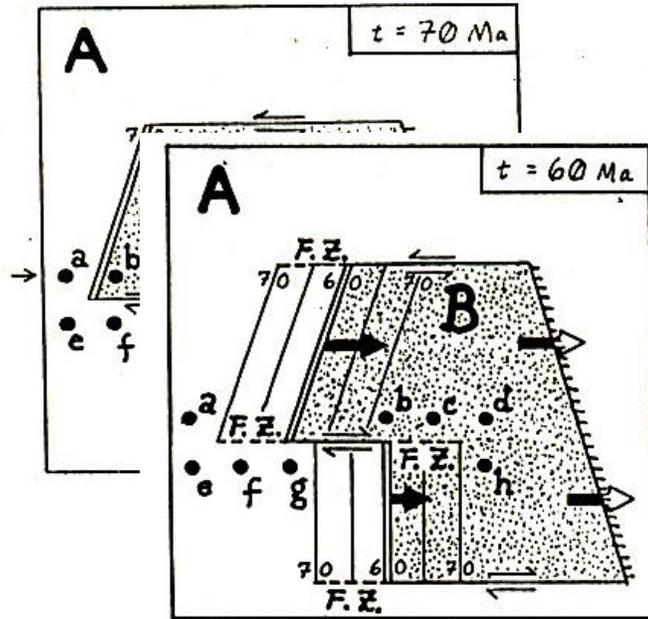
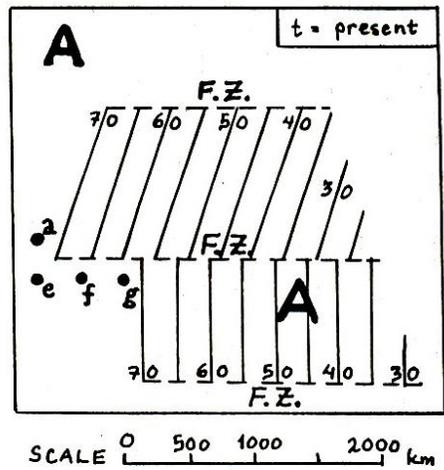
Tettonica delle placche: movimenti reciproci



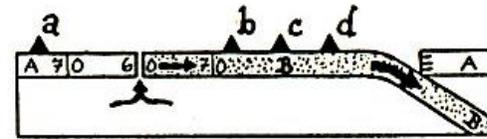
Come si è creato il pattern a lato?



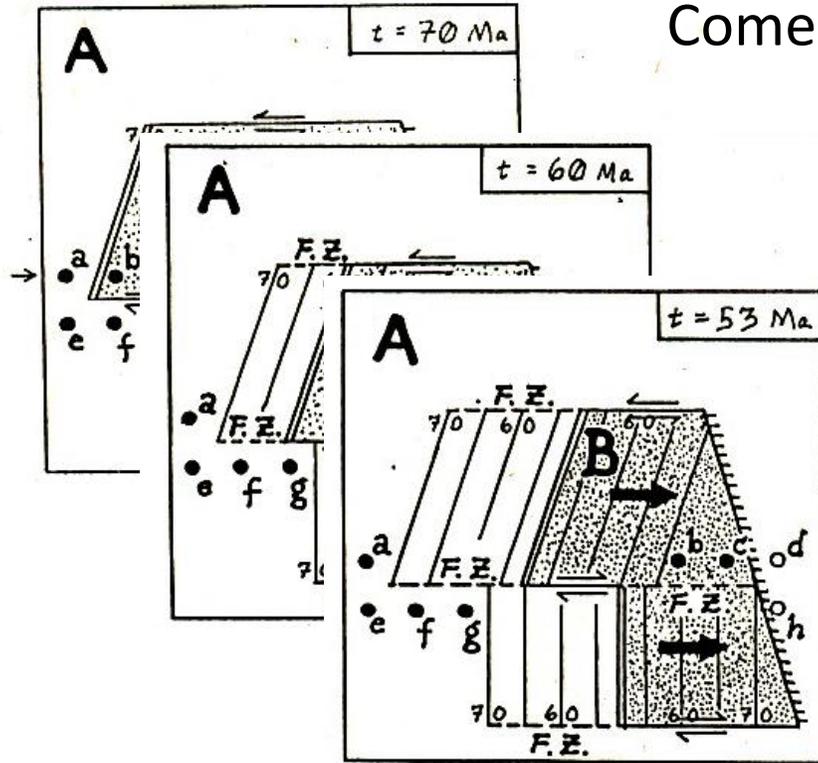
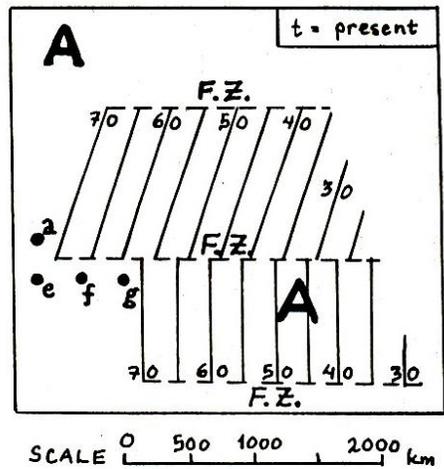
Tettonica delle placche: movimenti reciproci



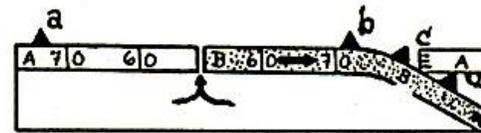
Come si è creato il pattern a lato?



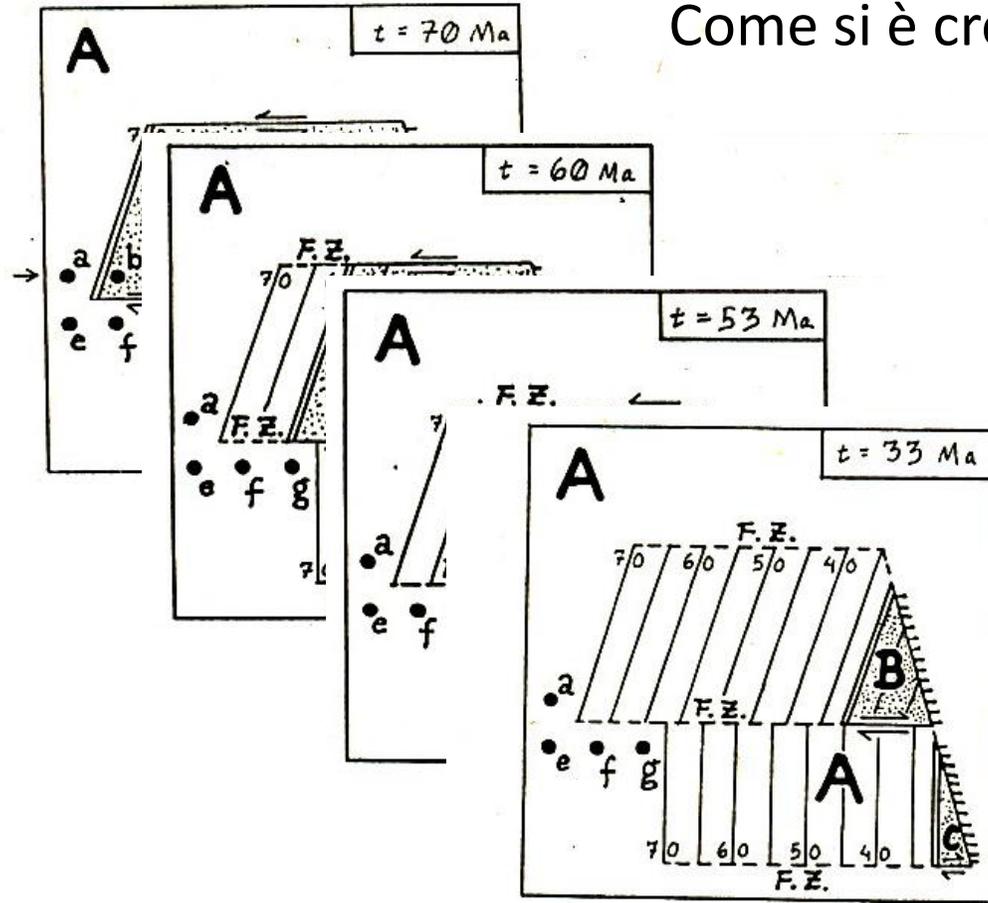
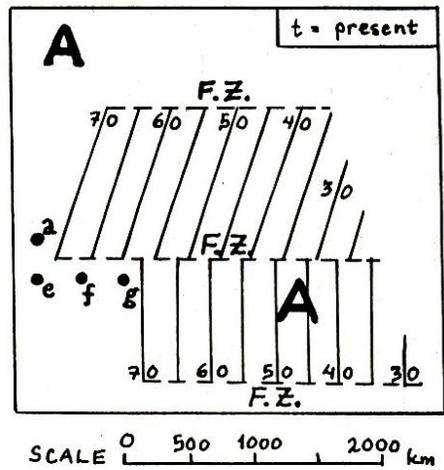
Tettonica delle placche: movimenti reciproci



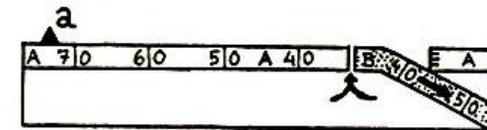
Come si è creato il pattern a lato?



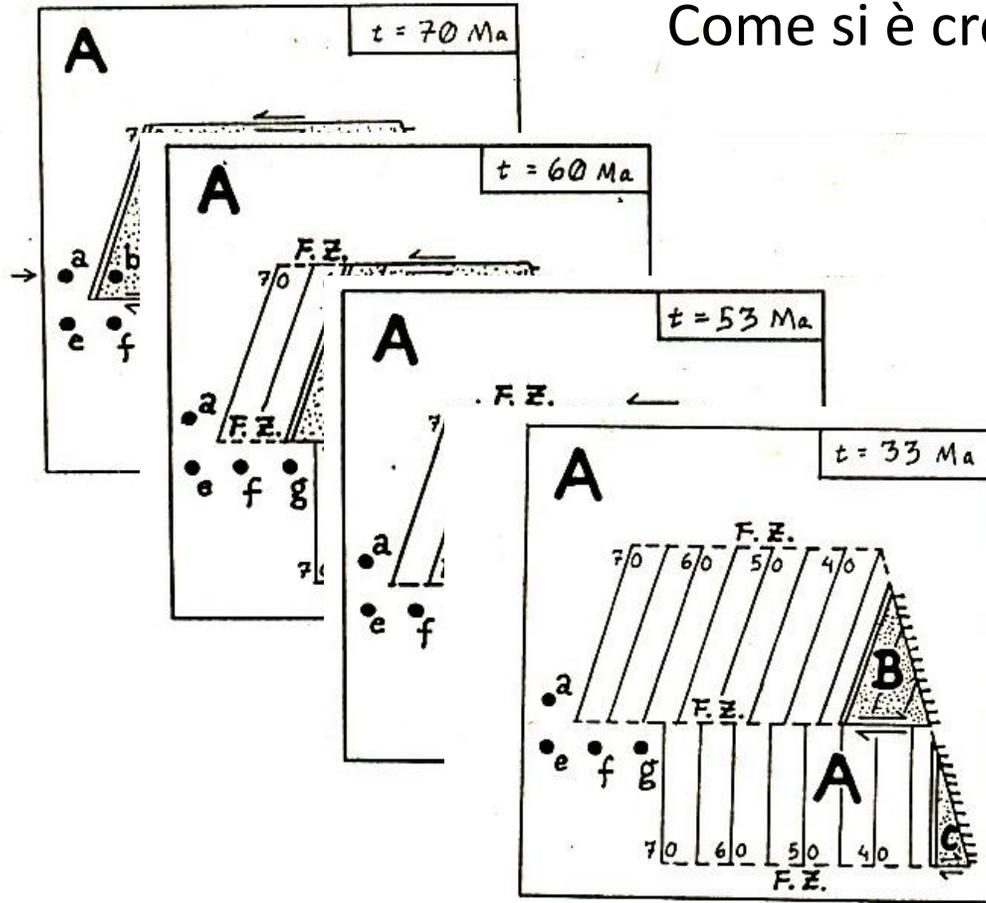
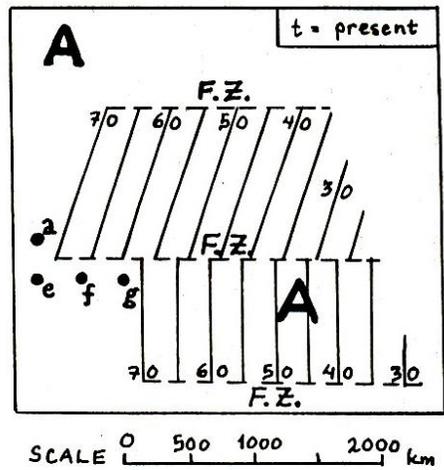
Tettonica delle placche: movimenti reciproci



Come si è creato il pattern a lato?

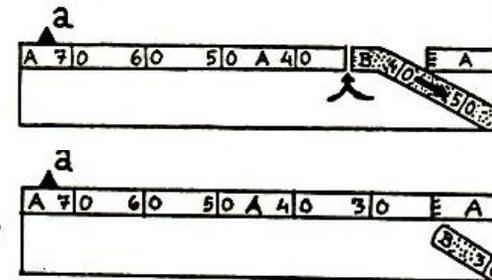


Tettonica delle placche: movimenti reciproci



Come si è creato il pattern a lato?

$t = 19 \text{ Ma}$
to present

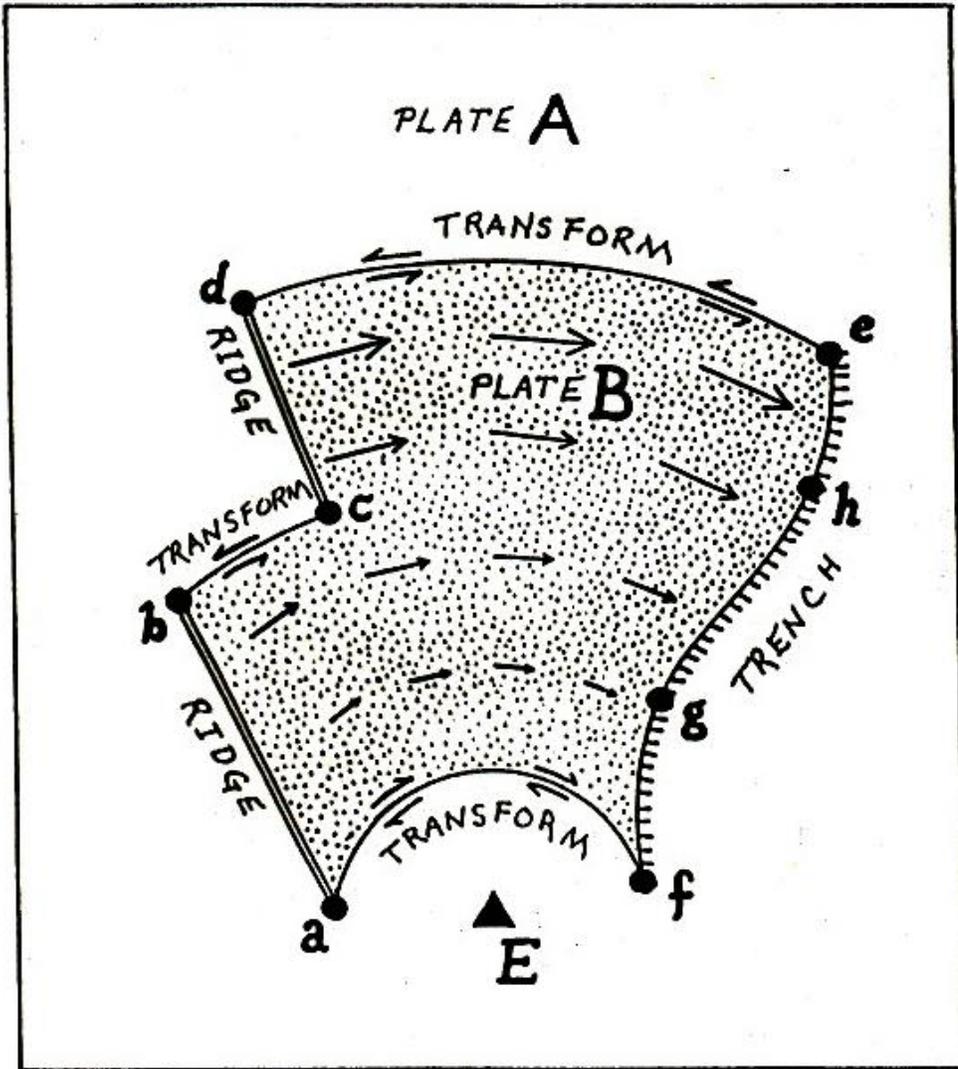


Tettonica delle placche: movimenti reciproci

Campo di velocità più realistico:

Faglie trasformi e zone di subduzione non sono rette

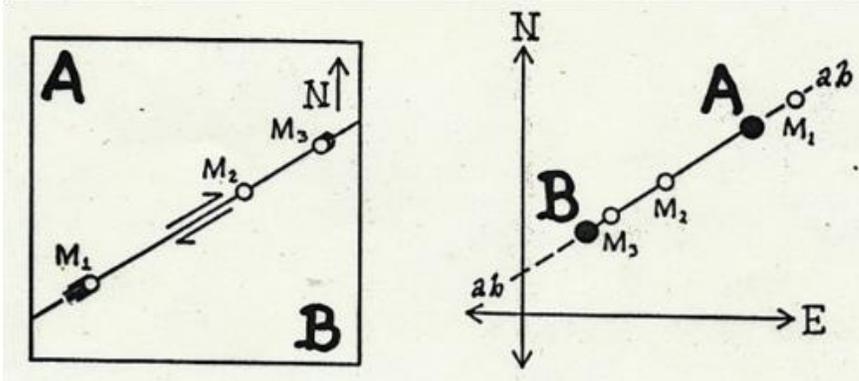
Le dorsali sono le uniche che restano rette



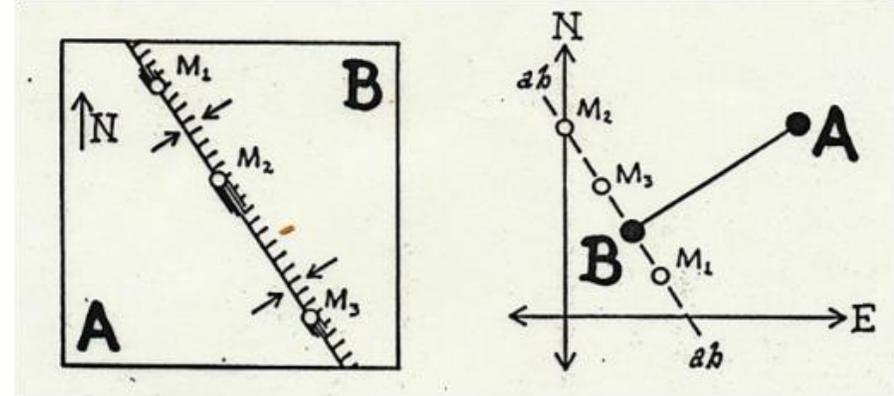
Tettonica delle placche: movimenti reciproci

Linee di velocità: insieme di punti alla stessa velocità

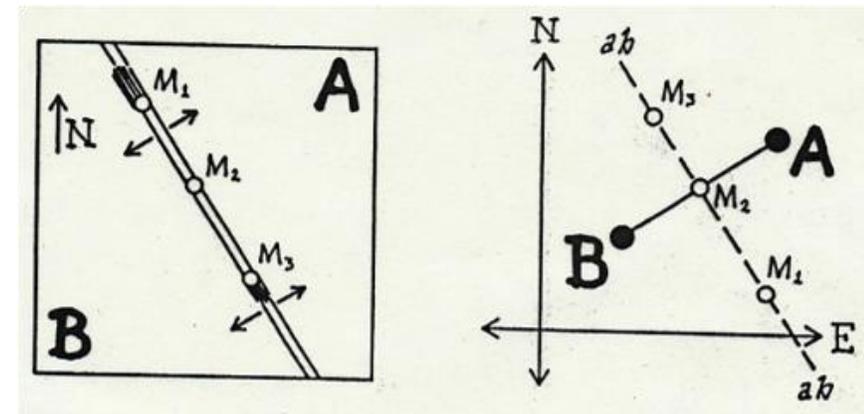
Margine in **subduzione**: linea di velocità parallela al trench e si muove con la placca che sovrascorre (cioè **tracciata sul margine che sovrascorre**)



Dorsale/ridge: la linea di velocità è parallela alla dorsale/ridge. Se l'accrescimento è simmetrico, **passa per la metà del segmento che unisce AB** (che rappresenta la velocità relativa delle due placche) ed è ad esso perpendicolare

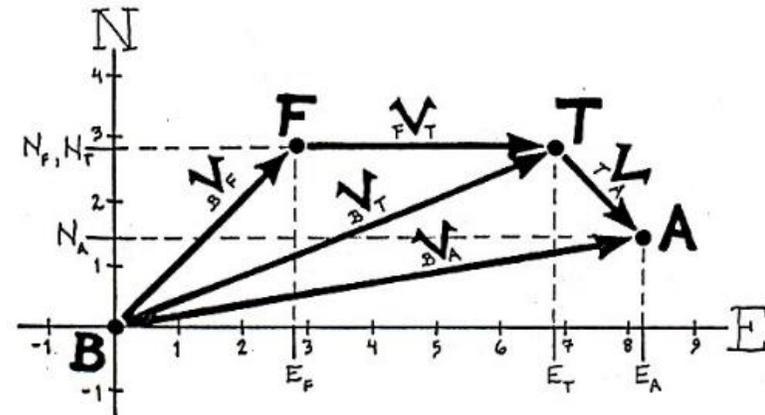
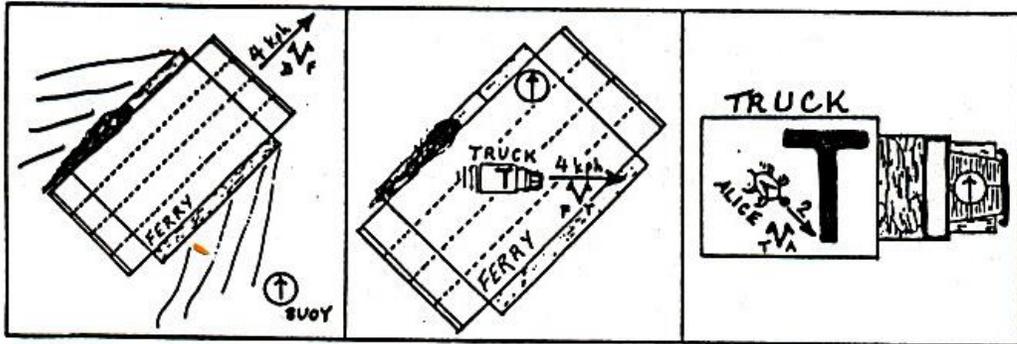
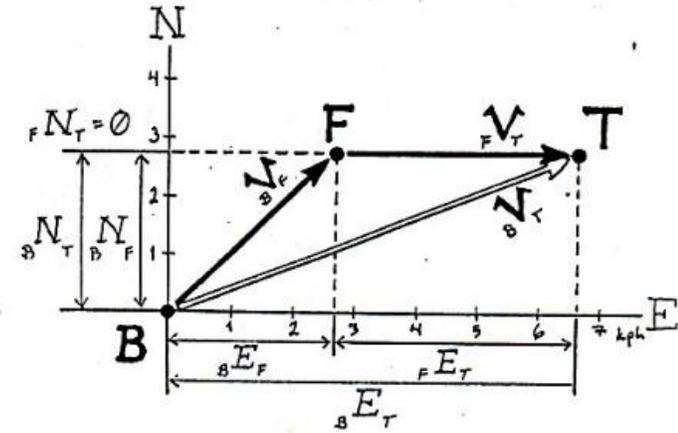
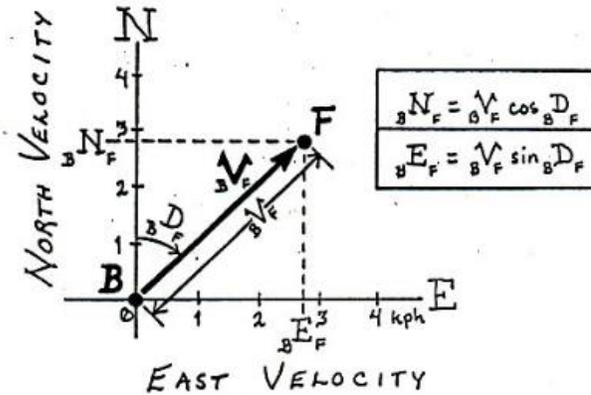
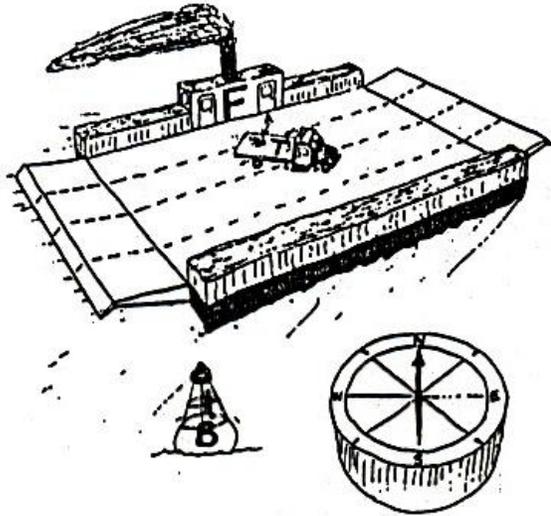


Margine **trascorrente**: linea di velocità parallela alla faglia e passa sia per A che per B



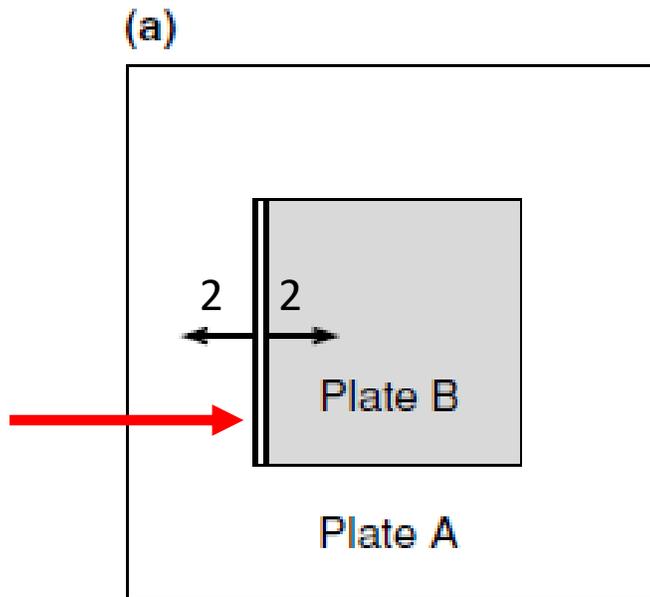
Tettonica delle placche: movimenti reciproci

Somma di vettori velocità in due dimensioni



Tettonica delle placche: movimenti reciproci

Il margine occidentale della placca B è una dorsale che si muove alla velocità dimezzata di 2 cm/yr



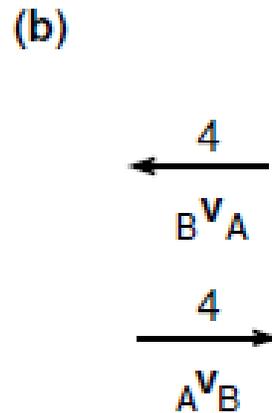
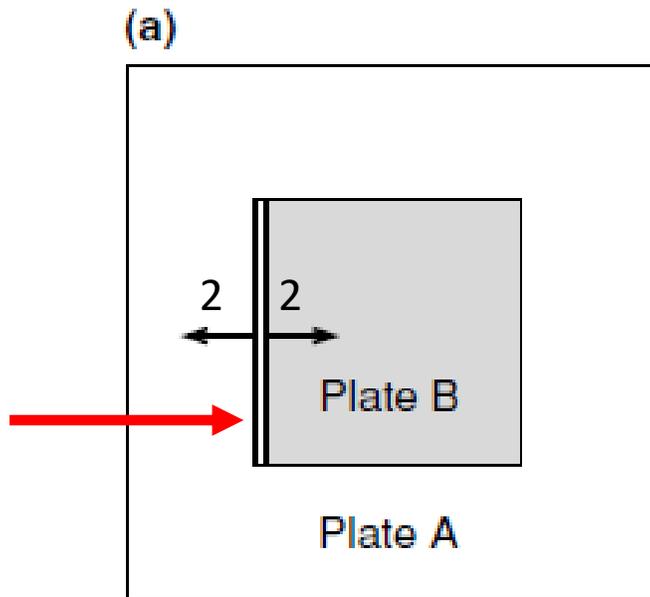
Margine costruttivo

Quale è la velocità relativa ${}_A V_B$?

Cosa accade agli altri tre margini?

Tettonica delle placche: movimenti reciproci

Il margine occidentale della placca B è una dorsale che si muove alla velocità dimezzata di 2 cm/yr

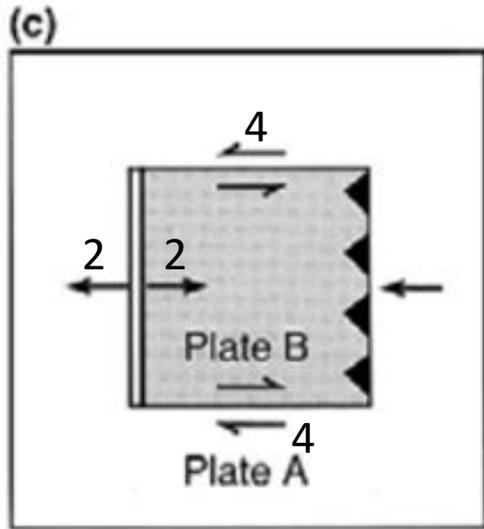


Margine costruttivo

Quale è la velocità relativa ${}_A V_B$?

Cosa accade agli altri tre margini?

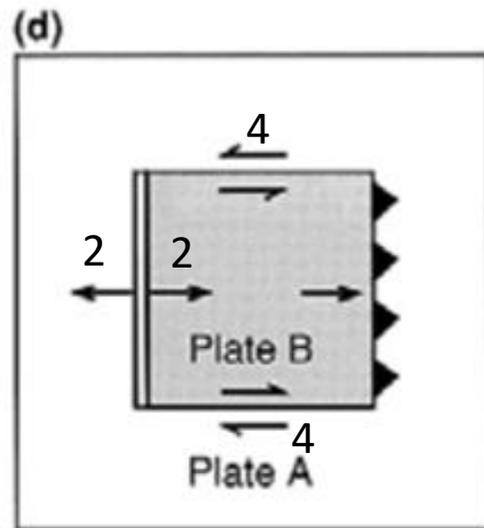
Tettonica delle placche: movimenti reciproci



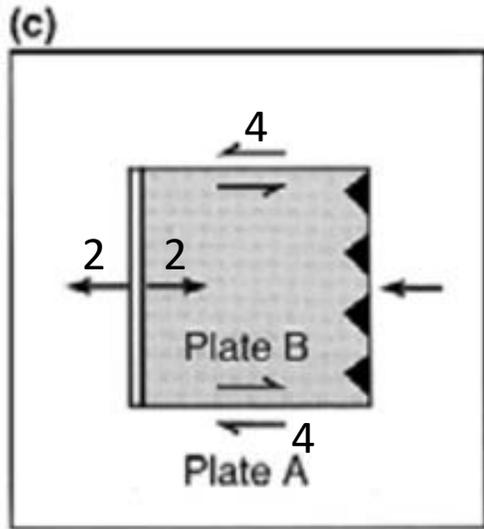
I **margini superiore ed inferiore** sono conservativi (trasformi) e si muovono ad una velocità di 4 cm/yr

Il quarto margine subduce in due possibili modi:
A sotto B o B sotto A.

Quali sono le velocità nei due casi? Cosa succede alle placche?



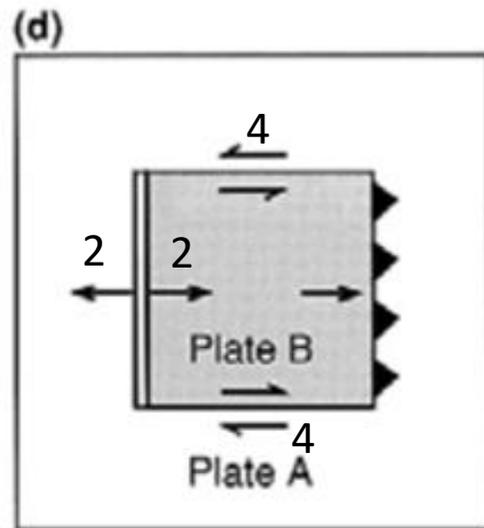
Tettonica delle placche: movimenti reciproci



I margini superiore ed inferiore sono conservativi (trasformi) e si muovono ad una velocità di 4 cm/yr

Il quarto margine subduce in due possibili modi:
A sotto B o B sotto A.

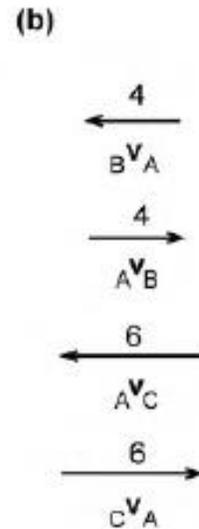
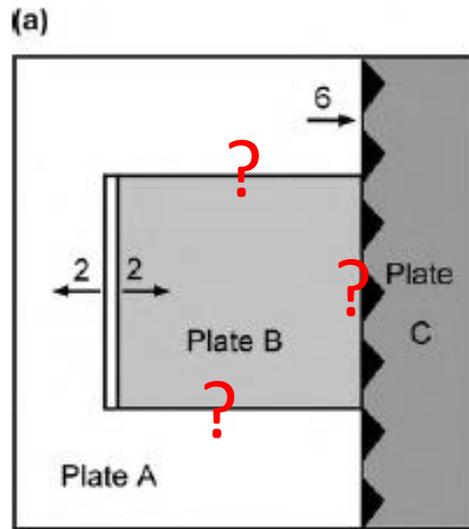
Quali sono le velocità nei due casi? Cosa succede alle placche?



Dal momento che V_B è uguale a 4 cm/yr, il margine orientale è una zona in subduzione.

La placca A subduce sotto la placca B che si accresce di 2 cm/yr, oppure la placca B subduce sotto la placca A e la placca B si consuma ad una velocità di 2 cm/yr

Tettonica delle placche: movimenti reciproci

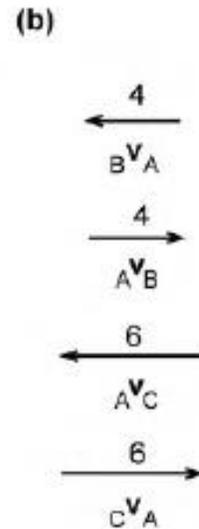
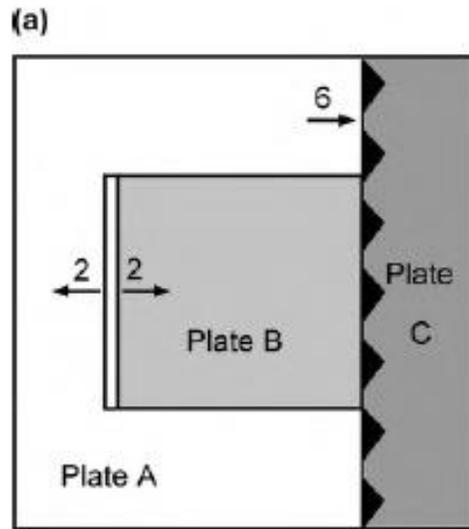


Le placche A e B si allontanano alla velocità dimezzata di 2 cm/yr

La placca A subduce sotto la C alla velocità di 6 cm/yr

Quale è la velocità relativa ${}_C v_B$? Cosa accade agli altri margini?

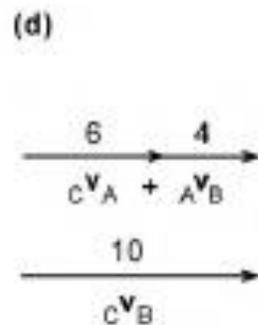
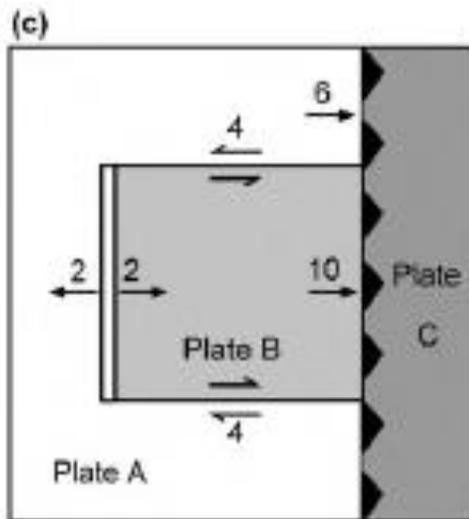
Tettonica delle placche: movimenti reciproci



Le placche A e B si allontanano alla velocità dimezzata di 2 cm/yr

La placca A subduce sotto la C alla velocità di 6 cm/yr

Quale è la velocità relativa ${}_C V_B$? Cosa accade agli altri margini?



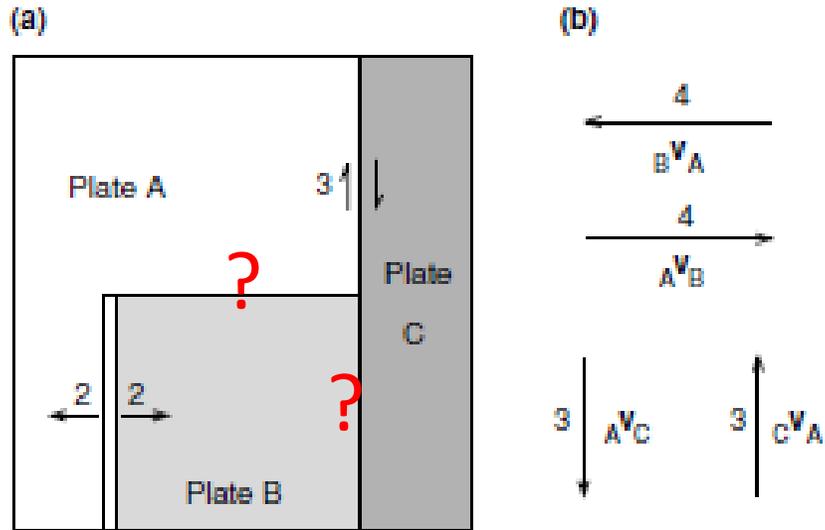
I **margini superiore e inferiore della placca B** sono trascorrenti (faglie trasformi) con velocità di 4 cm/yr.

Per il **margine est della placca B** si applica la somma vettoriale:

$${}_C V_B = {}_C V_A + {}_A V_B$$

Il margine est è quindi in subduzione con la placca C che sovrascorre sulla B ad una velocità di 10 cm/yr

Tettonica delle placche: movimenti reciproci

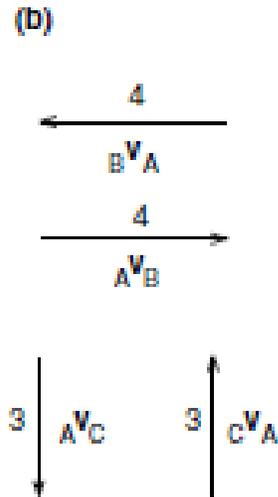
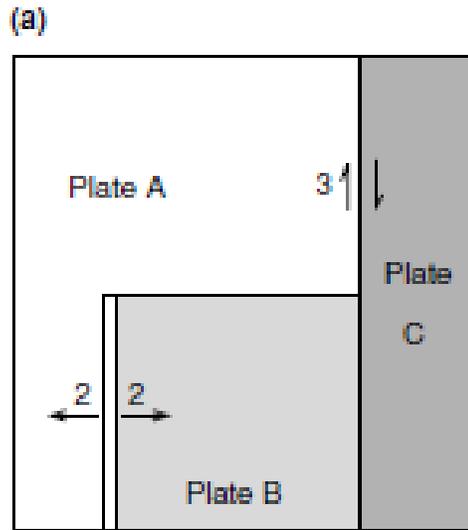


Le placche A e B si allontanano alla velocità dimezzata di 2 cm/yr

Il margine tra la placca A e quella C è una faglia trasforme (margine trascorrente) con una velocità relativa di 3 cm/yr

Quale è la velocità relativa ${}_C V_B$? Cosa accade agli altri margini?

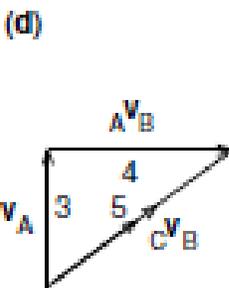
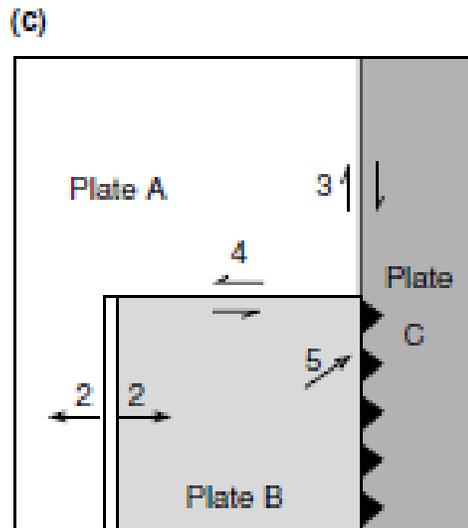
Tettonica delle placche: movimenti reciproci



Le placche A e B si allontanano alla velocità dimezzata di 2 cm/yr

Il margine tra la placca A e quella C è una faglia trasforme (margine trascorrente) con una velocità relativa di 3 cm/yr

Quale è la velocità relativa ${}_C V_B$? Cosa accade agli altri margini?



Il **margine superiore della placca B** è trasforme con velocità di 4 cm/yr. Per il margine est della placca B si applica la somma vettoriale:

$${}_C V_B = {}_C V_A + {}_A V_B$$

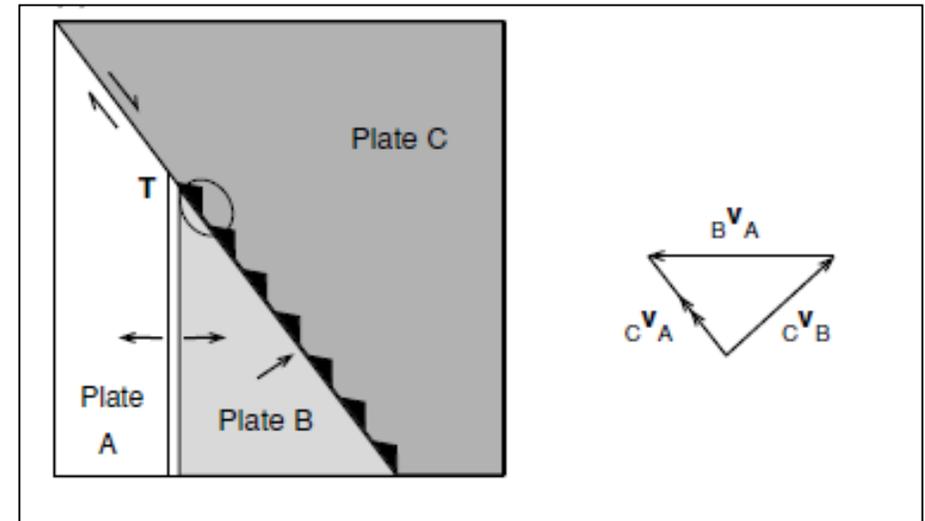
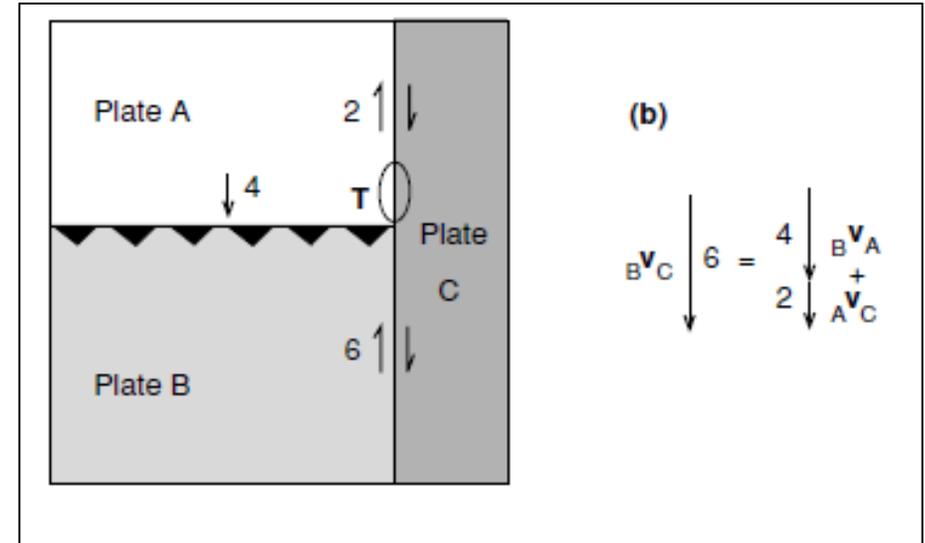
La placca B subduce obliquamente sotto la placca C ad una velocità di 5 cm/yr

Tettonica delle placche: movimenti reciproci

Formazione e distruzione delle placche sono **causa** della variazione dei margini delle placche stesse e **delle loro velocità relative**

In un modello con tre placche, il punto T negli esempi a lato, dove si incontrano le placche A, B e C, è la detto **giunzione tripla**

La parte cerchiata cambia nel tempo

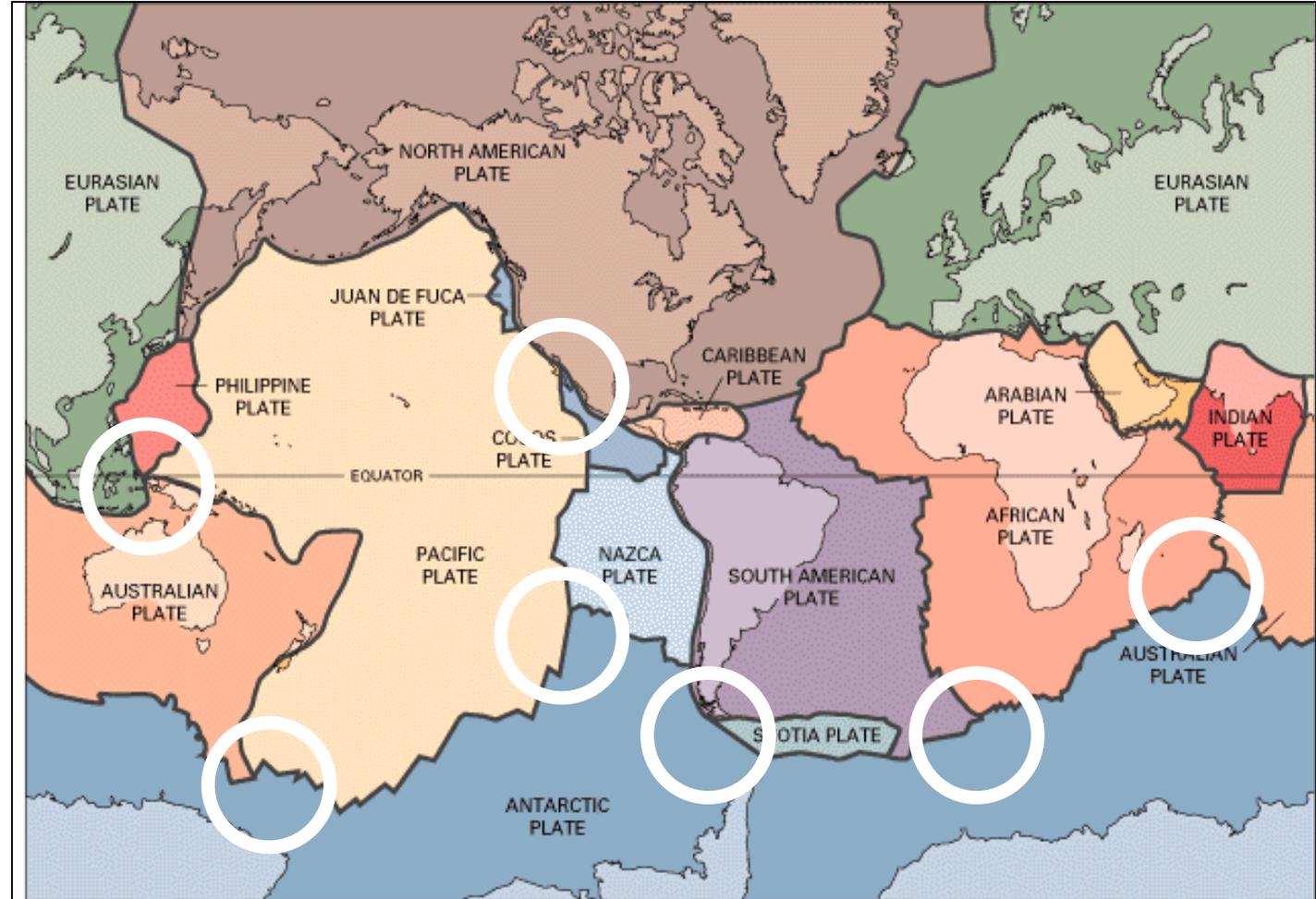


Tettonica delle placche: movimenti reciproci

Una **giunzione tripla stabile** si definisce se il moto relativo delle tre placche e l'azimut dei loro margini sono tali che la configurazione della giunzione non cambia nel tempo

Una **giunzione tripla instabile** esiste in quella configurazione solo per un tempo limitato prima di evolvere verso un'altra configurazione

Se **quattro o più placche** si incontrano in un punto la configurazione è sicuramente instabile ed il sistema evolverà formando **due o più giunzioni triple**



Tettonica delle placche: movimenti reciproci

Dati i tipi di margini:

Ridge (R)

Transform fault (F)

Subduction zone or trench (T)

Alcuni esempi di giunzione sono:

RRR: E. Pacific Rise- Galapagos

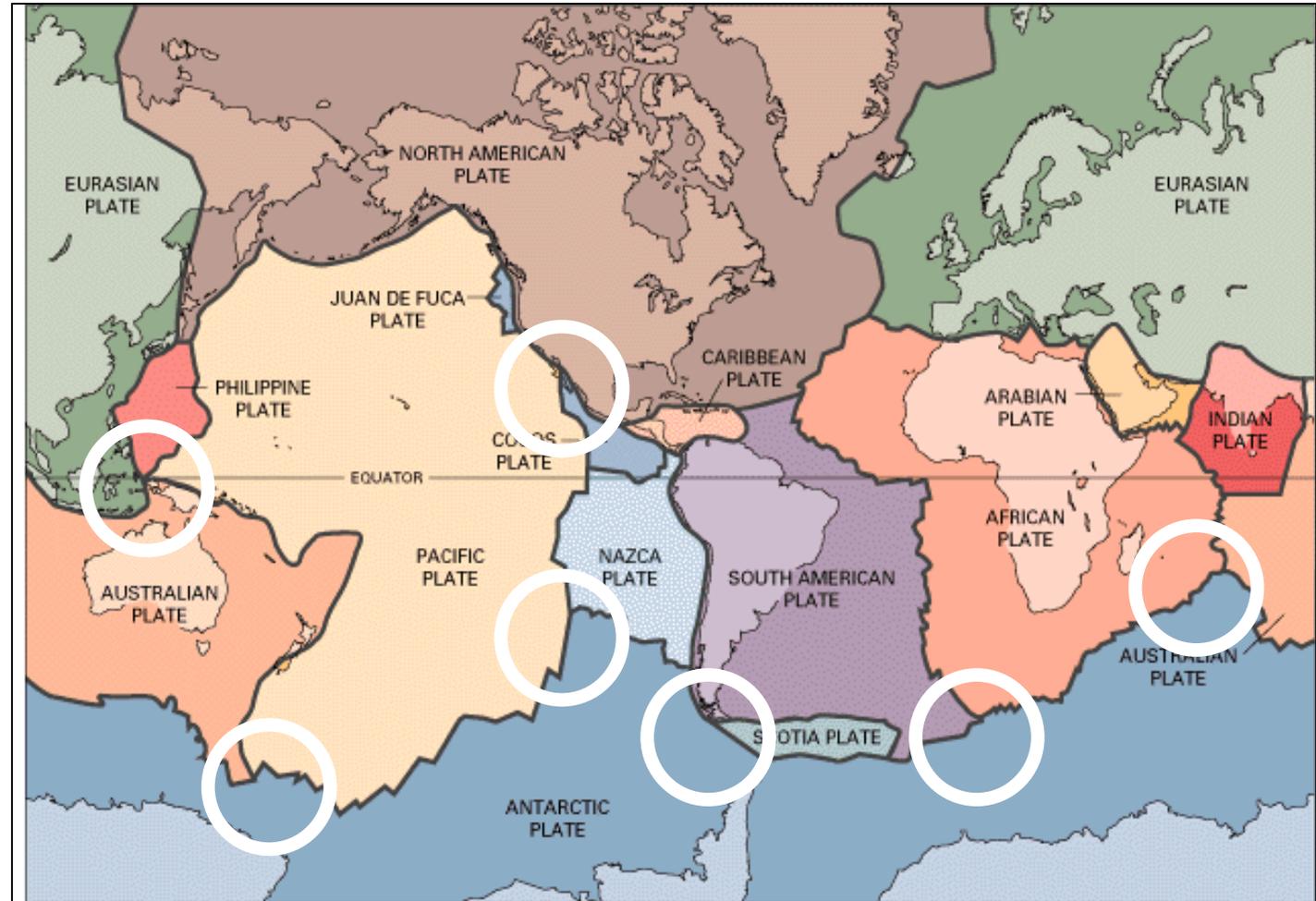
TTT: Central Japan

TTF: Peru-Chile trench\and West Chile Rise

FFR: Owen Fracture Zone– Sheba Ridge

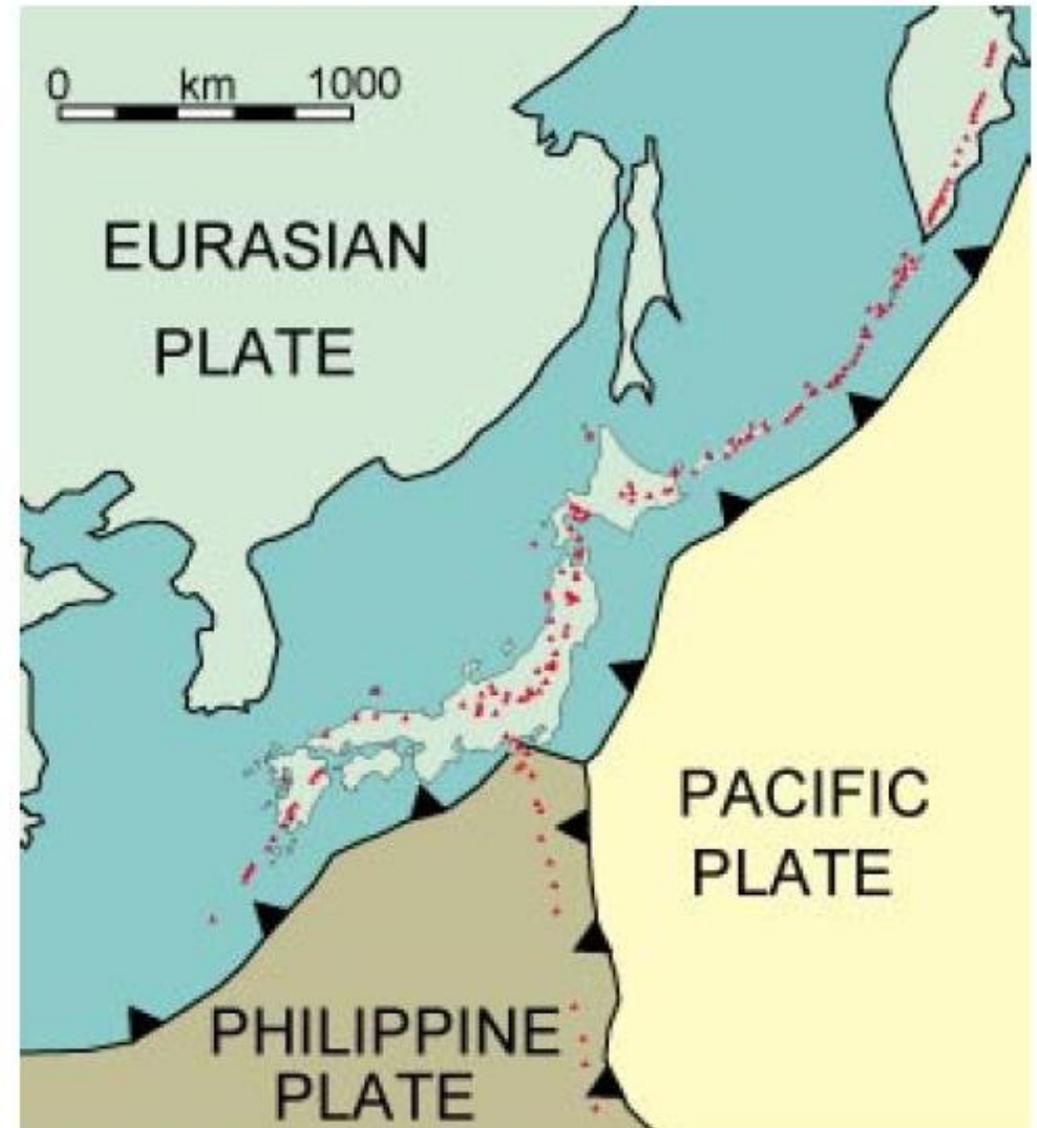
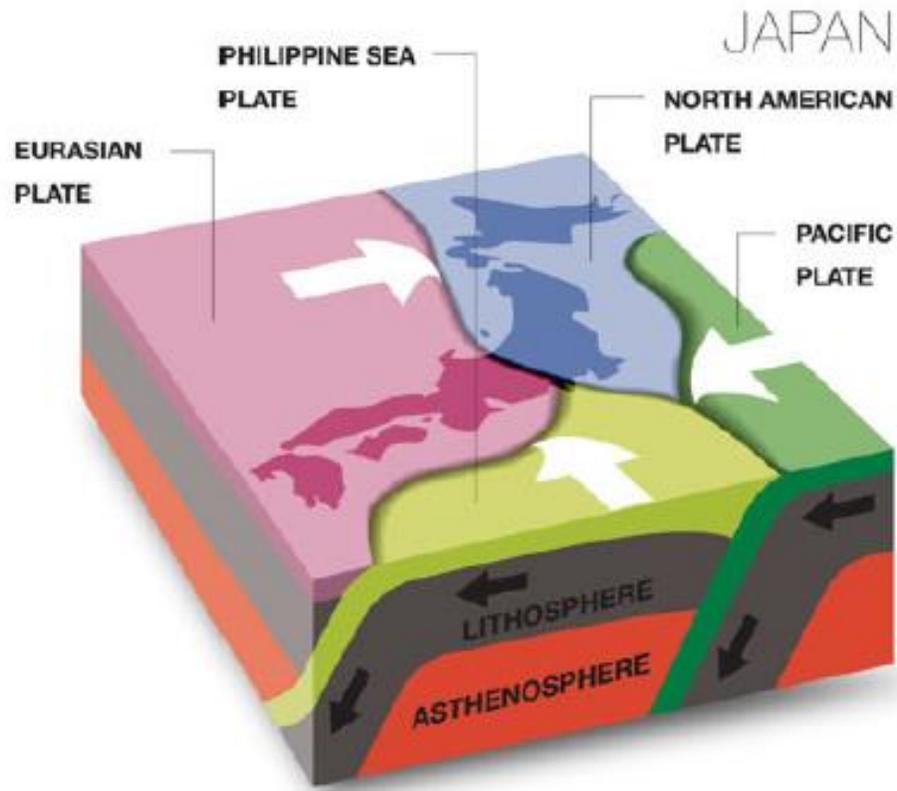
FFT: California

RTF: Gulf of California



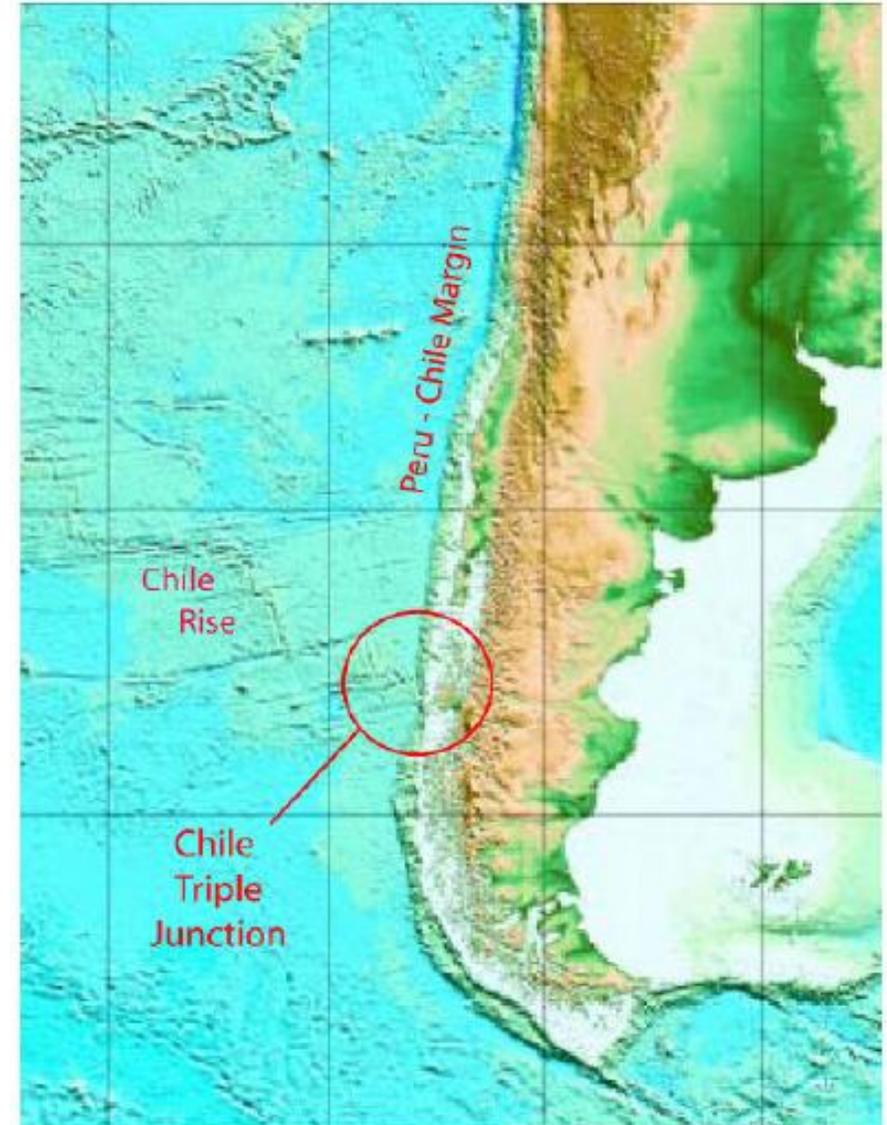
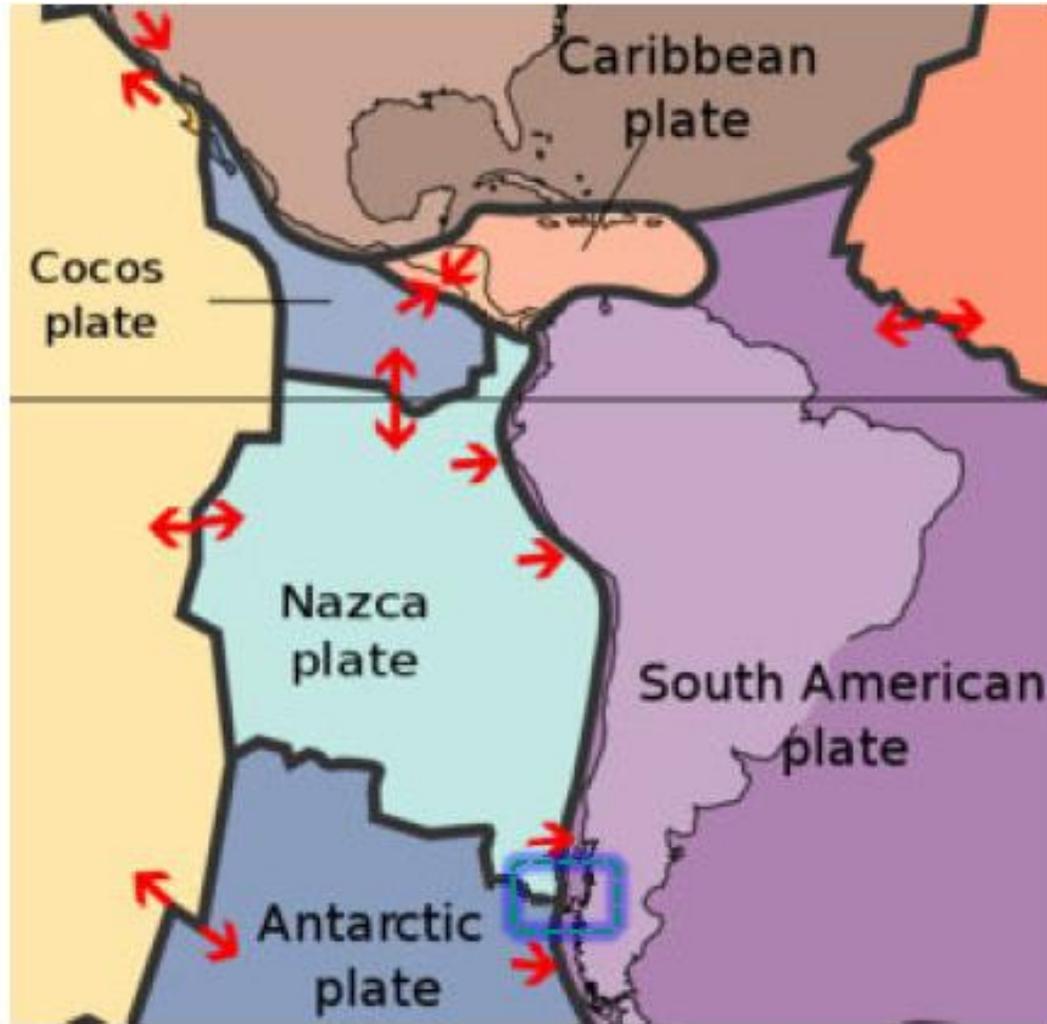
Tettonica delle placche: movimenti reciproci

TTT Central Japan



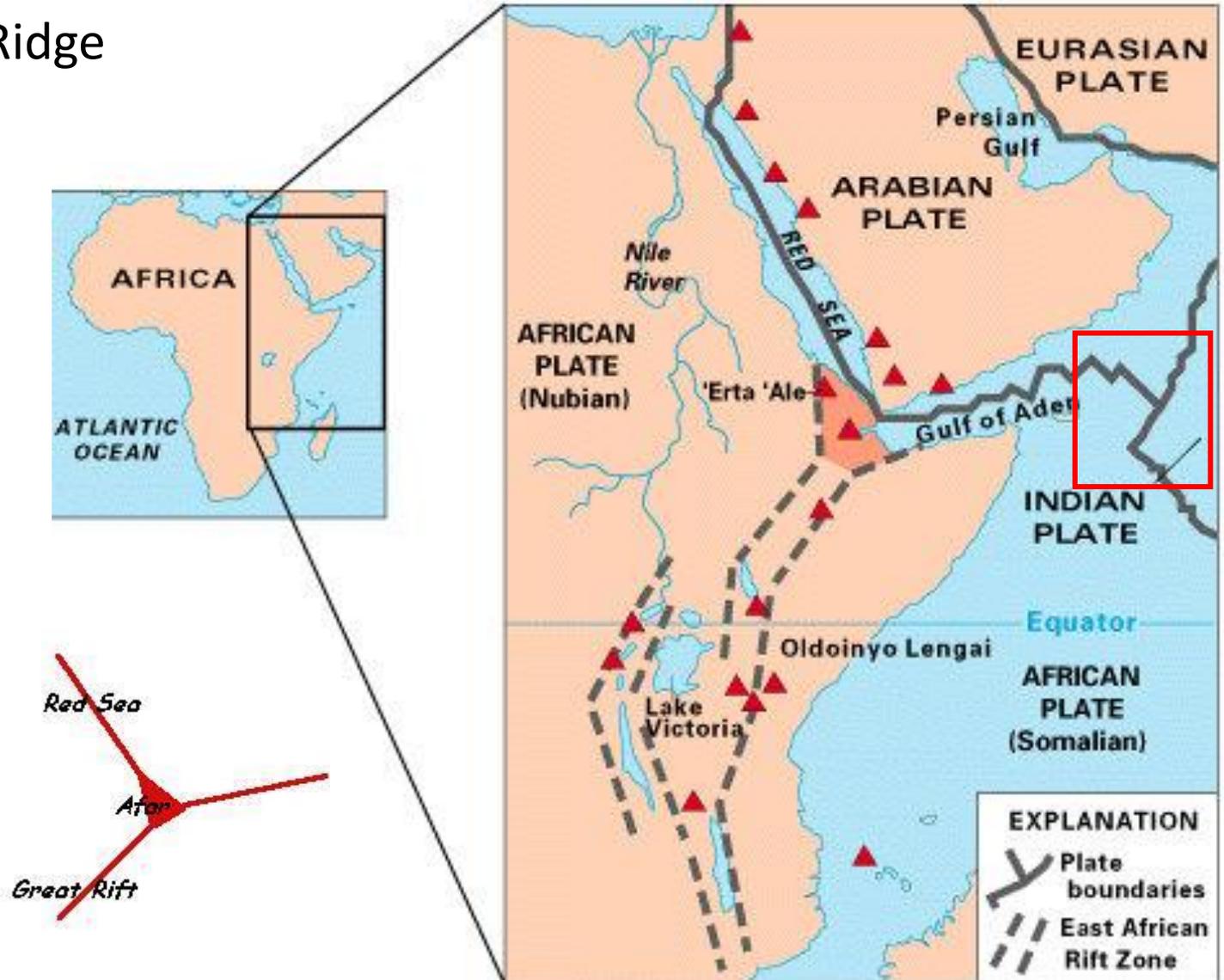
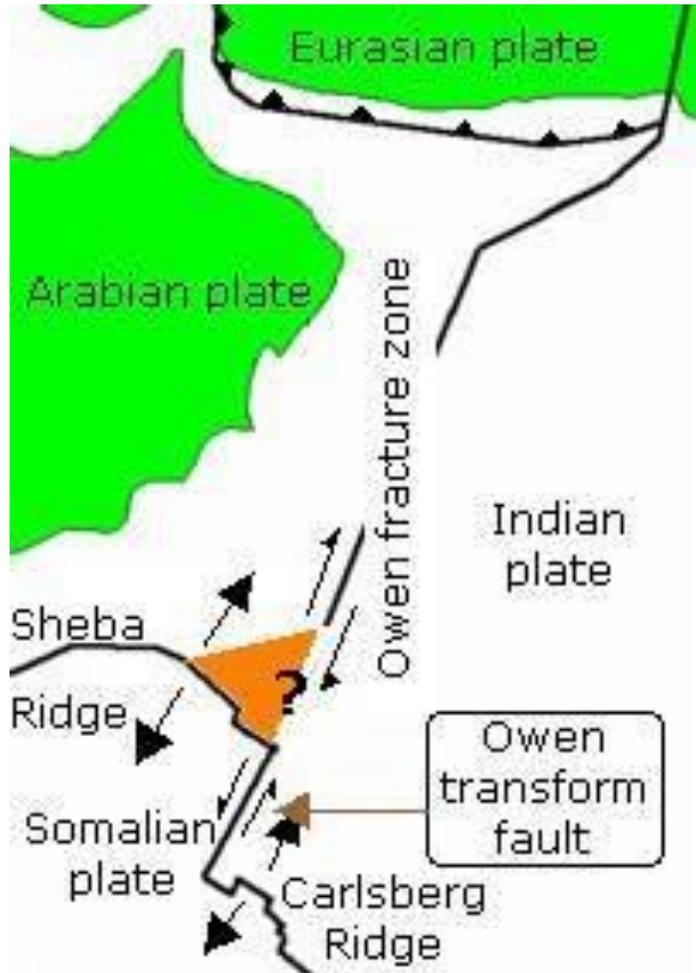
Tettonica delle placche: movimenti reciproci

TTF Peru' Chile Trench and West Chile Rise



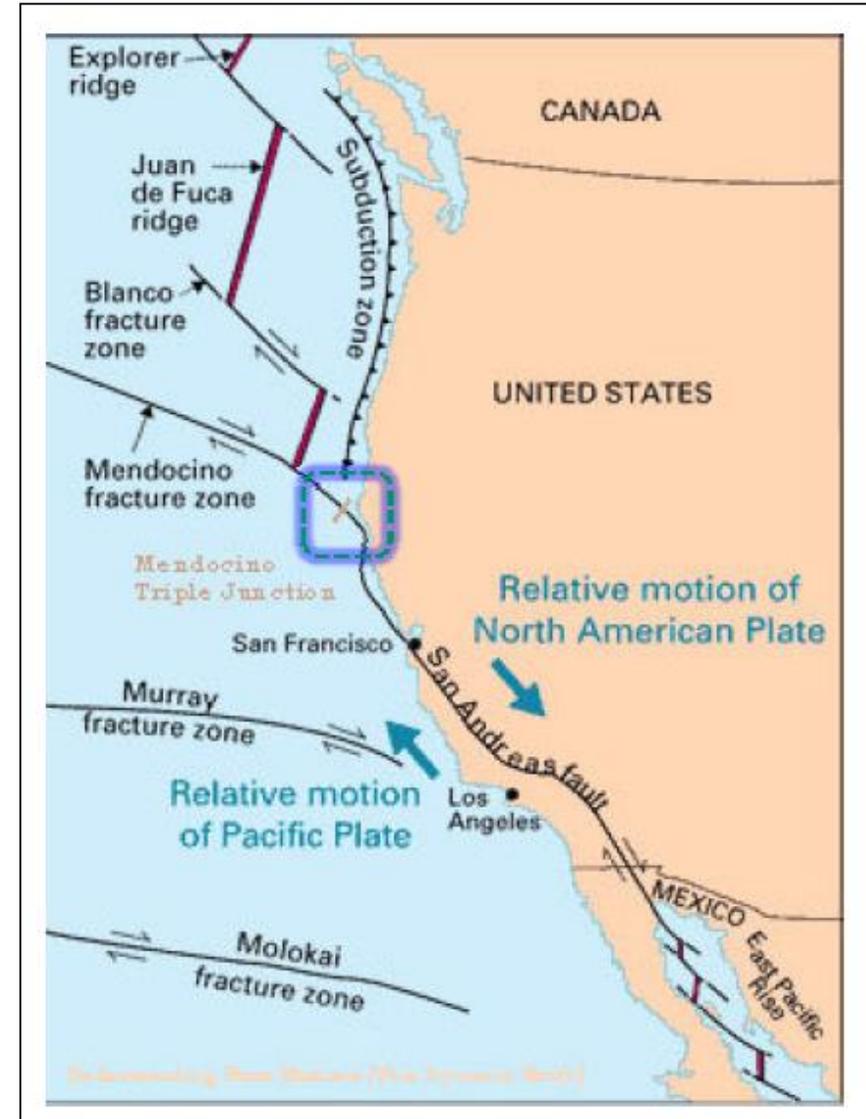
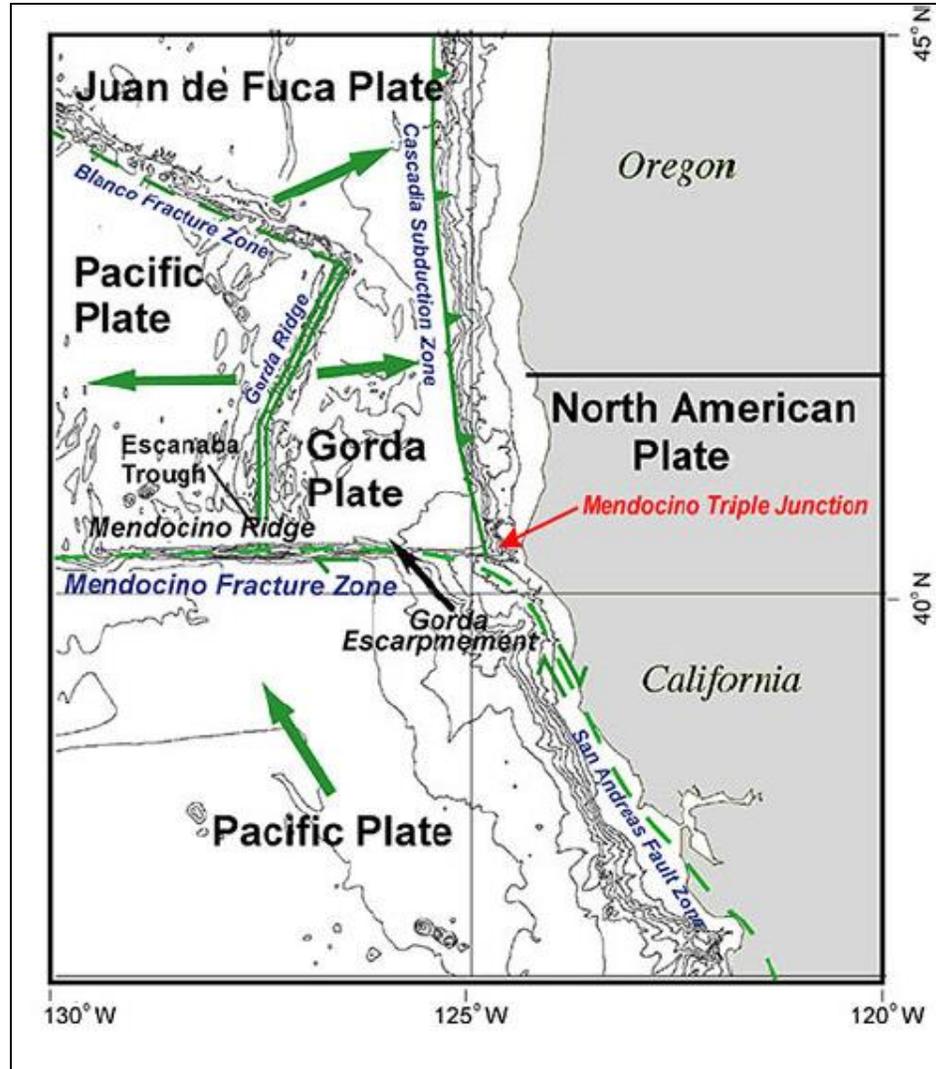
Tettonica delle placche: movimenti reciproci

FFR: Owen Fracture Zone– Sheba Ridge



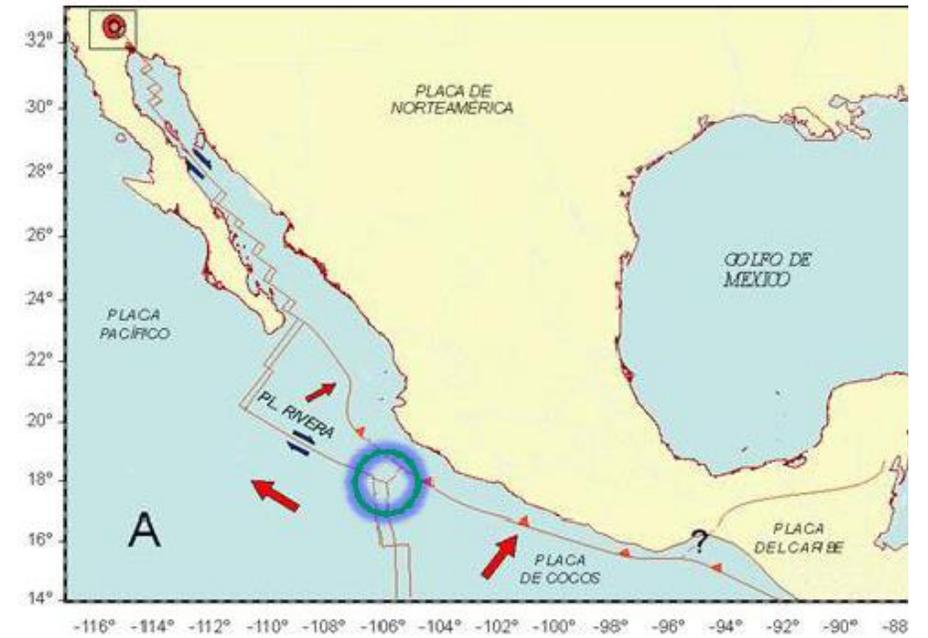
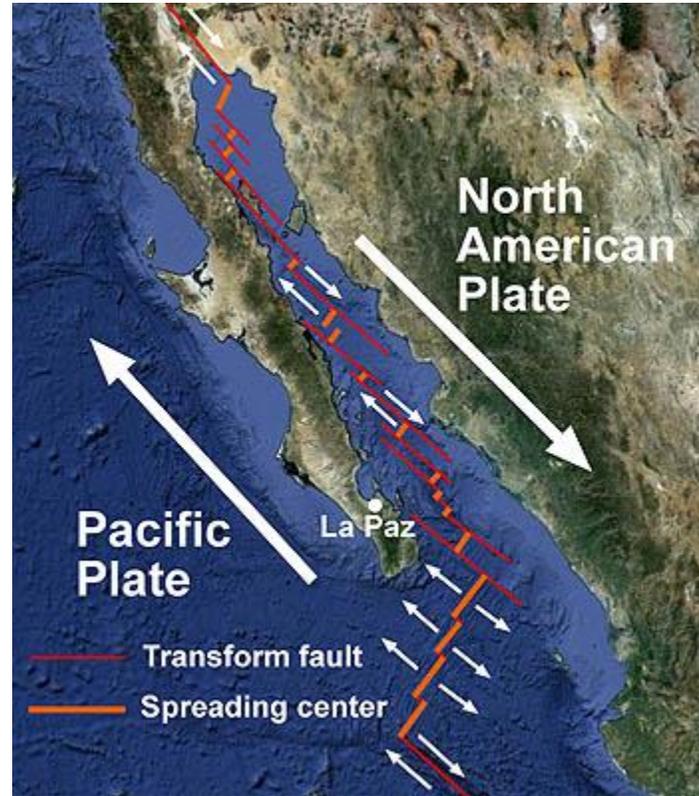
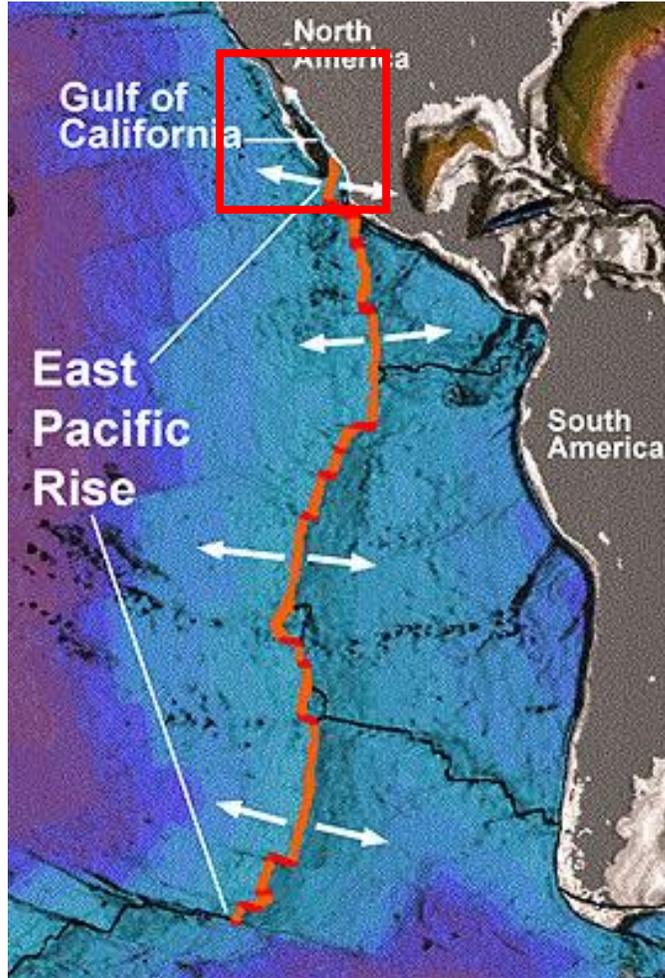
Tettonica delle placche: movimenti reciproci

FFT: California



Tettonica delle placche: movimenti reciproci

RTF Gulf of California



Tettonica delle placche: movimenti reciproci

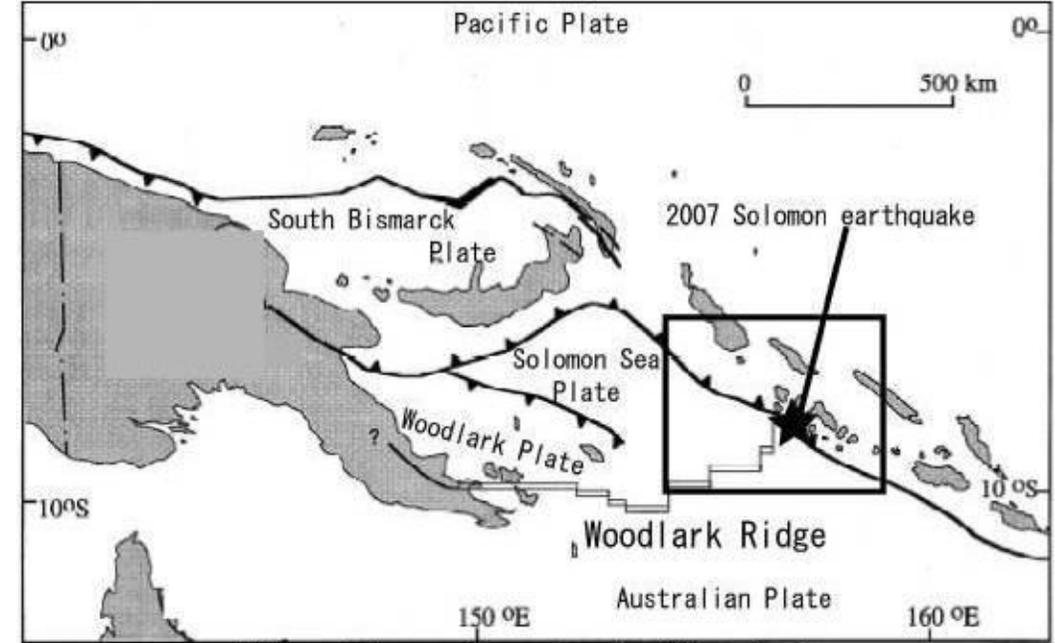
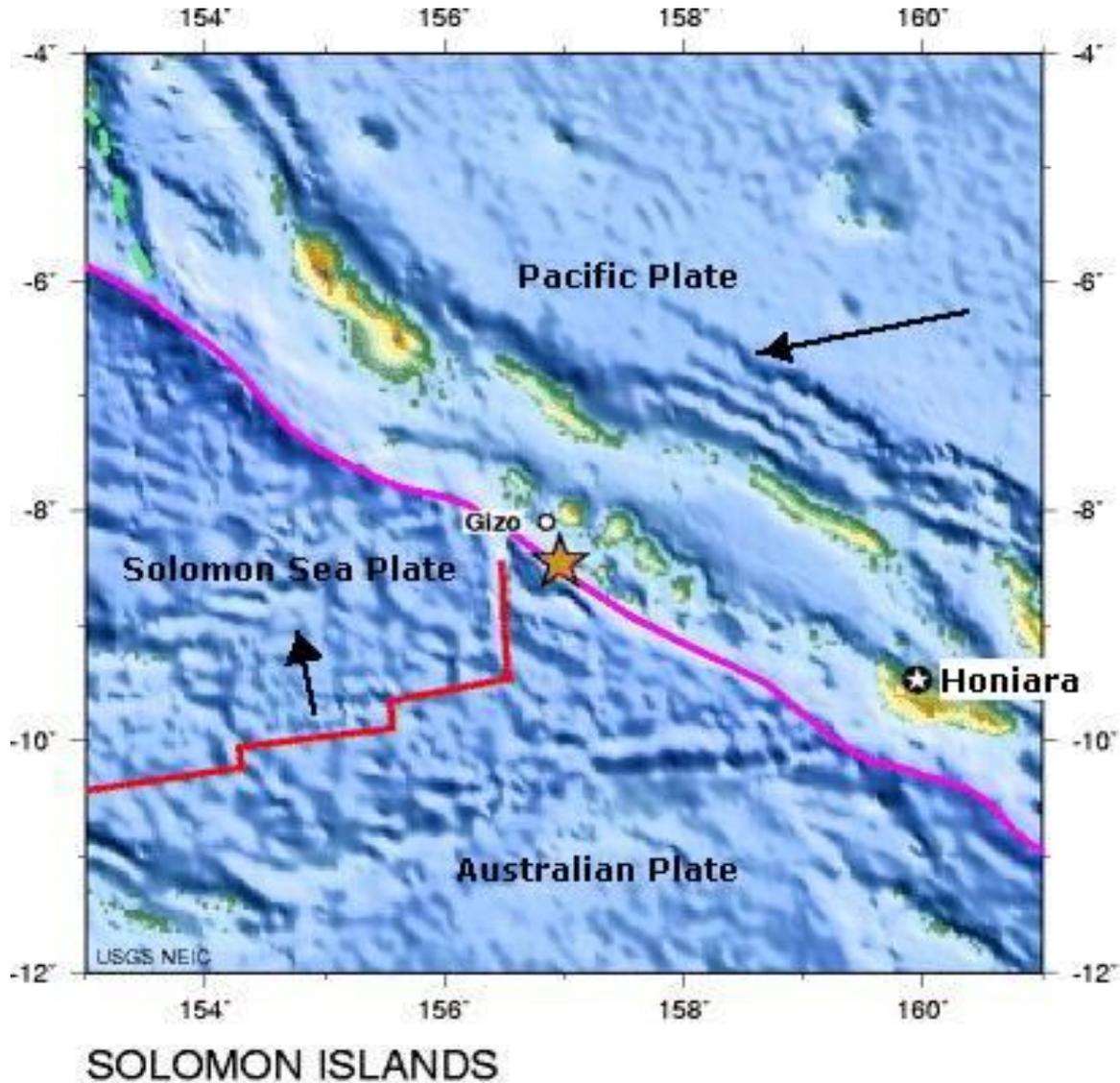
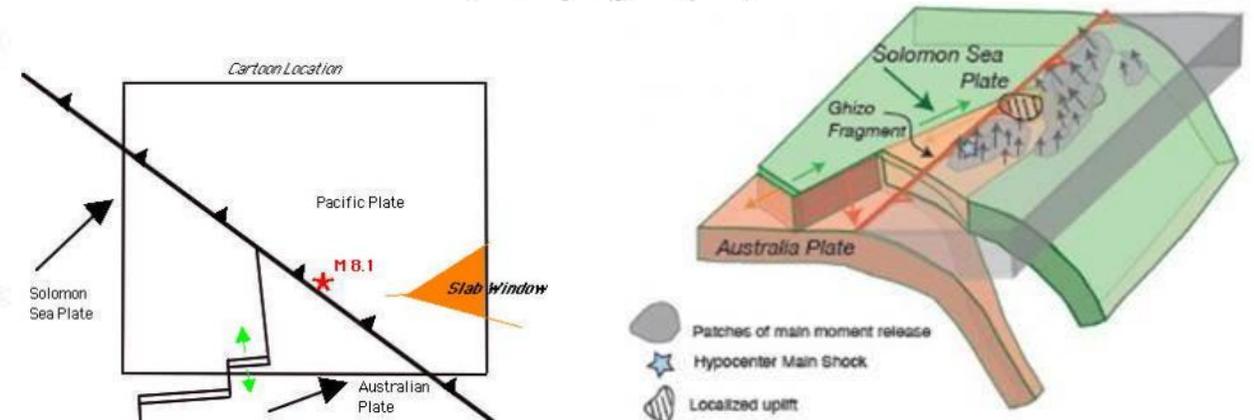


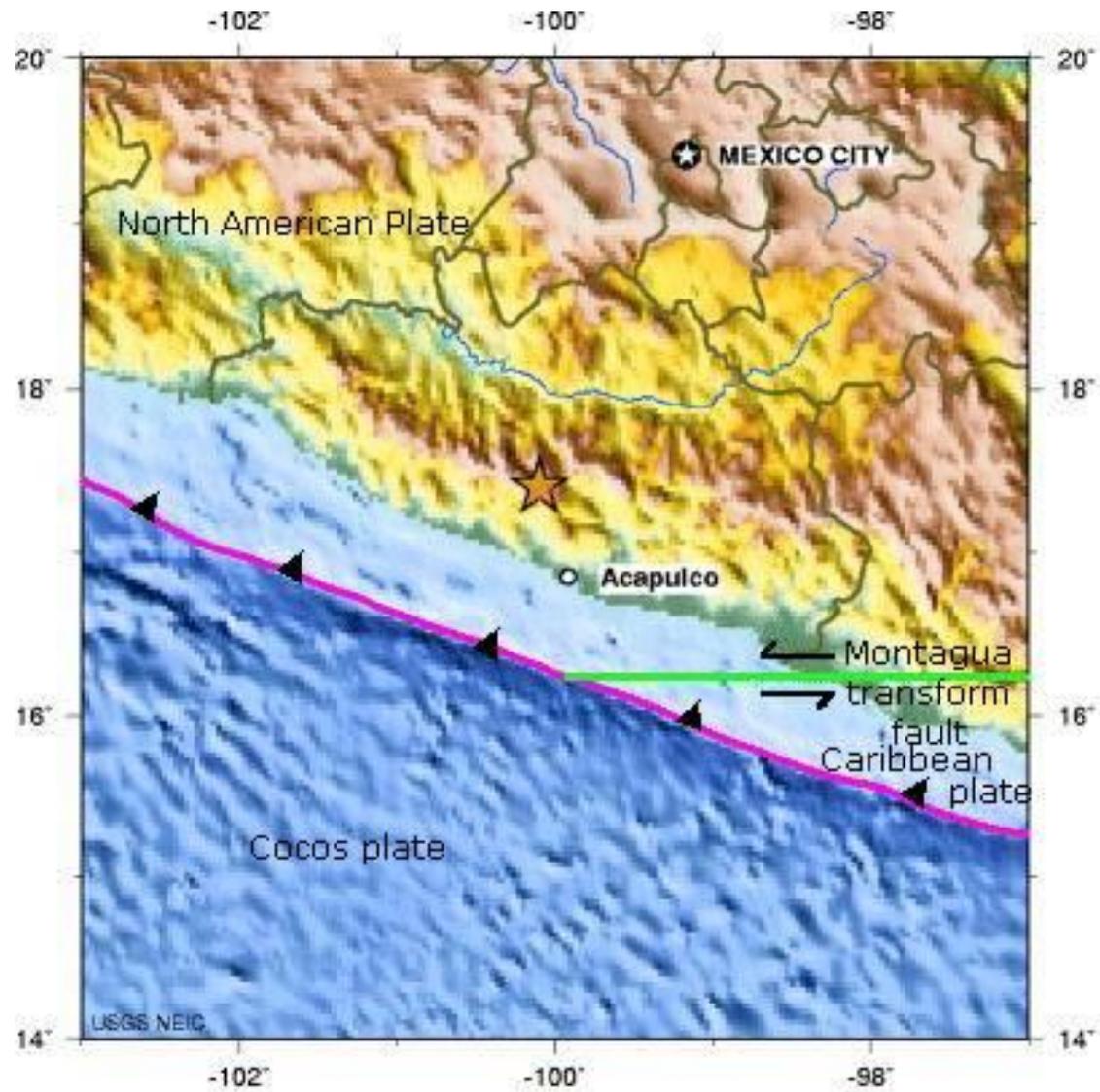
Plate boundaries around the source region of the earthquakes.
(from Tregoning et al., 1998)



This is a cartoon of the tectonic plates in the Solomon Islands area showing subduction beneath the Pacific plate. The Pacific plate is not shown.

Credit: Kevin Furlong, Penn State

Tettonica delle placche: movimenti reciproci



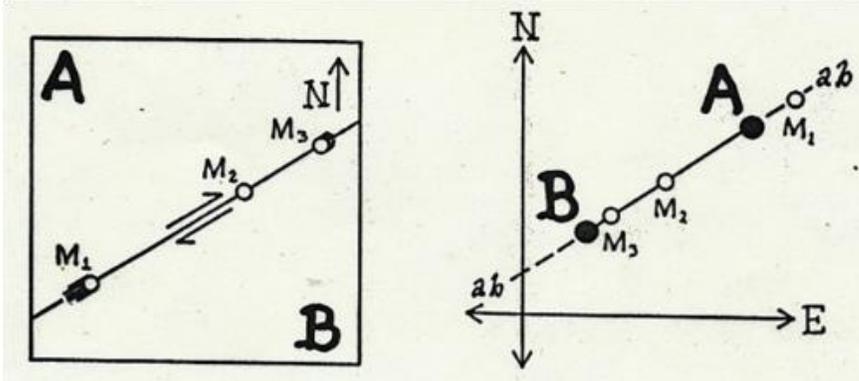
Tettonica delle placche: movimenti reciproci

Per definire se una giunzione tripla è stabile o no si osserva l'intersezione delle linee di velocità delle tre placche:

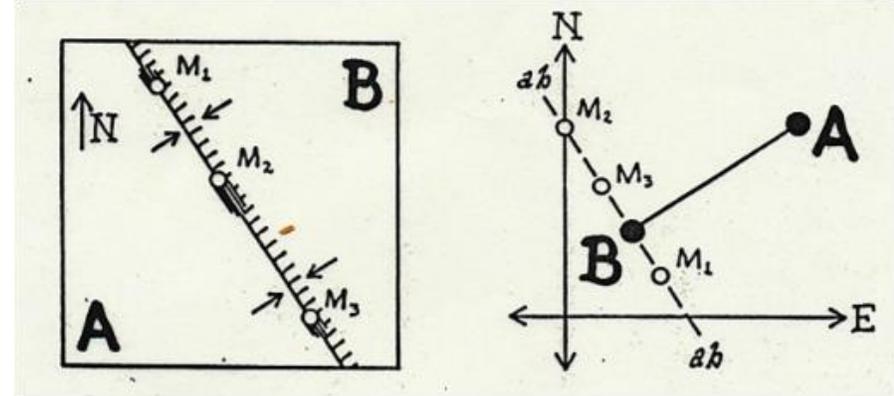
Tettonica delle placche: movimenti reciproci

Linee di velocità: insieme di punti alla stessa velocità

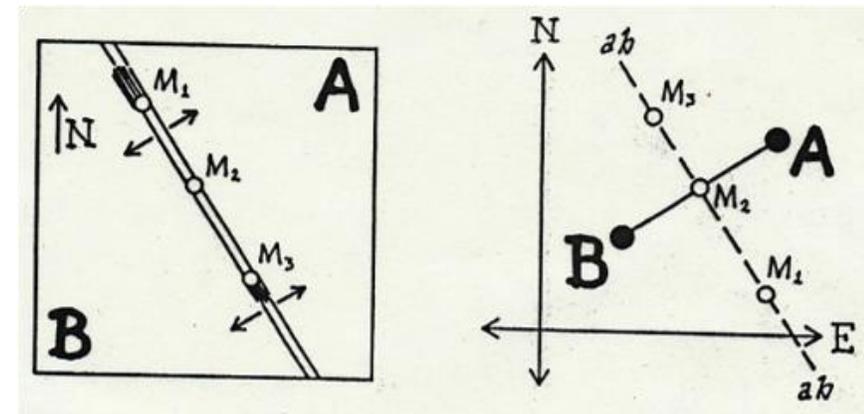
Margine in **subduzione**: linea di velocità parallela al trench e si muove con la placca che sovrascorre (cioè **tracciata sul margine che sovrascorre**)



Dorsale/ridge: la linea di velocità è parallela alla dorsale/ridge. Se l'accrescimento è simmetrico, **passa per la metà del segmento che unisce AB** (che rappresenta la velocità relativa delle due placche) ed è ad esso perpendicolare



Margine **trascorrente**: linea di velocità parallela alla faglia e passa sia per A che per B

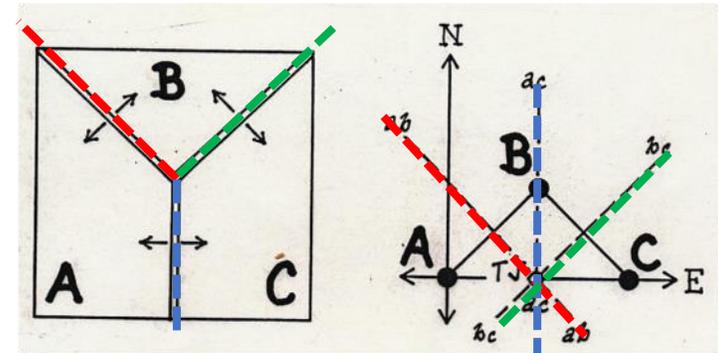


Tettonica delle placche: movimenti reciproci

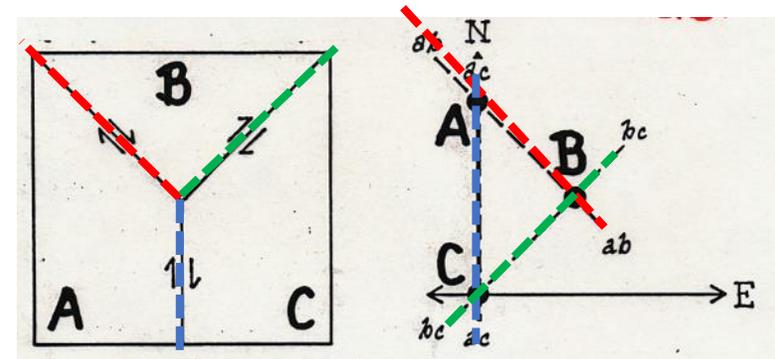
Per definire se una giunzione tripla è stabile o no si osserva l'intersezione delle linee di velocità delle tre placche:

Se le tre linee di velocità si **intersecano** la giunzione tripla è **stabile** (esempio RRR a lato)

Se le tre linee di velocità **non si intersecano** non si può definire una velocità per la giunzione e quindi la giunzione è **instabile** (esempio FFF a lato)



RRR è sempre stabile perché le linee di velocità si incontrano sempre in un punto



FFF è sempre instabile perché le tre linee di forza coincidono con i lati di un triangolo e quindi non si incontrano mai in un punto

Tettonica delle placche: movimenti reciproci

Esistono 16 tipi di giunzione tripla:

La **RRR** è sempre stabile

La **FFF** e la **FRR** sono sempre instabili

Le altre combinazioni sono stabili sotto certe condizioni

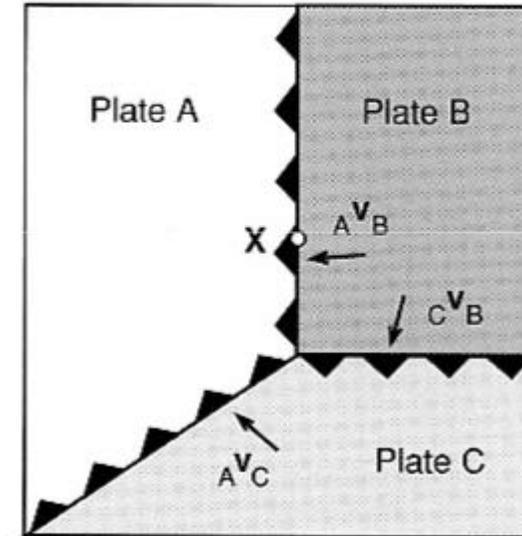
Geometry	Velocity triangle	Stability	Possible Examples	Geometry	Velocity triangle	Stability	Possible Examples
RRR 		All orientations stable	East Pacific Rise and Galapagos Rift Zone, Indian Ocean Triple Junction	TTR(b) 		Stable if the angles between ab and ac, bc, respectively, are equal, or if ac, bc form a straight line	
TTT(a) 		Stable if ab, ac form a straight line, or if bc is parallel to the slip vector CA	Central Japan	TTF(a) 		Stable if ac, bc form a straight line, or if C lies on ab	Intersection of the Peru-Chile trench and the Chile Rise
TTT(b) 		Stable if the complicated general condition for ab, bc and ac to meeting at a point is satisfied		TTF(b) 		Stable if bc, ab form a straight line, or if ac goes through B	
FFF 		Unstable		TTF(c) 		Stable if ab, ac form a straight line, or if ab, bc do so	
RRT 		ab must go through centroid of ABC		FFR 		Stable if C lies on ab, or if ac, bc form a straight line	Owen fracture zone and the Carlsberg Ridge, Chile Rise and the East Pacific Rise
RRF 		Unstable, evolves to FFR; but stable if ab and ac are perpendicular		FFT 		Stable if ab, bc form a straight line, or if ac, bc do so	San Andreas Fault and Mendocino fracture zone (Mendocino triple junction)
TTR(a) 		Stable if ab goes through C, or if ac, bc form a straight line		RTF(a) 		Stable if ab goes through C or if ac, bc form a straight line	Mouth of the Gulf of California (Rivera triple junction)
TTR(b) 		Stable if complicated general conditions are satisfied		RTF(b) 		Stable if ac, ab cross on bc	

Tettonica delle placche: movimenti reciproci

La placca A sovrascorre sia sopra la placca B che C (ovvero le placche B e C subducono sotto A) e la placca C sovrascorre su B ->

La giunzione tripla in (a) del tipo TTT è stabile?

(a) Giunzione tripla TTT



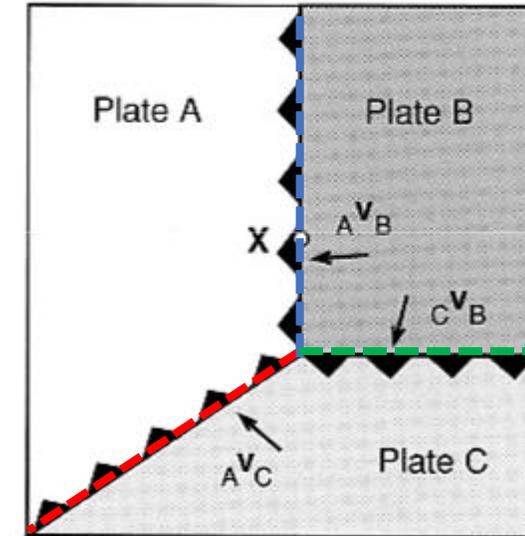
Tettonica delle placche: movimenti reciproci

La placca A sovrascorre sia sopra la placca B che C (ovvero le placche B e C subducono sotto A) e la placca C sovrascorre su B ->

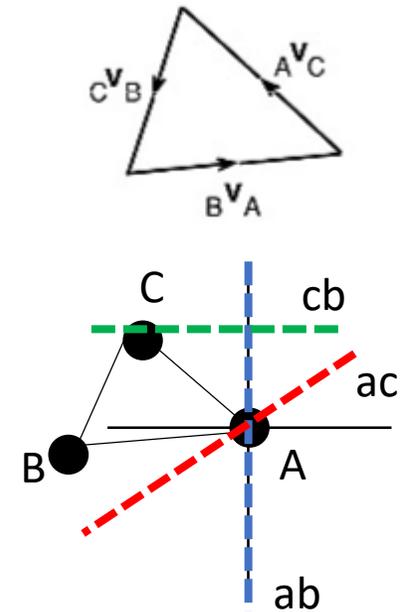
La giunzione tripla in (a) del tipo TTT è stabile?

NO

(a) Giunzione tripla TTT



(b)



Tettonica delle placche: movimenti reciproci

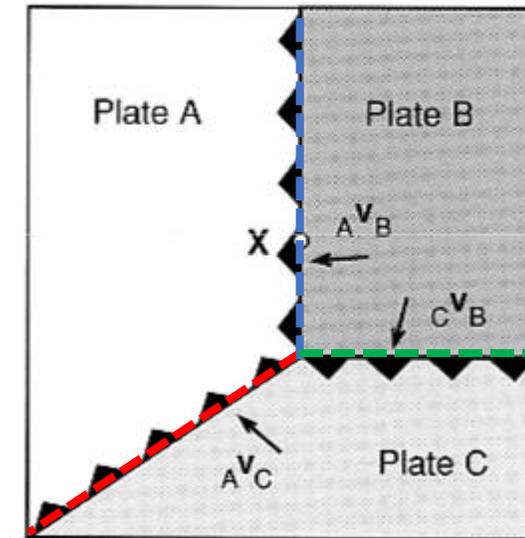
La placca A sovrascorre sia sopra la placca B che C (ovvero le placche B e C subducono sotto A) e la placca C sovrascorre su B ->

La giunzione tripla in (a) del tipo TTT è stabile?

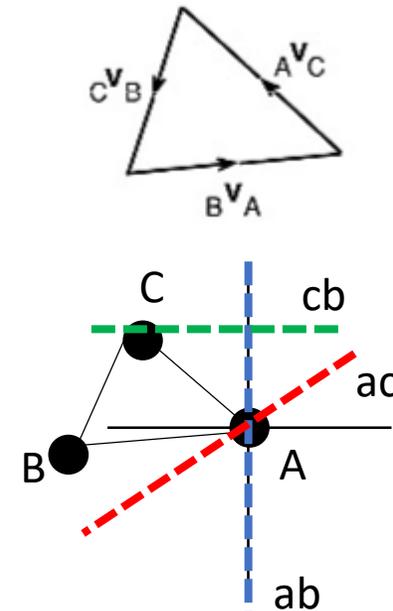
NO

Tuttavia la nuova configurazione (c), dove la giunzione si muove verso nord lungo il margine nord-sud della placca A, è stabile perché la geometria e le velocità relative delle placche non cambiano, ma cambia la direzione del margine

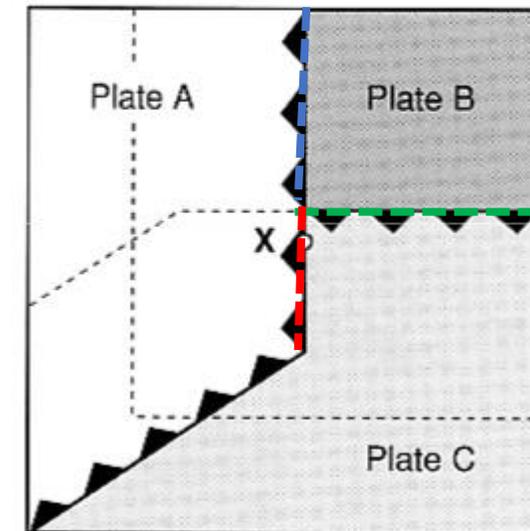
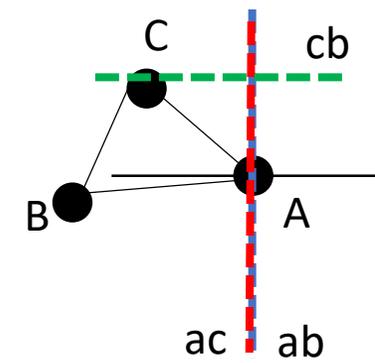
(a) Giunzione tripla TTT



(b)



(c)



Tettonica delle placche: movimenti reciproci

La placca A sovrascorre sia sopra la placca B che C (ovvero le placche B e C subducono sotto A) e la placca C sovrascorre su B ->

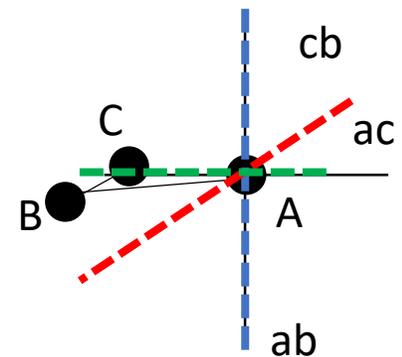
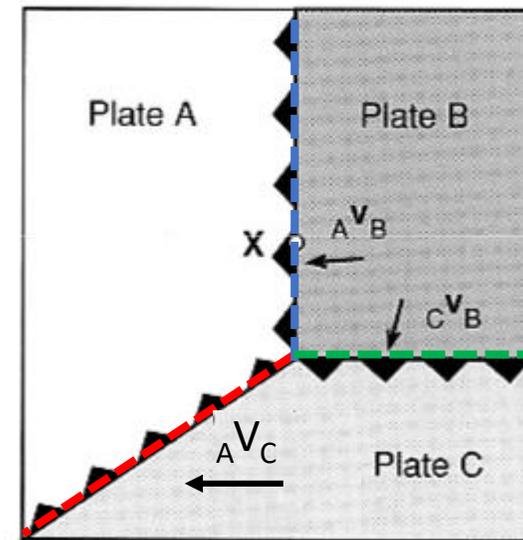
La giunzione tripla in (a) del tipo TTT è stabile?

NO

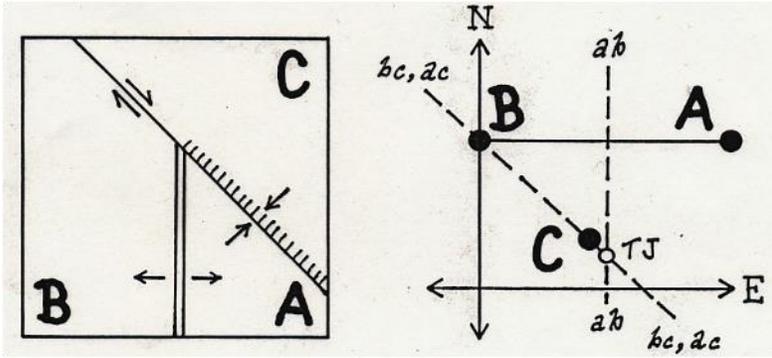
Tuttavia la nuova configurazione (c), dove la giunzione si muove verso nord lungo il margine nord-sud della placca A, è stabile perché la geometria e le velocità relative delle placche non cambiano, ma cambia la direzione del margine

NB: la configurazione in (a) sarebbe stata stabile se ${}_A V_C$ fosse stata parallela al margine B/C perché in quel caso questo margine non si sarebbe mosso verso nord rispetto alla placca A

(a) Giunzione tripla TTT

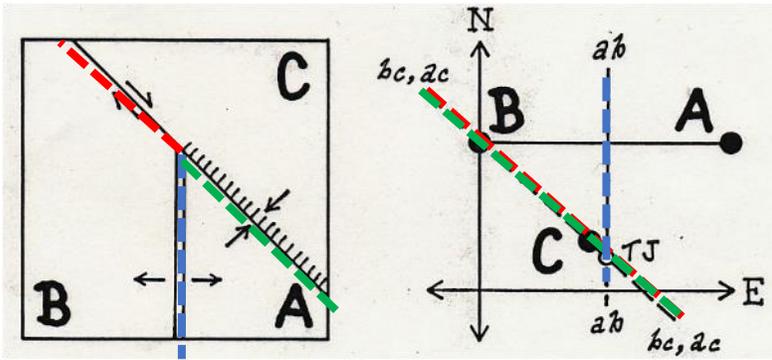


Tettonica delle placche: movimenti reciproci



Il punto triplo è sempre stabile?

Tettonica delle placche: movimenti reciproci



Il punto triplo è sempre stabile?

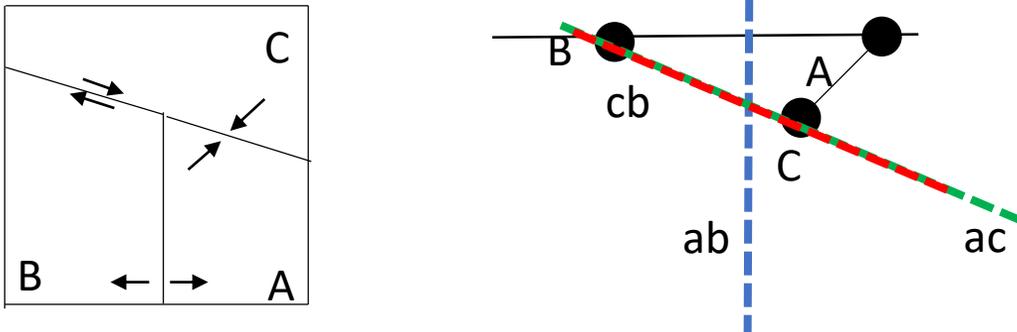
Poiché bc e ac devono passare per C (bc perché è un argine trascorrete e ac perché la placa che sovrascorre è C) il punto triplo RTF sarà stabile solo se

a) ac coincide con bc (come nell'esempio a lato o in quello sotto a sinistra, quindi se la direzione della faglia trasforme e del trench sono le stesse)

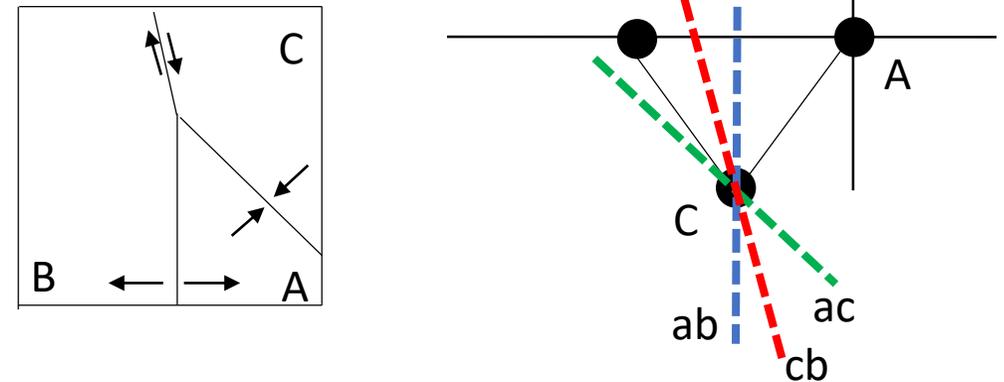
oppure

b) anche ab passa per C

a) Trench (fossa/subduzione) e faglia trasforme hanno stessa direzione

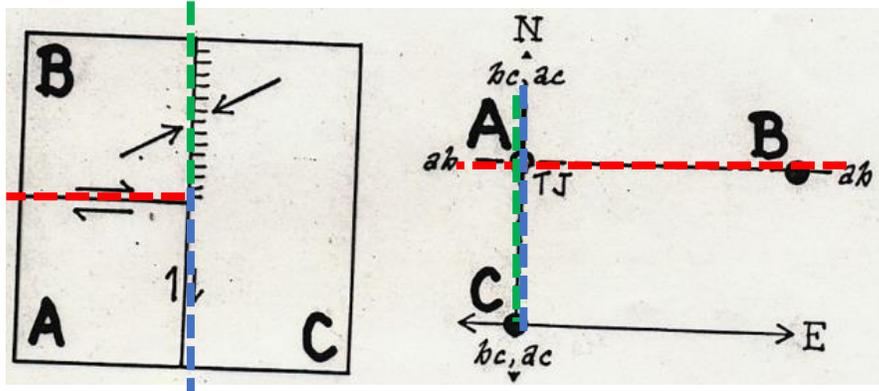


b) La velocità di allontanamento tra A e B è tale che la mezzeria del vettore velocità AB passa per C



Tettonica delle placche: movimenti reciproci

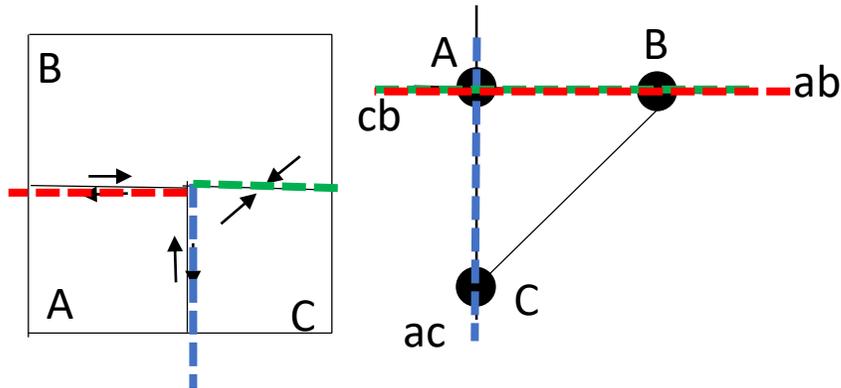
Il punto triplo è sempre stabile?



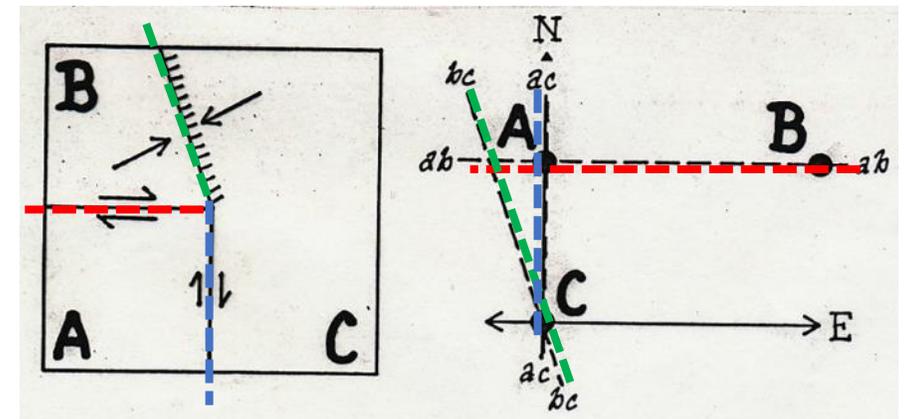
- ab e ac passano sempre per A

- bc deve passare per C

Perciò TFF è stabile solo se il trench (e quindi la linea di velocità bc) ha la stessa direzione di una delle due faglie trascorrenti



Se il trench non ha la stessa direzione di una delle due faglie trascorrenti, la giunzione tripla è sempre instabile

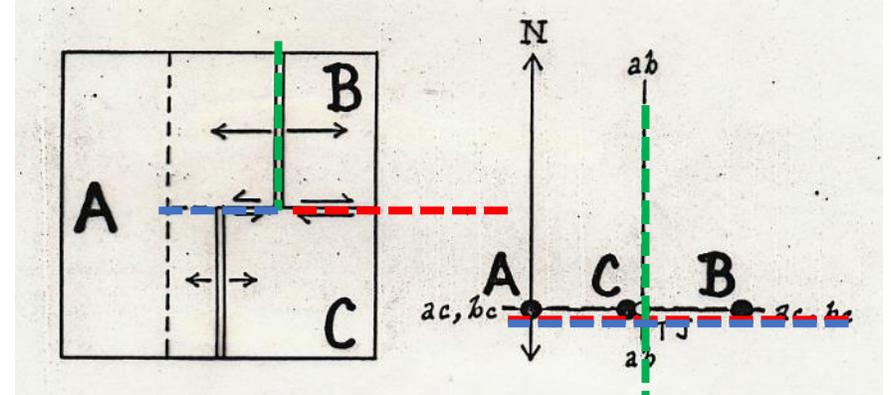
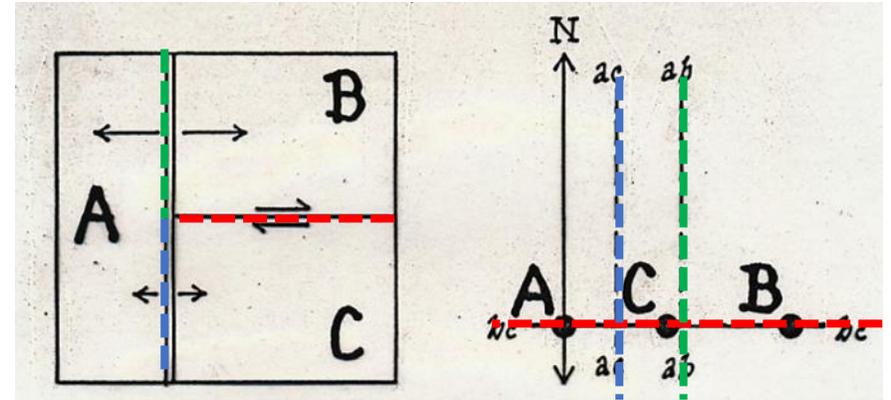


Tettonica delle placche: movimenti reciproci

Il punto triplo è sempre stabile?

RFR è instabile perché le linee di velocità ac e ab non si intersecano

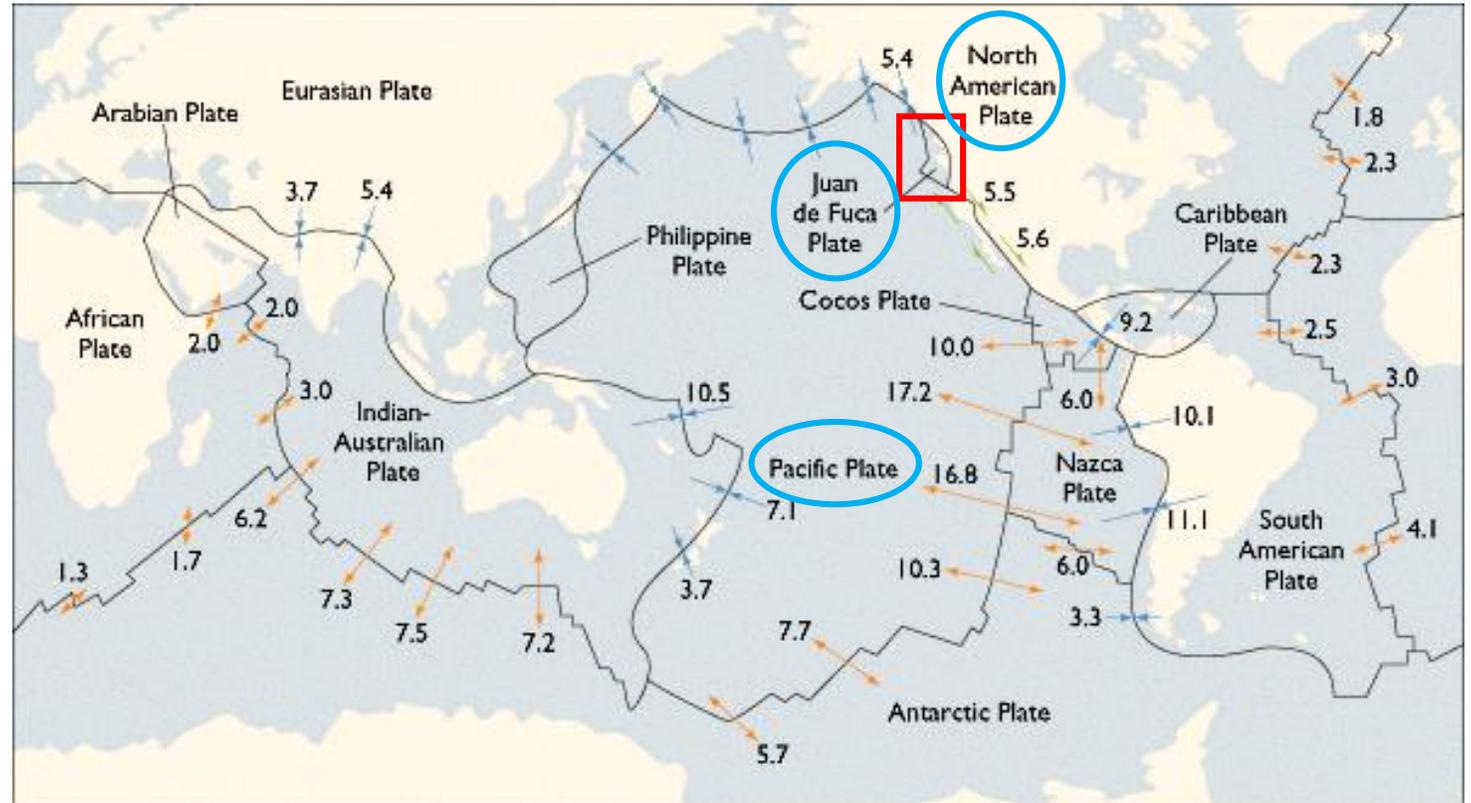
Perciò dopo un po' di tempo la configurazione evolve fino a raggiungere una geometria stabile del tipo FRF dove le linee di velocità ab , ac e bc si intersecano nel punto TJ che comincia a migrare verso est



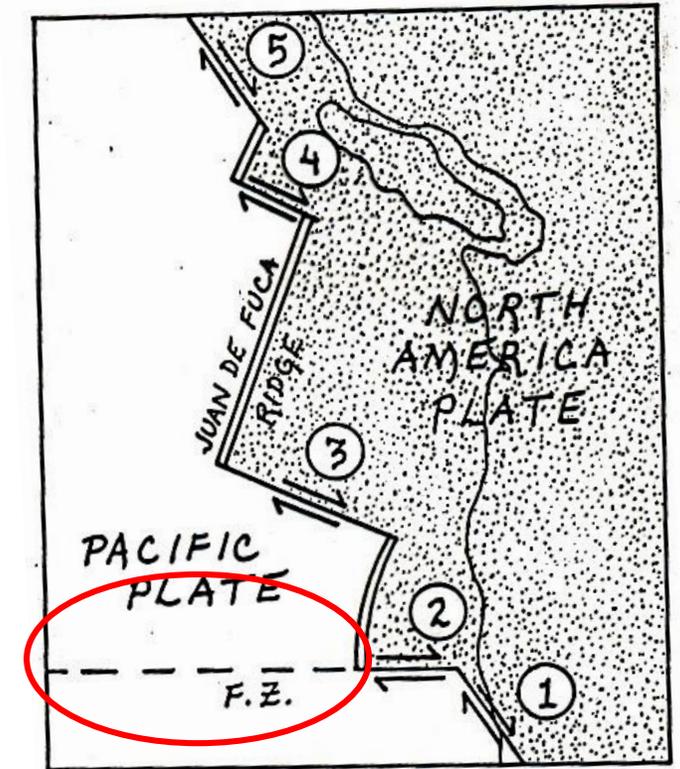
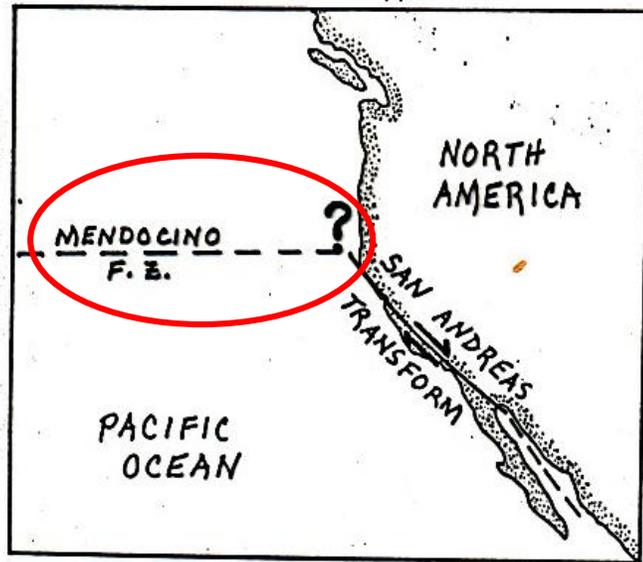
Tettonica delle placche:
calcolo dei movimenti reciproci delle placche
e diagrammi di velocità –
alcuni esempi

Tettonica delle placche: movimenti reciproci

Ci sono molti lavori che trattano della stabilità/instabilità delle **giunzioni triple Mendocino** (a sud) e **Queen Charlotte** (a nord) che si trovano a largo della costa ovest del Nord America tra le **placche Juan de Fuca, Pacifica** e **Nord Americana** e coinvolgono la faglia di San Andreas (in California) e la faglia Queen Charlotte nella British Columbia

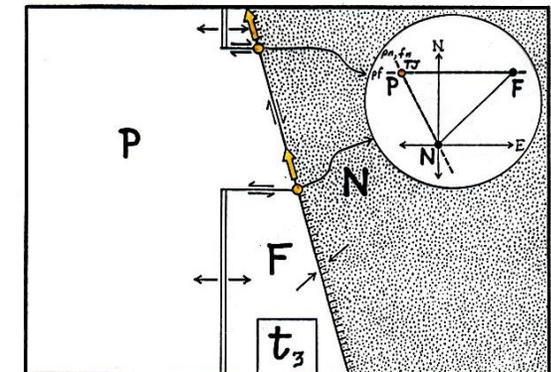
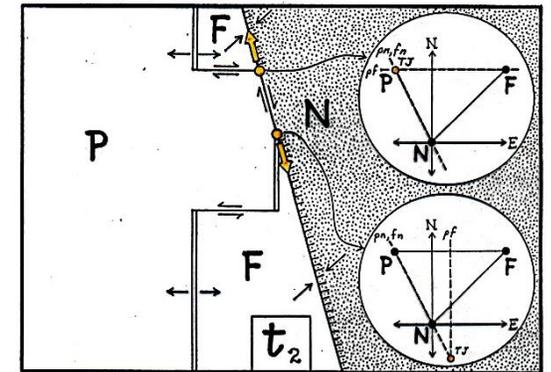
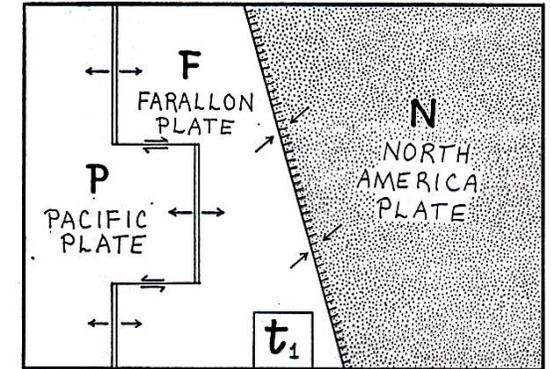
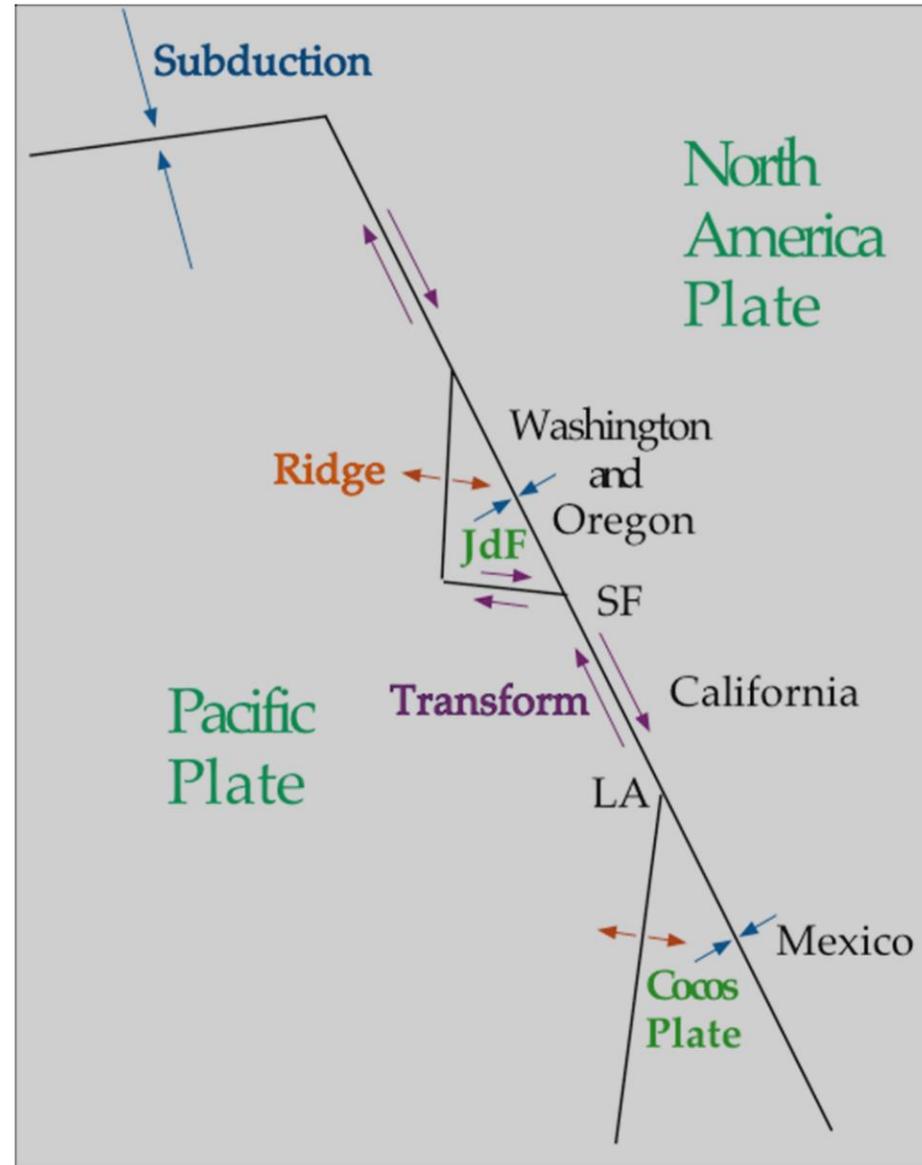


Tettonica delle placche: movimenti reciproci

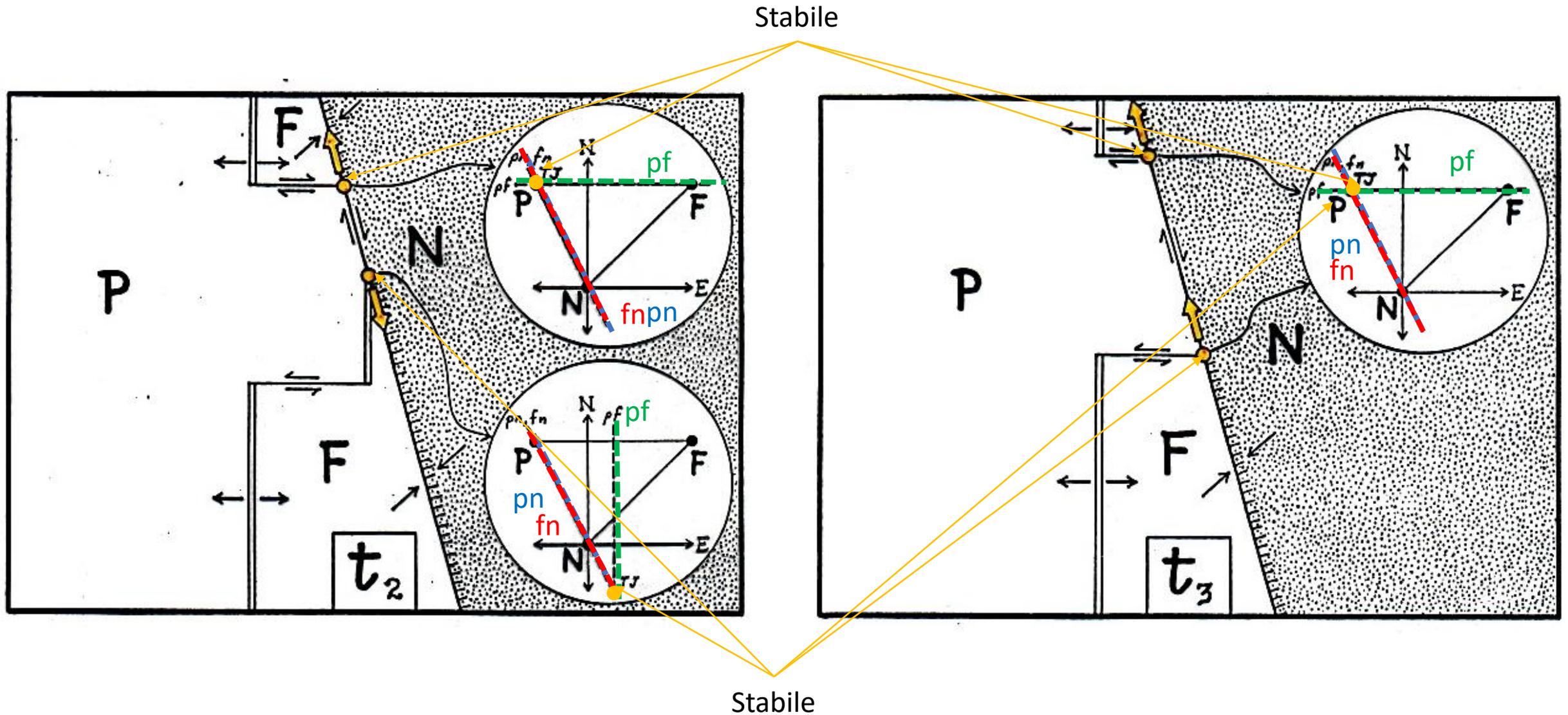


Tettonica delle placche: movimenti reciproci

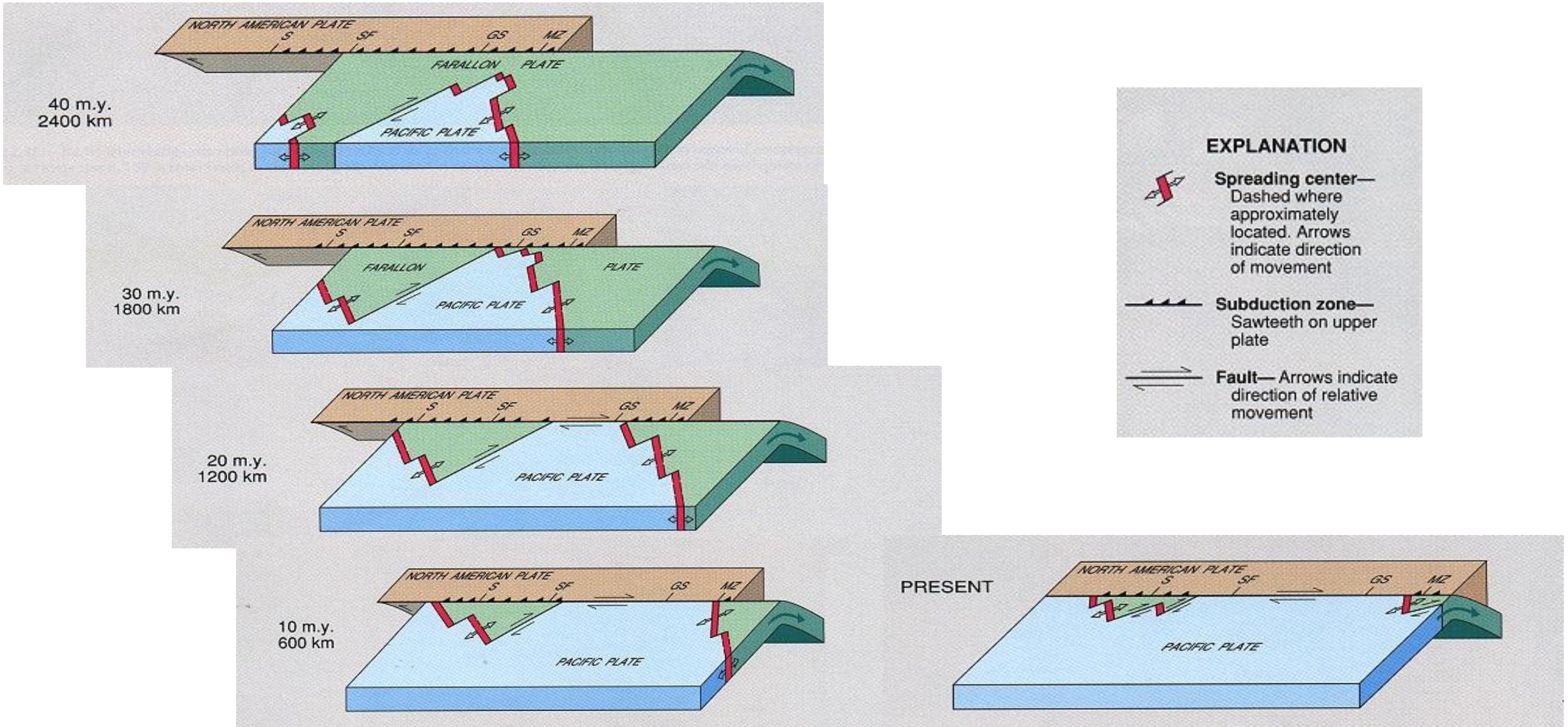
Le placche Juan de Fuca e Cocos sono i resti della placca Farallon che tra 80 Ma e 30 Ma era in subduzione sotto la costa ovest del Nord America



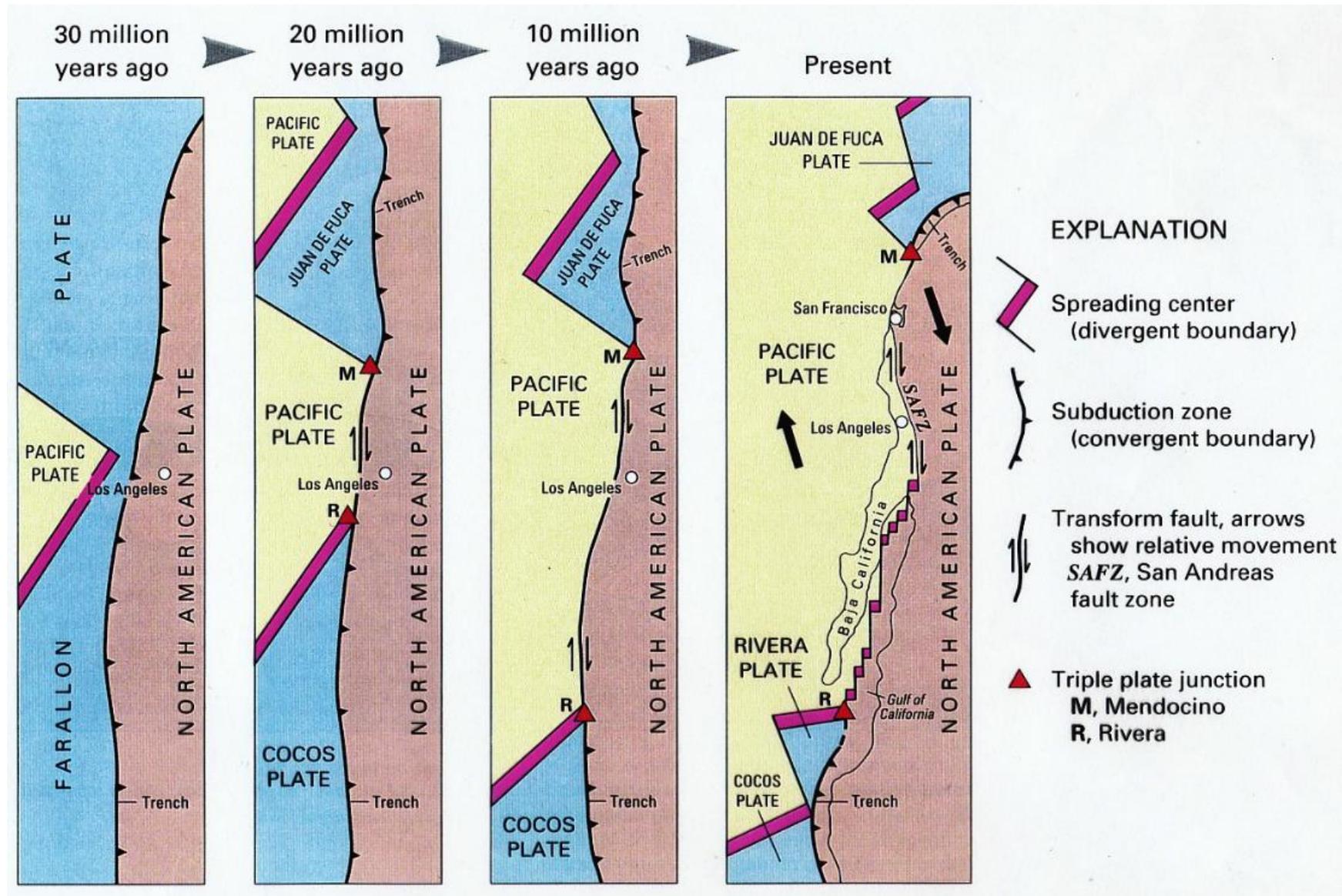
Tettonica delle placche: movimenti reciproci



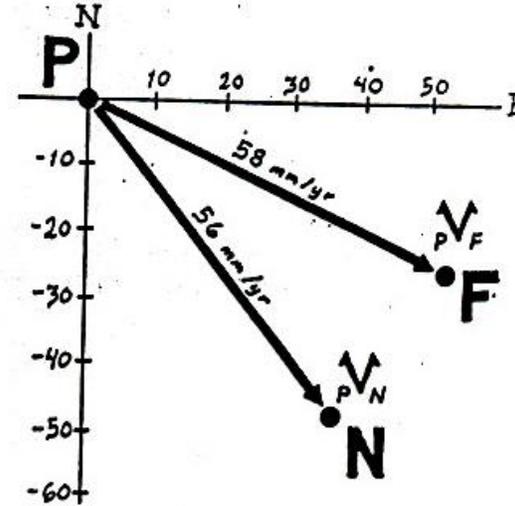
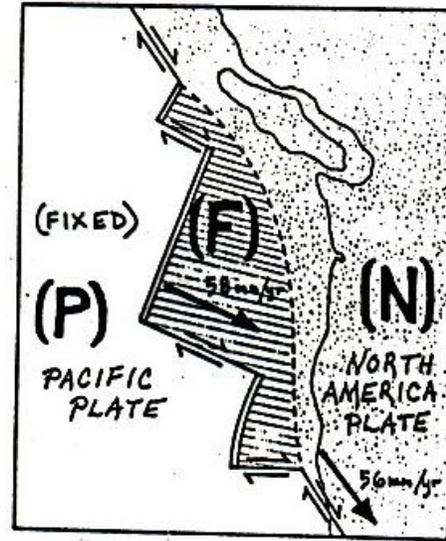
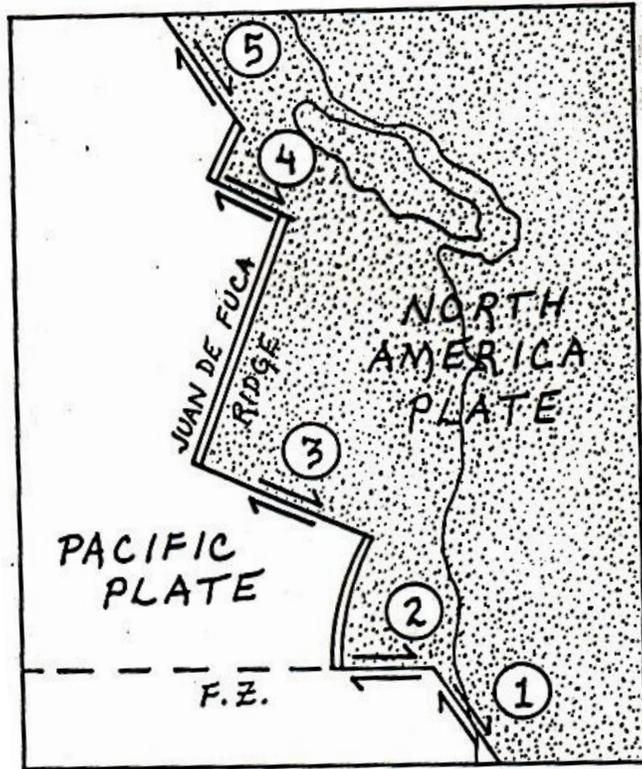
Tettonica delle placche: movimenti reciproci



Tettonica delle placche: movimenti reciproci



Tettonica delle placche: movimenti reciproci

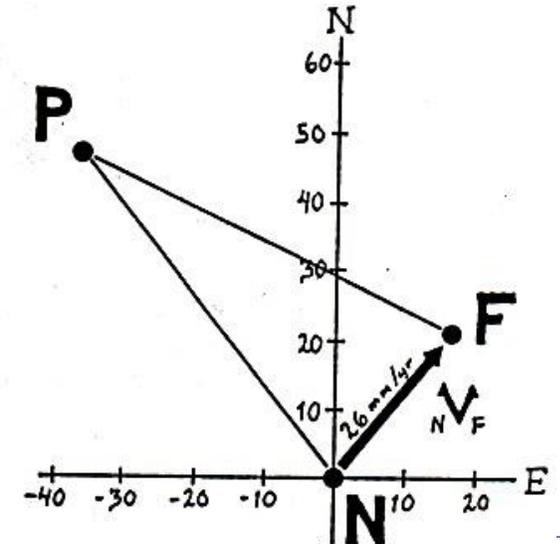
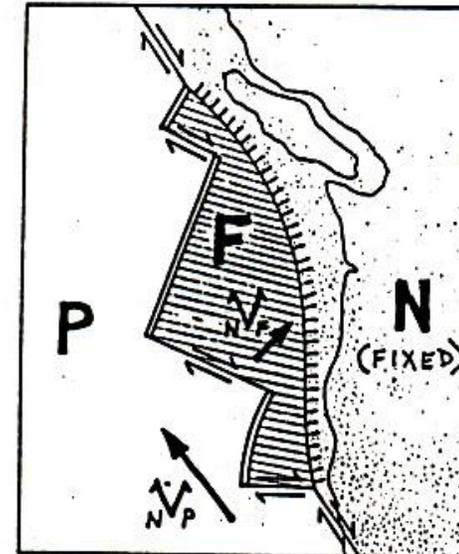


Misuriamo gli spostamenti della placca P ed N con sistemi GPS

Teniamo P fissa e riportiamo i vettori spostamento

Deduciamo il movimento di F rispetto ad N

(dal grafico non possiamo dire se N subduce sotto F o viceversa, lo diciamo grazie agli studi di tettonica)

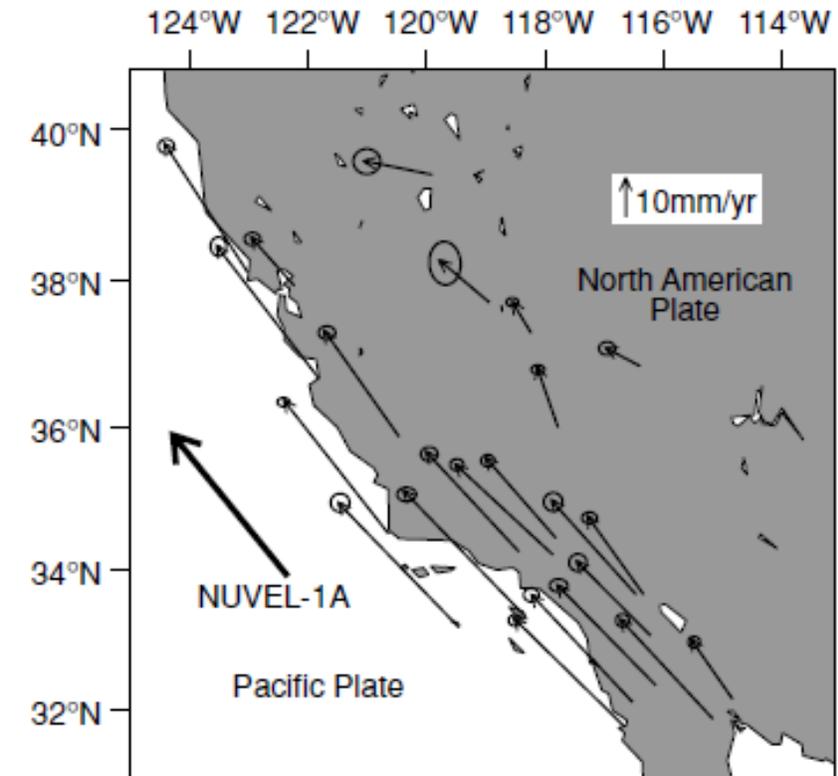


Tettonica delle placche: movimenti reciproci

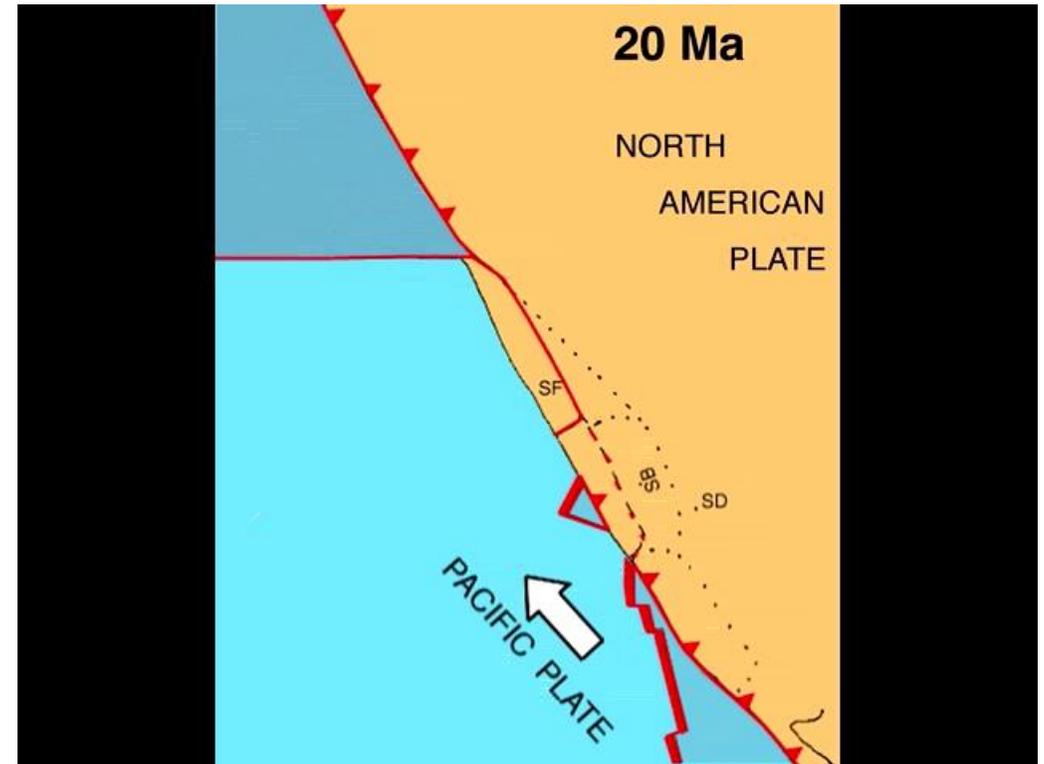
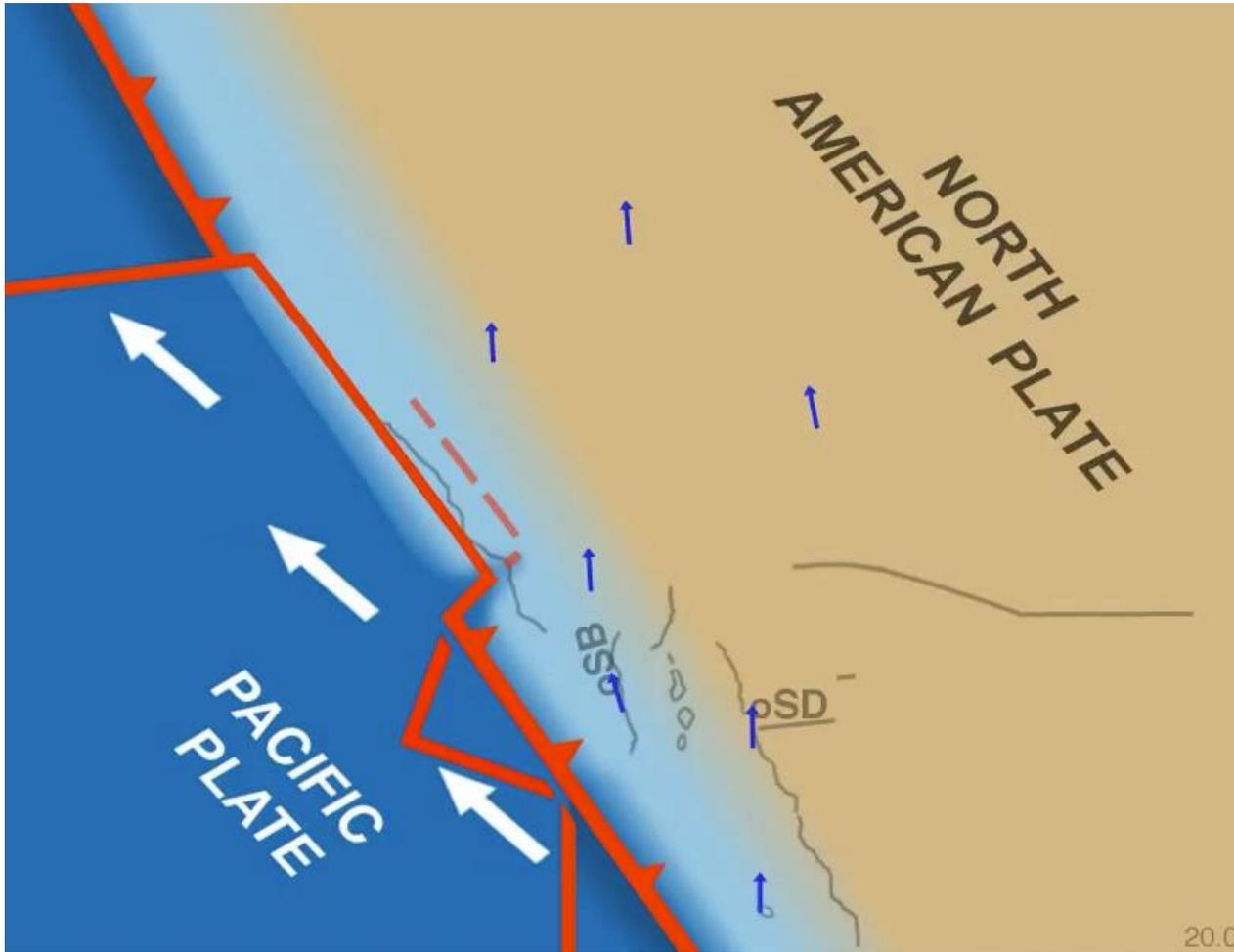
Plates	Latitude	Longitude	(10^{-7} deg yr $^{-1}$)
Africa–Antarctica	5.6°N	39.2°W	1.3
Africa–Eurasia	21.0°N	20.6°W	1.2
Africa–North America	78.8°N	38.3°E	2.4
Africa–South America	62.5°N	39.4°W	3.1
Australia–Antarctica	13.2°N	38.2°E	6.5
Pacific–Antarctica	64.3°S	96.0°E	8.7
South America–Antarctica	86.4°S	139.3°E	2.6
Arabia–Eurasia	24.6°N	13.7°E	5.0
India–Eurasia	24.4°N	17.7°E	5.1
Eurasia–North America	62.4°N	135.8°E	2.1
Eurasia–Pacific	61.1°N	85.8°W	8.6
Pacific–Australia	60.1°S	178.3°W	10.7
North America–Pacific	48.7°N	78.2°W	7.5
Cocos–North America	27.9°N	120.7°W	13.6
Nazca–Pacific	55.6°N	90.1°W	13.6
Nazca–South America	56.0°N	94.0°W	7.2

Note: The first plate moves anticlockwise with respect to the second plate as shown.

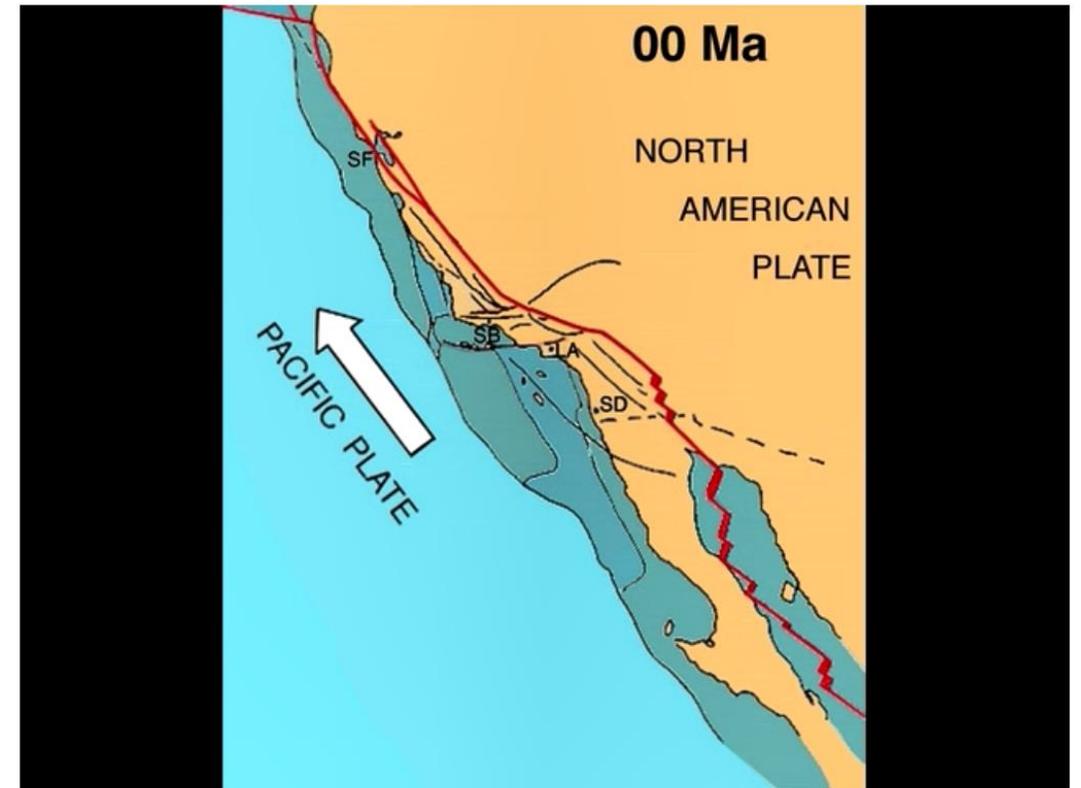
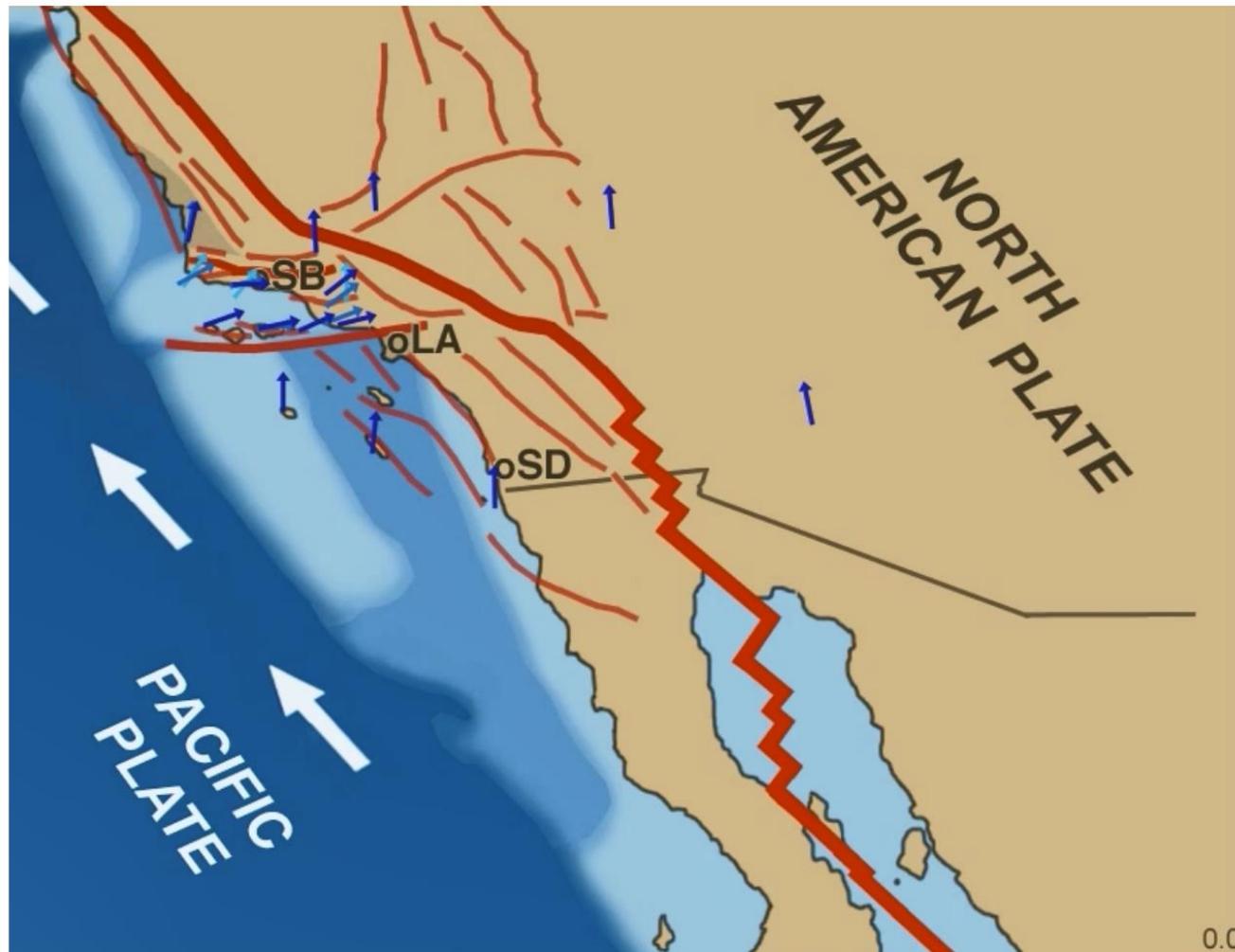
Source: After DeMets *et al.* (1990; 1994).



Tettonica delle placche: movimenti reciproci



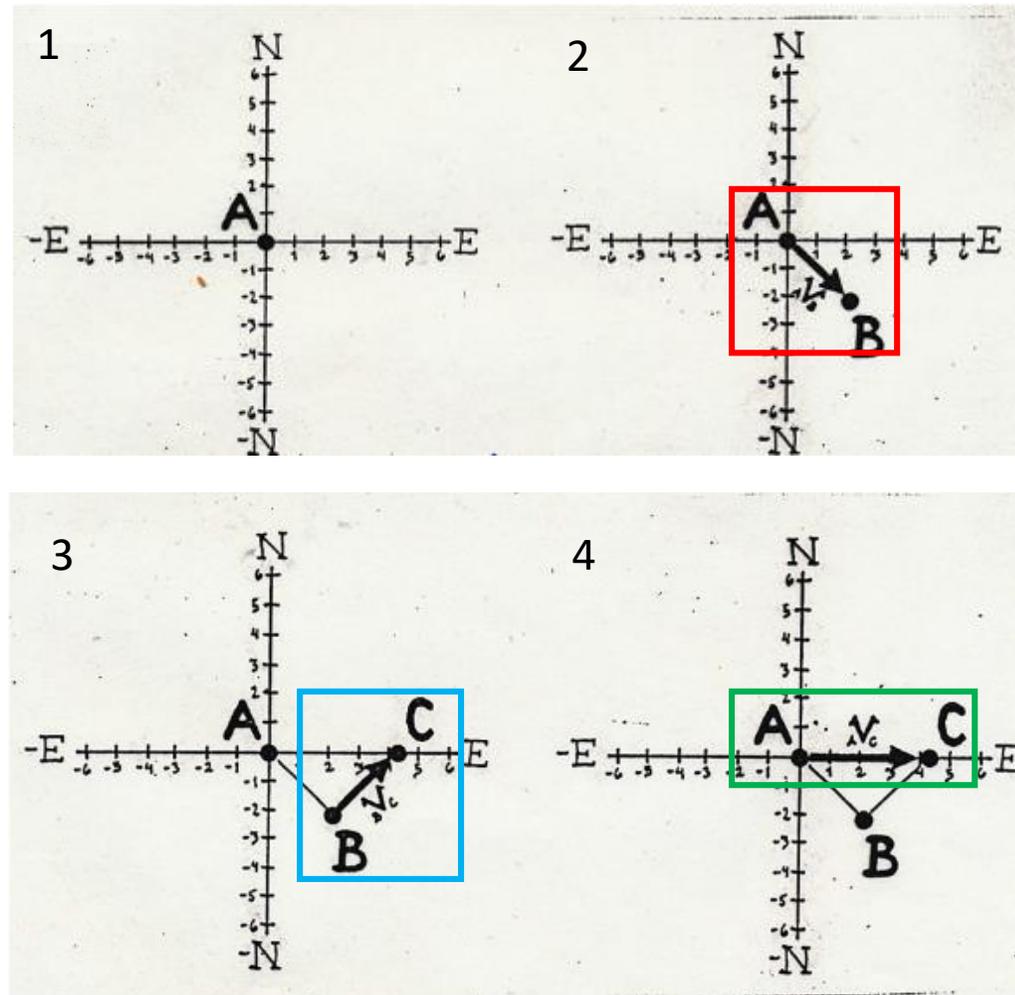
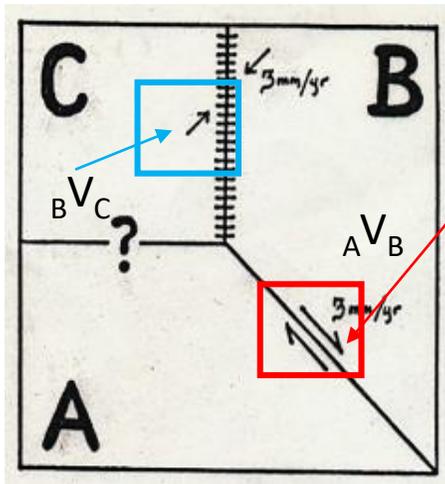
Tettonica delle placche: movimenti reciproci



Tettonica delle placche:
calcolo dei movimenti reciproci delle placche
e diagrammi di velocità –
esercizi

Tettonica delle placche: movimenti reciproci

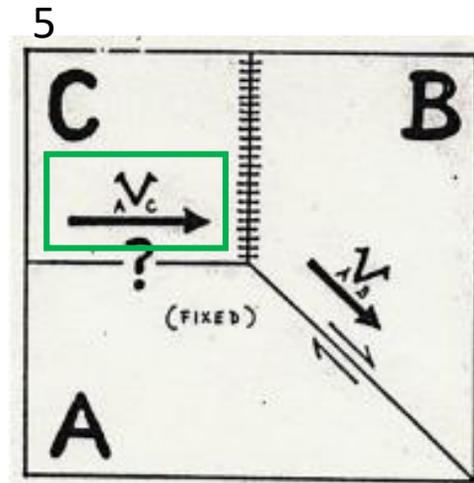
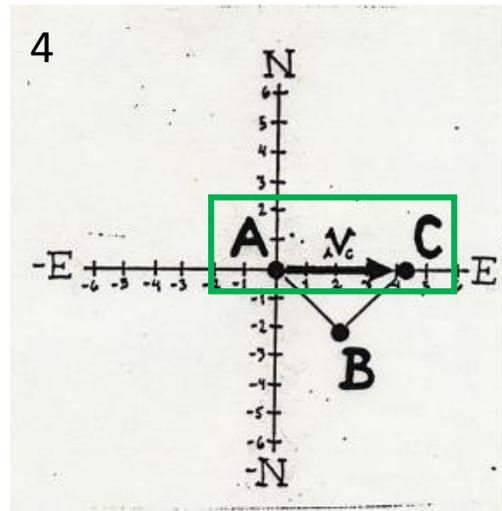
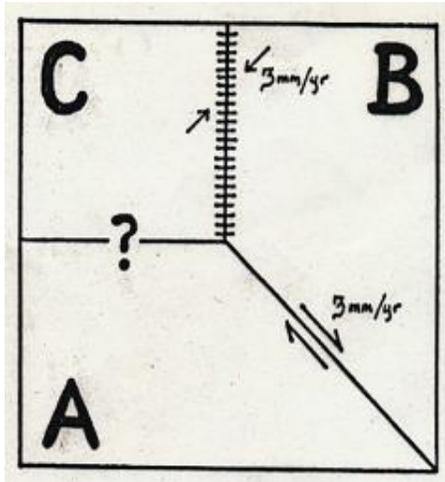
Esempio 1: Quale è il tipo di margine tra le placche A e C?



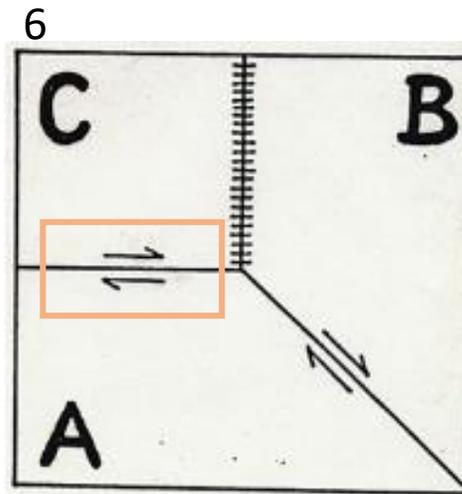
1. Considero la placca A fissa collocandola nel centro del diagramma delle velocità
2. Da A **segno** (direzione, verso, lunghezza) del vettore ${}_A V_B$ e indico B
3. Da B **segno** (direzione, verso, lunghezza) del vettore ${}_B V_C$ e indico C
4. Da A mi muovo verso C ed **individuo** il vettore ${}_C V_A$

Tettonica delle placche: movimenti reciproci

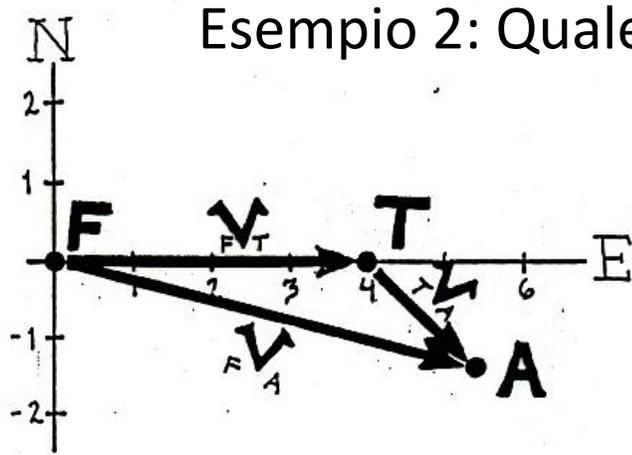
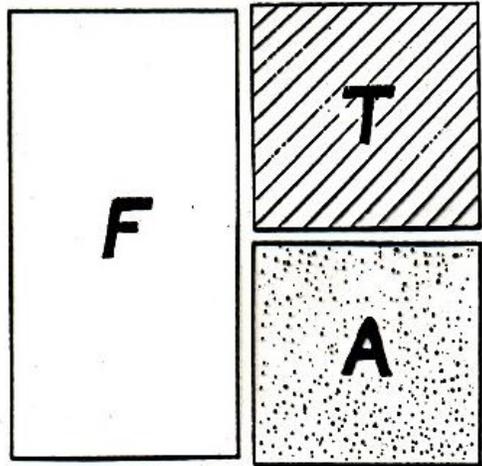
Esempio 1: Quale è il tipo di margine tra le placche A e C?



5. In corrispondenza del margine **riporto** il vettore ${}^C V_A$
6. Individuo il **tipo di margine** (trascorrente in questo caso)

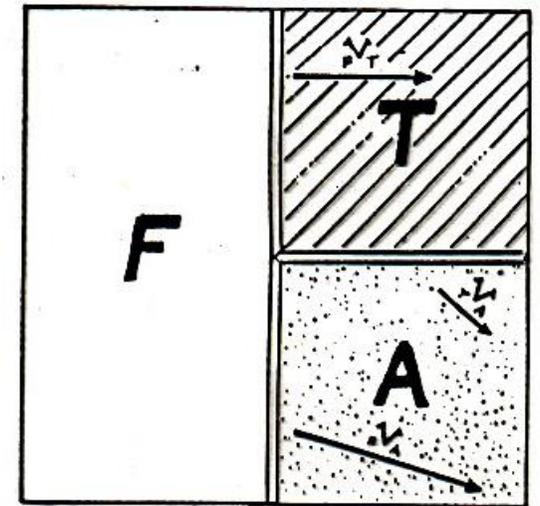
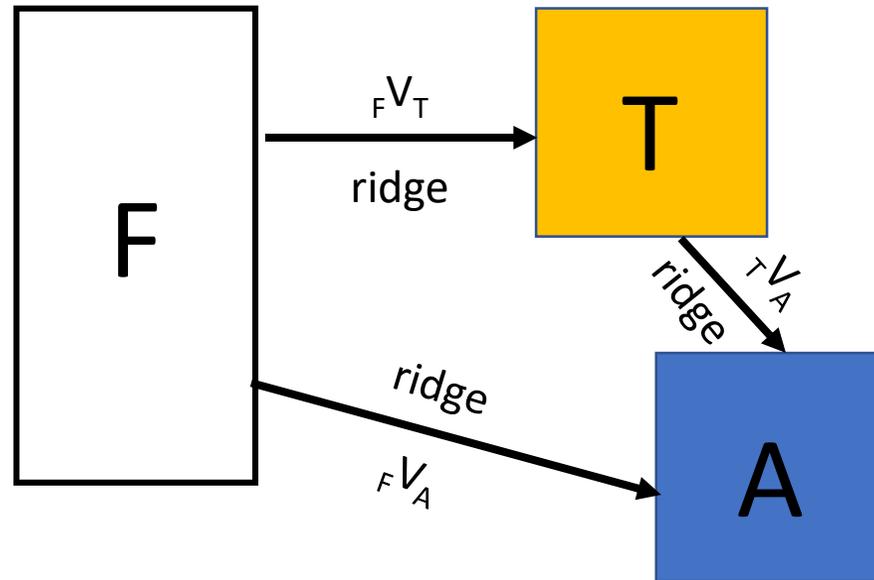
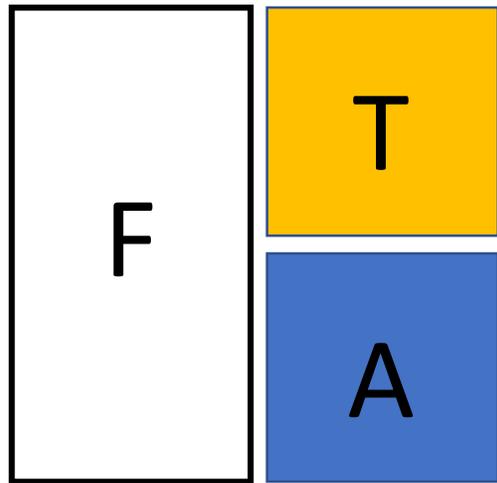


Tettonica delle placche: movimenti reciproci



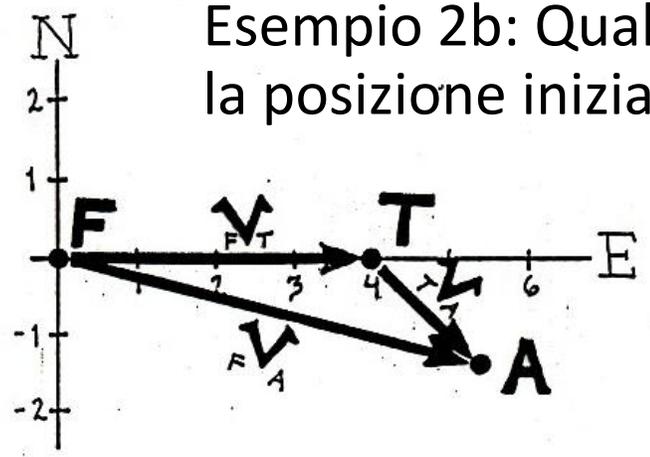
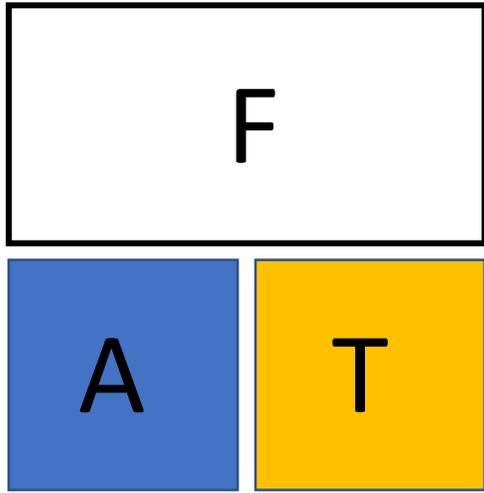
Esempio 2: Quale è il tipo di margine tra le placche?

Riporto i vettori sulle placche ed individuo i movimenti reciproci e quindi il tipo di margine

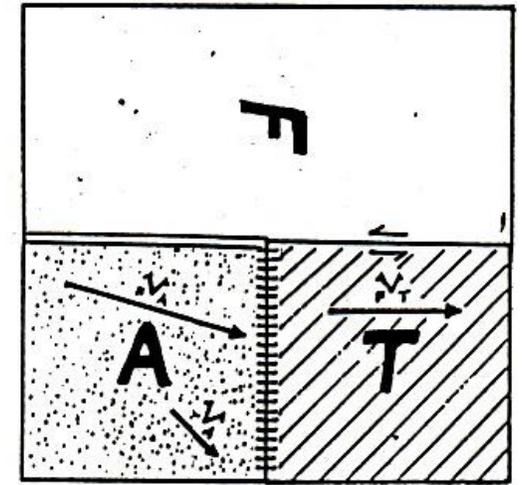
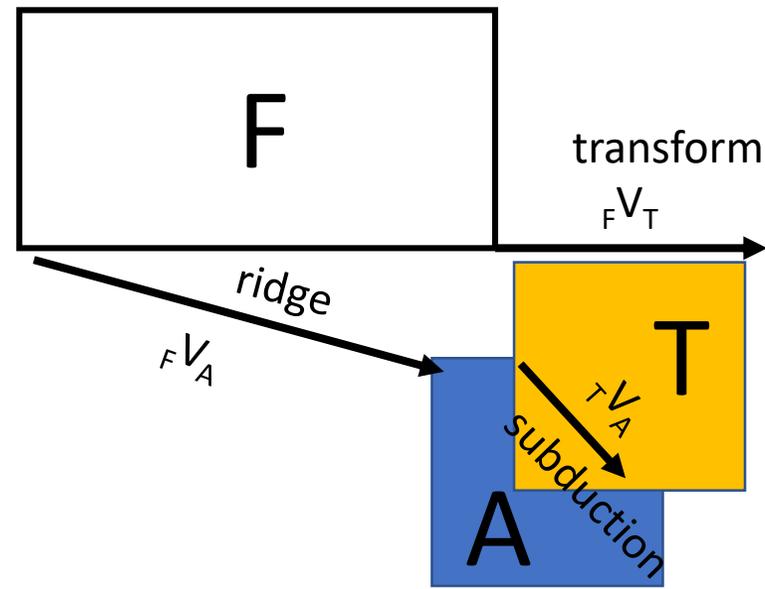


Tettonica delle placche: movimenti reciproci

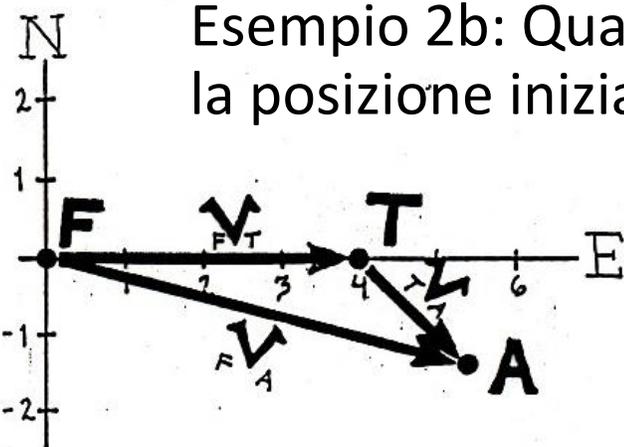
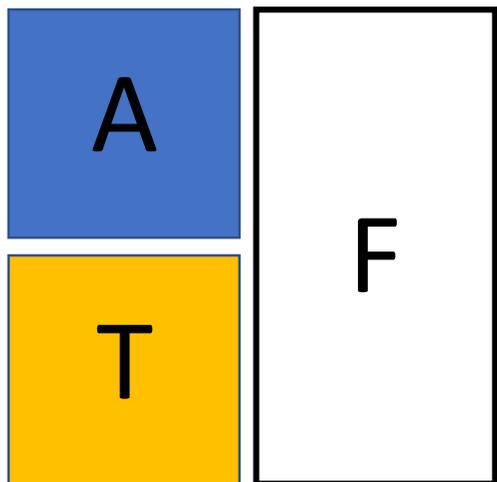
Esempio 2b: Quale è il tipo di margine tra le placche se ruotassimo la posizione iniziale delle tre placche?



Riporto i vettori sulle placche ed individuo i movimenti reciproci e quindi il tipo di margine

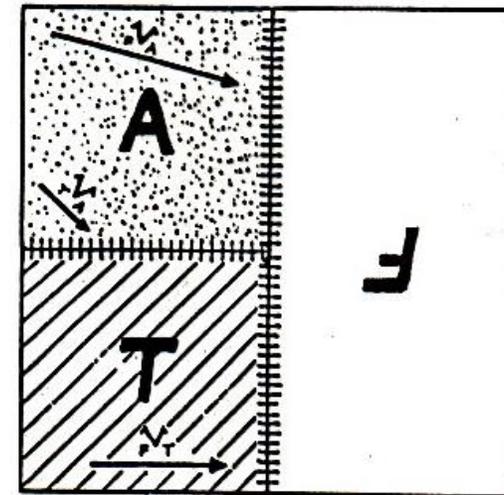
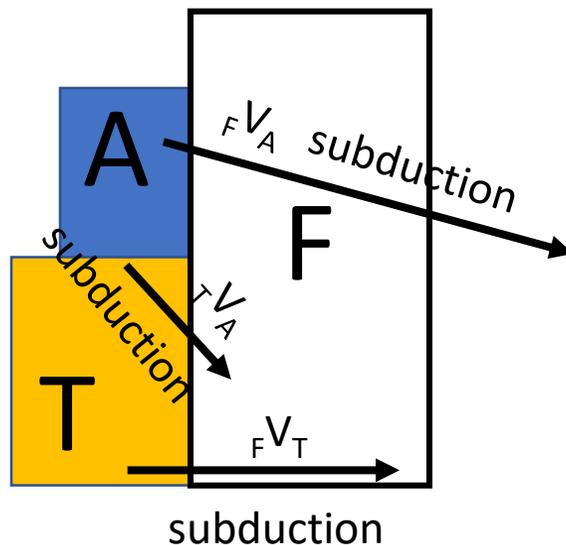


Tettonica delle placche: movimenti reciproci

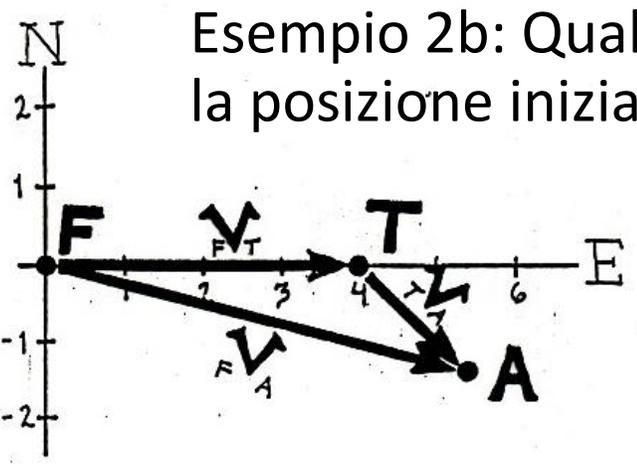
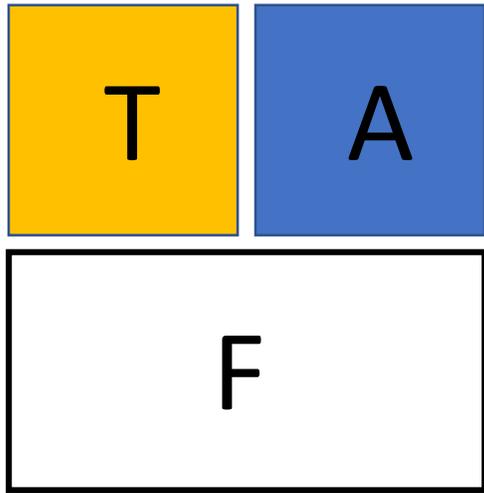


Esempio 2b: Quale è il tipo di margine tra le placche se ruotassimo la posizione iniziale delle tre placche?

Riporto i vettori sulle placche ed individuo i movimenti reciproci e quindi il tipo di margine

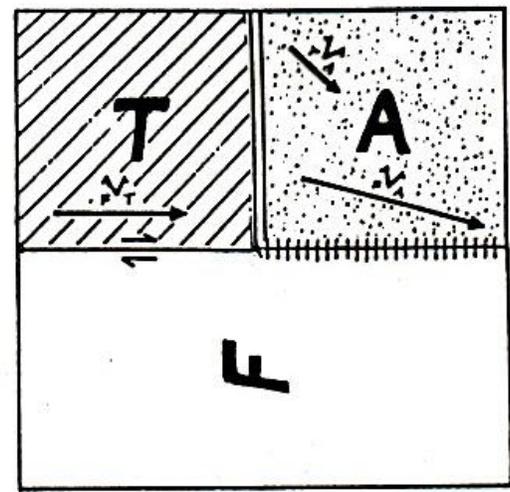
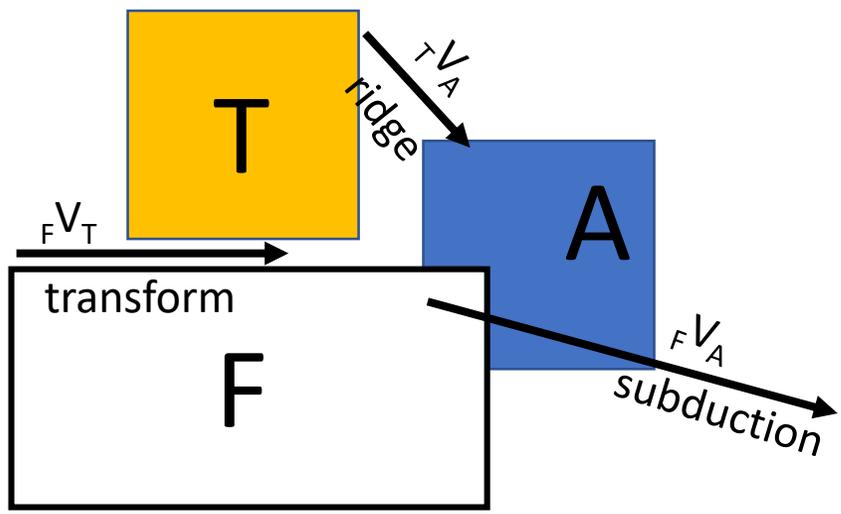


Tettonica delle placche: movimenti reciproci

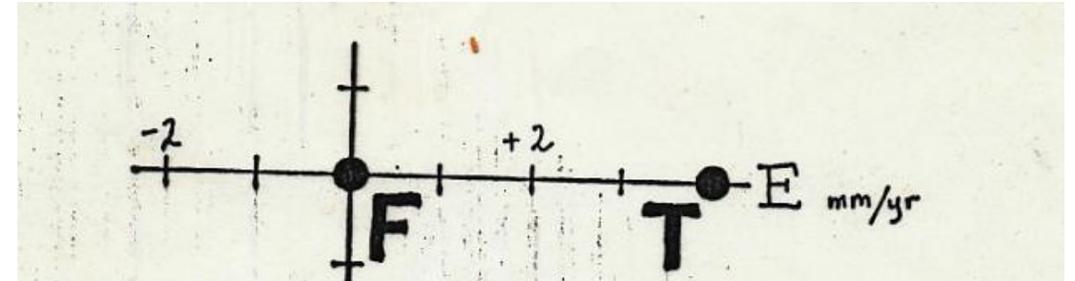
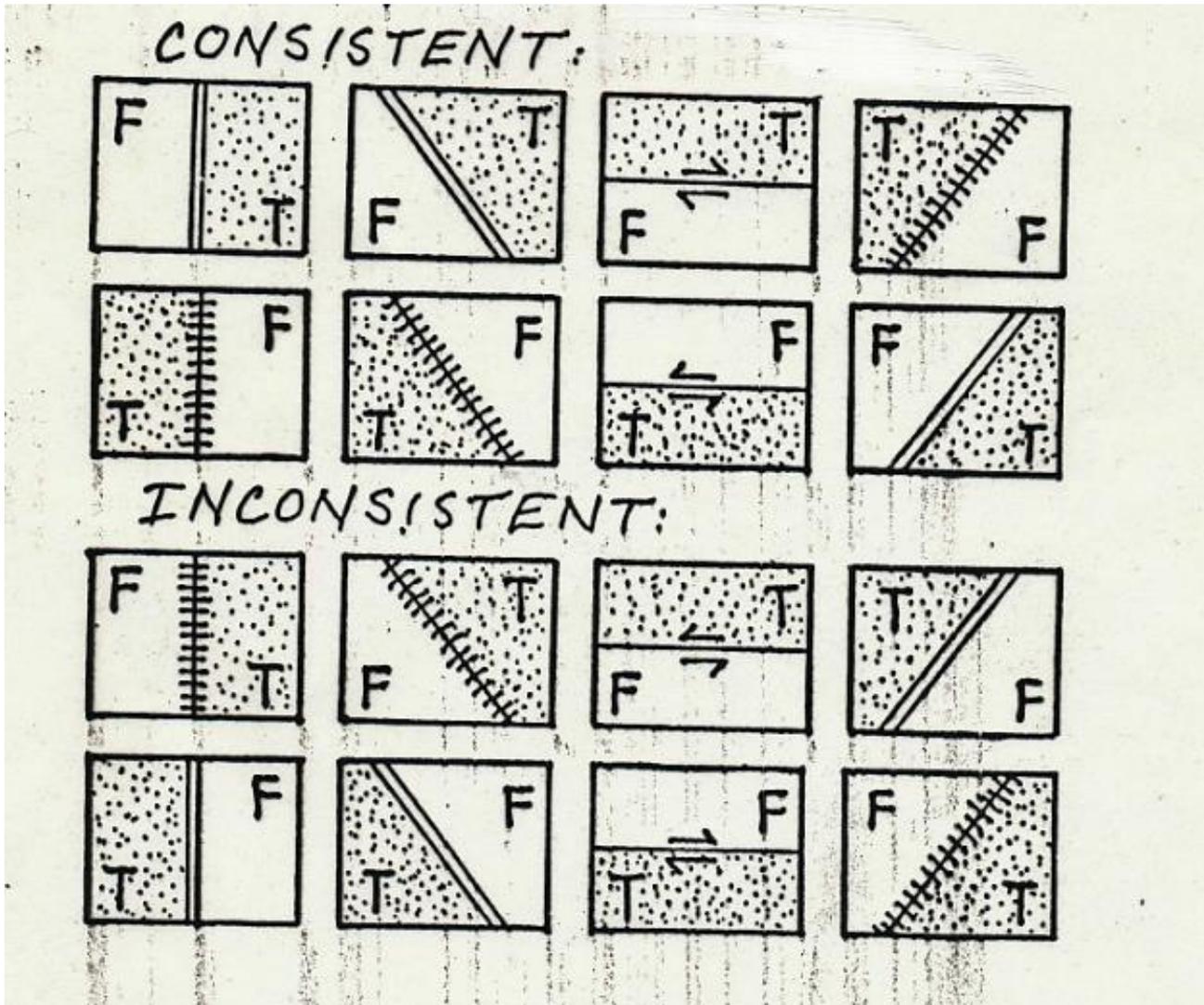


Esempio 2b: Quale è il tipo di margine tra le placche se ruotassimo la posizione iniziale delle tre placche?

Riporto i vettori sulle placche ed individuo i movimenti reciproci e quindi il tipo di margine



Tettonica delle placche: movimenti reciproci

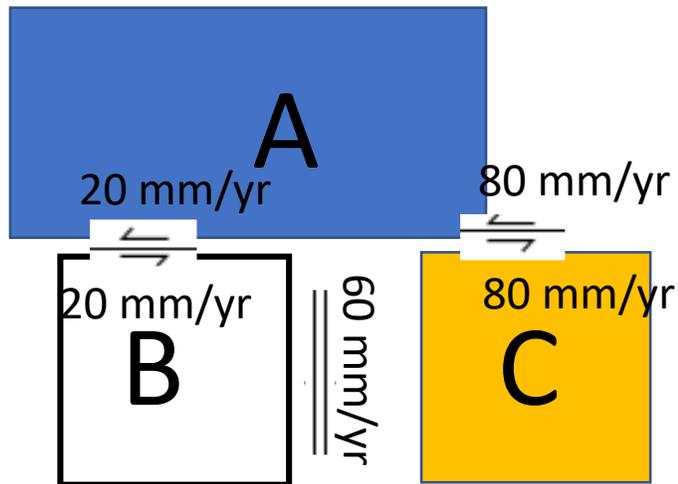
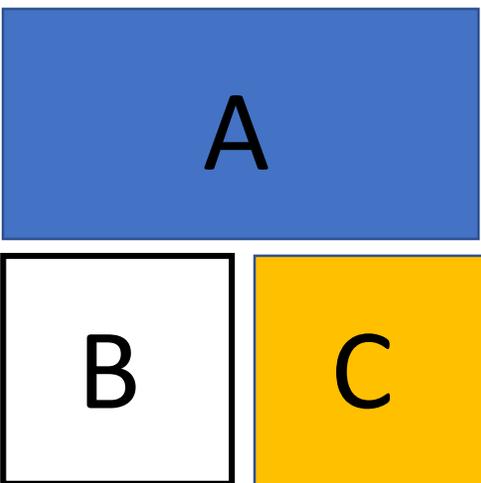
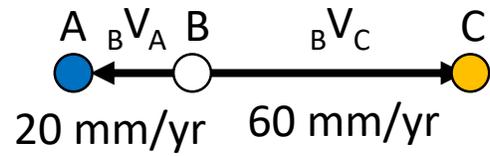
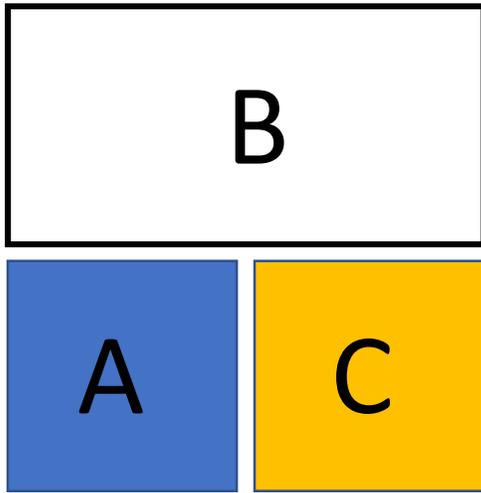


T si allontana da F:

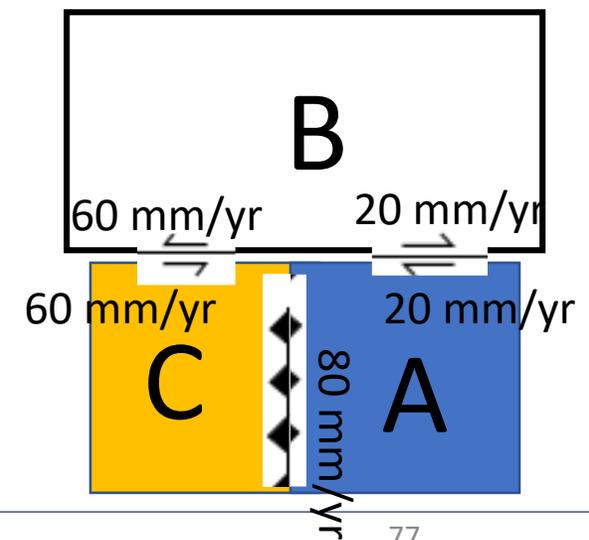
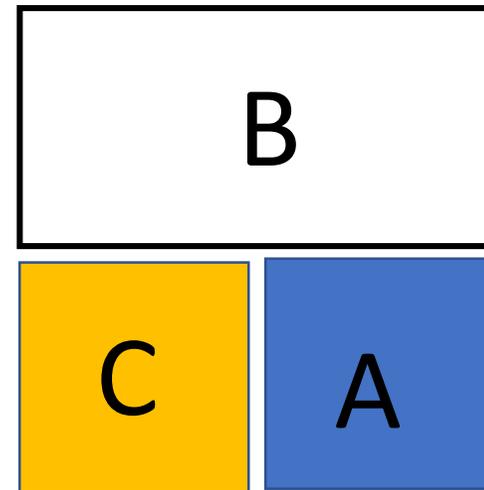
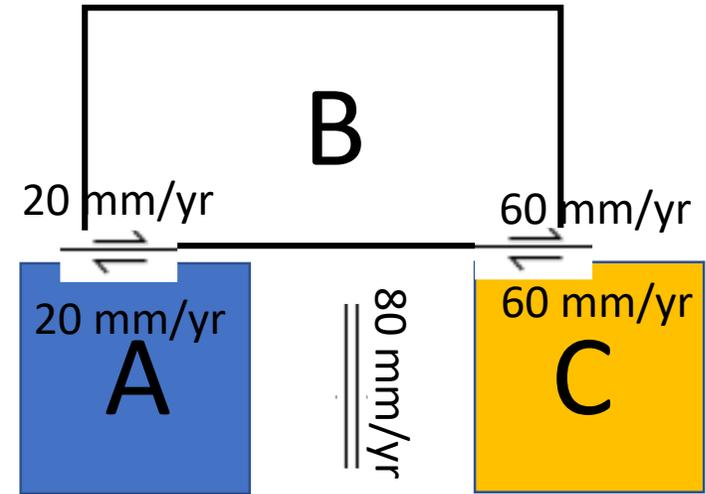
Nelle prime 8 situazioni è soddisfatto il movimento di allontanamento di T da F, nelle restanti 8 no

Tettonica delle placche: movimenti reciproci

Esercizi

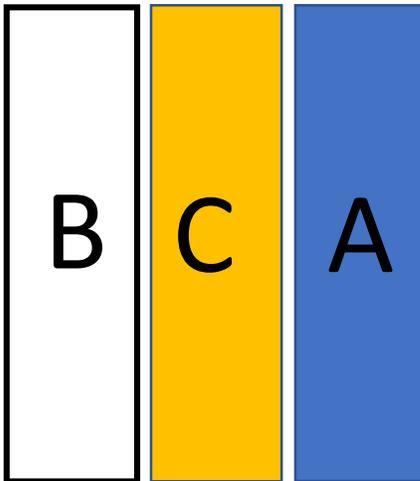
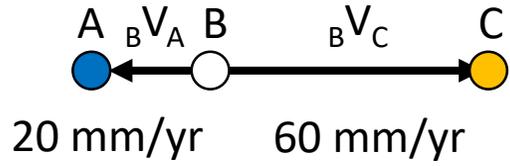
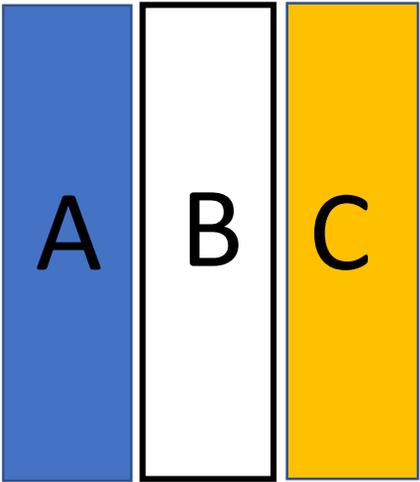


Soluzione

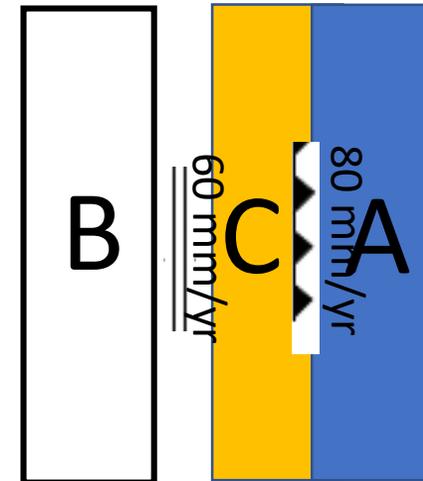
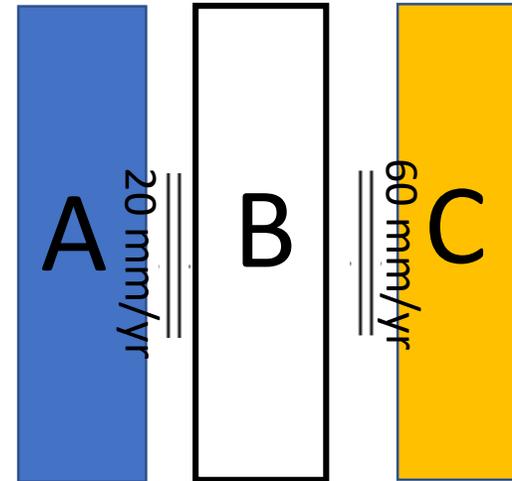


Tettonica delle placche: movimenti reciproci

Esercizi

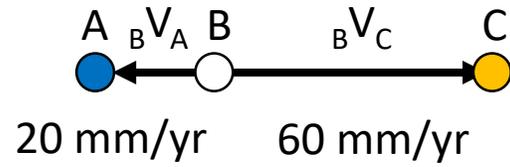
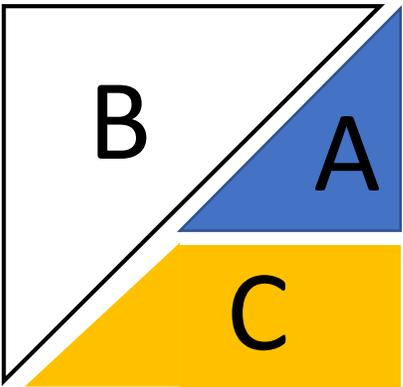
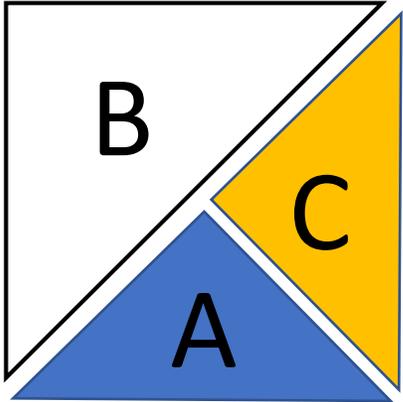


Soluzione

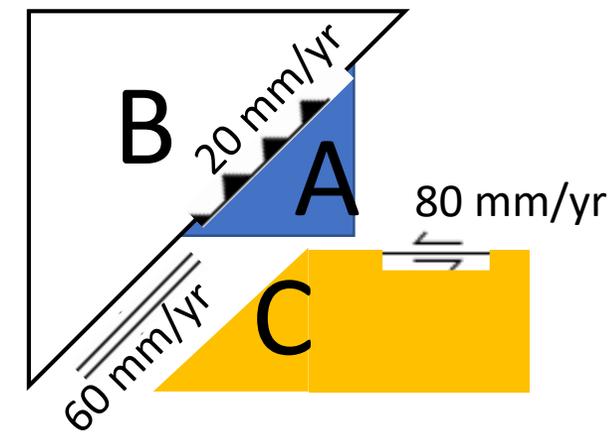
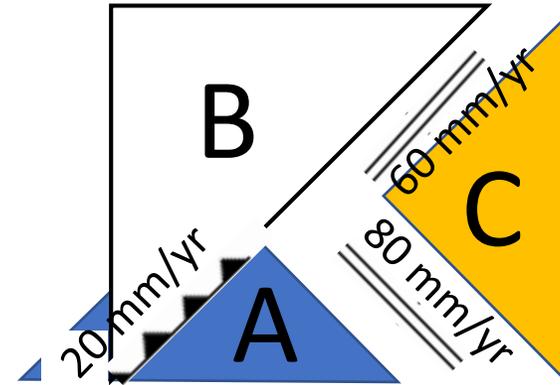


Tettonica delle placche: movimenti reciproci

Esercizi



Soluzione

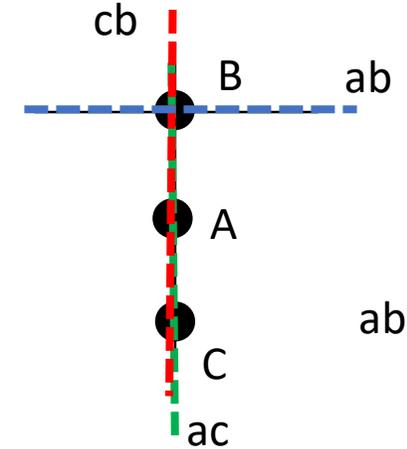
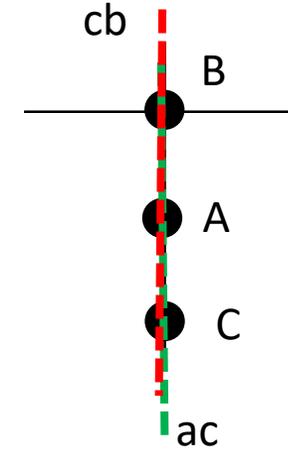
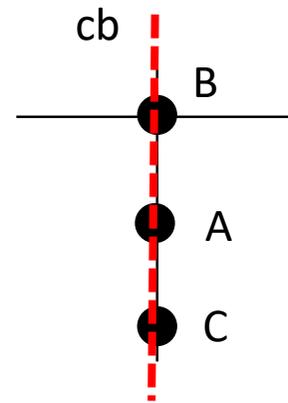
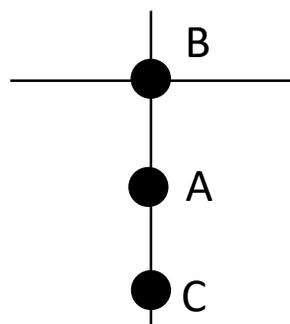
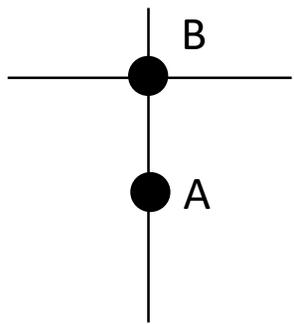
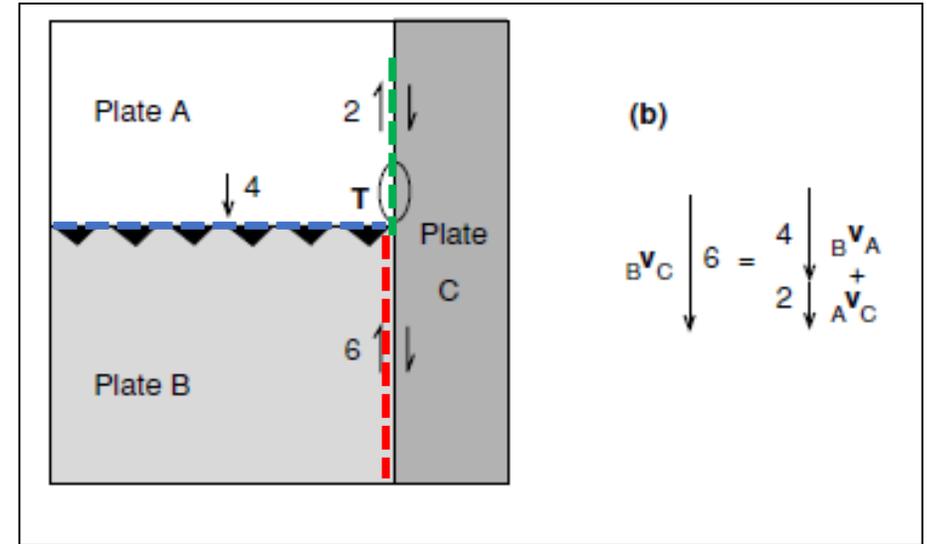


Tettonica delle placche: movimenti reciproci

Il margine occidentale della placca C è trasforme.

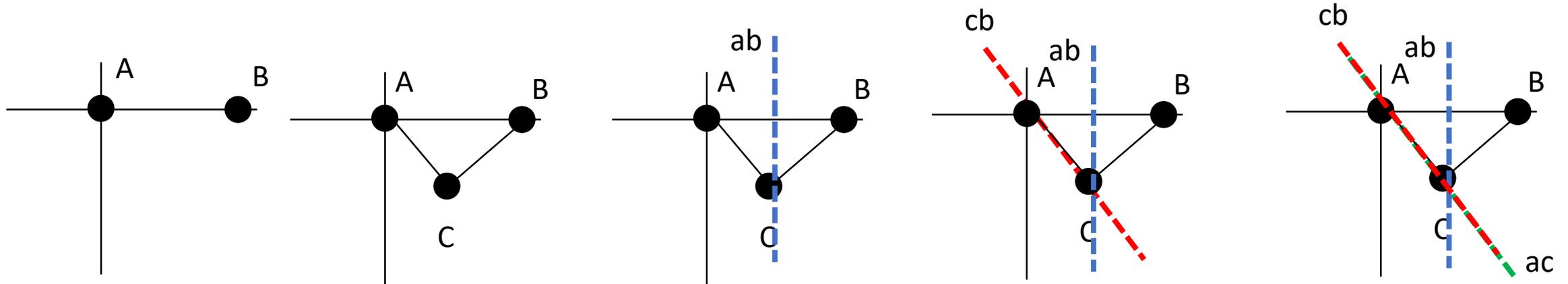
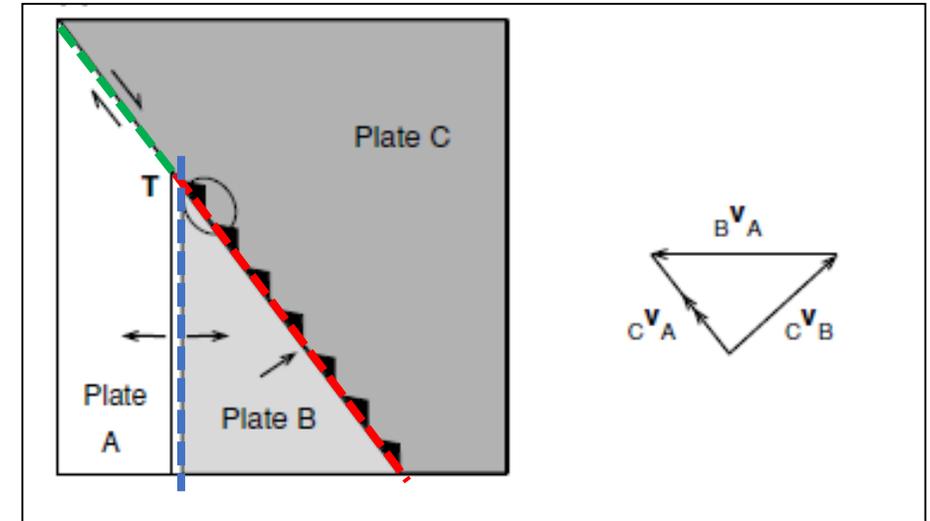
$${}_B V_A = 4 \text{ cm/yr} \quad {}_A V_C = 2 \text{ cm/yr} \quad \rightarrow \quad {}_B V_C = 6 \text{ cm/yr}$$

La placca B sovrascorre sulla placca A (ovvero la placca A subduce sotto la placca B) ad una velocità di 4 cm/yr



Tettonica delle placche: movimenti reciproci

Il margine tra le placche A e B è una dorsale, quello tra le placche A e C è una faglia trasformata e quello tra le placche B e C è una zona di subduzione.

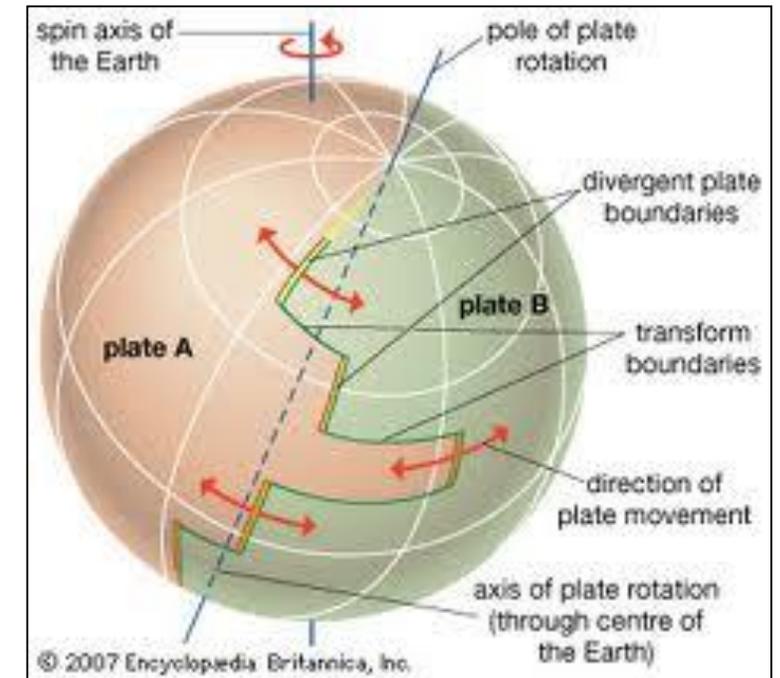


Tettonica delle placche: movimenti reciproci

Cosa succede realmente sulla Terra che è una sfera?

Teorema del punto fisso di Eulero:

1. un movimento generico di un corpo rigido con un punto fisso è equivalente ad una rotazione intorno ad un asse che passa per quel punto fisso



Tettonica delle placche: movimenti reciproci

Cosa succede realmente sulla Terra che è una sfera?

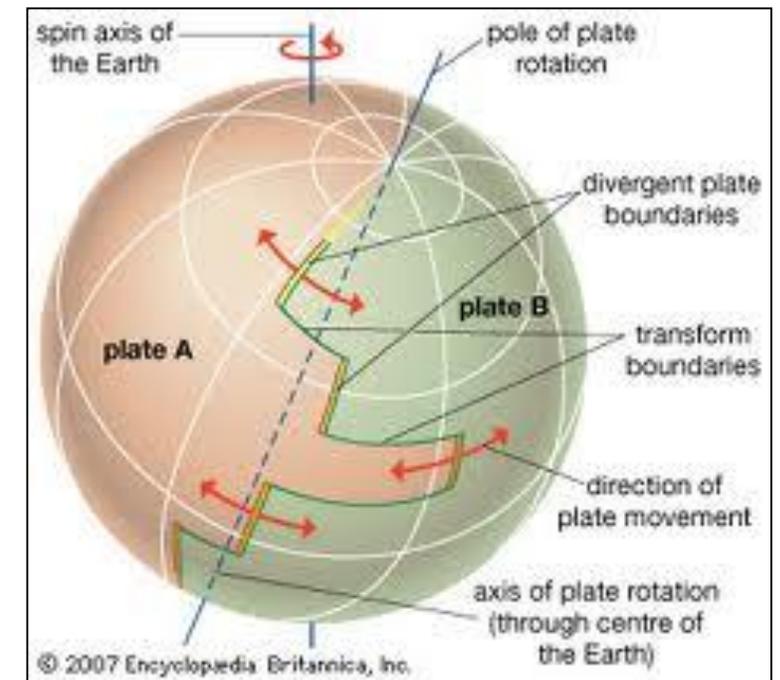
Teorema del punto fisso di Eulero:

1. un movimento generico di un corpo rigido con un punto fisso è equivalente ad una rotazione intorno ad un asse che passa per quel punto fisso

2. Ciascun movimento sulla superficie della Terra può essere considerata come una rotazione attorno ad un asse opportunamente scelto passante per il centro della Terra

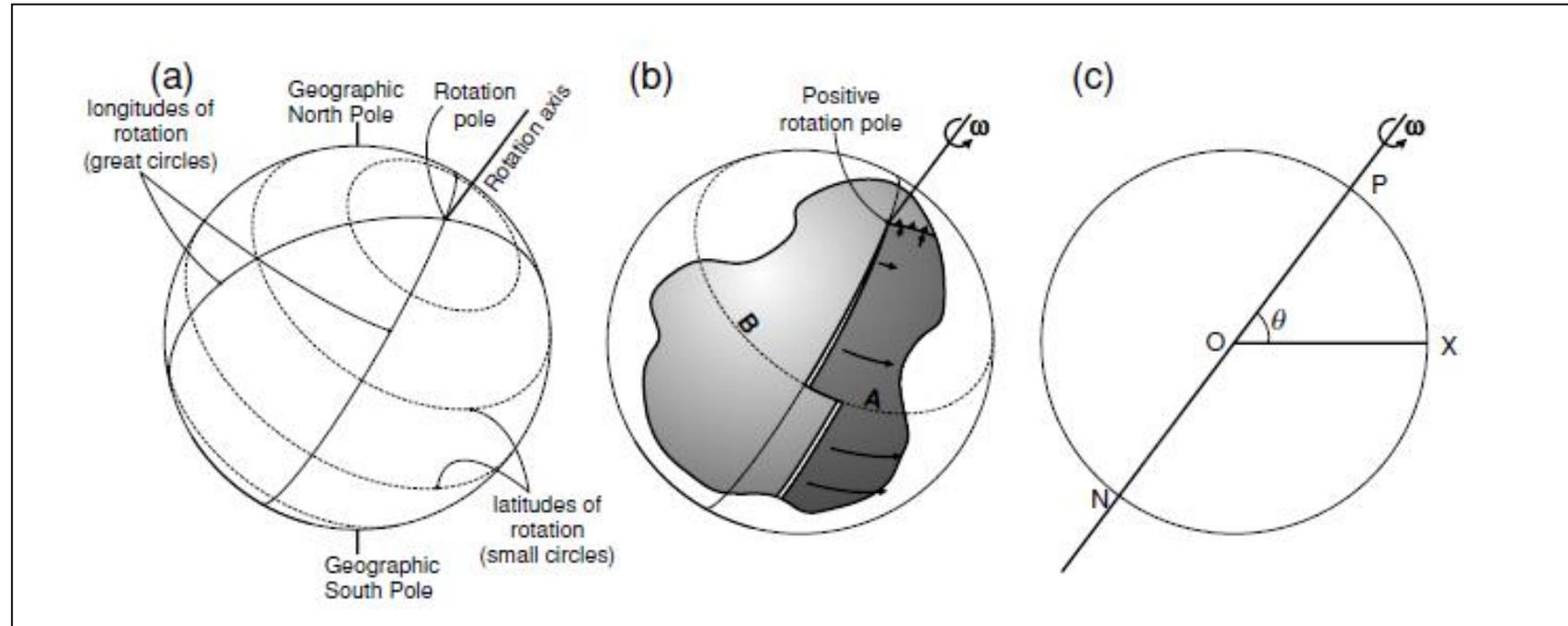
I poli di rotazione o i poli di Eulero sono i due punti in cui l'asse di rotazione taglia la superficie terrestre ->

La velocità di spostamento tra le due placche è definita dalla velocità angolare



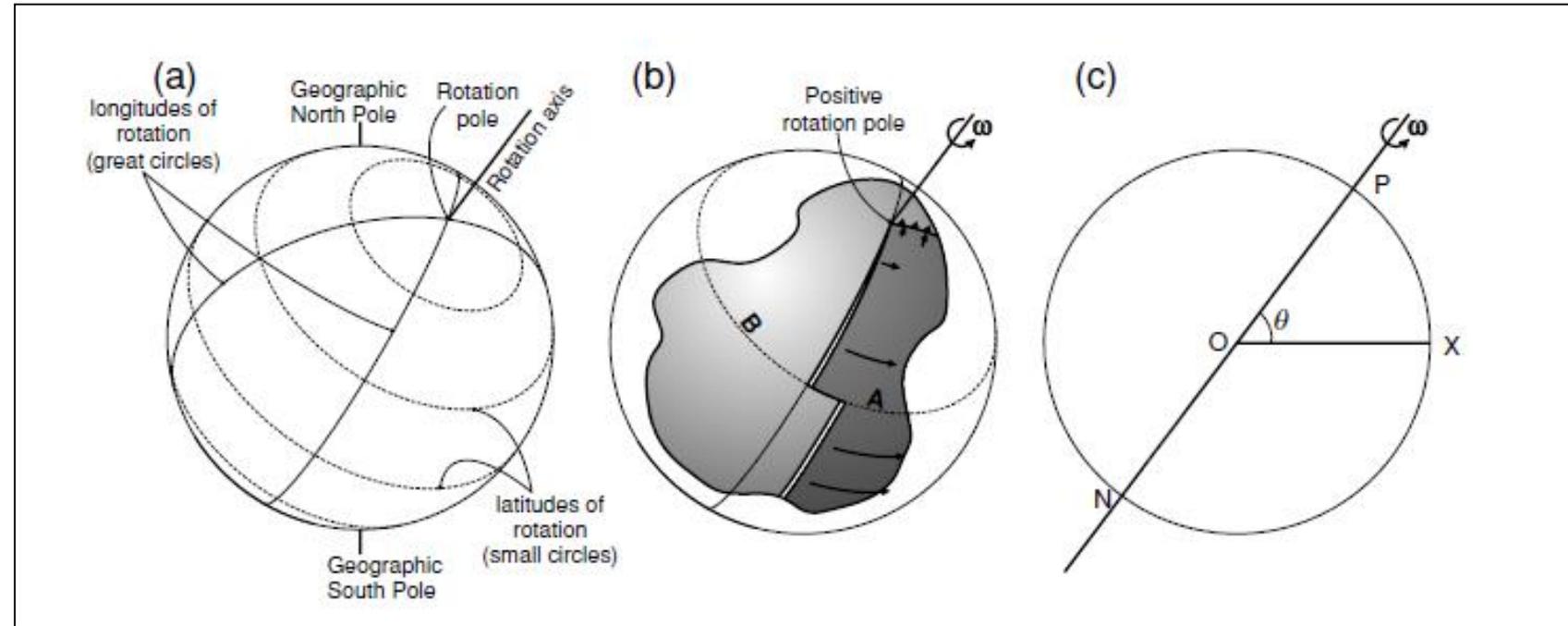
Tettonica delle placche: movimenti reciproci

(a) Le linee di latitudine di rotazione attorno ai poli di rotazione sono piccoli cerchi (mostrati tratteggiati) mentre le linee di longitudine di rotazione sono grandi cerchi (cioè cerchi con lo stesso diametro della Terra)



Tettonica delle placche: movimenti reciproci

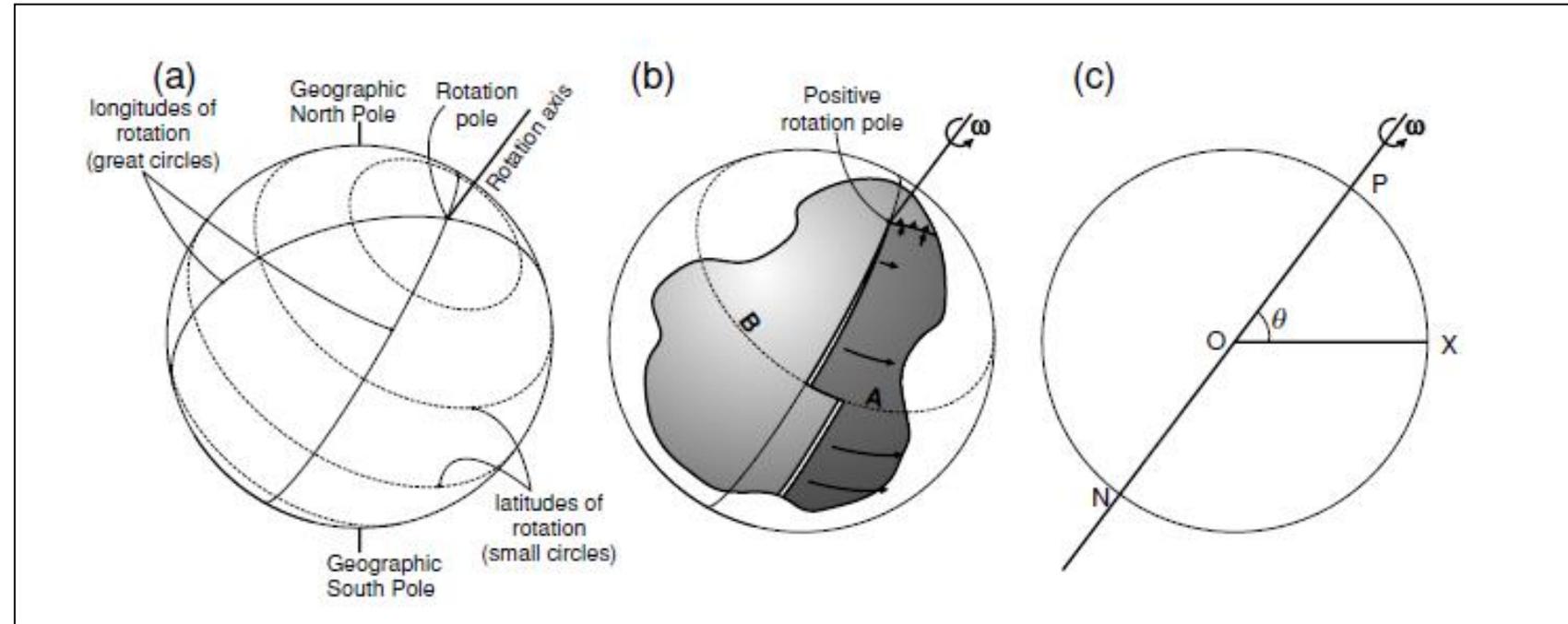
(a) Le linee di latitudine di rotazione attorno ai poli di rotazione sono piccoli cerchi (mostrati tratteggiati) mentre le linee di longitudine di rotazione sono grandi cerchi (cioè cerchi con lo stesso diametro della Terra)



(b) Margini costruttivi, distruttivi e conservativi tra le piastre A e B. Si assume la piastra B fissa così che il movimento della piastra A sia relativo alla piastra B. **Il polo di rotazione visibile è positivo** (il movimento è in senso antiorario se visto dall'esterno Terra). Si noti che **le velocità di allontanamento e subduzione aumentano con la distanza dal polo di rotazione**. La faglia trasforme è un arco di un piccolo cerchio (mostrato tratteggiato) e quindi è perpendicolare all'asse della dorsale/ridge. **Quando il margine della placca supera il polo di rotazione, il margine cambia da costruttivo a distruttivo, cioè da dorsale/ridge a zona di subduzione.**

Tettonica delle placche: movimenti reciproci

(c) Una sezione trasversale attraverso il centro della Terra O. P e N sono i poli di rotazione positivo (antiorario) e negativo e X è un punto sul margine della piastra.



La velocità relativa, v , di un certo punto sulla superficie terrestre è funzione della velocità angolare, ω , secondo:

$$v = \omega R \sin \theta$$

R: raggio della Terra

θ : angolo tra il polo di rotazione e il punto in questione.

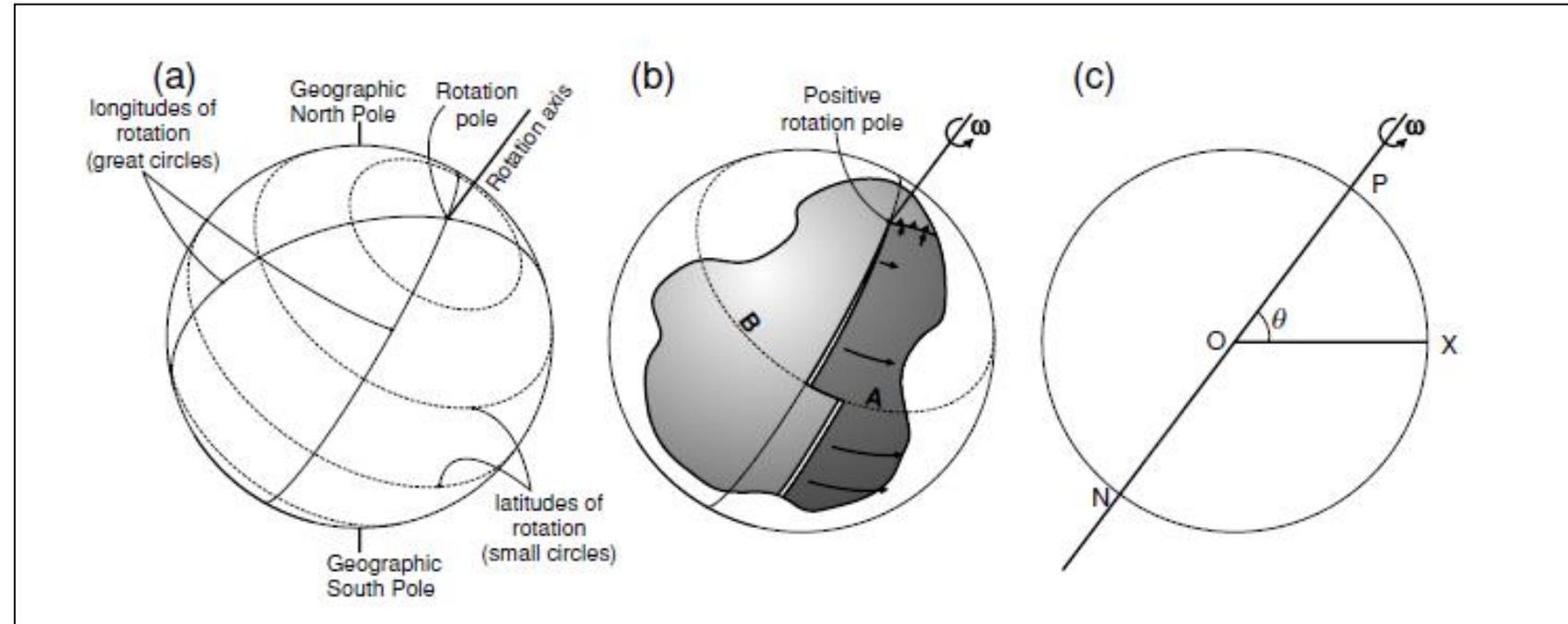
Tettonica delle placche: movimenti reciproci

Pertanto:

la velocità relativa è uguale a zero ai poli, dove $\theta=0^\circ$, ed è un massimo all'equatore, dove $\theta=90^\circ$.

la velocità relativa è costante lungo piccoli cerchi definiti da $\theta = \text{cost}$

NB: una grande velocità angolare non significa una grande velocità relativa



Tettonica delle placche: movimenti reciproci

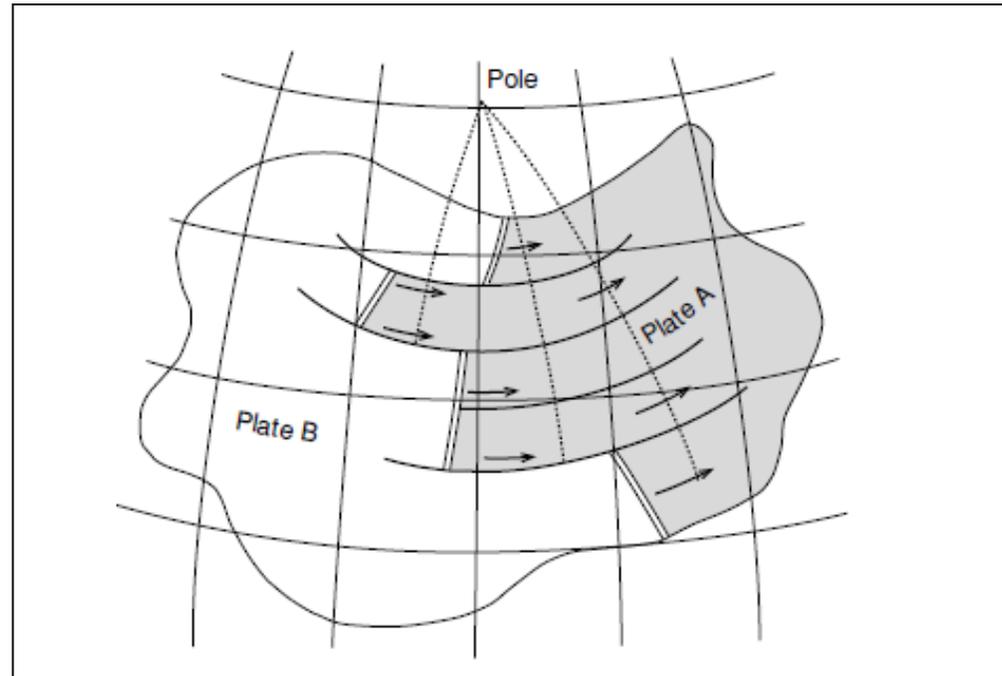
Esistono più metodi per trovare i poli di rotazione istantanei* odierni e le velocità angolari relative tra coppie di placche.

*Istantaneo si riferisce a un istante geologico: significa un valore mediato su un periodo di tempo che va da pochi anni a qualche milione di anni, a seconda del metodo utilizzato.

Metodo 1: determinazione locale della direzione del moto relativo tra due placche mediante lo strike delle faglie attive trasformi

Poiché le faglie trasformi sulle dorsali sono molto più facili da riconoscere e più comuni delle faglie trasformi lungo i confini distruttivi, questo metodo viene utilizzato principalmente per trovare i poli di rotazione per le placche su entrambi i lati di una dorsale oceanica. Il movimento relativo delle faglie trasformi è parallelo alla faglia ed è costante lungo la faglia. Ciò significa che le **faglie sono archi di piccoli cerchi attorno al polo di rotazione**. Il polo di rotazione deve quindi giacere da qualche parte sul cerchio grande che è perpendicolare a quel cerchio piccolo. Quindi, se si possono usare due o più faglie trasformi, l'intersezione dei cerchi massimi è la posizione del polo di rotazione

Tettonica delle placche: movimenti reciproci



Su una Terra sferica il moto della piastra A rispetto alla piastra B deve essere una rotazione attorno a un polo. Tutte le faglie trasformi sul confine tra le piastre A e B devono essere piccoli cerchi attorno a quel polo. Le faglie trasformi possono essere utilizzate per localizzare il polo: si trova all'intersezione dei grandi cerchi che sono perpendicolari

Tettonica delle placche: movimenti reciproci

Metodo 2: **determinare** (dalla spaziatura delle anomalie magnetiche oceaniche)

la velocità di allontanamento in varie posizioni lungo la dorsale

La velocità di allontanamento lungo il confine di una placca costruttiva cambia come il seno della distanza angolare θ dal polo di rotazione. Quindi è possibile stimare il polo di rotazione e la velocità angolare

Metodo 3: **soluzione del piano di faglia o dei meccanismi focali**

L'analisi dei dati di un terremoto può fornire la direzione del moto e il piano di faglia su cui si è verificato il terremoto. La soluzione del piano di faglia per i terremoti lungo il confine di una placca può fornire la direzione del moto relativo tra le due placche

Metodo 4: **rilievi dei movimenti in superficie**

Laddove i confini della placca arrivano sulla superficie, è possibile individuare gli spostamenti (su grandi distanze e lunghi periodi di tempo) per determinare il movimento relativo locale

Tettonica delle placche: movimenti reciproci

Metodo 5: **utilizzo di dati satellitari**

I satelliti hanno reso possibile misurare i movimenti istantanei delle placche con una certa precisione.

Un metodo utilizza un sistema di raggio **laser** (SLR) per determinare le differenze di distanza tra due siti sulla superficie terrestre in un periodo di anni.

Un altro metodo, l'interferometria a base molto lunga (VLBI), utilizza quasar per la sorgente del segnale e radiotelescopi terrestri come ricevitori. Anche in questo caso si misura la differenza nella distanza tra due siti/telescopi in un periodo di tempo.

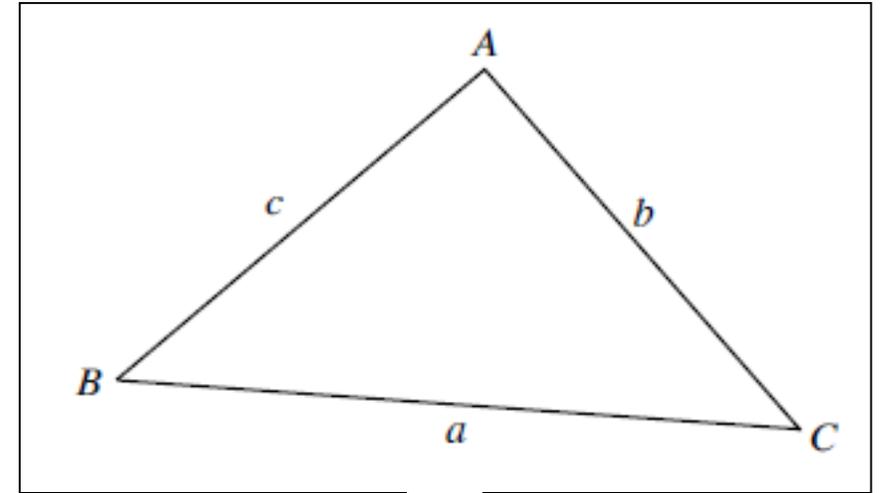
Un terzo metodo utilizza il sistema di posizionamento globale basandosi sulla rete mondiale di ricevitori **GPS**. Ha una precisione adatta alla geodinamica (1 cm nel posizionamento e $<10^{-3}$ arcsec nelle stime della posizione dei poli). Si chiama International GPS Service for Geodynamics (IGS) ed è una rete globale permanente di ricevitori. L'analisi dei dati dal 1991 al 1996 mostra per tutte le località un buon accordo delle velocità misurate con GPS con quelle determinate geologicamente e per alcune l'intervallo di confidenza è superiore al 95%

Tettonica delle placche: movimenti reciproci

I lati di un triangolo su una superficie piana sono rette e la somma dei suoi angoli interni è 180° (o π radianti).

Siano gli angoli A, B e C e le lunghezze dei lati opposti a ciascuno di questi angoli siano a, b e c

Le dimensioni degli angoli e le lunghezze dei lati sono regolate dalla legge del seno



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

$$a^2 = b^2 + c^2 - 2bc \cos A$$

Tettonica delle placche: movimenti reciproci

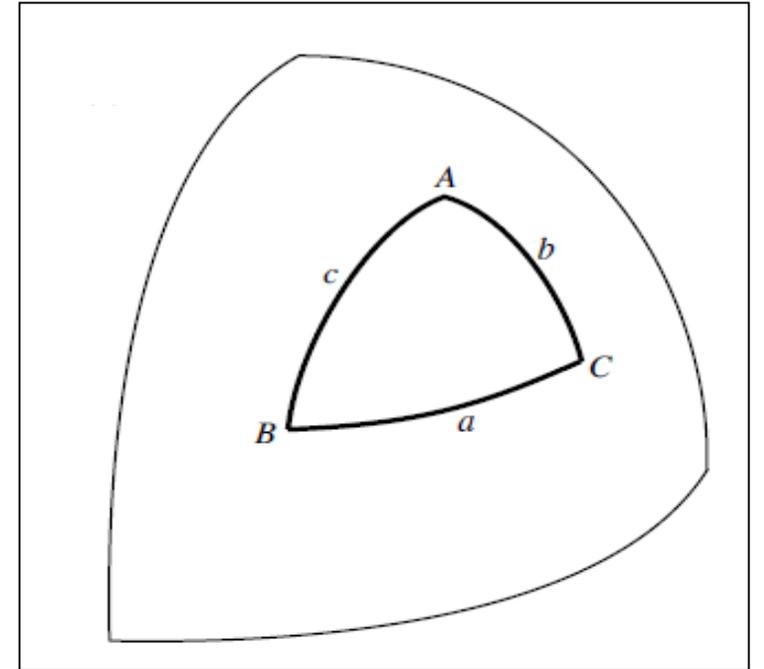
I lati di un triangolo su una superficie sferica sono archi di cerchio più grandi e la somma degli angoli interni è maggiore di 180° . Le tangenti in un punto a due cerchi più grandi definiscono l'angolo tra i due cerchi.

Siano gli angoli di un triangolo sferico A , B e C e le lunghezze dei lati opposti a ciascuno di questi angoli siano rispettivamente a , b e c

Esprimendo i lati del triangolo sferico come angoli di arco, la legge del seno è:

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

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

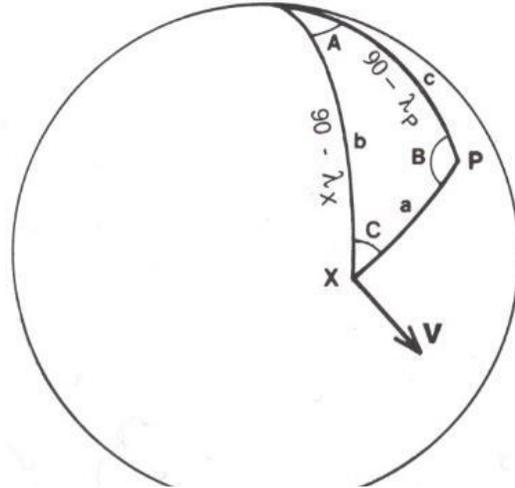


Le lunghezze dei lati possono essere convertite negli angoli che sottendono al centro della Terra. Ad esempio, la distanza dal polo all'equatore sulla superficie terrestre può essere considerata come 10.007 km o come 90 gradi di arco.

Tettonica delle placche: movimenti reciproci

Caso reale su Terra sferica

Determinare il polo di rotazione e la velocità angolare per una coppia di piastre adiacenti



Symbol	Meaning	Sign convention
λ_P	Latitude of rotation pole P	$^{\circ}$ N positive $^{\circ}$ S negative $^{\circ}$ W negative $^{\circ}$ E positive
λ_X	Latitude of point X on plate boundary	
ϕ_P	Longitude of rotation pole P	
ϕ_X	Longitude of point X on plate boundary	
v	Velocity at point X on plate boundary	
v	Amplitude of velocity	
β	Azimuth of the velocity with respect to north N	Clockwise positive
R	Radius of the earth	
ω	Angular velocity about rotation pole P	

1. Calcolare la direzione e il movimento relativo in qualsiasi punto lungo il bordo della piastra.

N= Polo Nord

P= Polo di rotazione

X= Punto sul limite della piastra

$$b = 90 - \lambda_X; \quad c = 90 - \lambda_P \quad [\text{Eq 1}]$$

$$A = \phi_P - \phi_X; \quad [\text{Eq 2}]$$

$$v = \omega R \sin a; \quad [\text{Eq 3}]$$

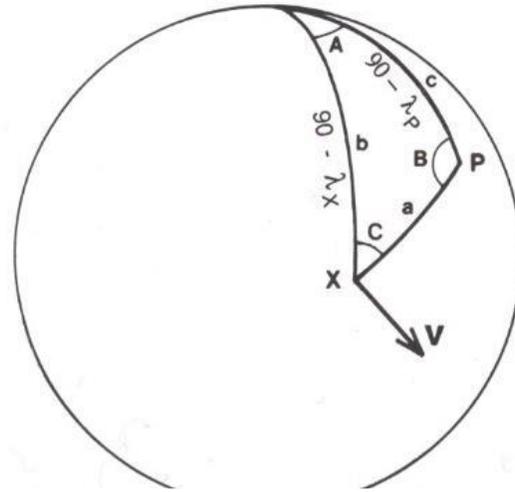
L'azimut della velocità rispetto al N è dato da:

$$\beta = 90 + C; \quad [\text{Eq 4}]$$

Tettonica delle placche: movimenti reciproci

Caso reale su Terra sferica

2. Per trovare gli angoli a e C da sostituire nell' Eq 3 e 4 usiamo la geometria sferica:



Symbol	Meaning	Sign convention
λ_P	Latitude of rotation pole P	$^{\circ}$ N positive $^{\circ}$ S negative $^{\circ}$ W negative $^{\circ}$ E positive
λ_X	Latitude of point X on plate boundary	
ϕ_P	Longitude of rotation pole P	
ϕ_X	Longitude of point X on plate boundary	
v	Velocity at point X on plate boundary	Clockwise positive
v	Amplitude of velocity	
β	Azimuth of the velocity with respect to north N	
R	Radius of the earth	
ω	Angular velocity about rotation pole P	

$$\cos a = \cos b \cdot \cos c + \sin b \cdot \sin c \cdot \cos A \quad [\text{Eq 5}]$$

e

$$\frac{\sin a}{\sin A} = \frac{\sin c}{\sin C} \quad [\text{Eq 6}]$$

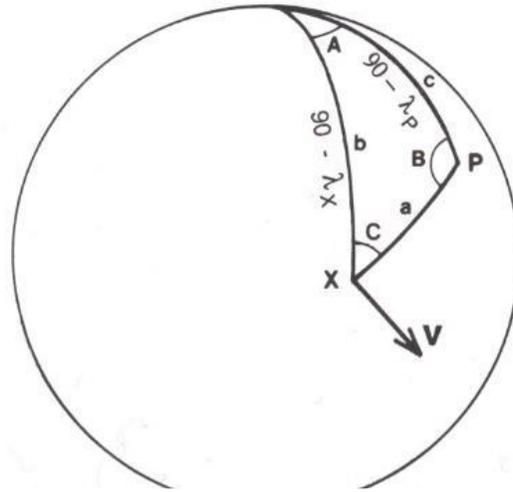
$$\cos a = \cos(90 - \lambda_X) \cdot \cos(90 - \lambda_P) + \sin(90 - \lambda_X) \cdot \sin(90 - \lambda_P) \cdot \cos(\phi_P - \phi_X) \quad [\text{Eq 7}]$$

$$a = \cos^{-1}[\cos(90 - \lambda_X) \cdot \cos(90 - \lambda_P) + \sin(90 - \lambda_X) \cdot \sin(90 - \lambda_P) \cdot \cos(\phi_P - \phi_X)] \quad [\text{Eq 8}]$$

Tettonica delle placche: movimenti reciproci

Caso reale su Terra sferica

3. Sostituendo Eq 1 e 2
nella Eq 6 otteniamo:



Symbol	Meaning	Sign convention
λ_P	Latitude of rotation pole P	} °N positive °S negative °W negative °E positive
λ_X	Latitude of point X on plate boundary	
ϕ_P	Longitude of rotation pole P	
ϕ_X	Longitude of point X on plate boundary	
v	Velocity at point X on plate boundary	
v	Amplitude of velocity	
β	Azimuth of the velocity with respect to north N	Clockwise positive
R	Radius of the earth	
ω	Angular velocity about rotation pole P	

$$\frac{\sin a}{\sin(\varphi_P - \varphi_X)} = \frac{\sin(90 - \lambda_P)}{\sin C}$$

[Eq 9]

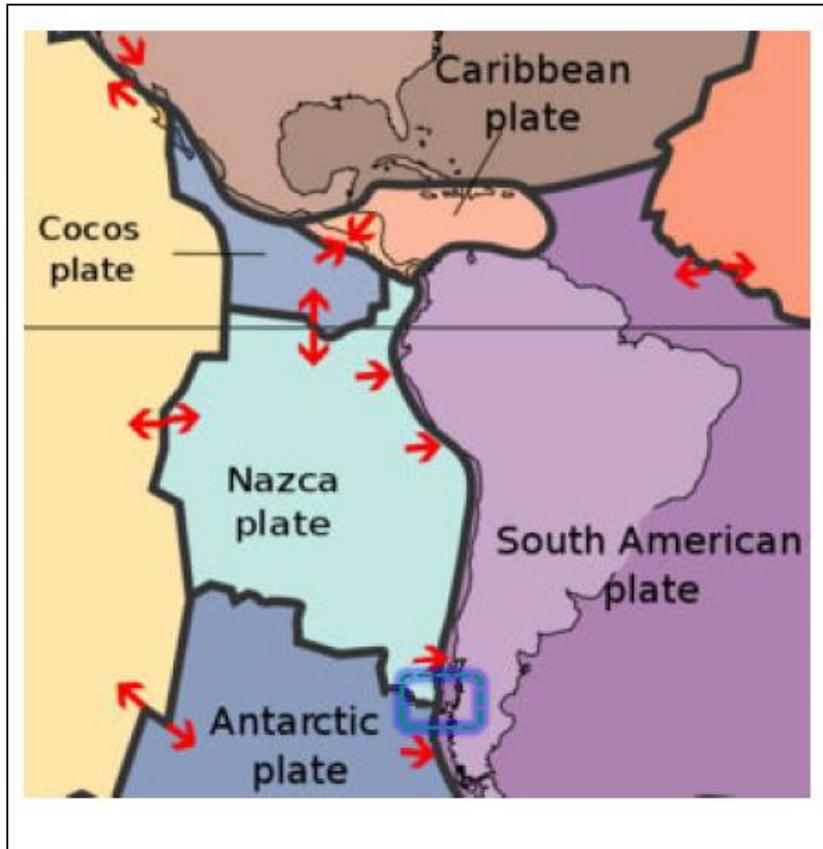
da cui si ricava

$$C = \sin^{-1} \left[\frac{\cos \lambda_P \sin(\varphi_P - \varphi_X)}{\sin a} \right]$$

[Eq 10]

Tettonica delle placche: movimenti reciproci

Esempio: Calcolare l'attuale moto relativo a 28°S , 71°W della Fossa Perù-Cile utilizzando il polo di rotazione Nazca-Sud America (Assumere che il raggio della terra sia 6371 km)



Plates	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	1.2
Africa–North America	78.8°N	38.3°E	2.4
Africa–South America	62.5°N	39.4°W	3.1
Australia–Antarctica	13.2°N	38.2°E	6.5
Pacific–Antarctica	64.3°S	96.0°E	8.7
South America–Antarctica	86.4°S	139.3°E	2.6
Arabia–Eurasia	24.6°N	13.7°E	5.0
India–Eurasia	24.4°N	17.7°E	5.1
Eurasia–North America	62.4°N	135.8°E	2.1
Eurasia–Pacific	61.1°N	85.8°W	8.6
Pacific–Australia	60.1°S	178.3°W	10.7
North America–Pacific	48.7°N	78.2°W	7.5
Cocos–North America	27.9°N	120.7°W	13.6
Nazca–Pacific	55.6°N	90.1°W	13.6
Nazca–South America	56.0°N	94.0°W	7.2

Note: The first plate moves anticlockwise with respect to the second plate as shown.

Source: After DeMets *et al.* (1990; 1994).

Tettonica delle placche: movimenti reciproci

X - Fossa Perù-Cile: 28°S 71°W

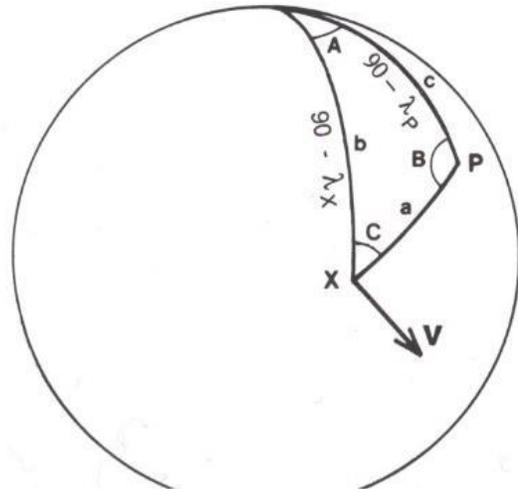
$$\lambda_X = -28^\circ \quad \varphi_X = -71^\circ$$

P - polo di rotazione: Nazca-Sud America

Plates	Latitude	Longitude	(10^{-7} deg yr $^{-1}$)
Nazca-South America	56.0°N	94.0°W	7.2

$$\lambda_P = 56^\circ \quad \varphi_P = -94^\circ$$

$$\omega = 7.2 \cdot 10^{-7} \text{ deg yr}^{-1} = \frac{\pi}{180} \cdot 7.2 \cdot 10^{-7} \text{ rad yr}^{-1}$$



Symbol	Meaning	Sign convention
λ_P	Latitude of rotation pole P	$^\circ$ N positive $^\circ$ S negative $^\circ$ W negative $^\circ$ E positive
λ_X	Latitude of point X on plate boundary	
φ_P	Longitude of rotation pole P	
φ_X	Longitude of point X on plate boundary	
v	Velocity at point X on plate boundary	
v	Amplitude of velocity	
β	Azimuth of the velocity with respect to north N	Clockwise positive
R	Radius of the earth	
ω	Angular velocity about rotation pole P	

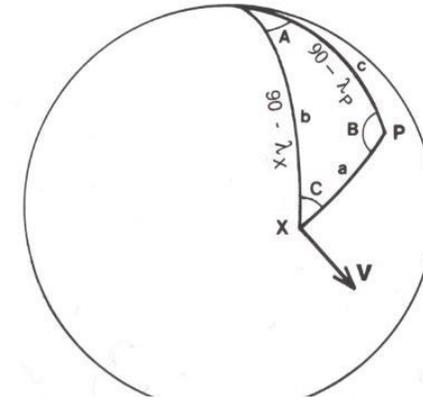
Sostituiamo i valori:
 nell'Eq 8 per trovare a
 nell'Eq 10 per trovare C
 nell'Eq 3 per trovare v
 nell'Eq 4 per trovare β

Tettonica delle placche: movimenti reciproci

$$\lambda_X = -28^\circ \quad \varphi_X = -71^\circ$$

$$\lambda_P = 56^\circ \quad \varphi_P = -94^\circ$$

$$\omega = 7.2 \cdot 10^{-7} \text{ deg yr}^{-1} = \frac{\pi}{180} \cdot 7.2 \cdot 10^{-7} \text{ rad yr}^{-1}$$



Trigonometria: angoli complementari

$$\cos\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right) = \sin \alpha$$

$$\sin\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right) = \cos \alpha$$

$$a = \cos^{-1}[\cos(90 - \lambda_X) \cdot \cos(90 - \lambda_P) + \sin(90 - \lambda_X) \cdot \sin(90 - \lambda_P) \cdot \cos(\varphi_P - \varphi_X)] \quad [\text{Eq 8}]$$

$$a = \cos^{-1}[\sin(-28) \cdot \sin(56) + \cos(-28) \cdot \cos(56) \cdot \cos(-94 + 71)] = 86.26^\circ \quad [\text{Eq 8}]$$

$$v = \omega R \sin a \quad [\text{Eq 3}]$$

$$v = \left(\frac{\pi}{180^\circ} \cdot 7.2^\circ \cdot 10^{-7} \text{ rad yr}^{-1}\right) (6371 \cdot 10^5 \text{ cm}) \sin(86.26^\circ) = 7.97 \text{ cm yr}^{-1} \quad [\text{Eq 3}]$$

$$C = \sin^{-1} \left[\frac{\sin \lambda_P \sin(\varphi_P - \varphi_X)}{\sin a} \right] \quad [\text{Eq 10}]$$

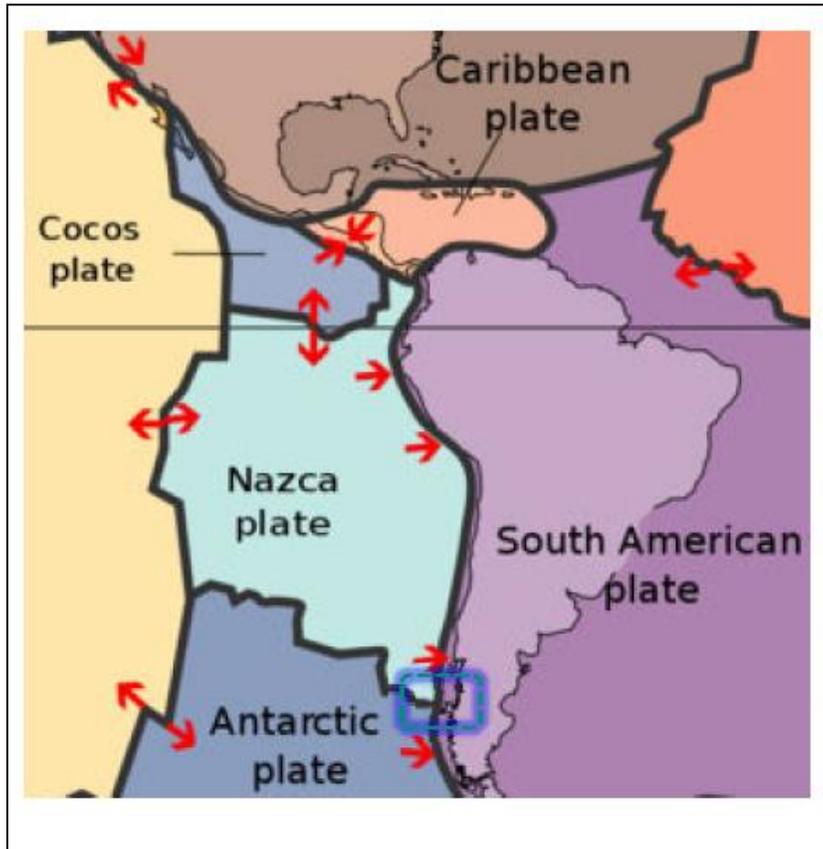
$$C = \sin^{-1} \left[\frac{\sin(56) \sin(-94 + 71)}{\sin(86.26)} \right] = -12.65^\circ \quad [\text{Eq 10}]$$

$$\beta = 90 + C \quad [\text{Eq 4}]$$

$$\beta = 90^\circ - 12.65^\circ = 77.35^\circ \quad [\text{Eq 4}]$$

Tettonica delle placche: movimenti reciproci

Esempio: Calcolare l'attuale moto relativo a 28°S , 71°W della Fossa Perù-Cile utilizzando il polo di rotazione Nazca-Sud America (Assumere che il raggio della terra sia 6371 km)



Quindi:

La placca Nazca si muove rispetto alla placca Sud Americana di 8 cm/yr (v) con un azimut di 77° (β).
Conseguentemente, la placca Sud Americana si sta muovendo rispetto alla placca Nazca di 8 cm/yr con un azimut di 257°



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI TRIESTE

Veronica Pazzi

Dipartimento di Matematica e Geoscienze

veronica.pazzi@units.it

www.units.it