



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI TRIESTE

Fisica Terrestre

Tettonica delle placche

Veronica Pazzi - veronica.pazzi@units.it

Riepilogo

Riepilogo

Quiz

How to participate?



- 1 Go to [wooclap.com](https://www.wooclap.com)
- 2 Enter the event code in the top banner

Event code
RIEPILOGO

wooclap



wooclap



Attenzione, non c'è nessuna votazione in corso al momento. Ti sarà recapitato un avviso quando inizierà la votazione.

Riepilogo

Della lezione precedente...

Ottimo sistema wooclap

Giunzione tripla

Tutto ok

Comportamento vettoriale
della combinazione di placca

Tutto

Valutiamo i moti reciproci

Punti tripli

Giunzione tripla stabile e
instabile

Giunti tripli

Come fare a studiare tutto al
massimo

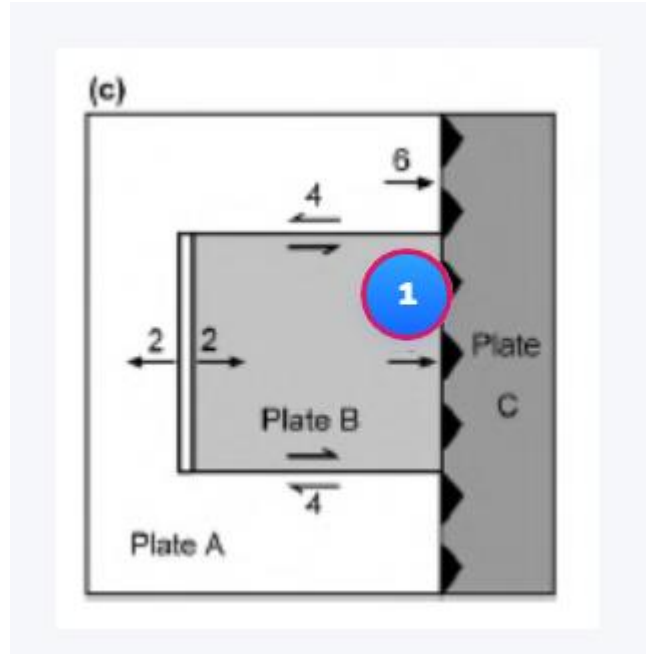
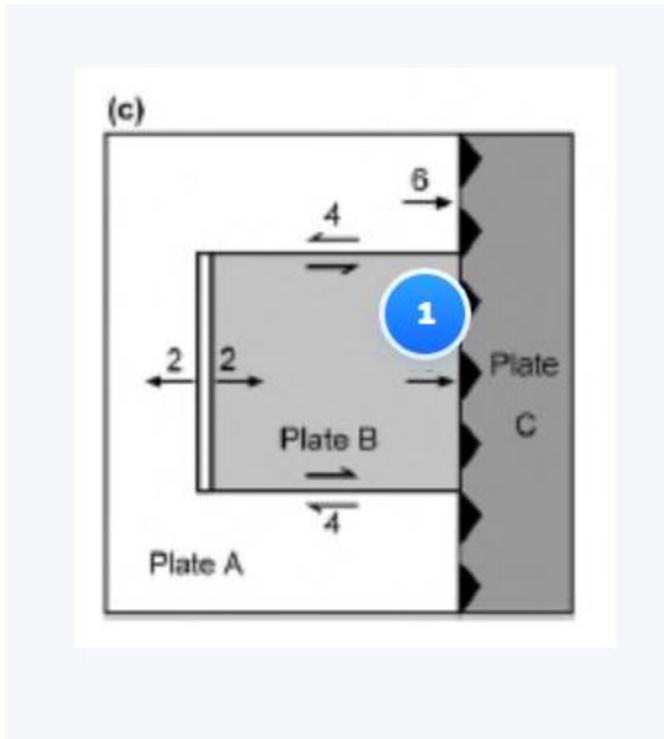
Tutto top

Tutto ok

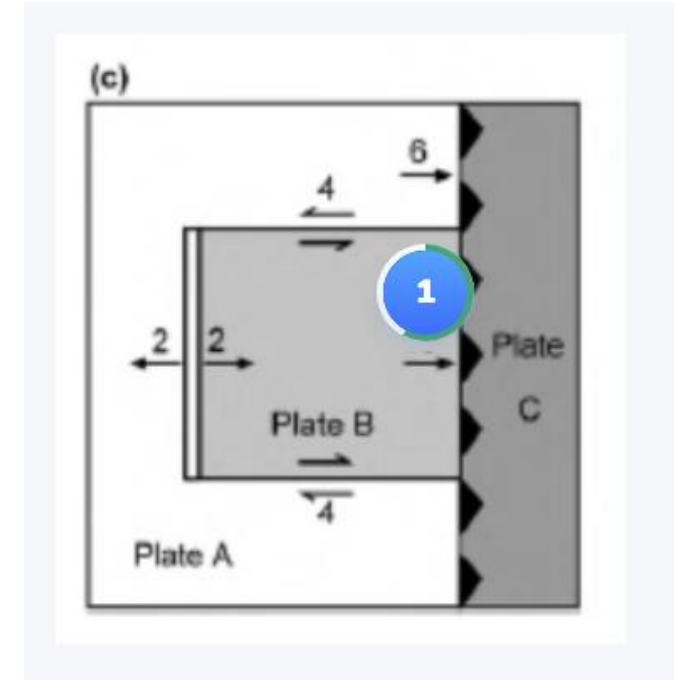
Tutto apposto

Riepilogo

Quiz: quale è la velocità di subduzione della placca B rispetto a c?



Risposta a domanda introduttiva



Risposta a domanda di riepilogo

Tettonica delle placche: movimenti reciproci

Esistono 16 tipi di giunzione tripla (teorizzati da McKenzie e Morgan): di questi alcuni sono puramente teorici, altri reali.

Sono classificati in funzione del margine e poi in funzione della direzione.

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	TTT(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		TTT(b)		Stable if bc, ab form a straight line, or if ac goes through B	
FFF		Unstable		TTT(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

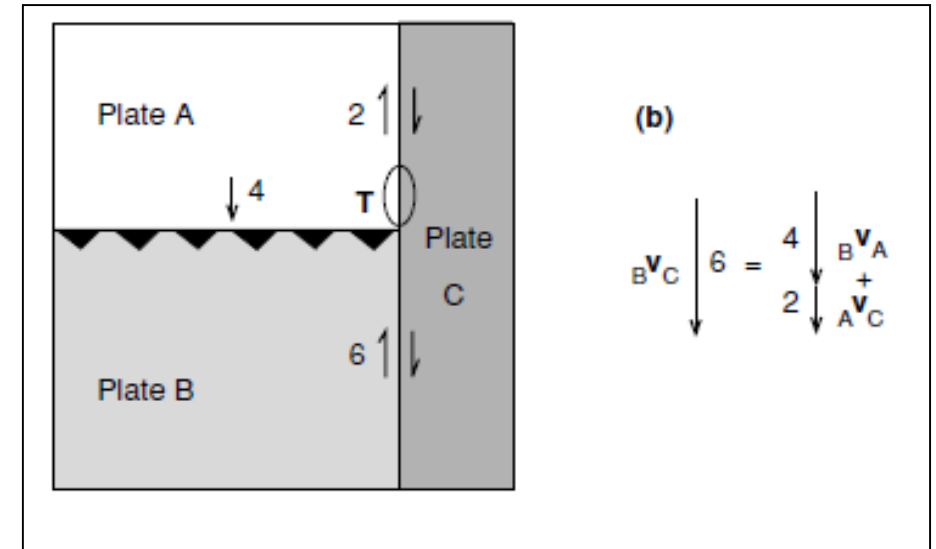
Abbiamo detto che:

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



1) La somma vettoriale delle velocità relative alla giunzione tripla deve essere nulla

2) I movimenti delle placche devono essere tali da lasciare inalterata la geometria della giunzione tripla



$${}_A V_B + {}_B V_C + {}_C V_A = 0$$

La giunzione si muove in modo da restare posizionata su tutti e tre i margini

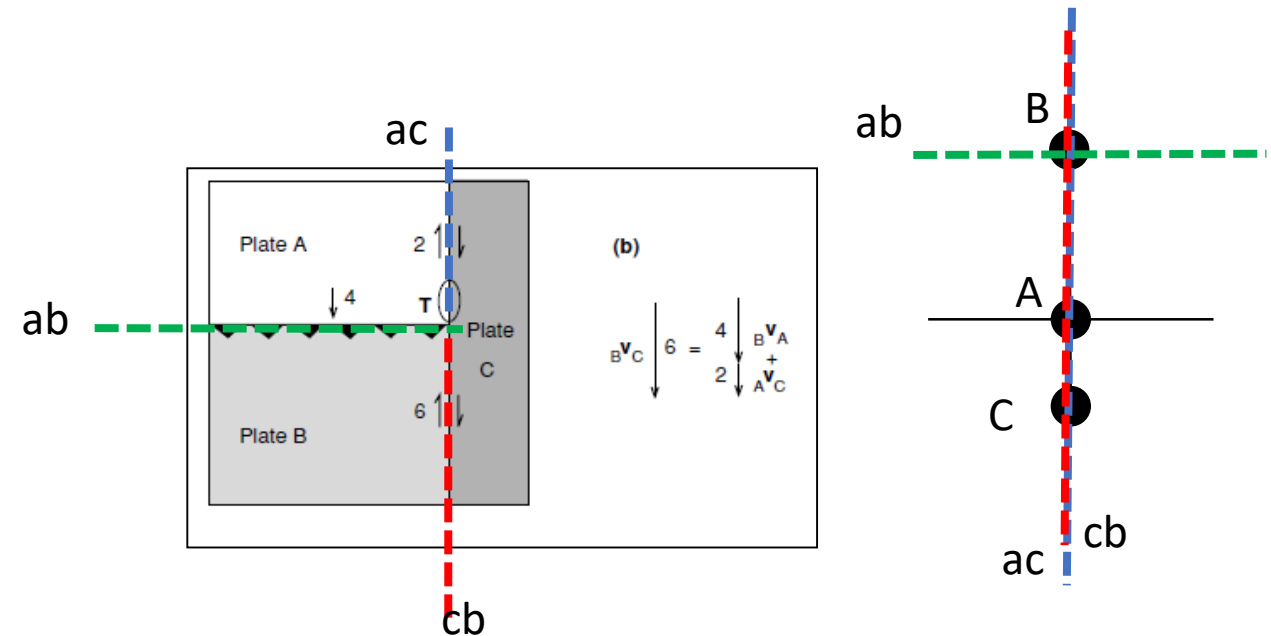
Tettonica delle placche: movimenti reciproci

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

Ma cosa sono le linee di velocità?

linee di velocità delle placche: sono luoghi di punti nello spazio delle velocità in cui un osservatore potrebbe muoversi ad una data velocità (anche nulla) e rimanere sempre sul margine di placca.

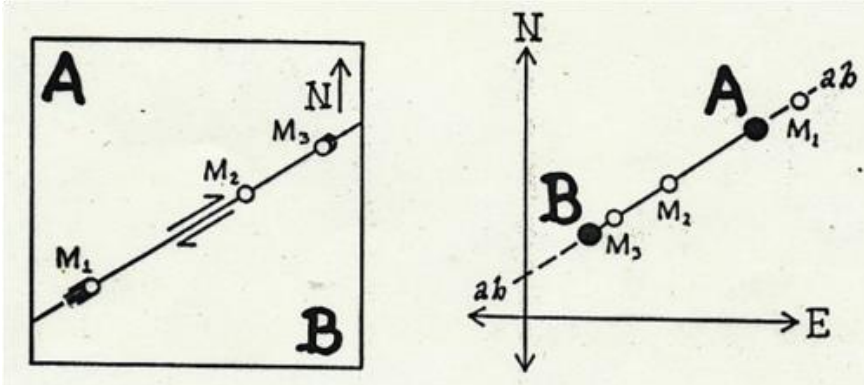
Le linee di velocità sono parallele ai margini di placca poiché, per rimanere su un margine, un osservatore deve o muoversi lungo di esso o rimanere fermo.



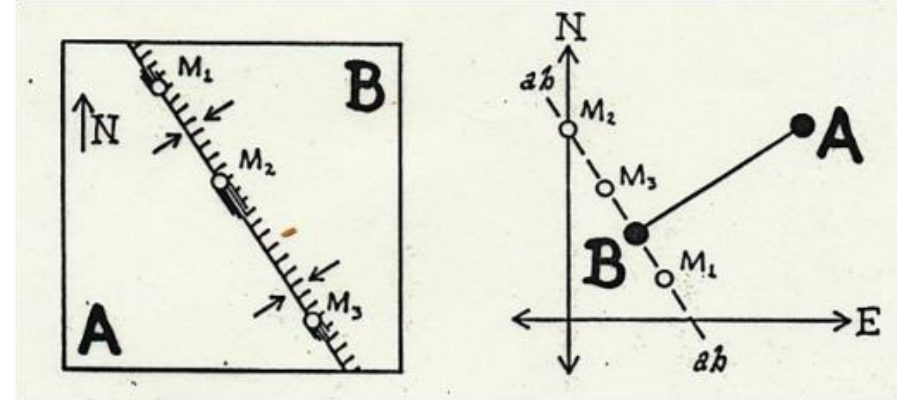
Tettonica delle placche: movimenti reciproci

Linee di velocità: insieme di punti alla stessa velocità

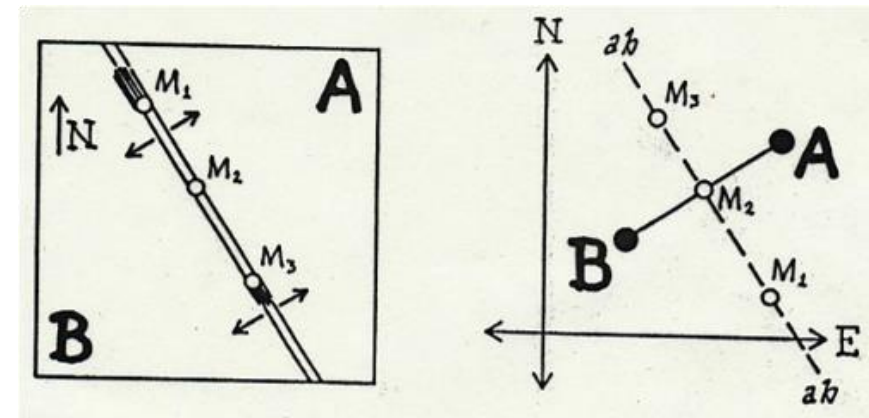
Margine in **subduzione**: linea di velocità parallela al trench e si muove con la placca che sovrascorre (cioè **tracciata sul margine che sovrascorre**)



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

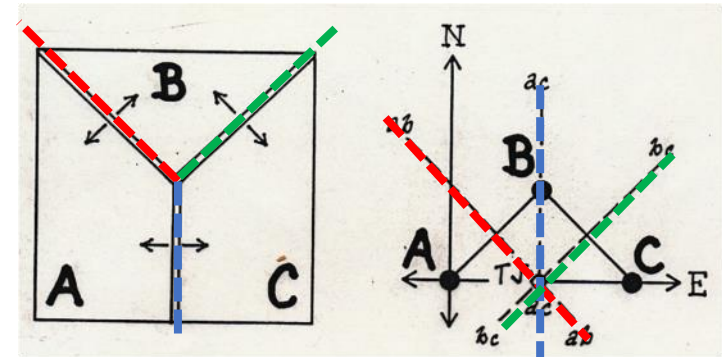


Tettonica delle placche: movimenti reciproci

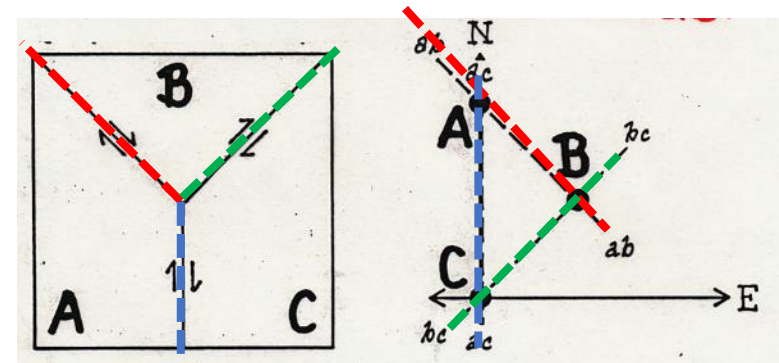
Per definire se una giunzione tripla è stabile o no si osserva l'intersezione delle **linee di velocità** delle tre placche:

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)

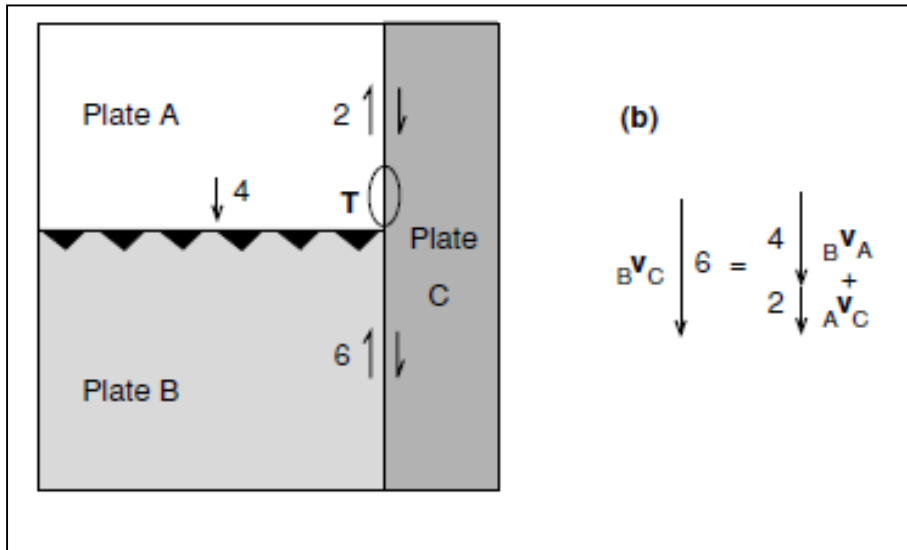


RRR è sempre stabile perché le linee di velocità si incontrano sempre in un punto



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



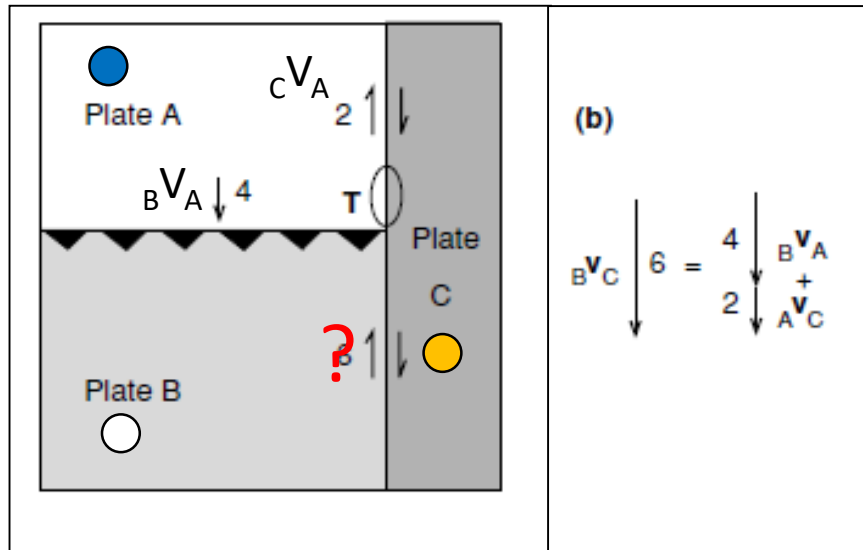
Come si definisce se un punto triplo è stabile?

Primo passo: **diagramma delle velocità** (rappresentazione dei vettori velocità nel piano)

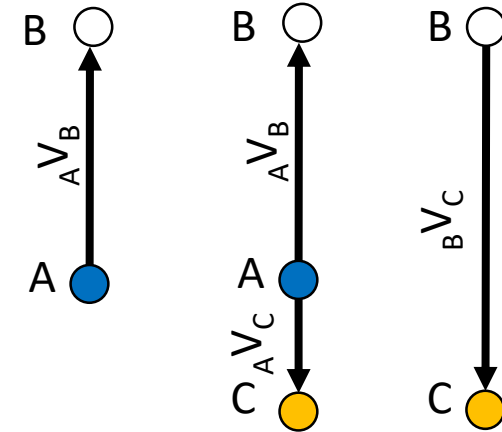
Secondo passo:
rappresentazione delle
linee di velocità

Tettonica delle placche: movimenti reciproci

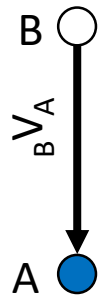
Diagramma delle velocità



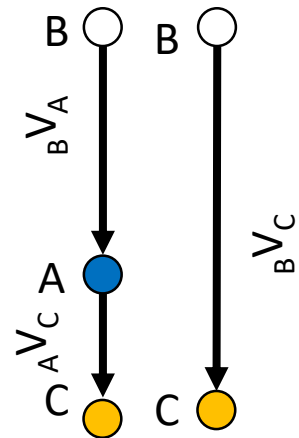
Mi posiziono sulla placca A e osservo cosa accade alle altre due



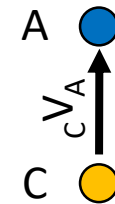
Mi posiziono sulla placca B e osservo cosa accade alle altre due



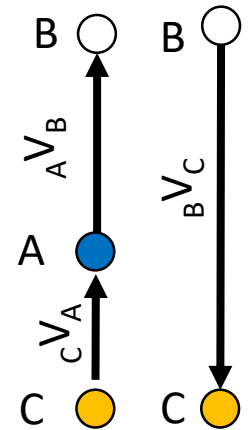
Non so il moto relativo tra B e C, ma conosco quello tra A e C



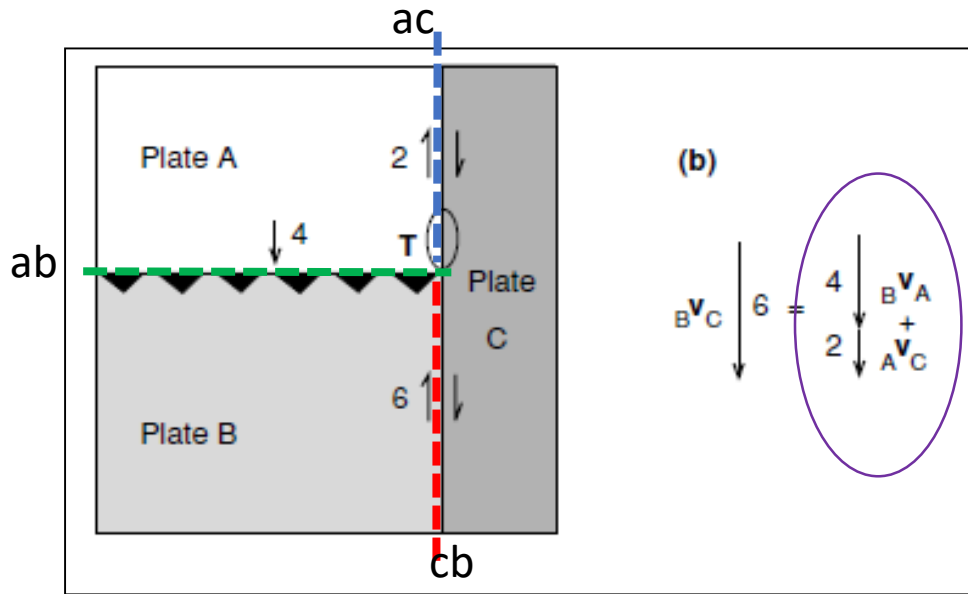
Mi posiziono sulla placca C e osservo cosa accade alle altre due



Non so il moto relativo tra B e C, ma conosco quello tra A e B

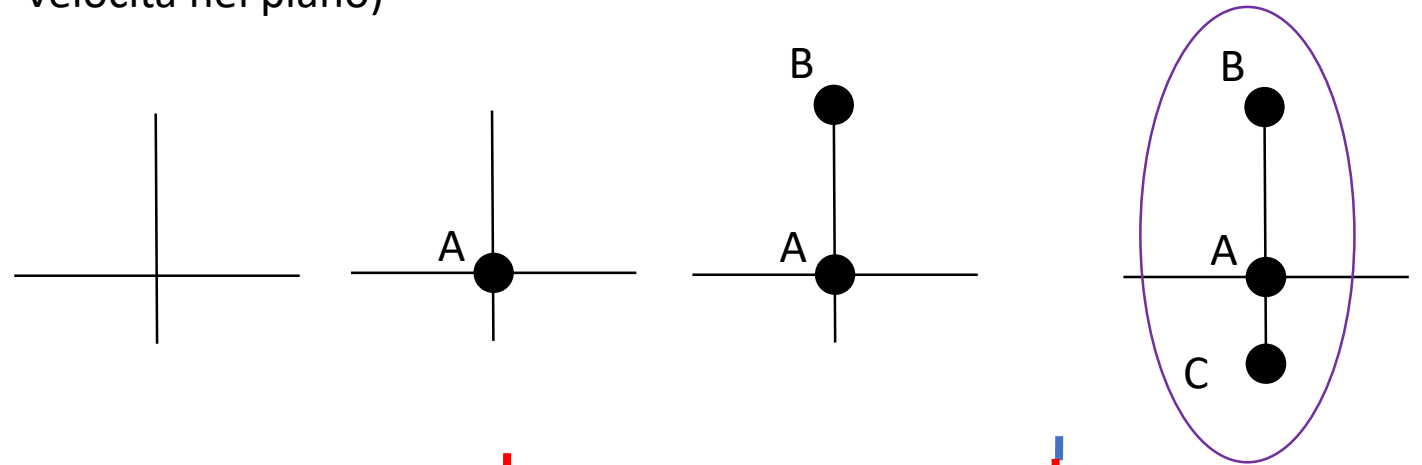


Tettonica delle placche: movimenti reciproci

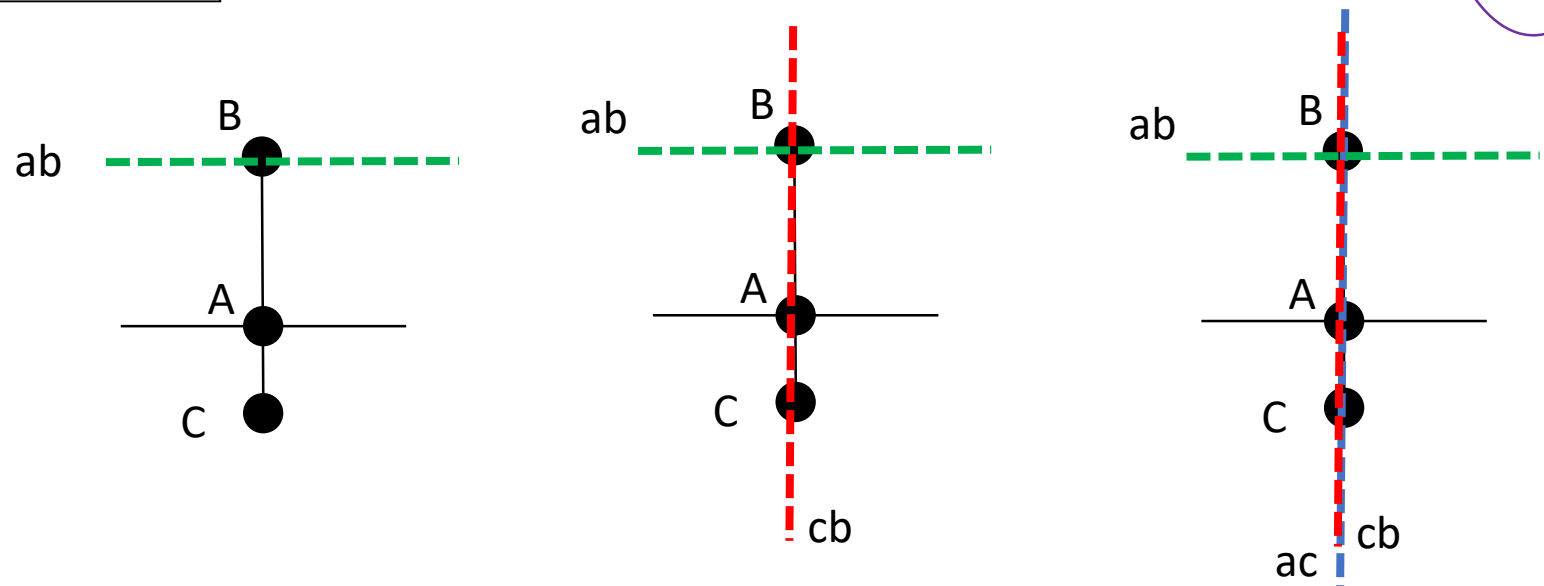


Come si definisce se un punto triplo è stabile?

Primo passo: **diagramma delle velocità** (rappresentazione dei vettori velocità nel piano)



Secondo passo:
rappresentazione delle
linee di velocità

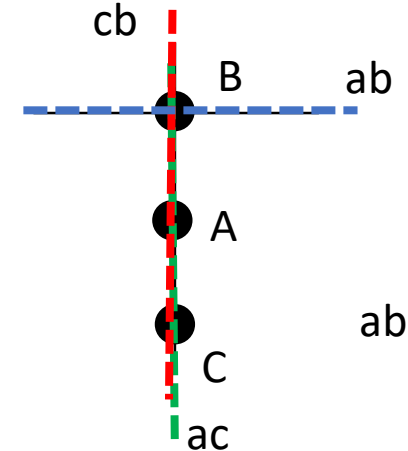
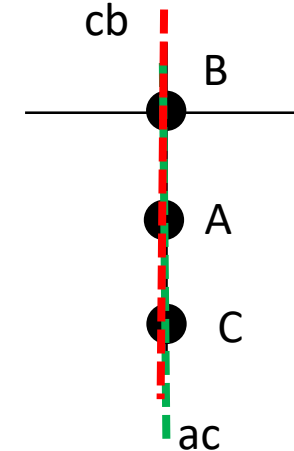
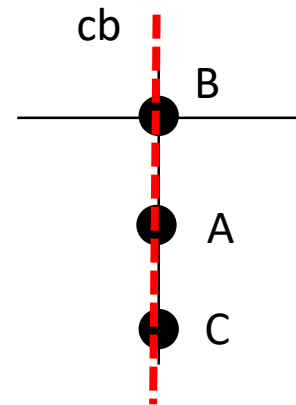
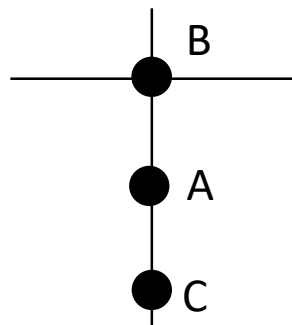
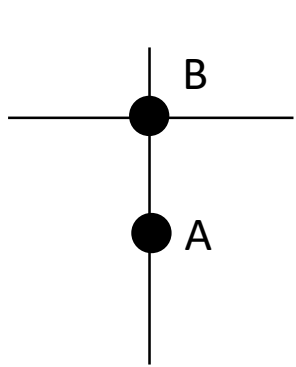
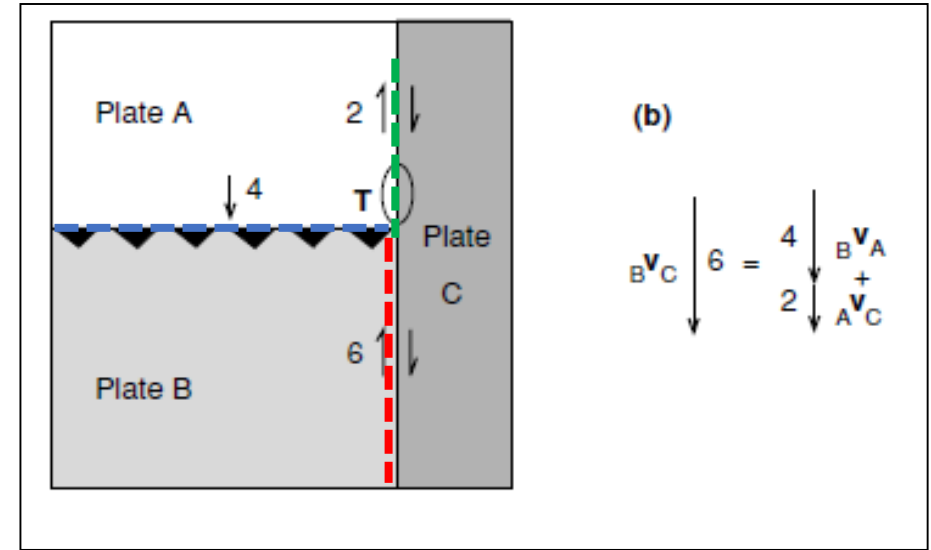


Tettonica delle placche: movimenti reciproci

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

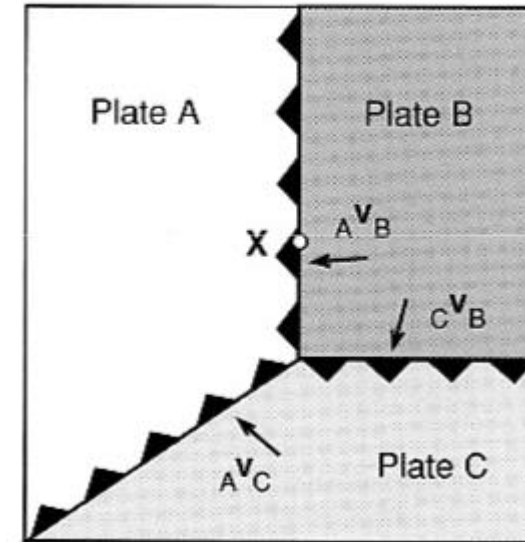


Tettonica delle placche: movimenti reciproci

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



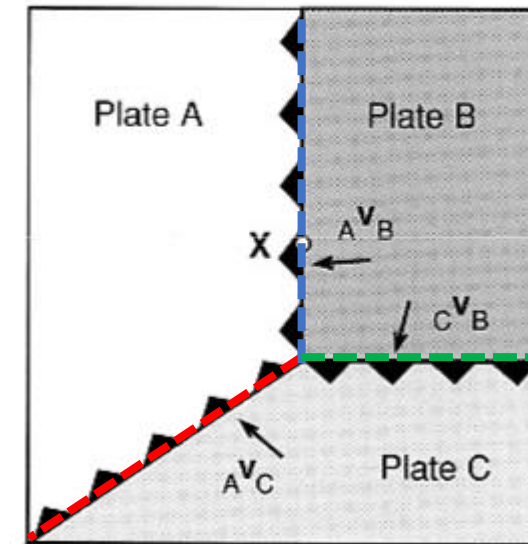
Tettonica delle placche: movimenti reciproci

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 ->

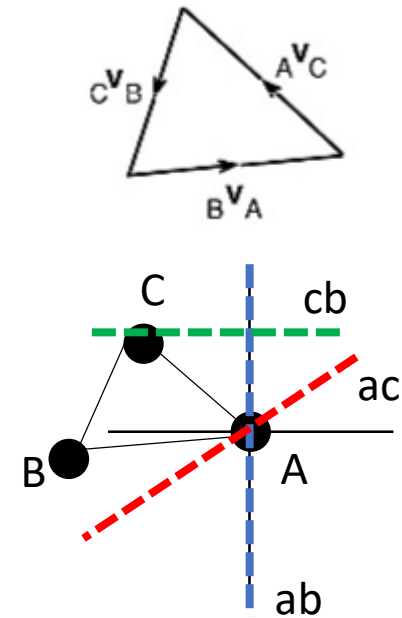
La giunzione tripla in (a) del tipo TTT è stabile?

NO

(a) Giunzione tripla TTT



(b)



Tettonica delle placche: movimenti reciproci

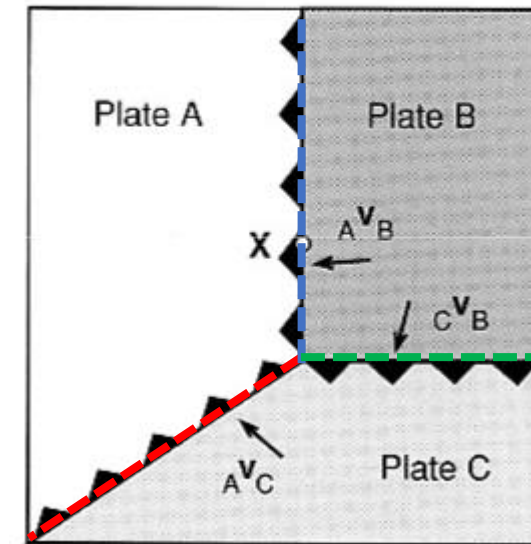
La placca A sovrascorre sia sopra la placca B che C (ovvero le placche B e C subducono sotto A) e la placca C sovrascorre su B ->

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

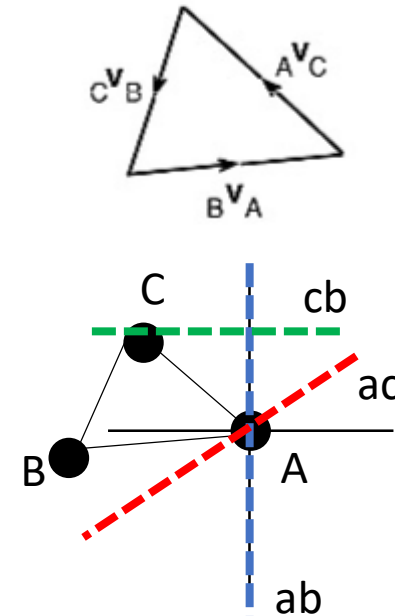
NO

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

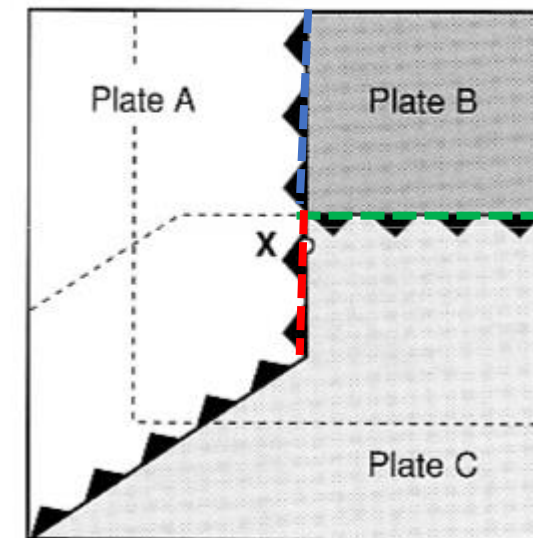
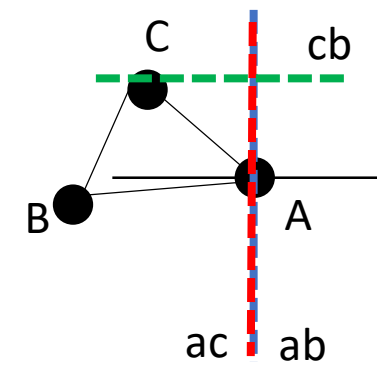
(a) Giunzione tripla TTT



(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 ->

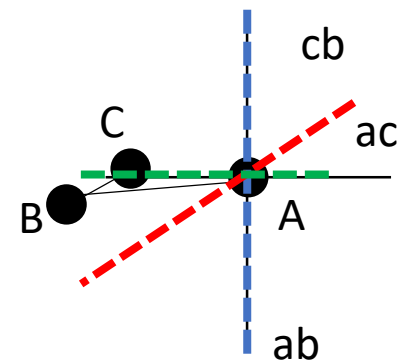
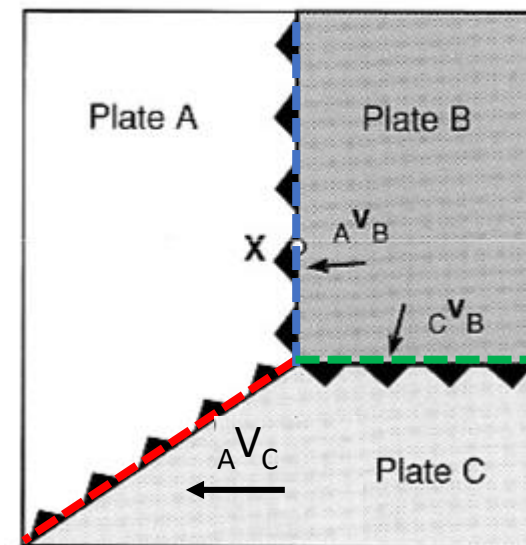
La giunzione tripla in (a) del tipo TTT è stabile?

NO

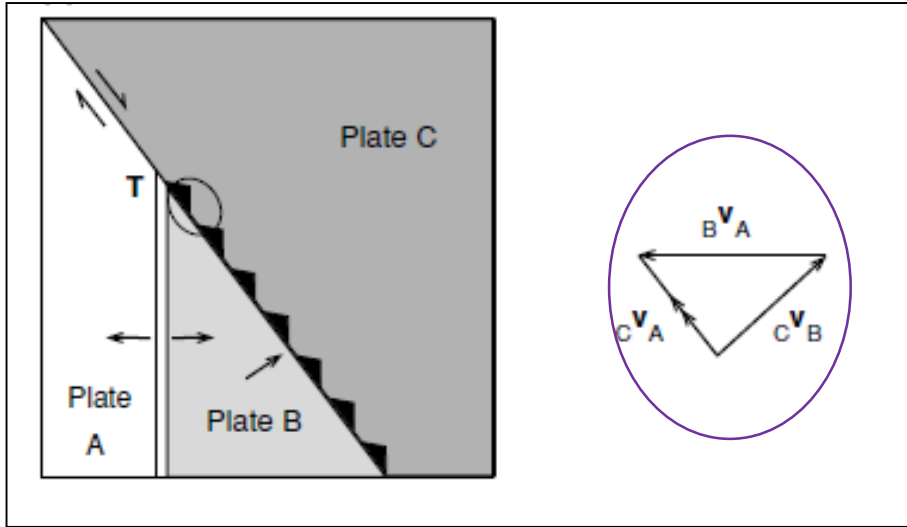
Tuttavia la nuova configurazione (c), dove la giunzione si muove verso nord lungo il margine nord-sud della placca A, è stabile perché la geometria e le velocità relative delle placche non cambiano, ma cambia la direzione del margine

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

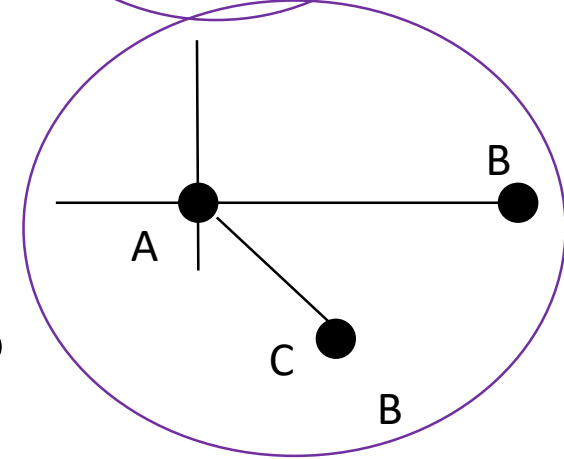
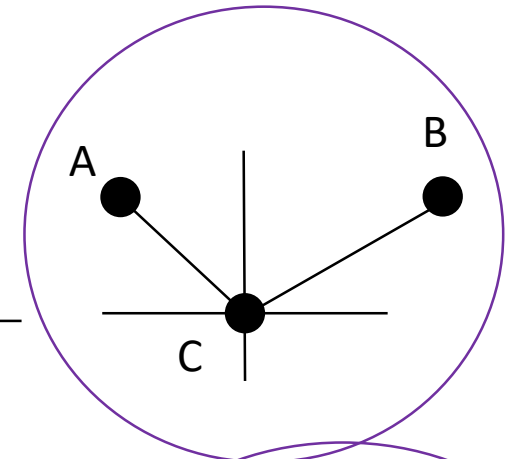
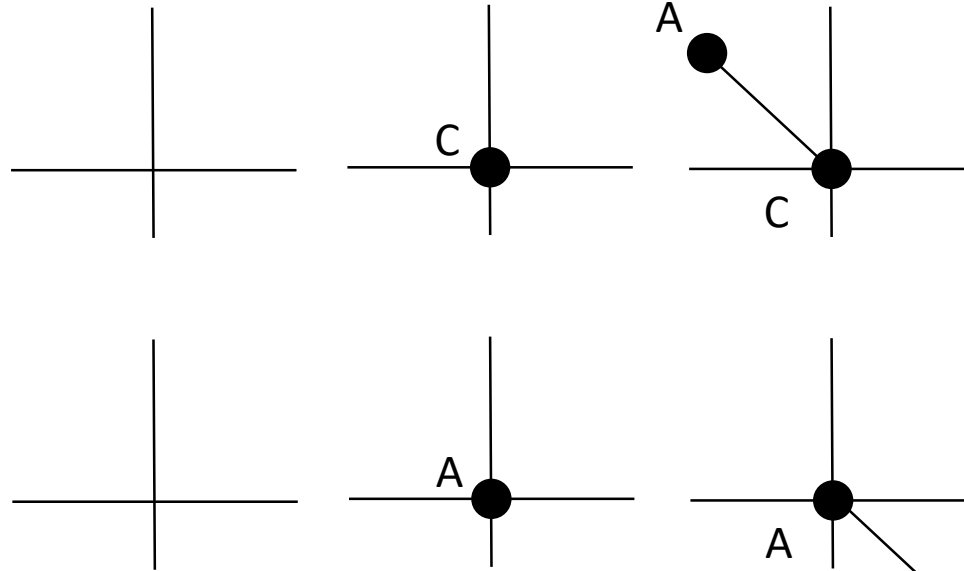
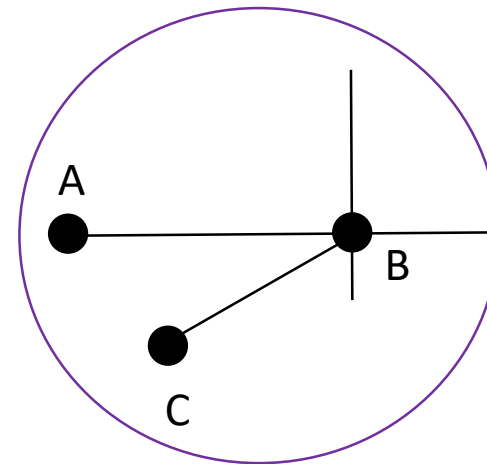
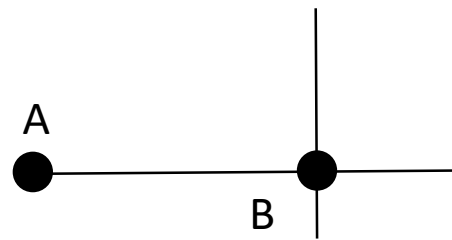
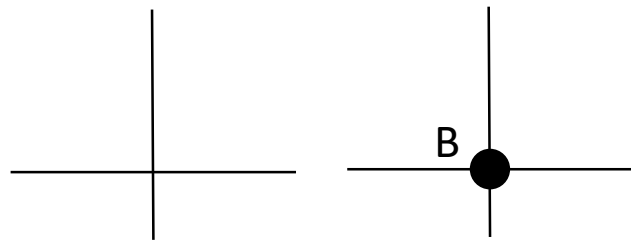
(a) Giunzione tripla TTT



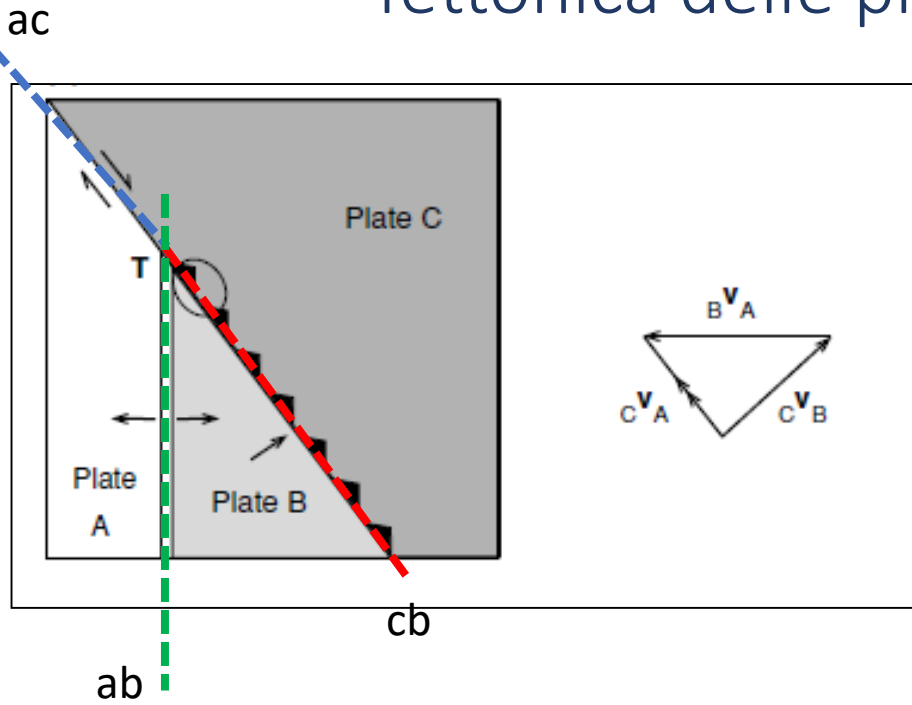
Tettonica delle placche: movimenti reciproci



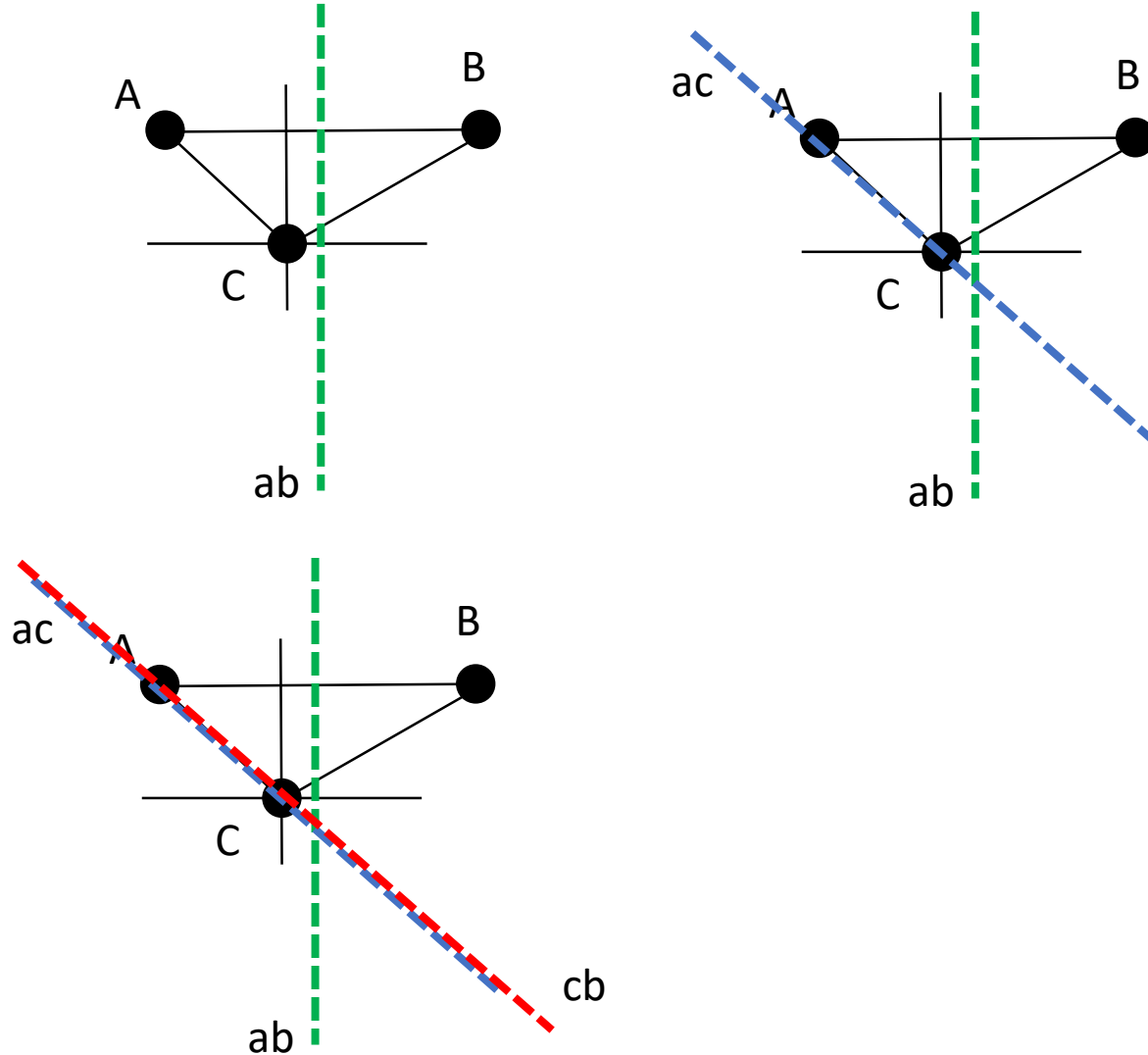
Primo passo: **diagramma delle velocità**
(rappresentazione dei vettori velocità nel piano)



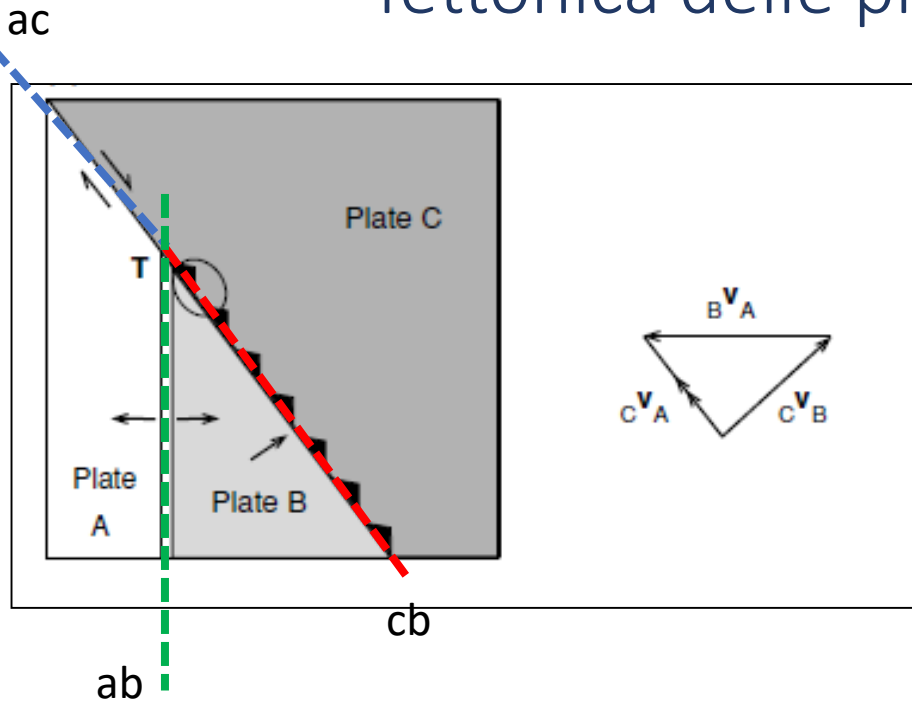
Tettonica delle placche: movimenti reciproci



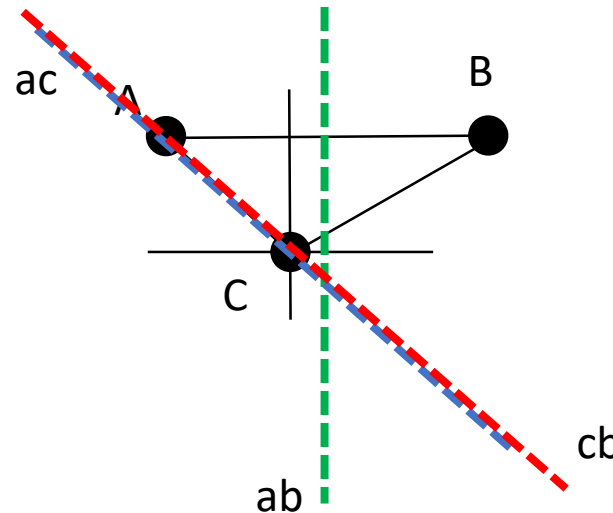
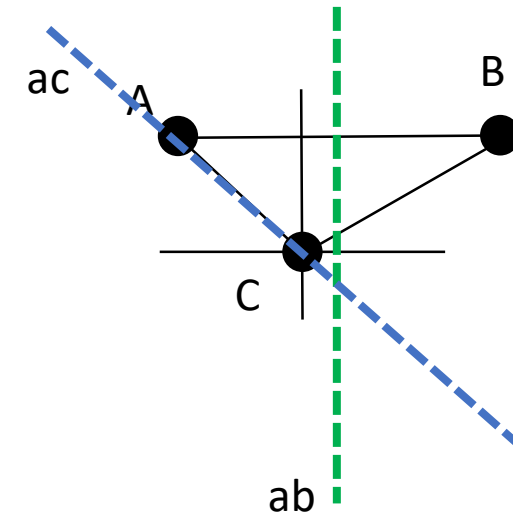
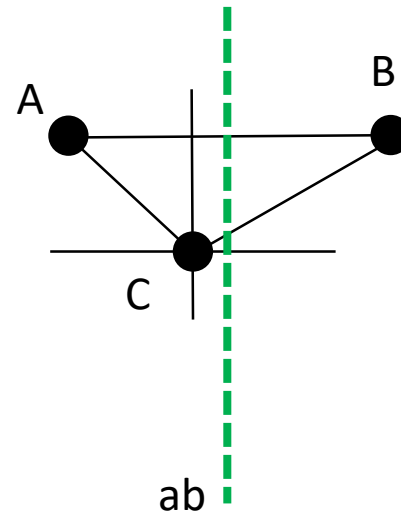
Secondo passo:
rappresentazione delle
linee di velocità



Tettonica delle placche: movimenti reciproci

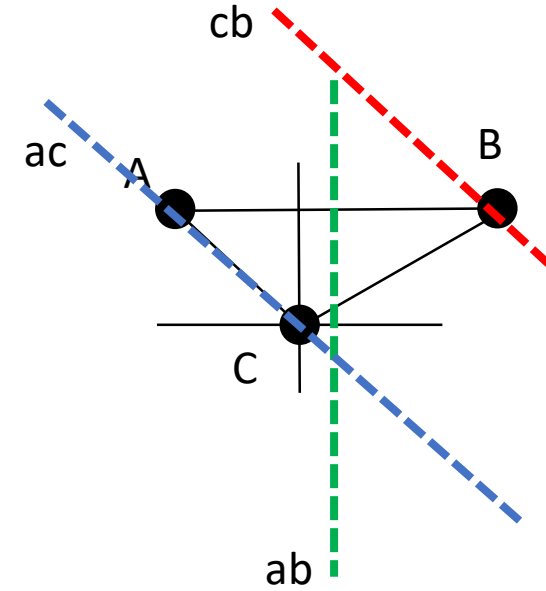
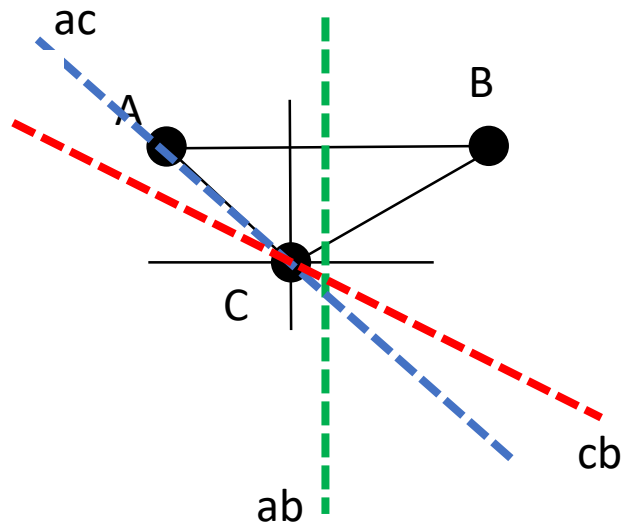
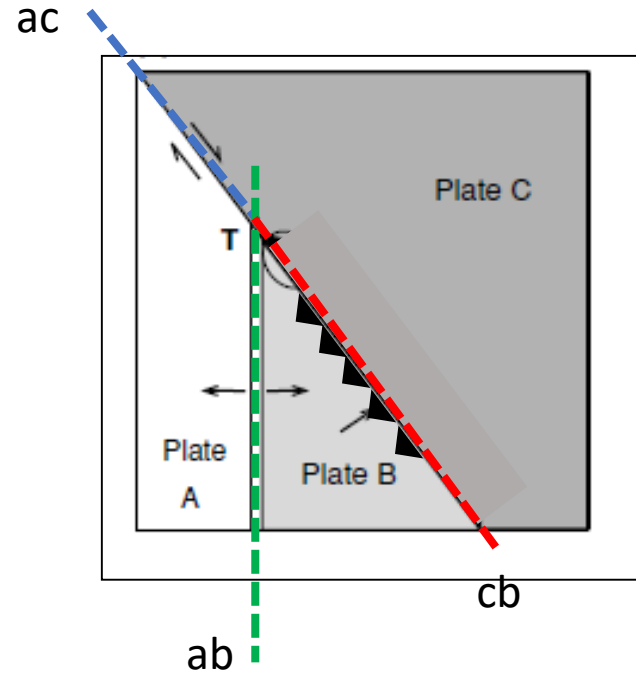
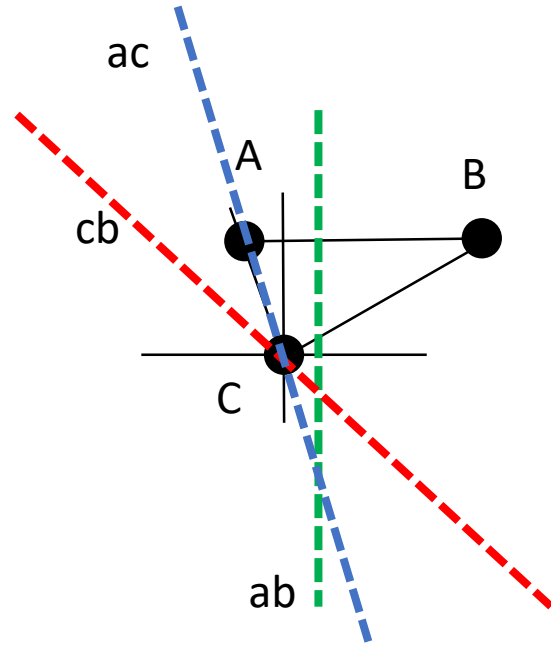
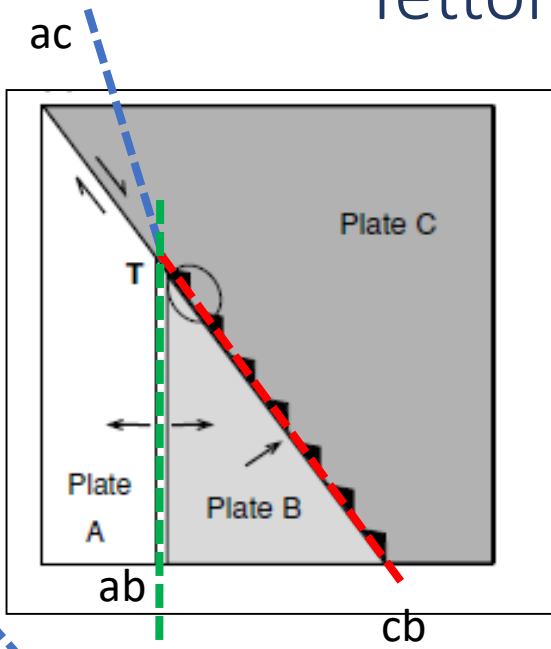


Secondo passo:
rappresentazione delle
linee di velocità

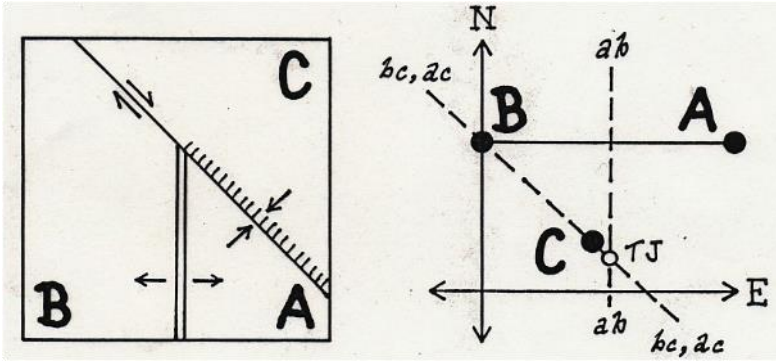


Domanda: c'è una
conformazione tale per cui il
punto triplo non è stabile?

Tettonica delle placche: movimenti reciproci

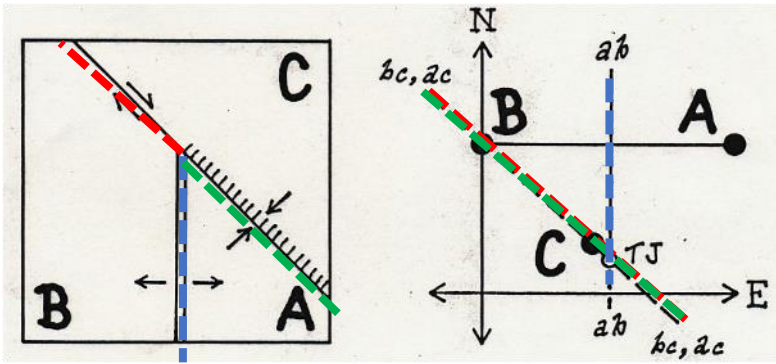


Tettonica delle placche: movimenti reciproci



Il punto triplo è sempre stabile?

Tettonica delle placche: movimenti reciproci



Il punto triplo è sempre stabile?

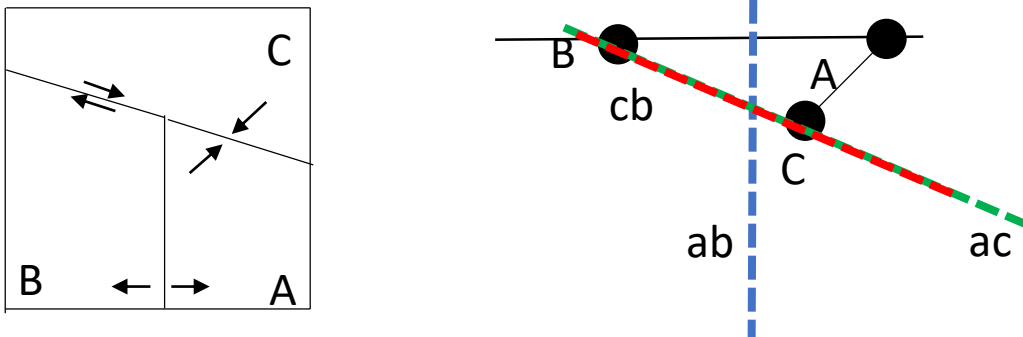
Poiché bc e ac devono passare per C (bc perché è un argine trascorrete e ac perché la placa che sovrascorre è C) il punto triplo RTF sarà stabile solo se

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)

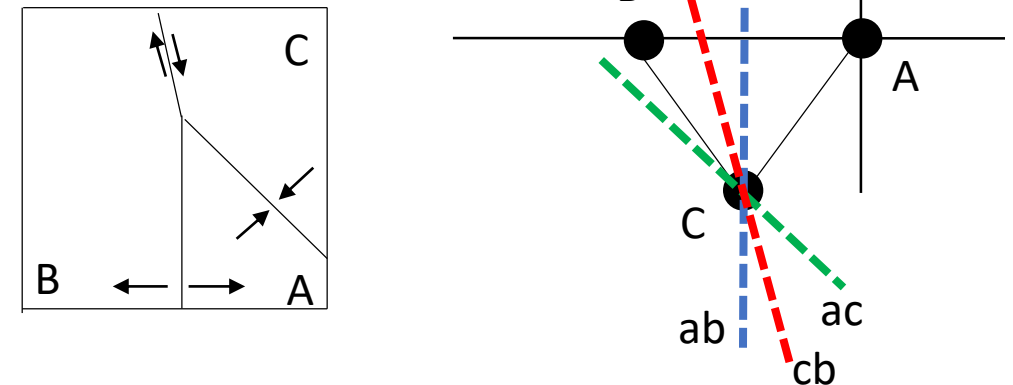
oppure

b) anche ab passa per C

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

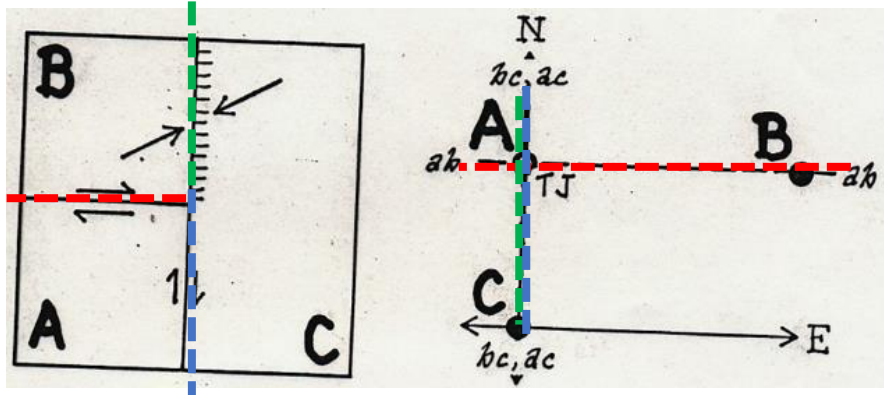


b) La velocità di allontanamento tra A e B è tale che la mezzeria del vettore velocità AB passa per C



Tettonica delle placche: movimenti reciproci

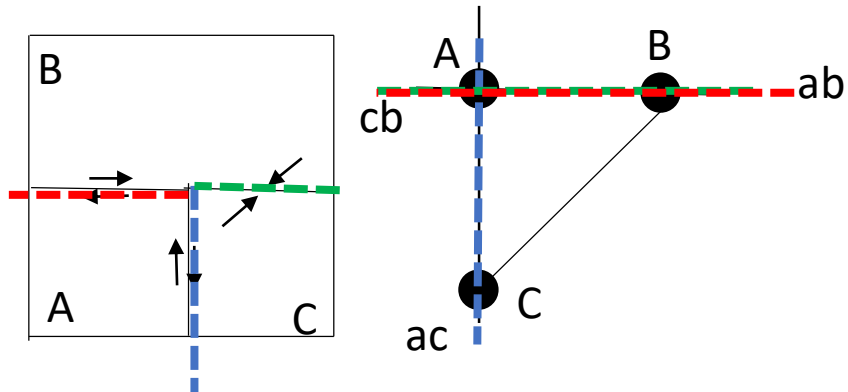
Il punto triplo è sempre stabile?



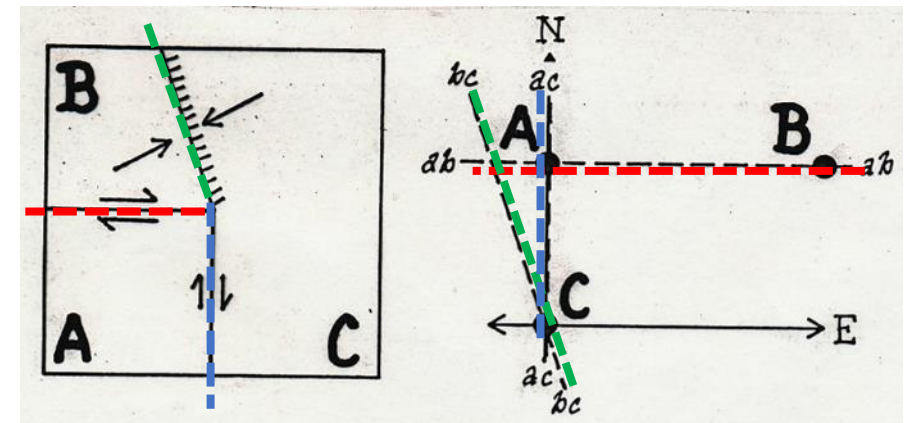
- ab e ac passano sempre per A

- 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

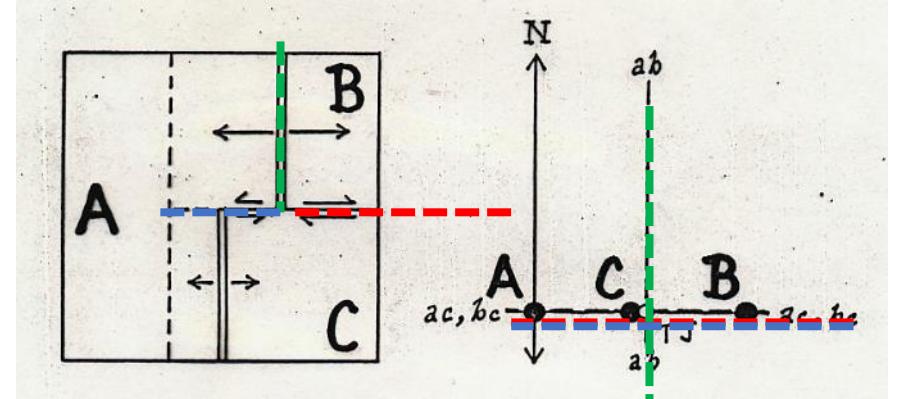
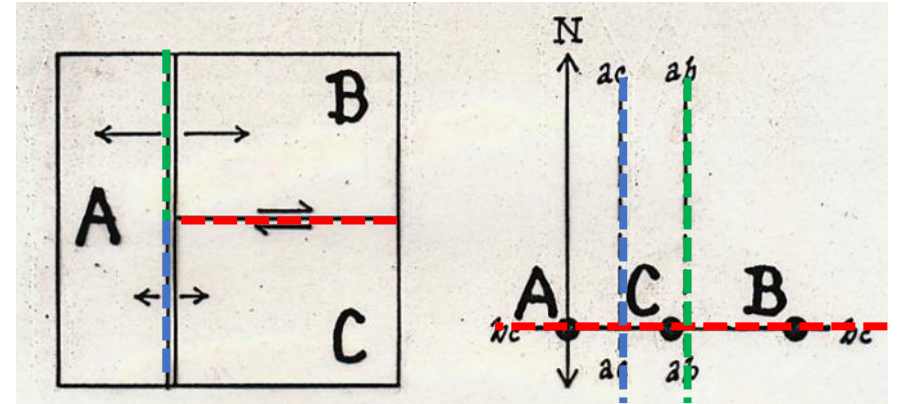


Tettonica delle placche: movimenti reciproci

Il punto triplo è sempre stabile?

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

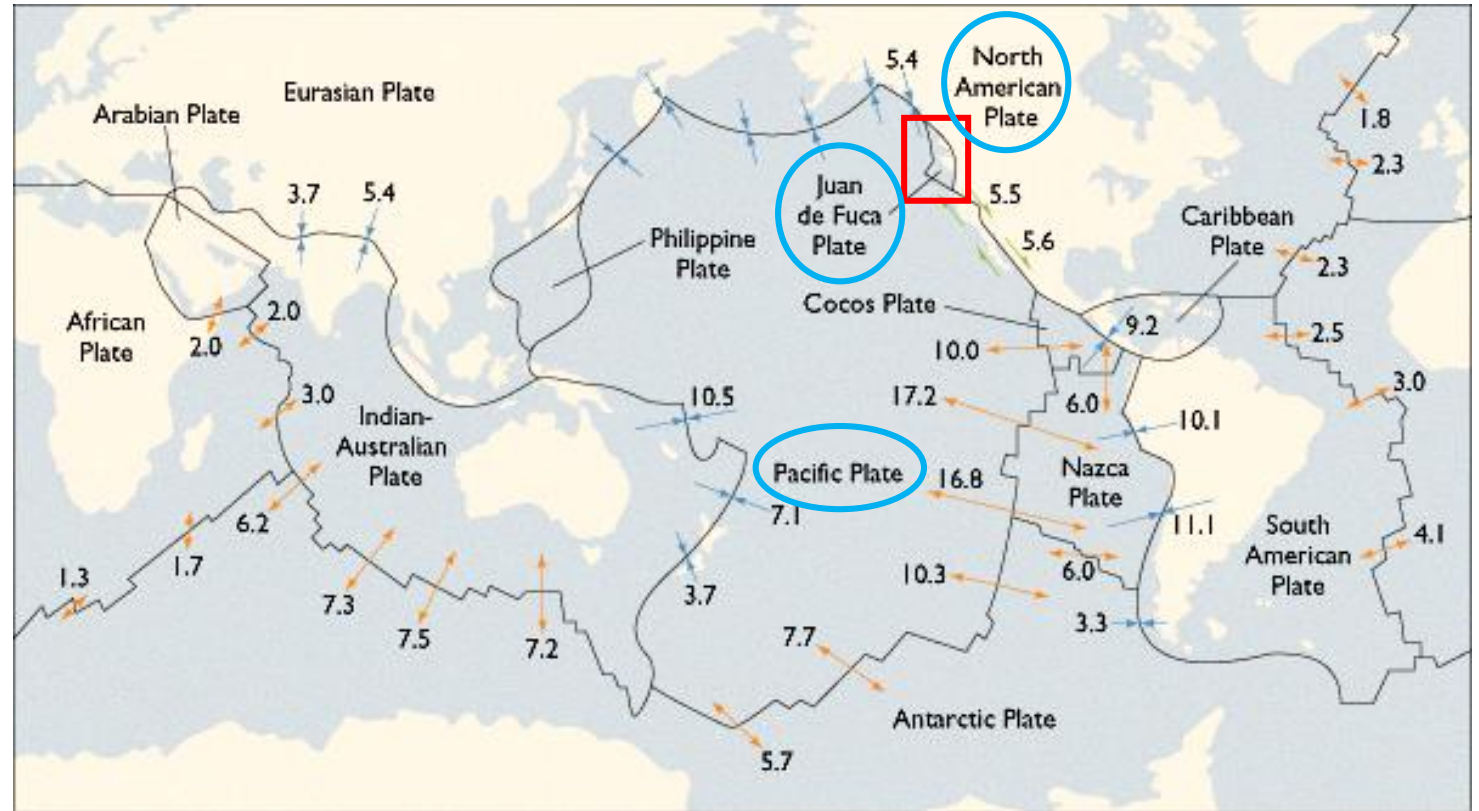
Perciò dopo un po' di tempo la configurazione evolve fino a raggiungere una geometria stabile del tipo FRF dove le linee di velocità ab , ac e bc si intersecano nel punto TJ che comincia a migrare verso est



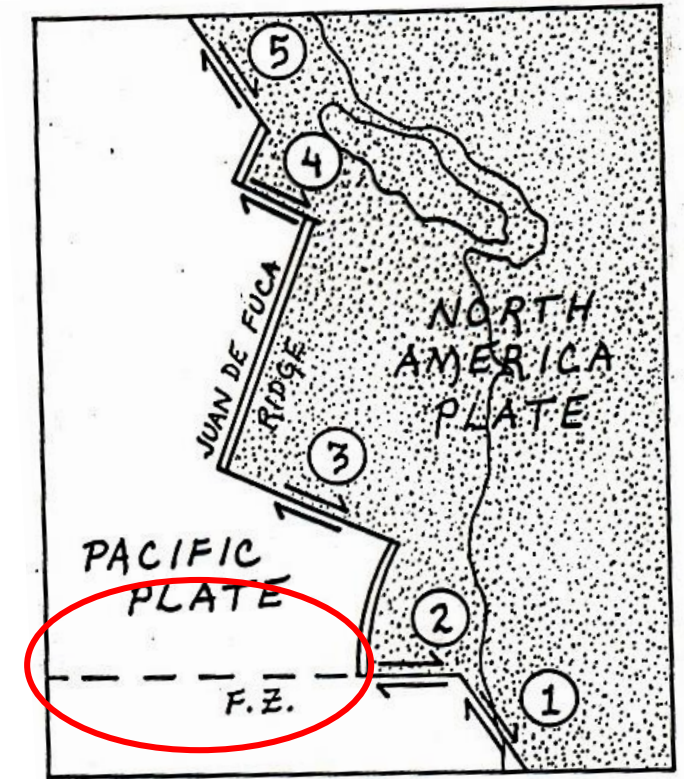
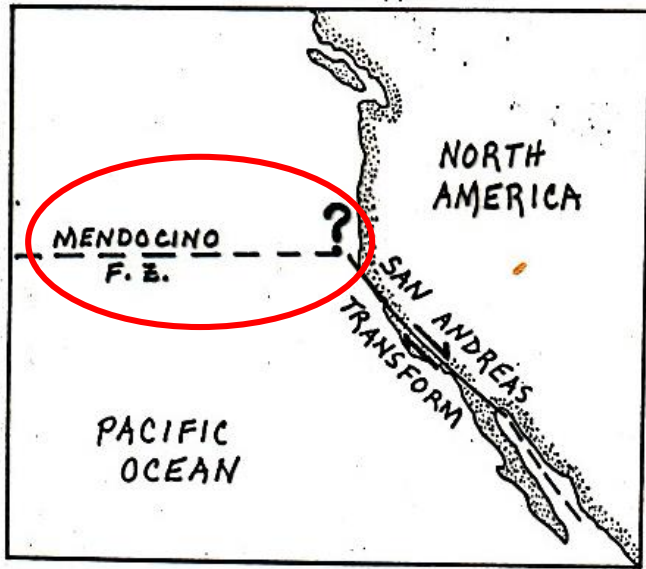
Tettonica delle placche:
calcolo dei movimenti reciproci delle placche
e diagrammi di velocità –
alcuni esempi

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

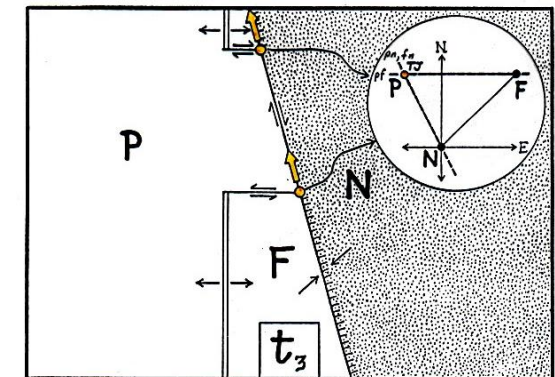
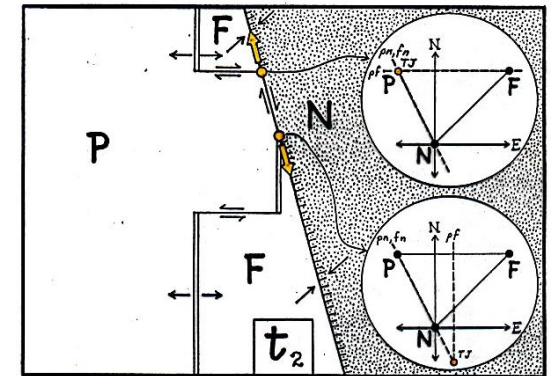
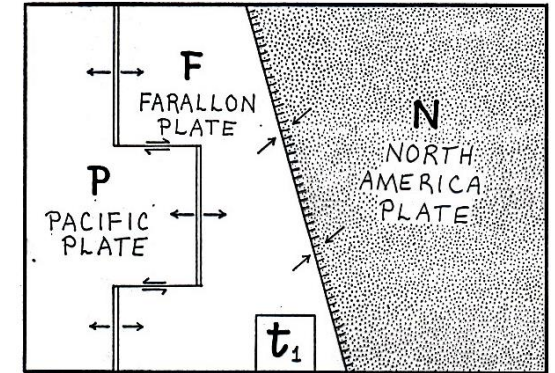
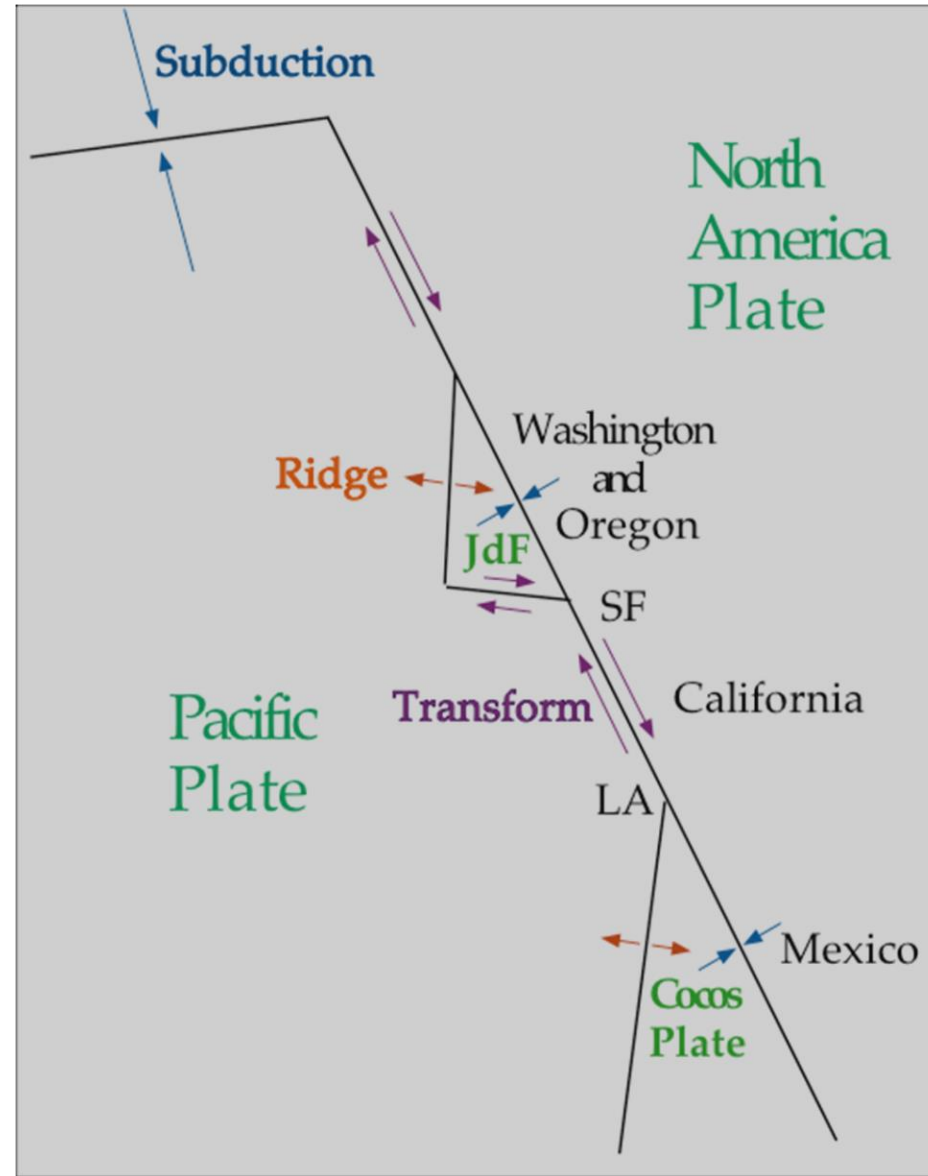


Tettonica delle placche: movimenti reciproci

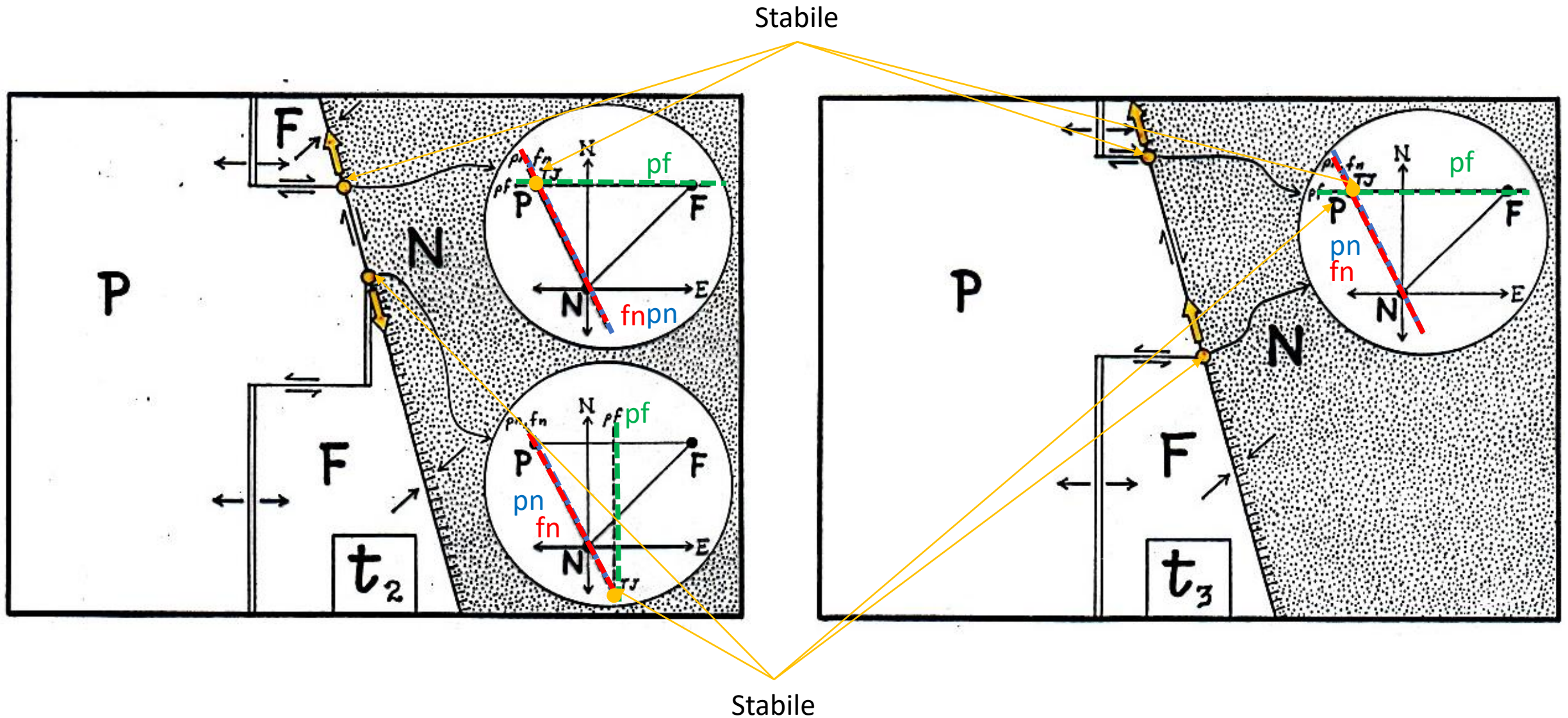


Tettonica delle placche: movimenti reciproci

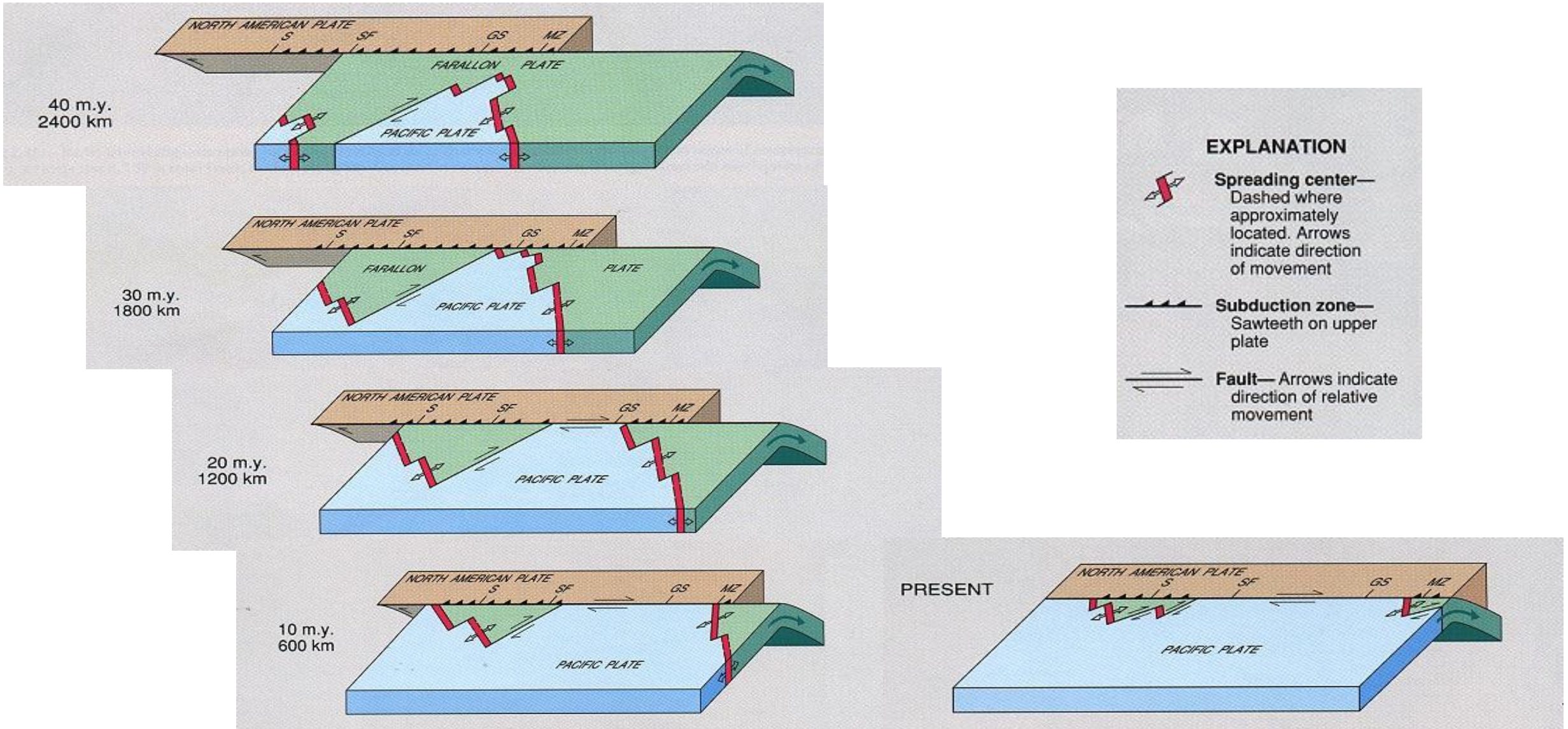
Le placche Juan de Fuca e Cocos sono i resti della placca Farallon che tra 80 Ma e 30 Ma era in subduzione sotto la costa ovest del Nord America



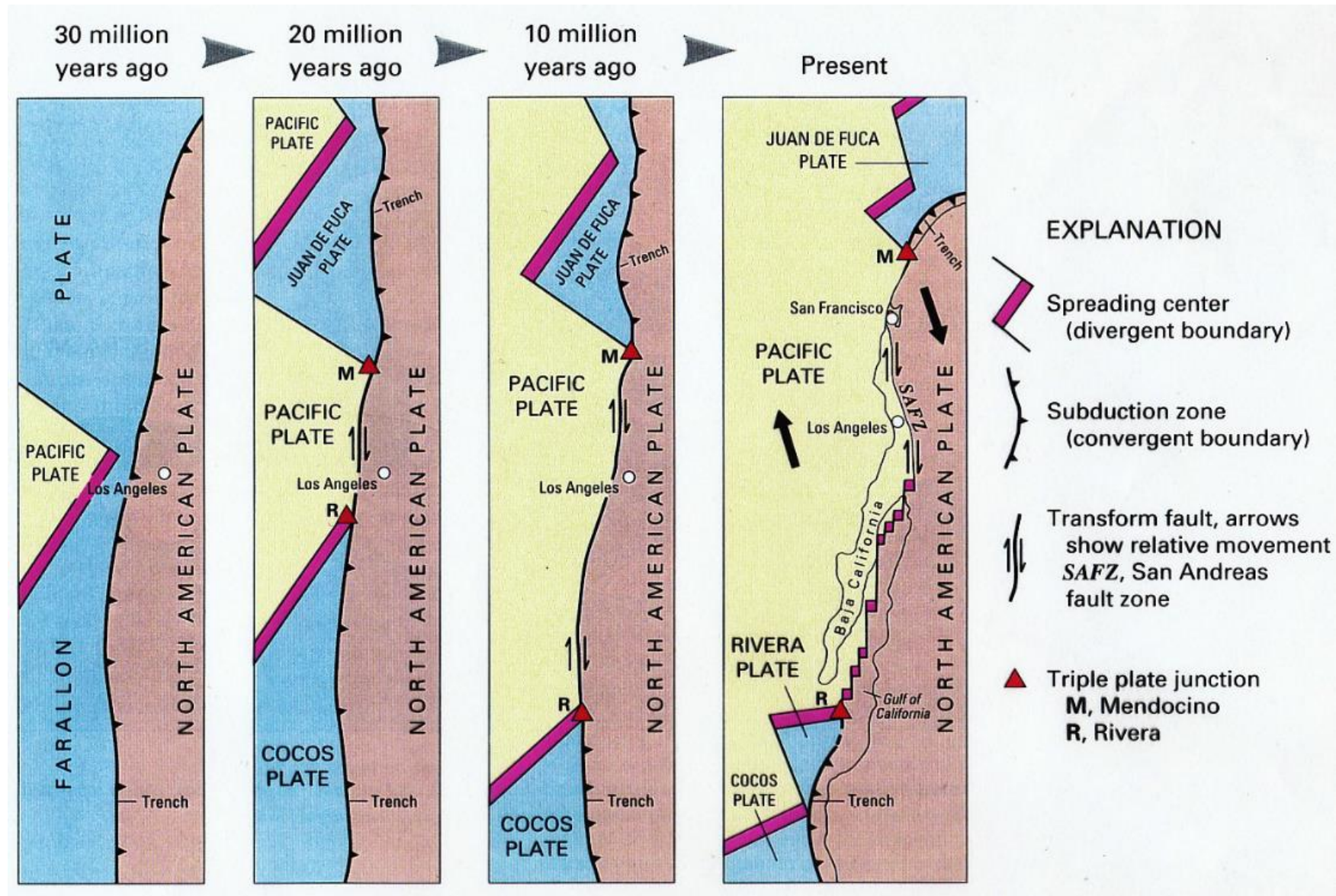
Tettonica delle placche: movimenti reciproci



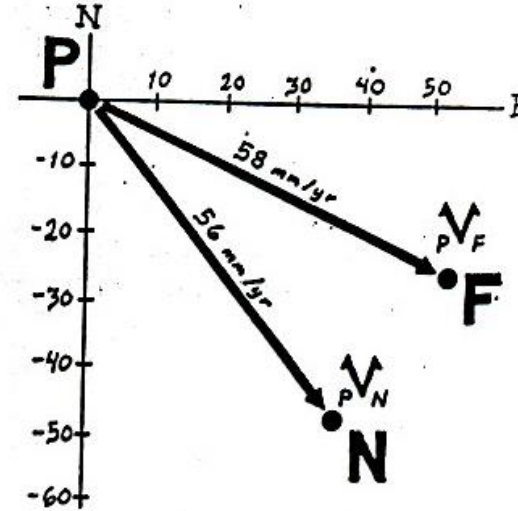
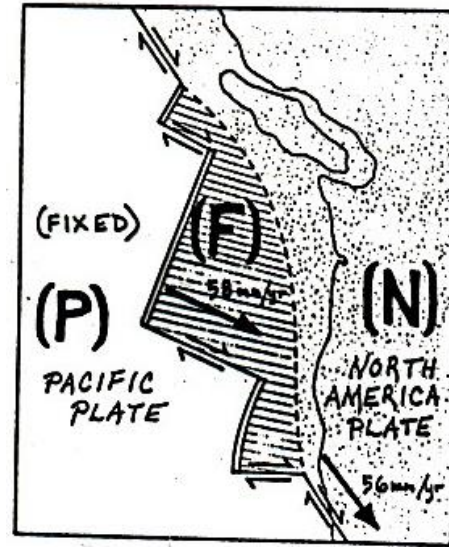
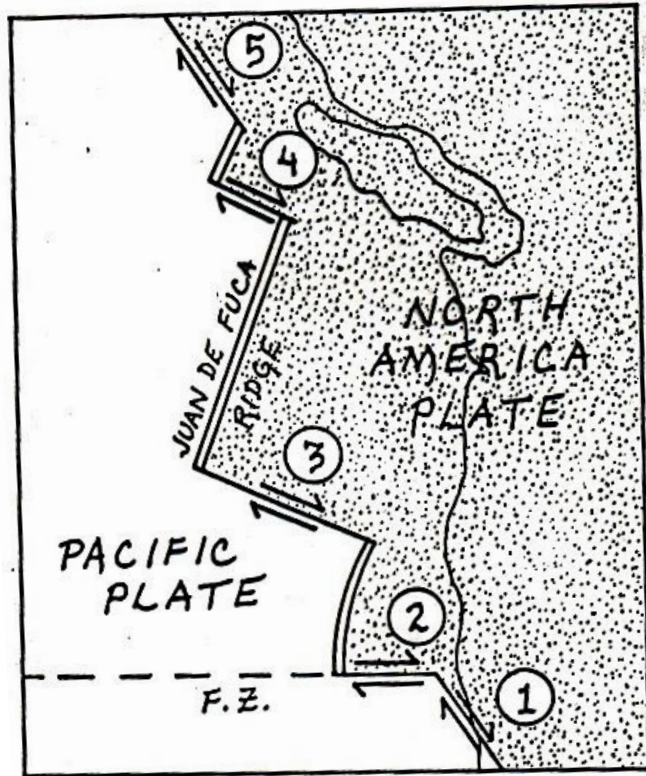
Tettonica delle placche: movimenti reciproci



Tettonica delle placche: movimenti reciproci

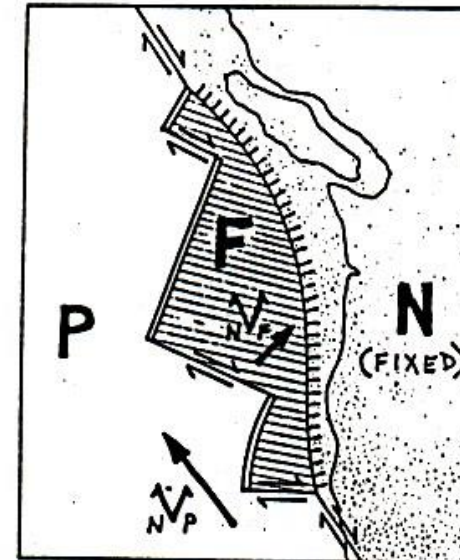


Tettonica delle placche: movimenti reciproci



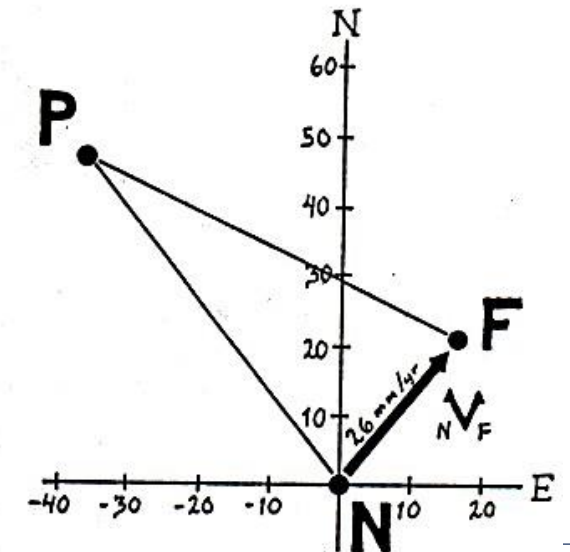
Deduciamo il movimento di F rispetto ad N

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

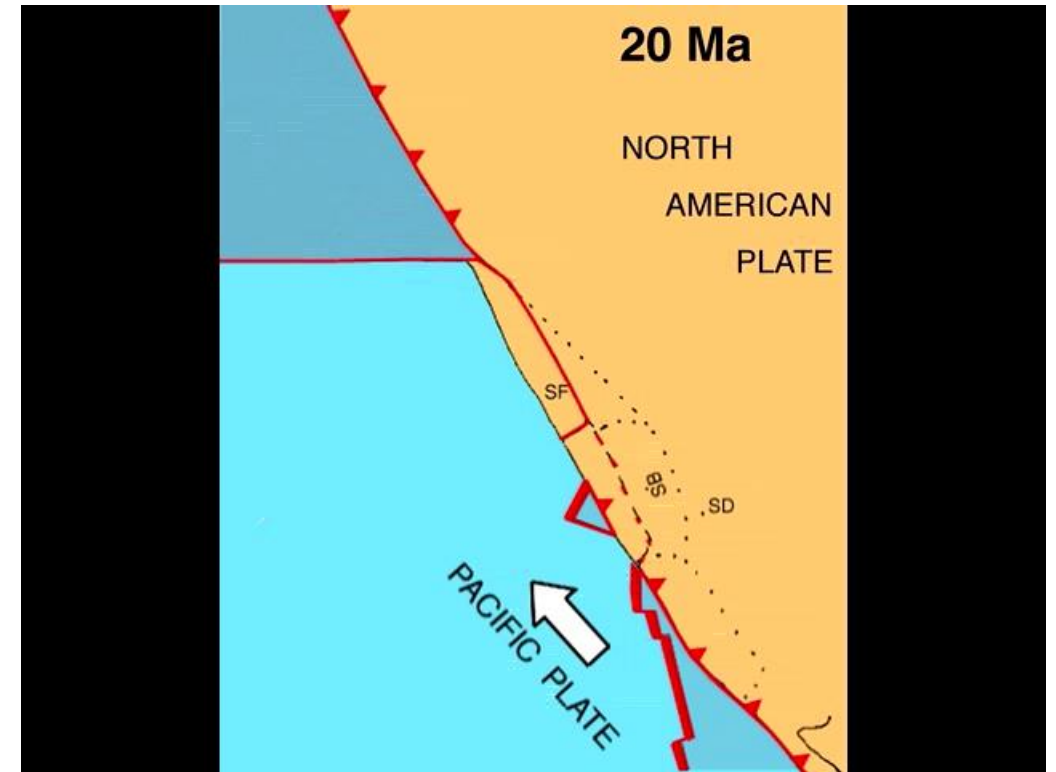
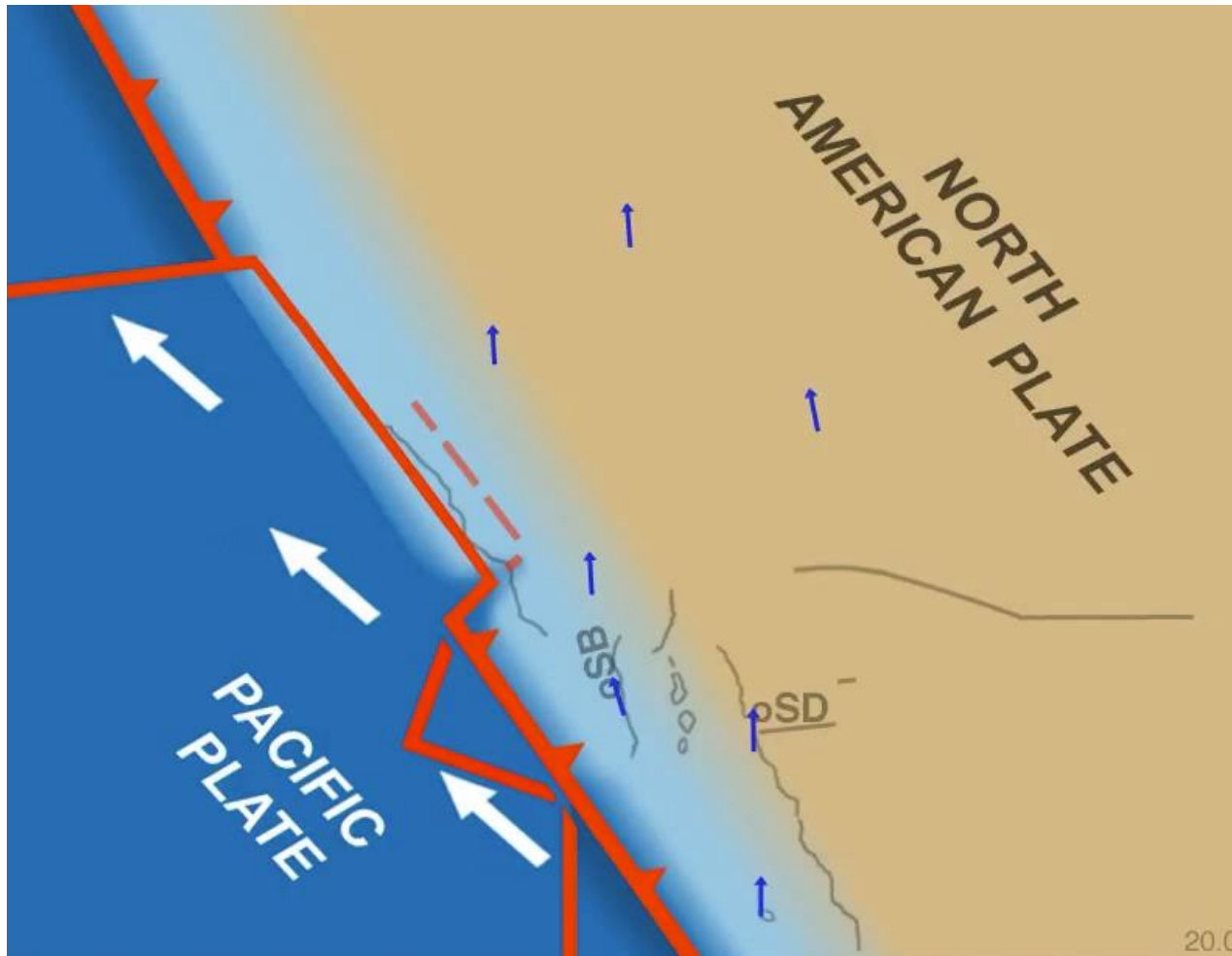


Misuriamo gli spostamenti della placca P ed N con sistemi GPS

Teniamo P fissa e riportiamo i vettori spostamento



Tettonica delle placche: movimenti reciproci

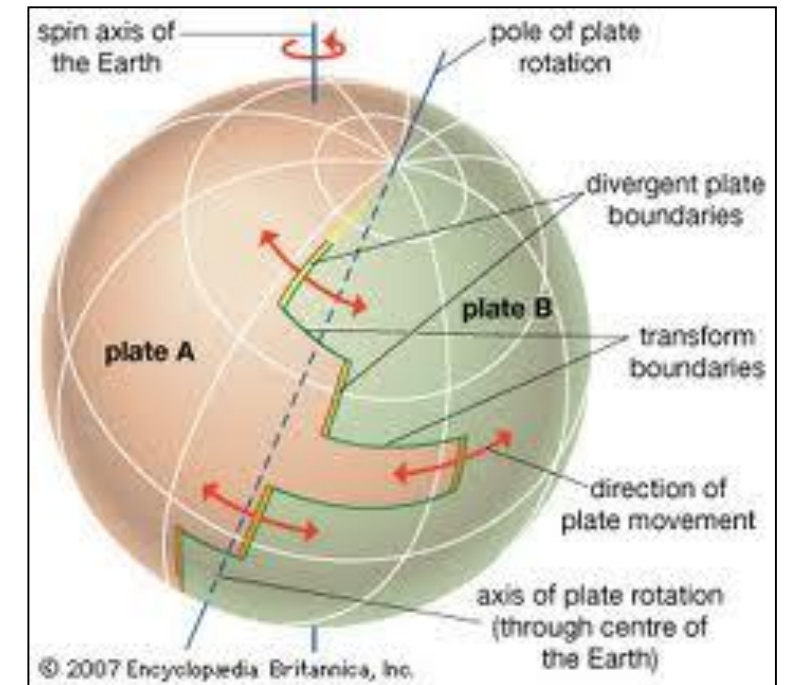
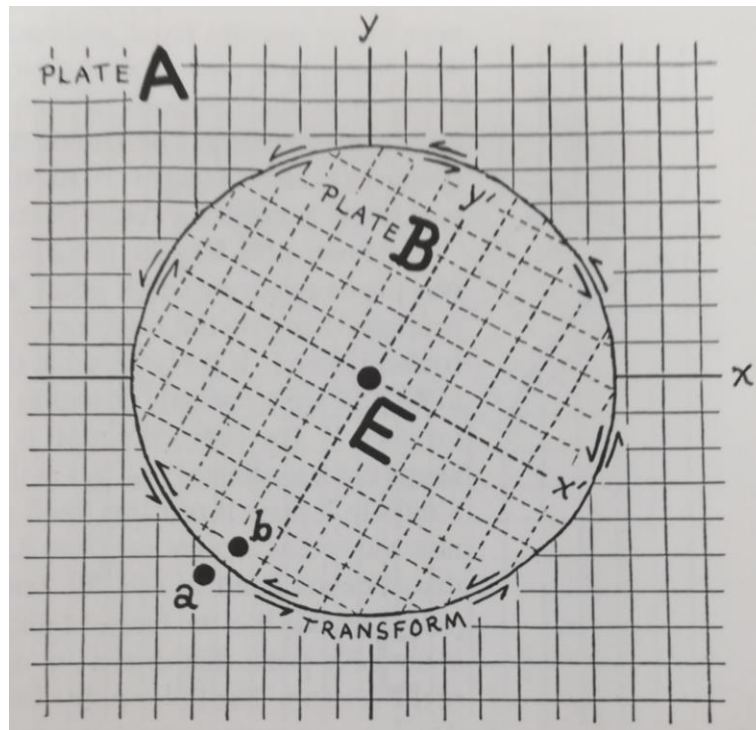


Tettonica delle placche: movimenti reciproci

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?

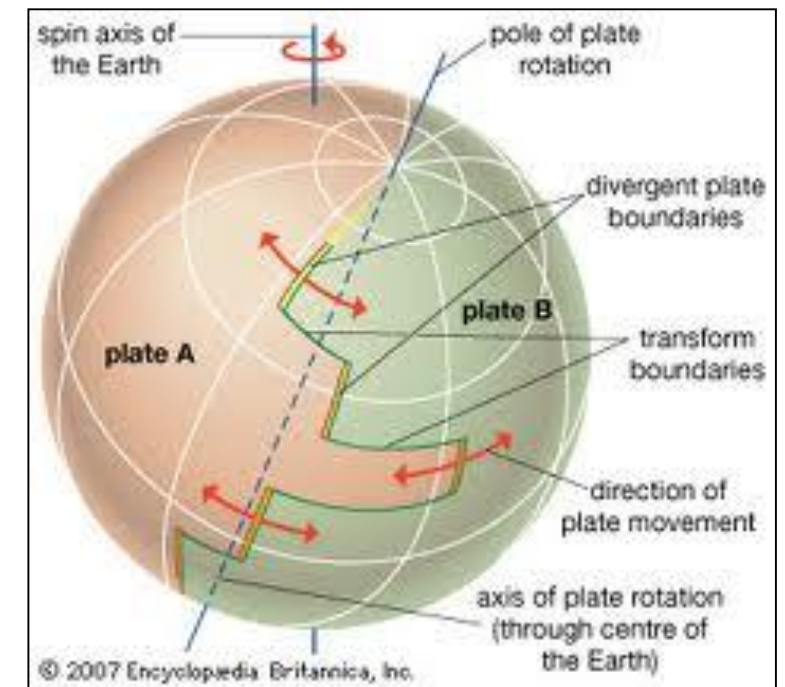
Teorema del punto fisso di Eulero:

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

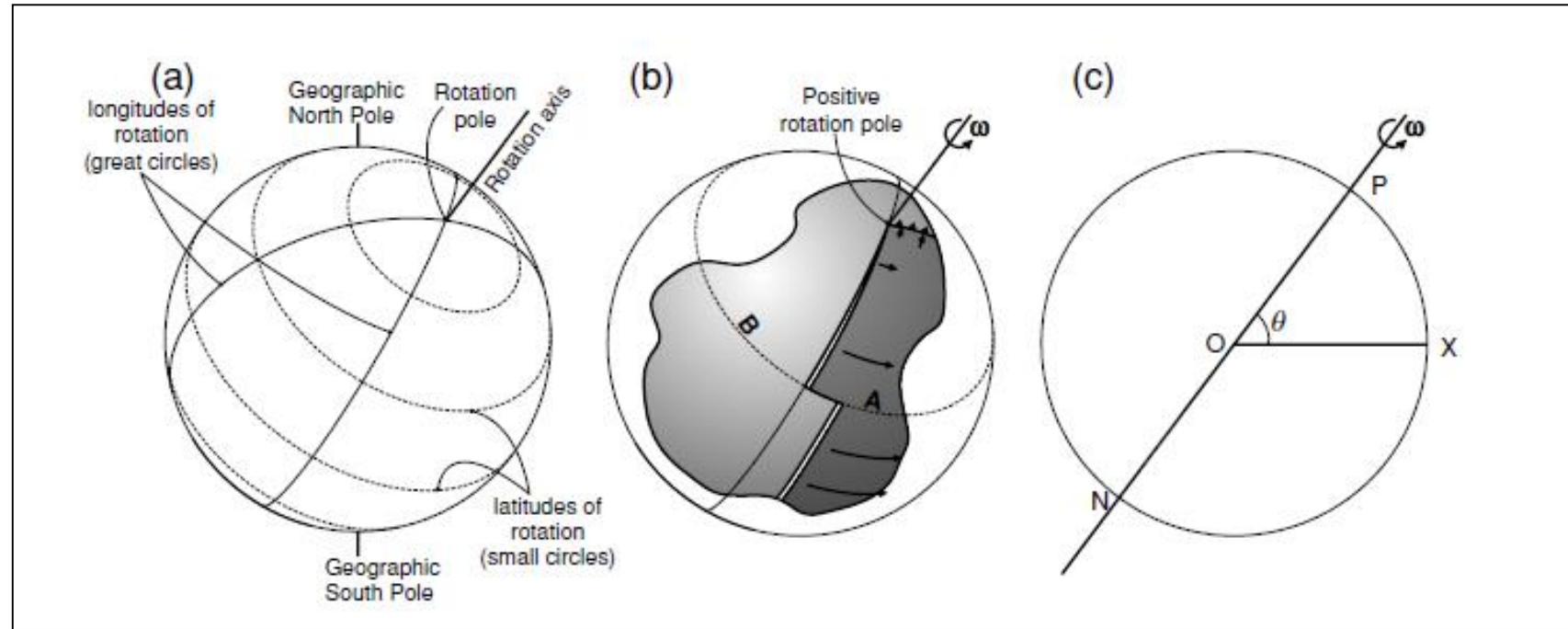
I poli di rotazione o i poli di Eulero sono i due punti in cui l'asse di rotazione taglia la superficie terrestre ->

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



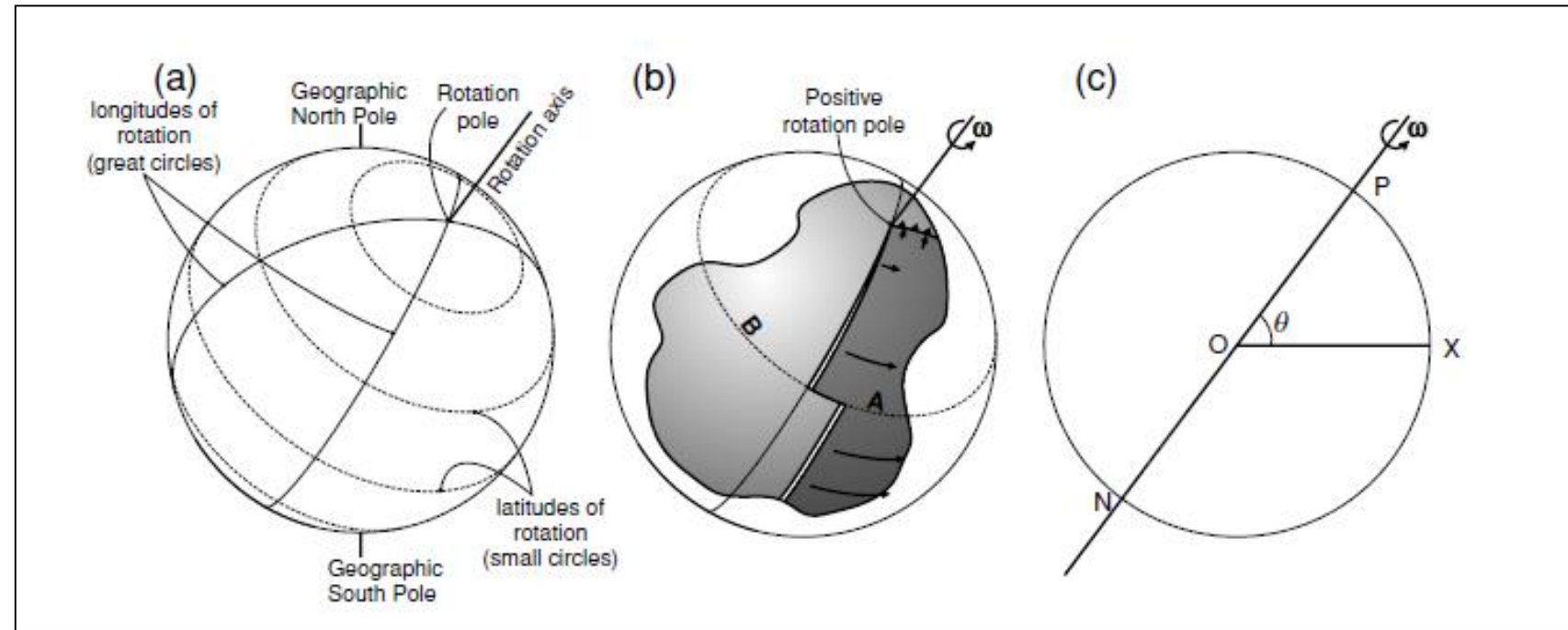
Tettonica delle placche: movimenti reciproci

(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

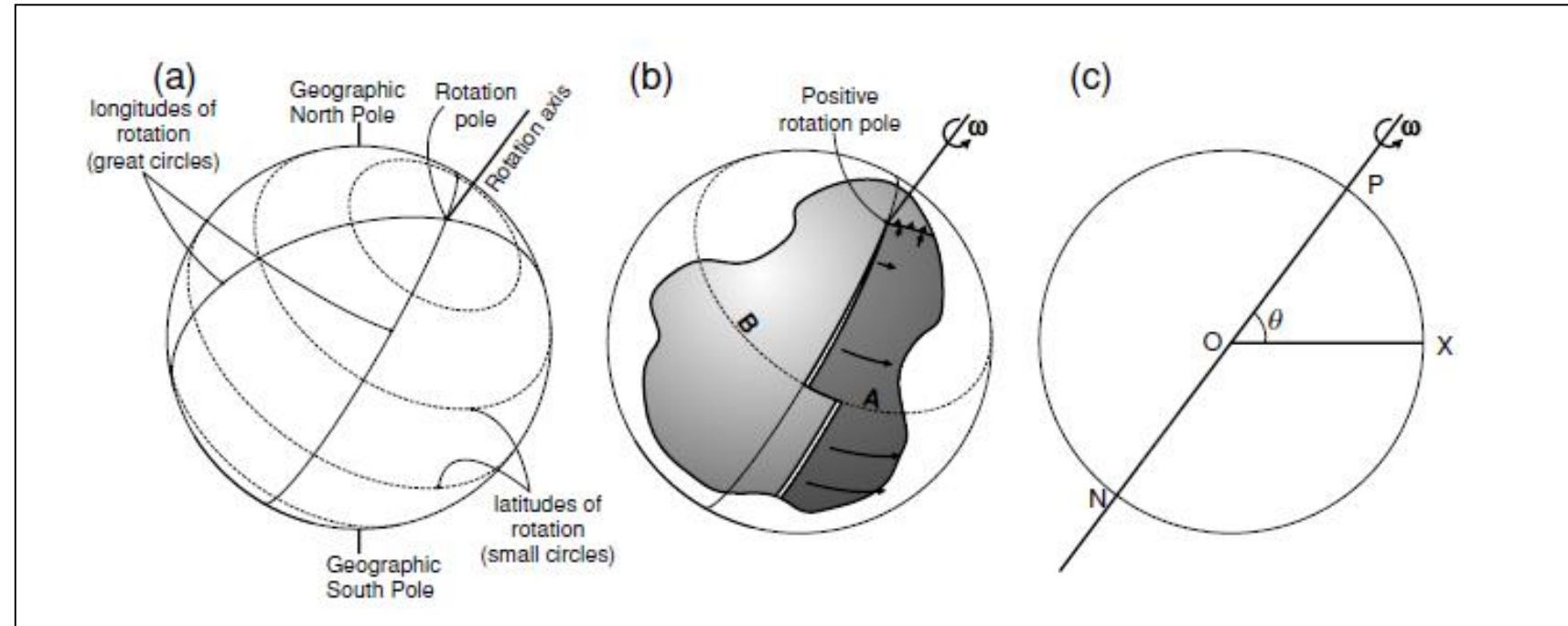
(a) Le linee di latitudine di rotazione attorno ai poli di rotazione sono piccoli cerchi (mostrati tratteggiati) mentre le linee di longitudine di rotazione sono grandi cerchi (cioè cerchi con lo stesso diametro della Terra)



(b) Margini costruttivi, distruttivi e conservativi tra le piastre A e B. Si assume la placca B fissa così che il movimento della placca A sia relativo alla placca 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.

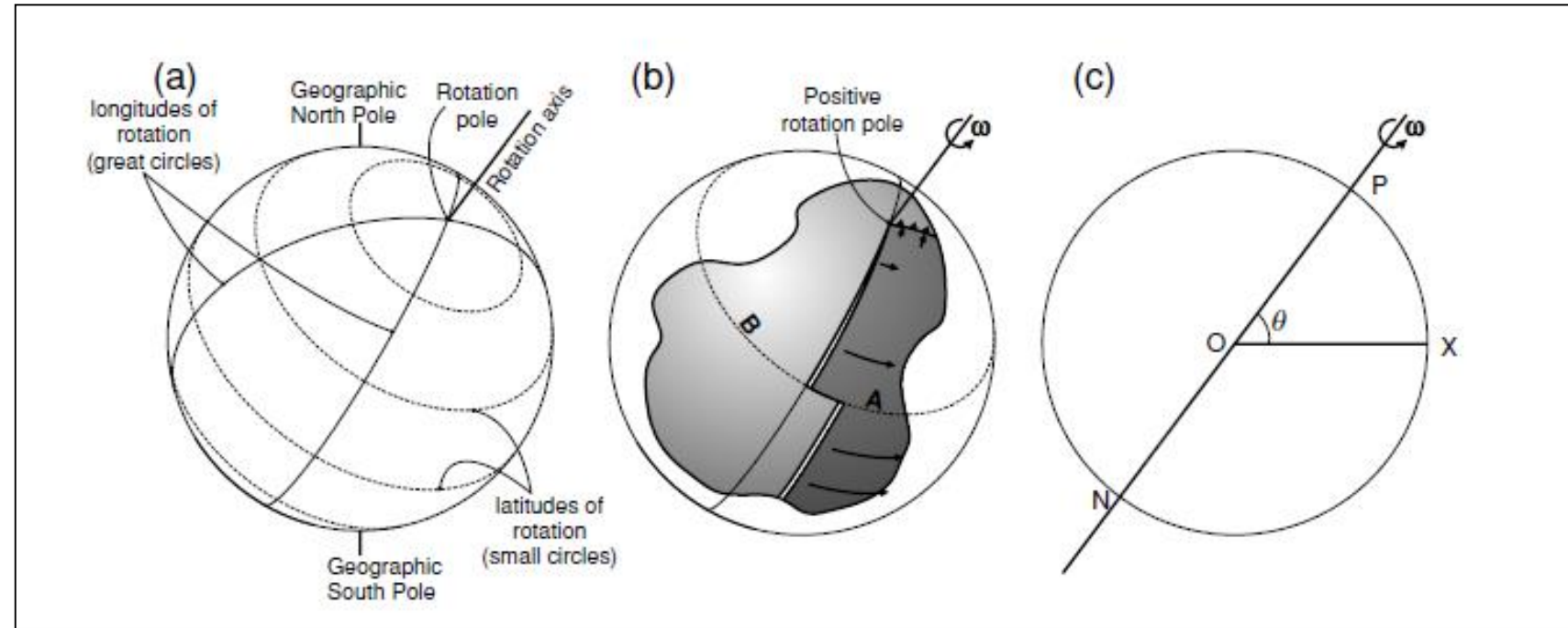
Tettonica delle placche: movimenti reciproci

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

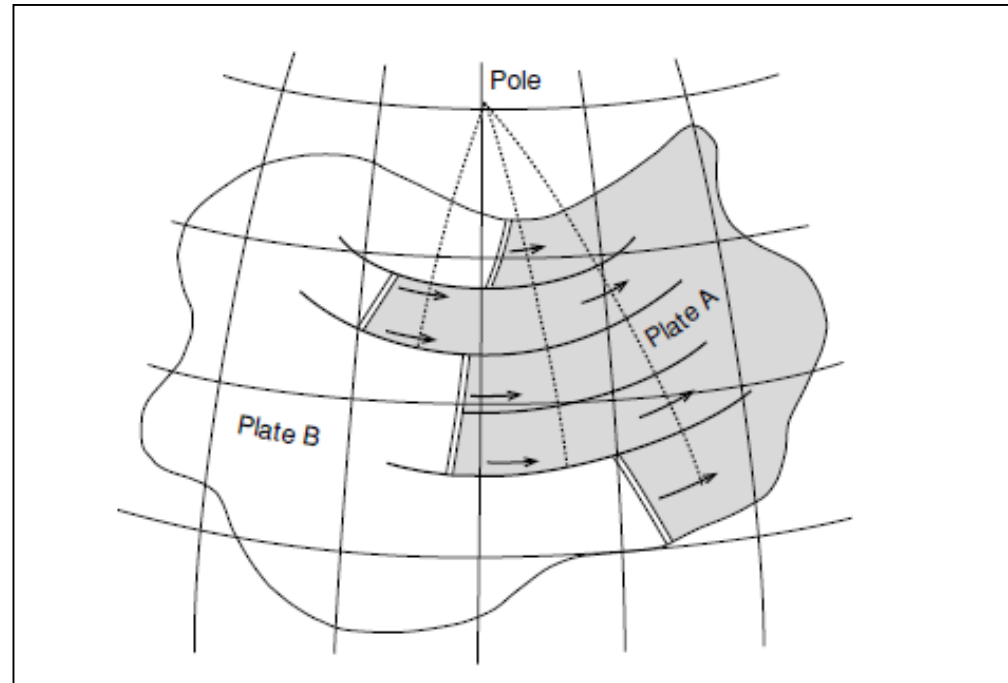
Esistono più metodi per trovare i poli di rotazione istantanei* odierni e le velocità angolari relative tra coppie di placche.

*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.

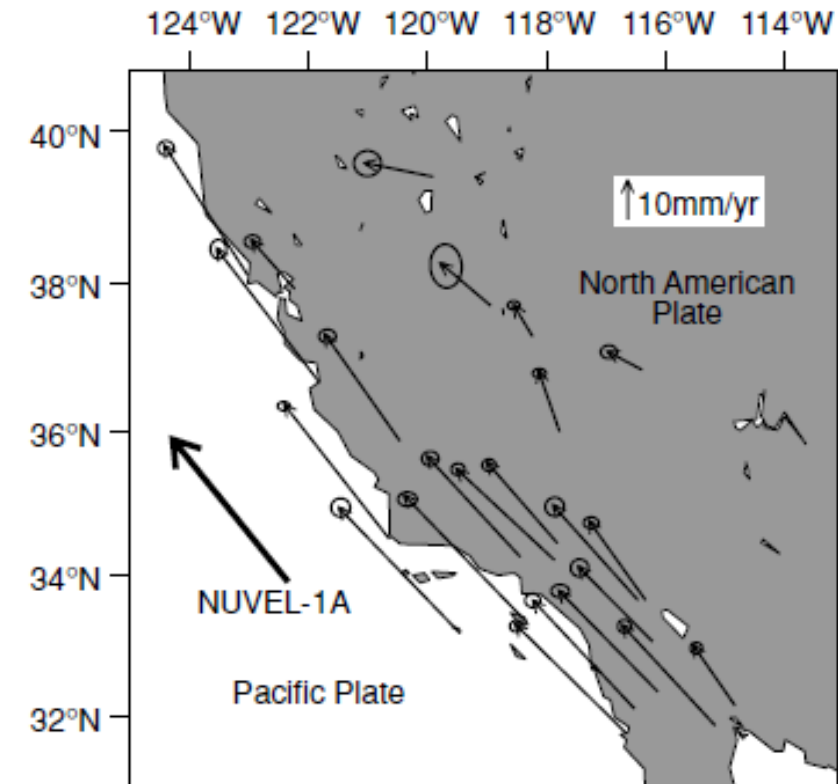
Un terzo metodo utilizza il sistema di posizionamento globale basandosi sulla rete mondiale di ricevitori **GPS**. Ha una precisione adatta alla geodinamica (1 cm nel posizionamento e $<10^{-3}$ arcsec nelle stime della posizione dei poli). Si chiama International GPS Service for Geodynamics (IGS) ed 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

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).

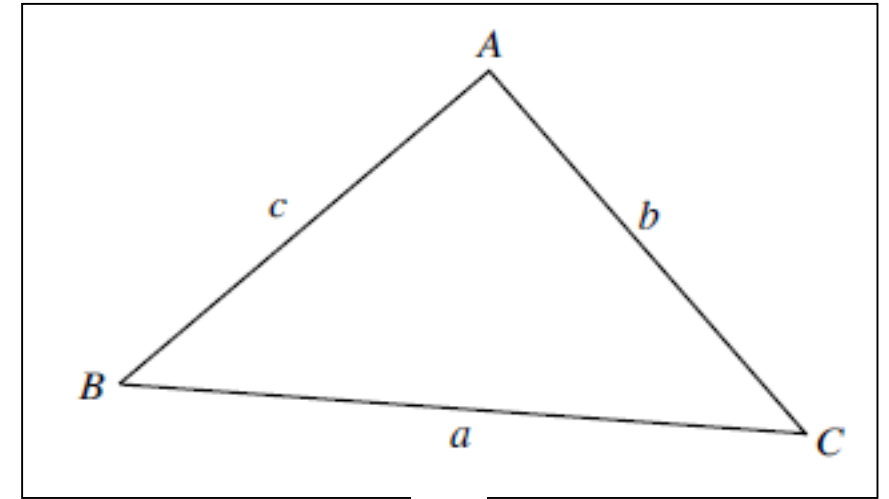


Tettonica delle placche: movimenti reciproci

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

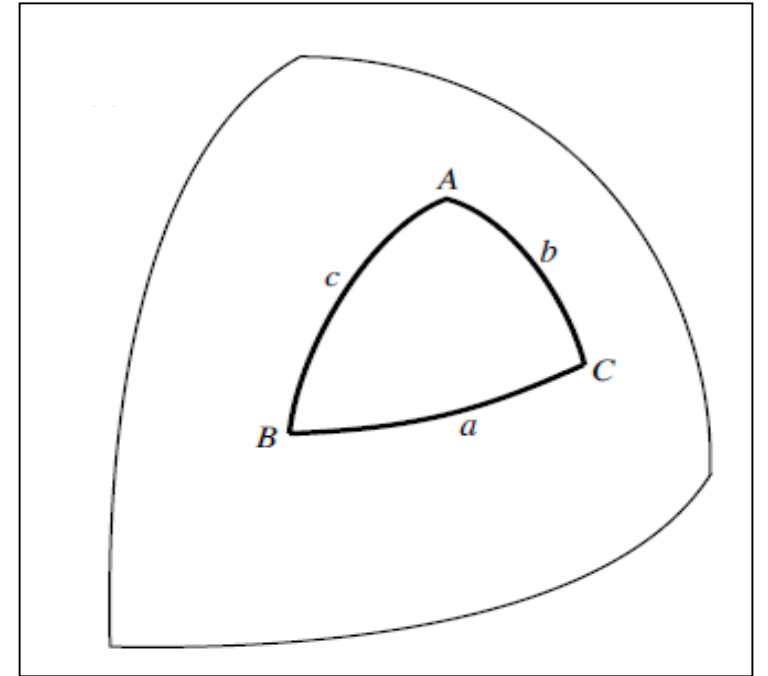
I lati di un triangolo su una superficie sferica sono archi di cerchio più grandi e la somma degli angoli interni è maggiore di 180° . Le tangenti in un punto a due cerchi più grandi definiscono l'angolo tra i due cerchi.

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:

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

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

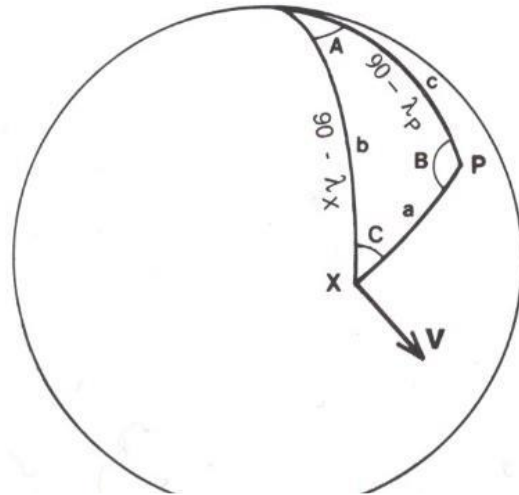


Le lunghezze dei lati possono essere convertite negli angoli che sottendono al centro della Terra. Ad esempio, la distanza dal polo all'equatore sulla superficie terrestre può essere considerata come 10.007 km o come 90 gradi di arco.

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

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

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

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

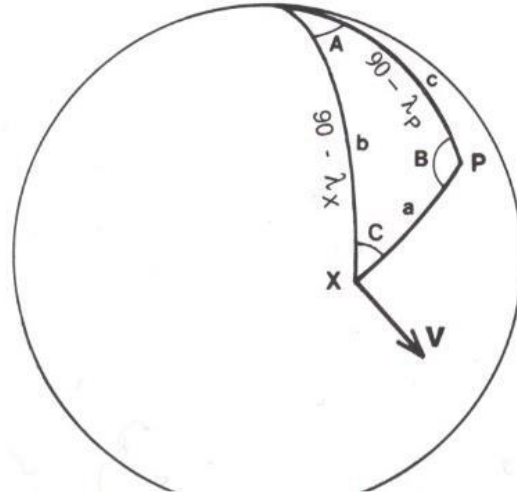
L'azimut della velocità rispetto al N è dato da:

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

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
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

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

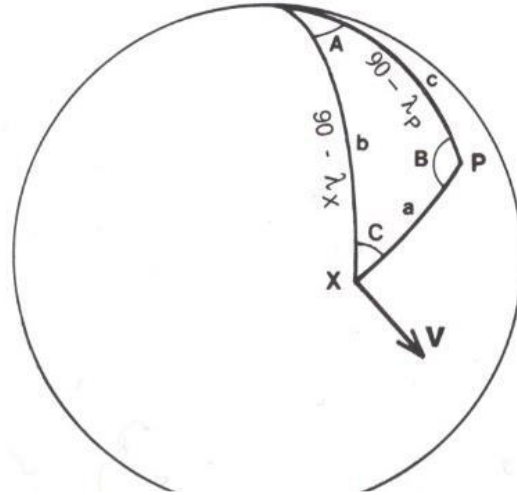
$$\cos a = \cos(90 - \lambda_X) \cdot \cos(90 - \lambda_P) + \sin(90 - \lambda_X) \cdot \sin(90 - \lambda_P) \cdot \cos(\phi_P - \phi_X) \quad [\text{Eq 7}]$$

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

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	$^{\circ}$ 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	

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

[Eq 9]

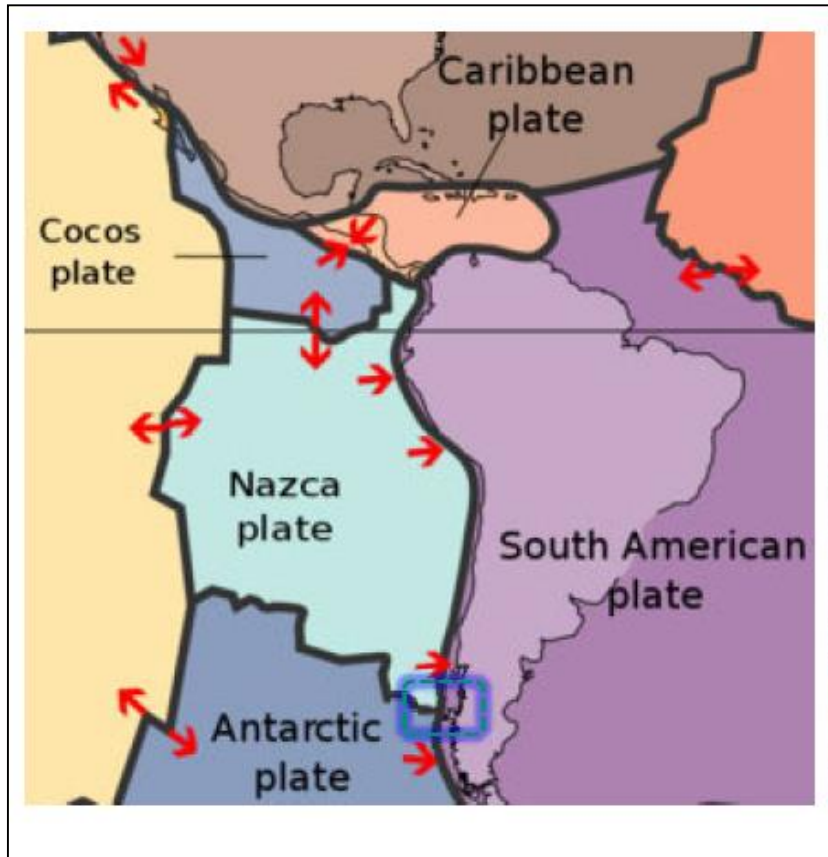
da cui si ricava

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

[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

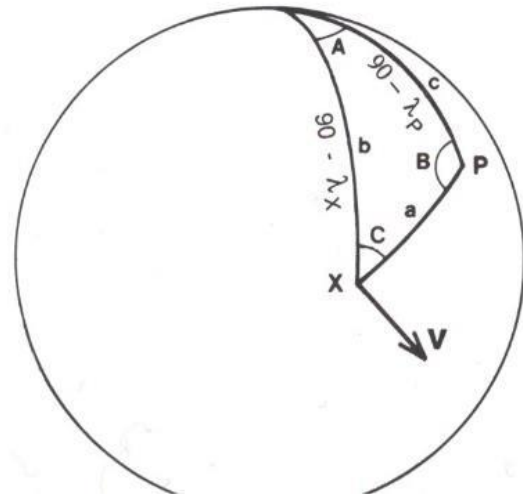
$$\lambda_X = -28^\circ \quad \varphi_X = -71^\circ$$

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	

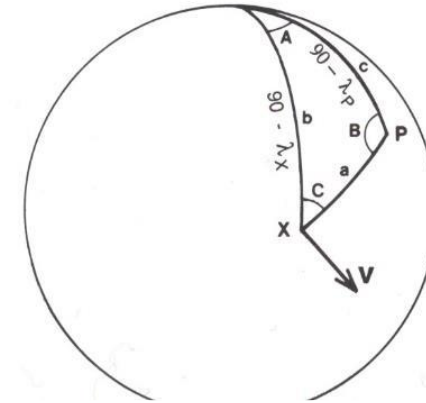
Sostituiamo i valori:
 nell'Eq 8 per trovare a
 nell'Eq 10 per trovare C
 nell'Eq 3 per trovare v
 nell'Eq 4 per trovare β

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

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

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

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

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

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

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

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

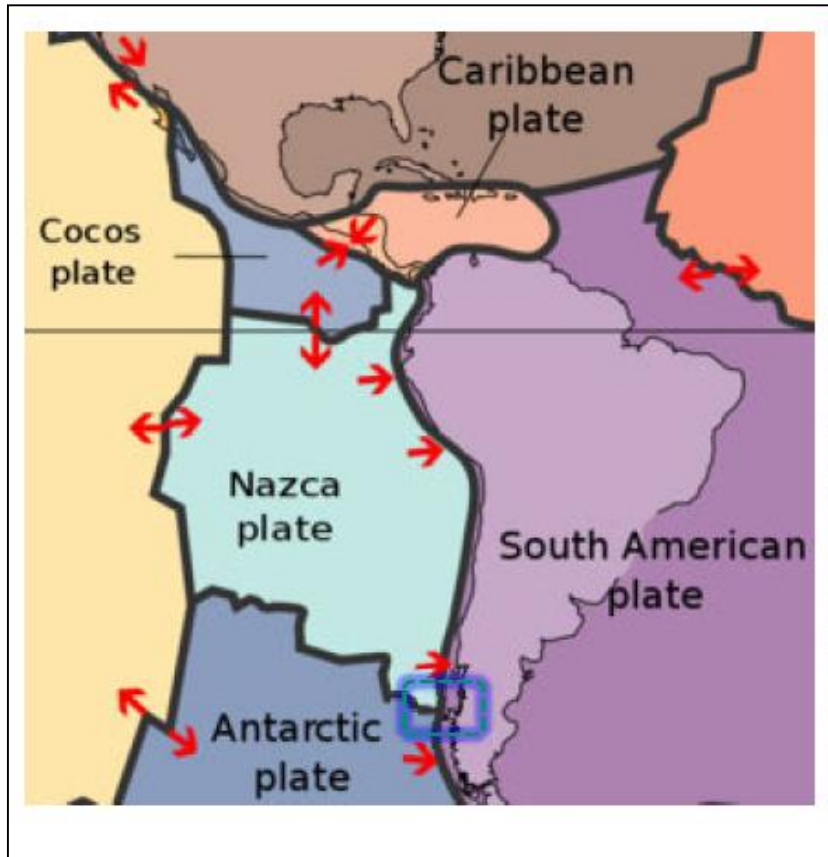
$$C = \sin^{-1} \left[\frac{\sin(56) \sin(-94 + 71)}{\sin(86.26)} \right] = -12.65^\circ \quad [\text{Eq 10}]$$

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

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

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