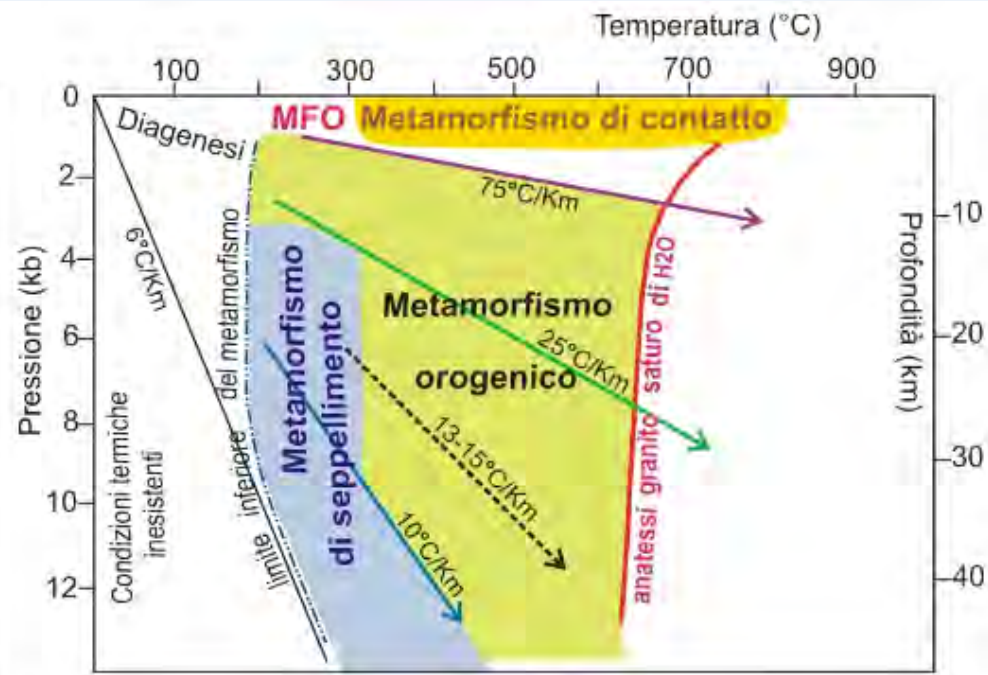
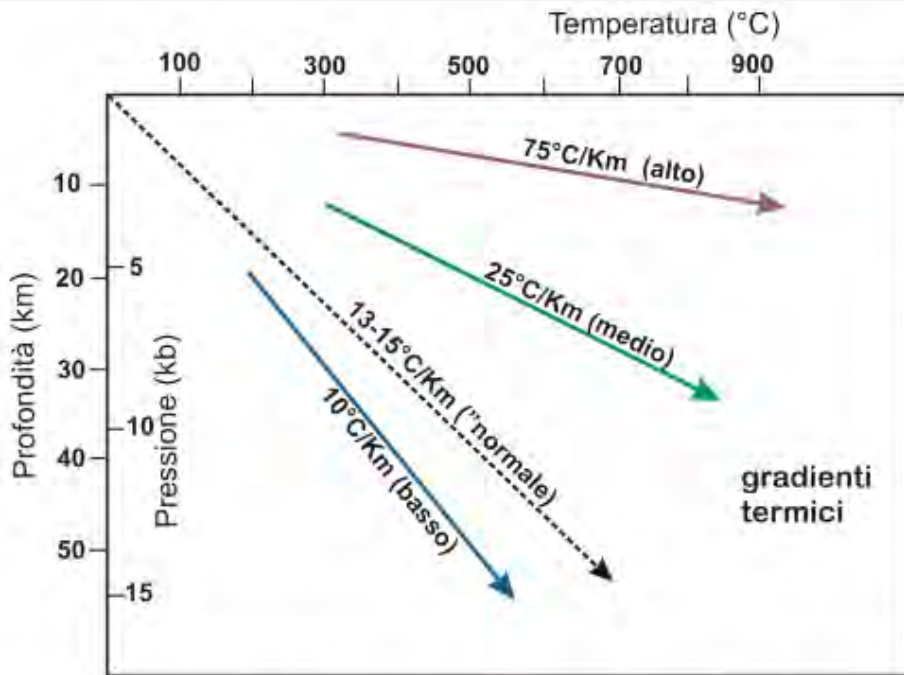


Gradienti termici e tipi di metamorfismo

Il contesto geologico determina il tipo di metamorfismo che può subire un corpo roccioso ed i gradienti termici in questo contesto hanno un ruolo fondamentale.



- Gradiente termico "normale"
($\equiv 1 \text{ HFU} = 1 \cdot 10^{-6} \text{ cal cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$)
- Gradiente termico intermedio
- Gradiente termico alto
- Gradiente termico basso

- MFO** Metamorfismo di Fondo Oceanico
 - Met. Orogenico
 - Met. Seppellimento & Subduzione
 - Met. Contatto
- estensione regionale
- estensione locale

Tipi di metamorfismo

I tipi di metamorfismo variano in funzione della collocazione geologica e dell'estensione geologica.

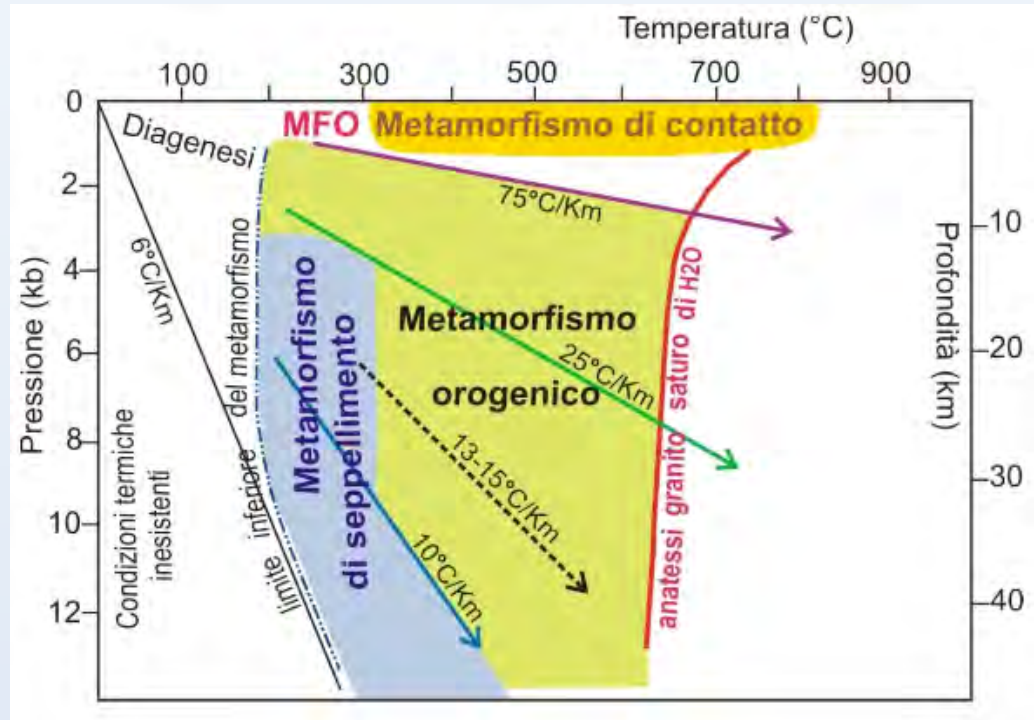
Estensione locale:
(~ km di estensione)

- di contatto
- di cataclasi

Non riportato in questo diagramma in quanto le pressioni non sono isostatiche

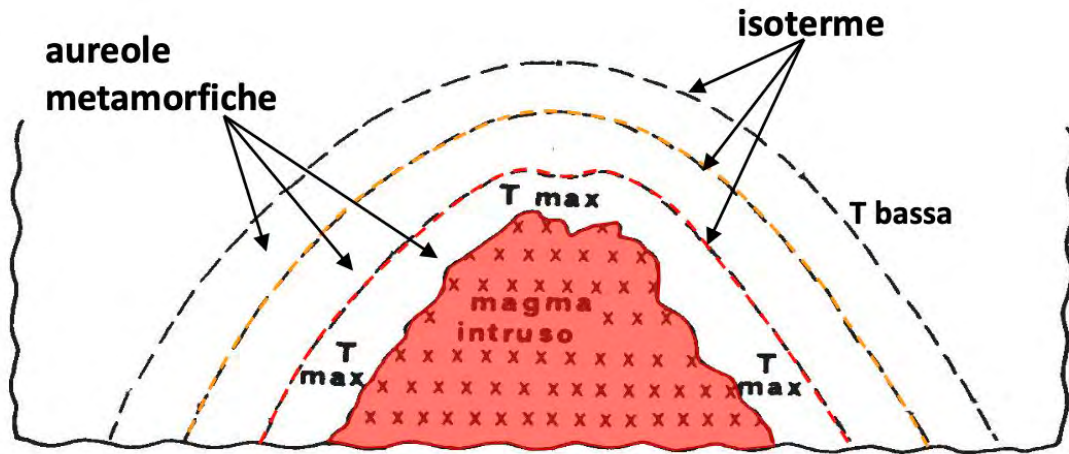
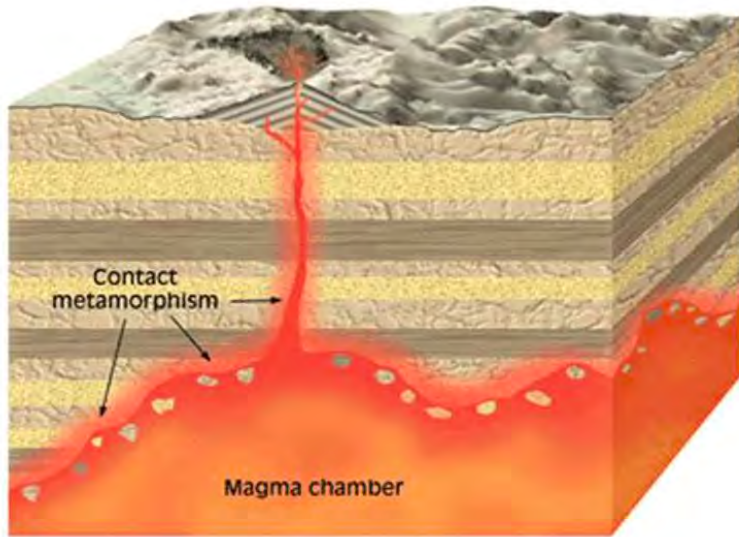
Estensione regionale:
(migliaia di km di estensione)

- orogenico o di collisione
- di seppellimento/subduzione
- di fondo oceanico



Metamorfismo di contatto

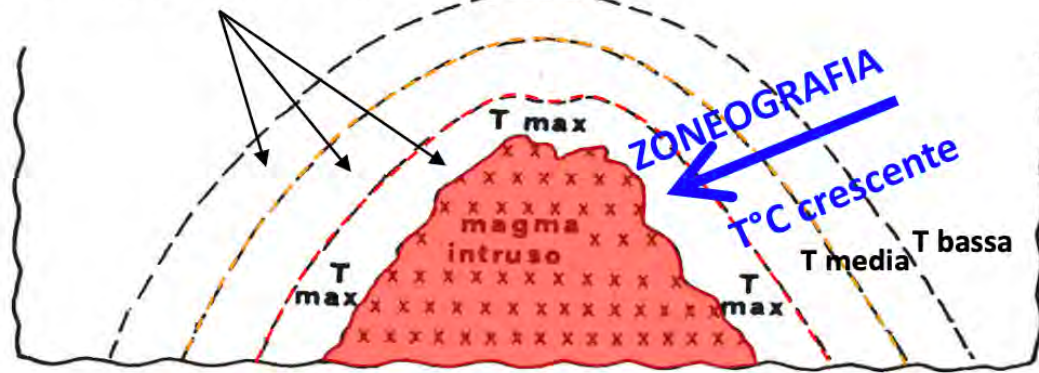
Viene anche detto «termometamorfismo» ed è un processo alla scala locale.



- È dovuto al riscaldamento delle rocce incassanti da parte di intrusioni magmatiche a bassa profondità (epiplutoniche; < 15 km, < ~ 5 kbar). Crea delle aureole metamorfiche.
- Il range di T è ampio, in funzione della vicinanza alla massa magmatica.
- ~ 600°C vicino a intrusioni acide, ~ 800°C vicino a intrusioni basiche.
- Il gradiente termico è il massimo, ma varia in funzione della distanza dalla massa magmatica.
- In funzione delle zone metamorfiche, il cambiamento mineralogico sarà più o meno spinto.
- Le strutture sono massive, no strutture orientate

Metamorfismo di contatto

AUREOLE METAMORFICHE (da pochi m a qualche km)



Avvicinandosi alla massa magmatica si distinguono delle fasce con associazioni mineralogiche di T crescente e ricostruzione strutturale crescente



ZONEOGRAFIA

Il cambiamento mineralogico e strutturale dipende da:

**Caratteristiche
massa ignea**

+

**Caratteristiche
rocce incassanti**

+

**Profondità intrusione
Modalità trasporto
calore (conduzione,
convezione)**

**Massa, Temperatura,
chimismo,
contenuto in volatili !!**

**Chimismo,
porosità/permeabilità**

NB:

Attorno ai plutoni granitoidi (acidi) le aureole sono spesso più estese rispetto a quelli gabbri (basici). Questo è dovuto all'effetto dei fluidi, più abbondanti nel primo caso.

I fluidi facilitano di molto lo scambio di calore ed il trasporto degli elementi chimici. Infatti le rocce incassanti hanno spesso composizioni modificate (METASOMATISMO).

Metamorfismo di contatto

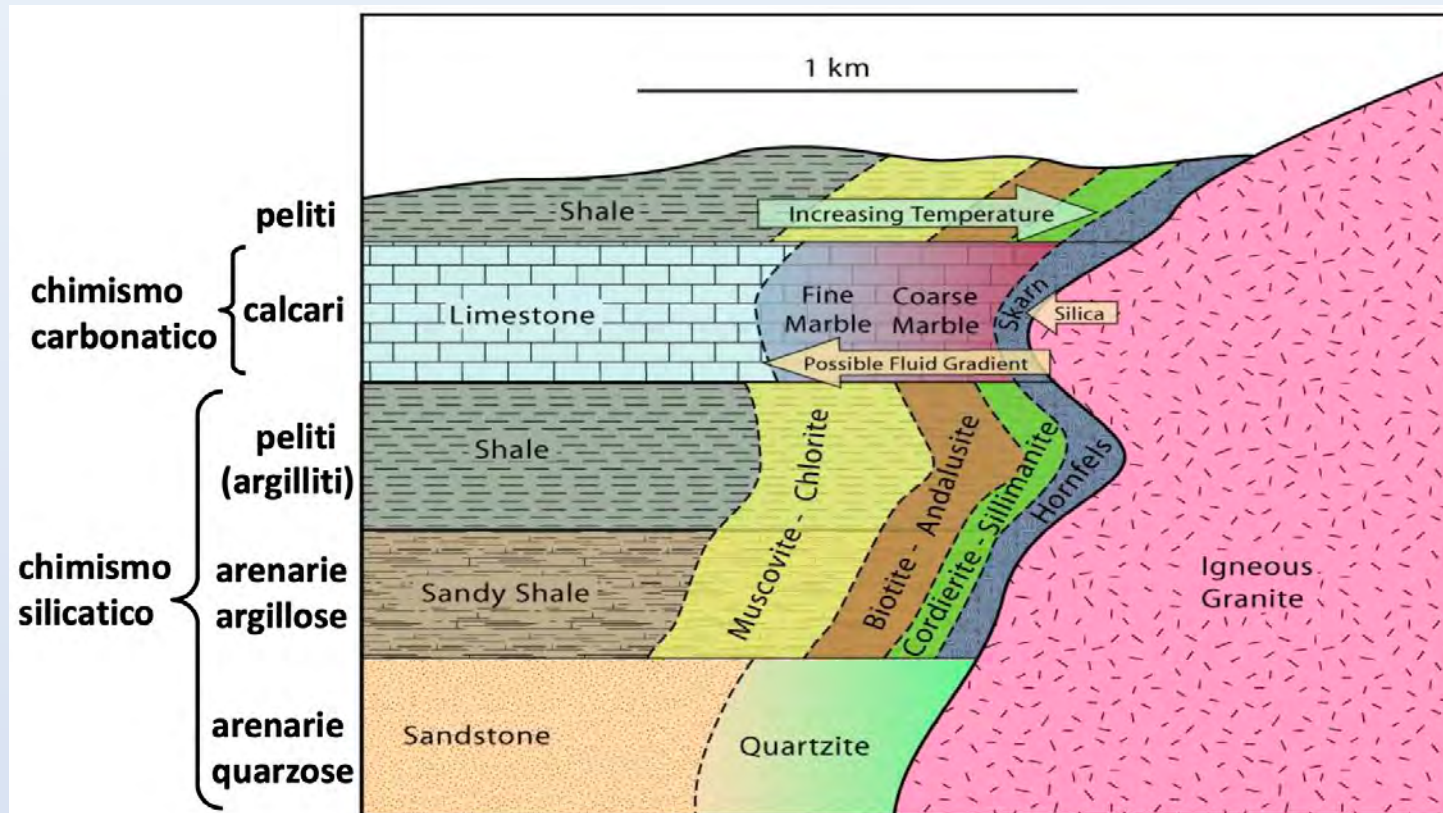
Minerali tipici:

Se protoliti pelitico-arenacei:
andalusite, cordierite, biotite, K-feldspato,
plagioclasio, corindone, spinelli.

Rocce risultanti:
Cornubianiti
(Hornfels)

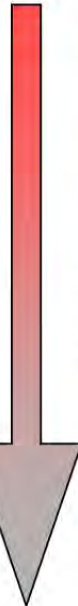
Se protoliti calcareo-dolomitici:
tremolite, diopside (fassaite), wollastonite,
Ca-granati, vesuviana, epidoti, forsterite,
anortite, brucite....., oltre a calcite e
dolomite

Rocce risultanti:
Marmi / Calcefiri



Metamorfismo di contatto

ZONEOGRAFIA



vicino al contatto
(alta T°C)
Aureole "interne"

più lontano dal
contatto (media T°C)

distanti dal contatto
(bassa T°C)
Aureole "esterne"

In rocce PELITICO-ARENACEE → CORNUBIANITI

biotite, spinelli, corindone, cordierite, feldspati,
granati, sillimanite

Strutture massive, granoblastiche o peciloblastiche,
completamente ricostruite

Andalusite, biotite, muscovite

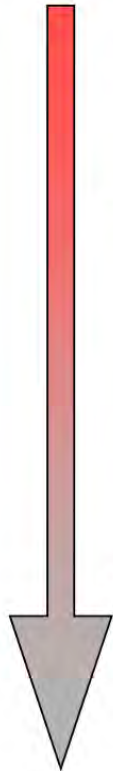
Parziale ricostruzione strutturale, con possibili
residui di strutture pre-metamorfiche

Locali accumuli di muscovite e clorite, rara biotite
e andalusite (che compaiono come "macchie")

Caratteri strutturali ≈ originali

Metamorfismo di contatto

ZONEOGRAFIA In rocce **CARBONATICHE** —→ **MARMI/CALCEFIRI/SKARN**



**vicino al contatto
(alta T°C)
Aureole "interne"**

oltre a calcite e << dolomite:

Wollastonite ($\text{Ca}[\text{SiO}_3]$), grossularia (Ca-gt), andradite ($\text{Ca-Fe}^{3+}\text{-Ti-gt}$), vesuviana, anortite, diopside (fassaite), periclasio (MgO), monticellite ($\text{Ca}(\text{Mg,Fe})[\text{SiO}_4]$), forsterite,

Strutture : MASSIVE, granoblastiche, omeo-eteroblastiche, peciloblastiche, di forte compenetrazione tra le fasi

**allontanandosi dal
contatto
(media-bassa T°C)**

Acuni minerali di quelli sopra + epidoti, tremolite o altri anfiboli, brucite ($\text{Mg}[\text{OH}]_2$), talco, serpentino....

Strutture : residui strutturali sedimentari (es.stratificazioni) spesso conservati, anche per ricostruzioni mineralogiche ± avanzate

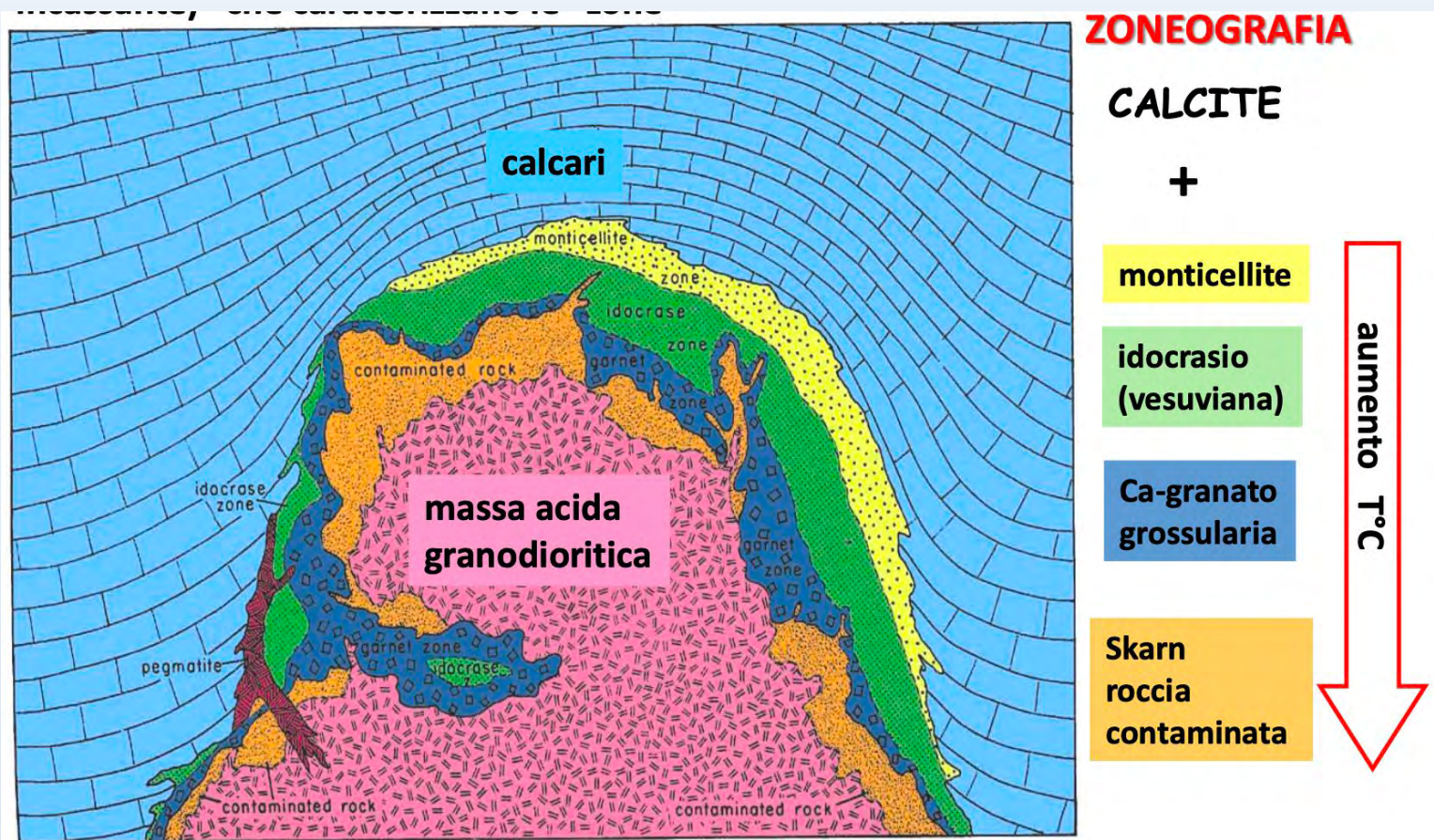
Metamorfismo di contatto

Nelle metamorfiti di contatto sono comuni gli effetti metasomatici:

la circolazione dei fluidi magmatici trasferisce calore (convezione) e specie chimiche.

E' particolarmente evidente per plutoni granitici e incassanti carbonatici.

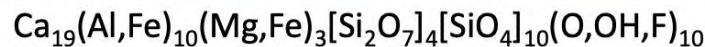
Si producono gli SKARN, rocce carbonatiche ricche di Fe-silicati e minerali metallici (ematite, magnetite, solfuri vari) spesso economicamente sfruttabili



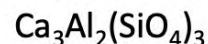
Monticellite



Vesuviana (Idocrasio)



Grossularia



Metamorfismo di contatto

Termini generali usati per le metamorfite di contatto:

CONTATTITE : metamorfite di contatto di qualsiasi composizione

FELS (GRANOFELS) : metamorfite isotropa, priva di qualsiasi anisotropia strutturale

NB : il termine FELS è usato in generale per tutte quelle rocce metamorfiche a struttura isotropa, indipendentemente dal tipo di metamorfismo !!!!

Termini specifici in funzione della composizione:

CORNUBIANITE (HORNFELS) : metamorfite di composizione silicatica (solo a silicati

CALCEFIRO : metamorfite di composizione mista carbonatica-silicatica
minerali: carbonati (>> calcite) + Ca-silicati

MARMO : metamorfite di contatto di composizione carbonatica
minerali : calcite ($\pm$ dolomite) >95%

SKARN : metamorfite carbonatiche (calcari o dolomie) ricche di Ca-Mg-Fe-silicati + Cu-solfuri + Magnetite (spesso in depositi economicamente utili) prodotti per metasomatismo da fluidi di provenienza magmatica

Metamorfismo di contatto

Marmo (calcite)



Marmo (calcite)



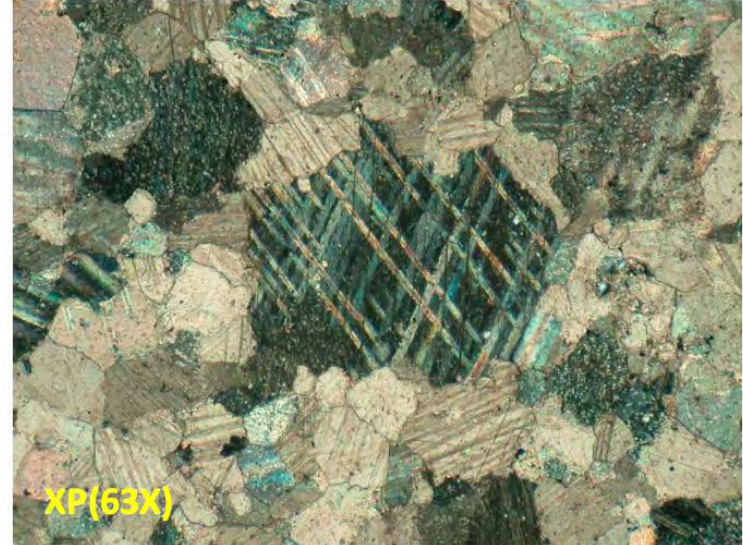
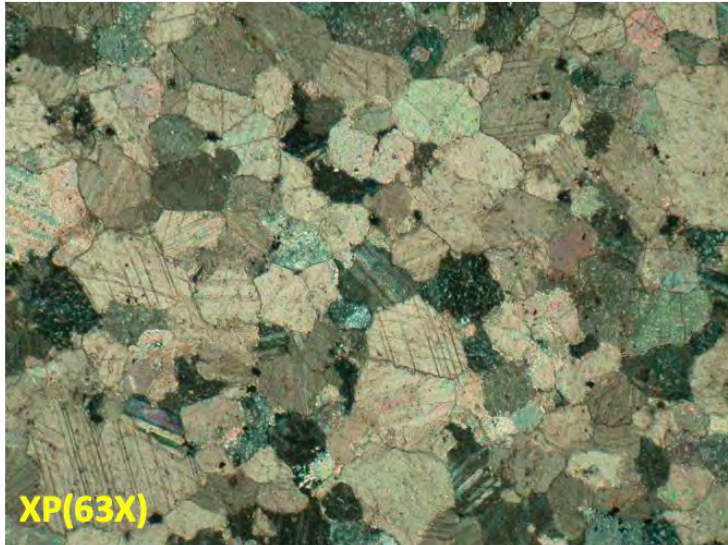
Skarn (calcite, actinolite, diopside)



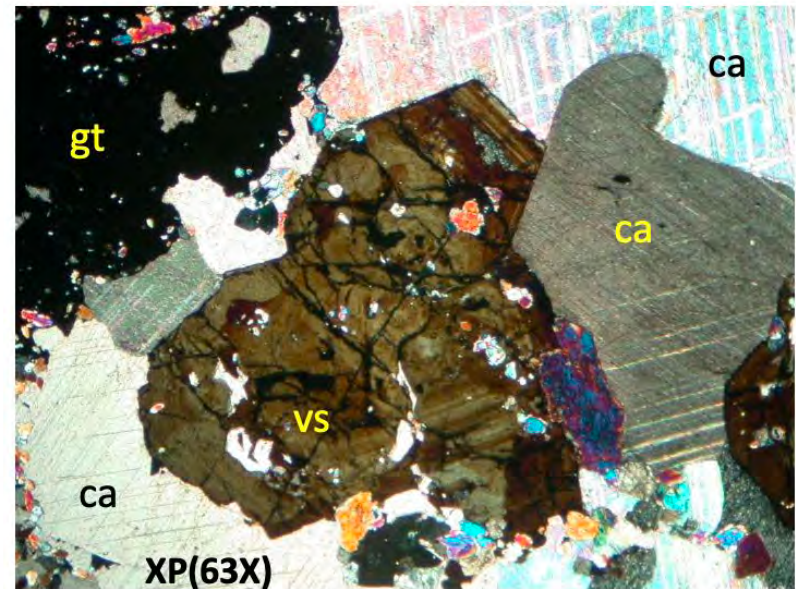
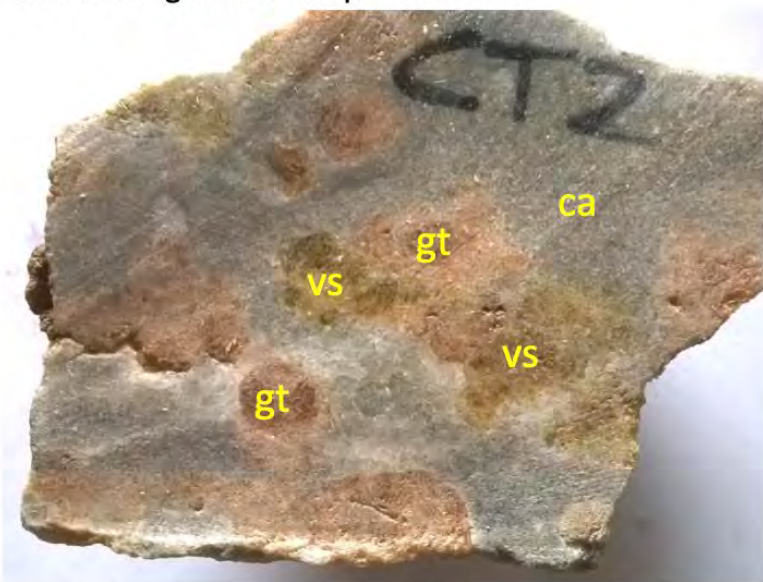
Calcefiro a granato



Metamorfismo di contatto



Marmore (aureole contatto Adamello) a tessitura isotropa granoblastica con locali punti tripli; a dx particolare della calcite con geminazioni polisintetiche



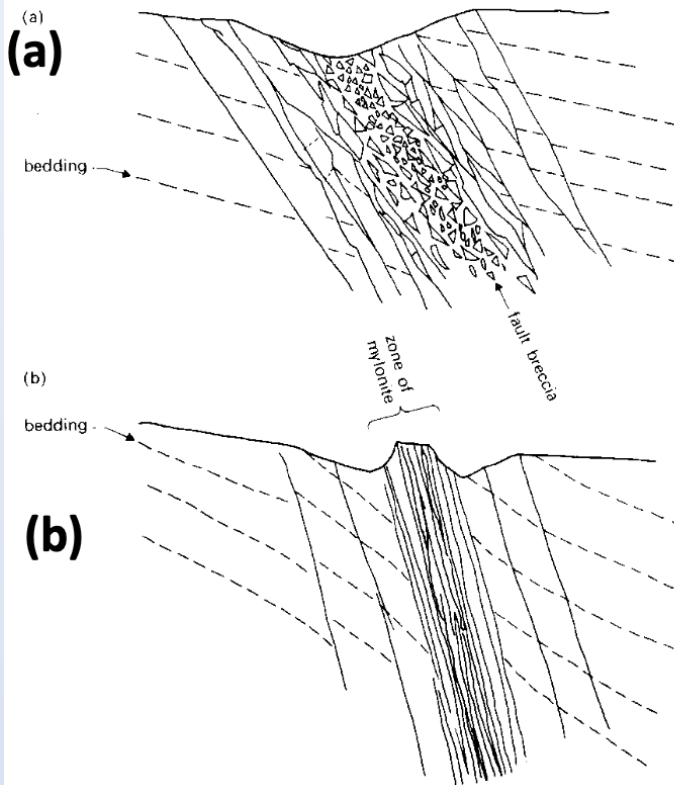
Calcefiro (aureole contatto, Monzoni) a calcite (grigia), granato (rosso) e vesuviana (giallo-verde); lunghezza campione 6cm. A dx al microscopio: presenti anche piccoli cristalli di diopside

Metamorfismo di cataclasi o dislocazione

- Lungo faglie, fasce di sovrascorrimento, limiti di falde tettoniche.
- Frantumazione meccanica e sollecitazioni di taglio producono gradi variabili di distruzione dell'originaria struttura/tessitura ("fabric") della roccia

Brecce di faglia → **cataclasiti** → **pseudotachiliti** → **miloniti** → **ultramiloniti**
tachiliti **blastomiloniti**

diminuzione di grana // deformazione da fragile a duttile // ricristallizzazione ± spinta



Sezione schematica attraverso una zona di faglia

a) Zona di faglia di bassa profondità; le rocce hanno un comportamento fragile rispetto alle sollecitazioni e non ricristallizzano (bassa T) : sviluppo di brecce di faglia e cataclasiti

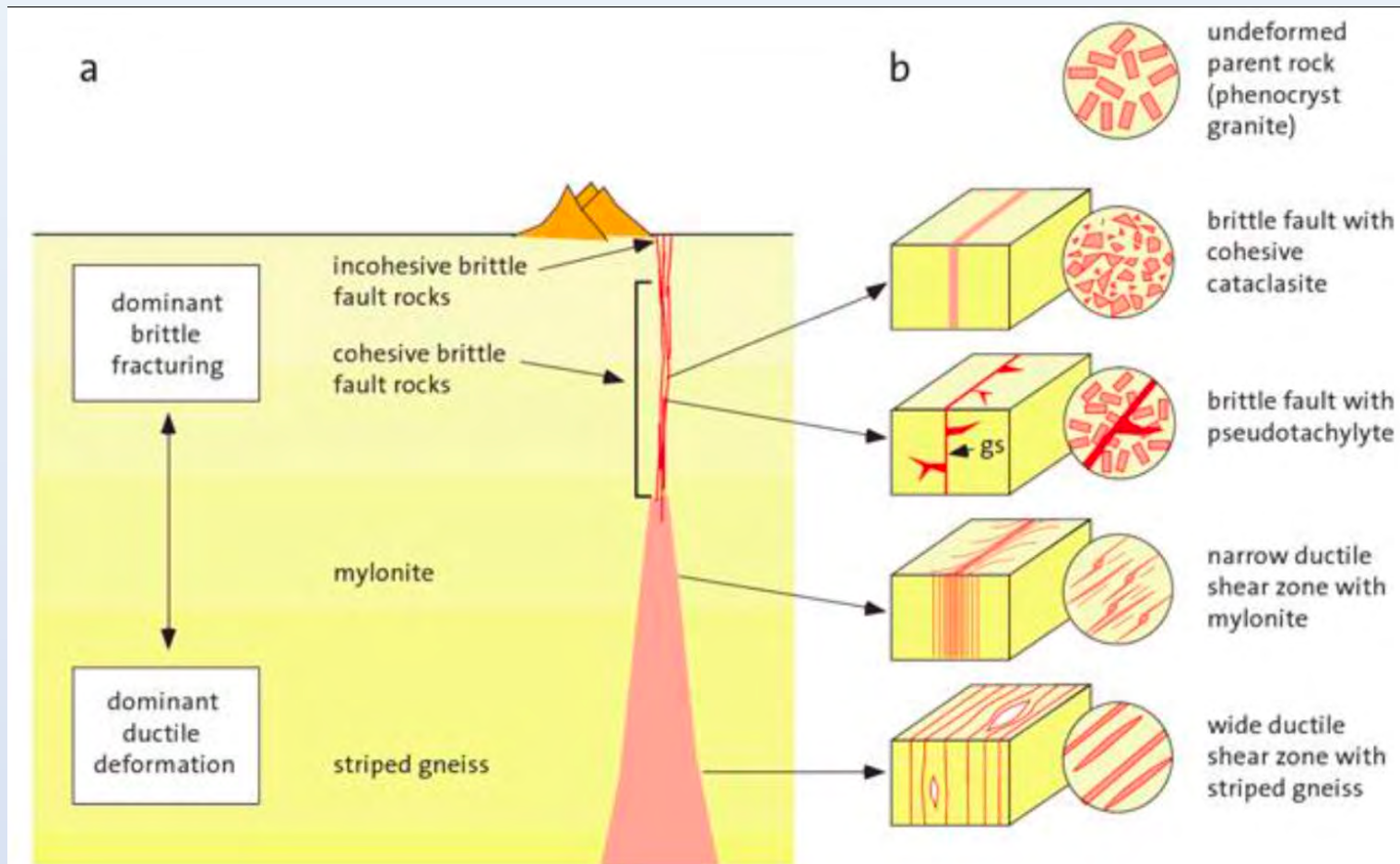
b) Zona di faglia un più profonda (esposta per erosione) ; le rocce hanno una risposta duttile alle sollecitazioni e ricristallizzano ($> T$). Un intenso shear produce rocce a grana fine e foliate : miloniti

Metamorfismo di cataclasi o dislocazione

Distribuzione dei principali tipi di rocce deformate nella crosta:

- sezione schematica attraverso una zone di shear trascorrente; cambiamento del tipo di deformazione in risposta allo shear (da fragile a duttile) e relative rocce prodotte
- rappresentazione schematica dei tipi di rocce risultanti all'aumentare della profondità partendo da una roccia granitica: roccia incoerente, cataclasite compatta, pseudotachilite, milonite, gneiss listato "a bande".

NB: la transizione da deformazione fragile a duttile dipende anche dalla composizione mineralogica delle rocce, dal gradiente termico, dalla velocità di deformazione, dalla presenza di fluidi

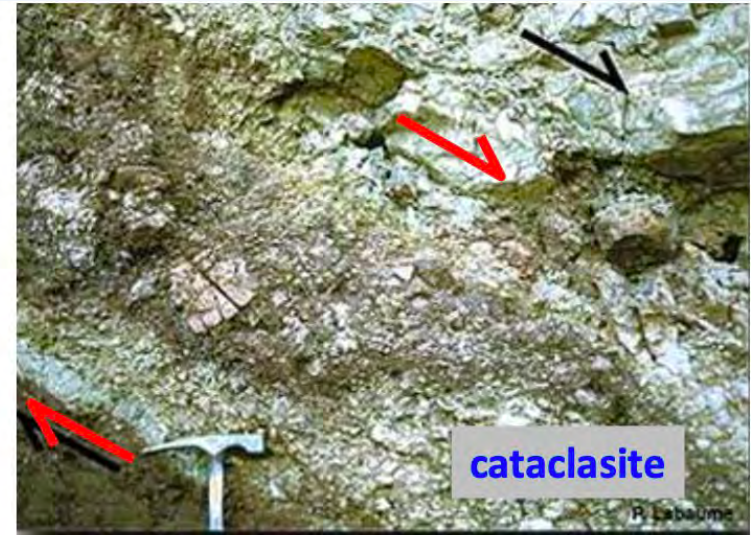


*Passchier et al. (2005;
Microtectonics)*

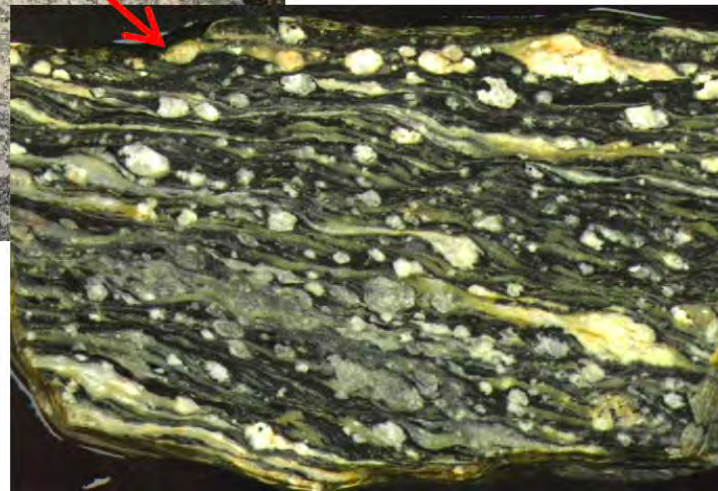
Metamorfismo di cataclasi o dislocazione



In zone superficiali di faglia (<10-15km):
comportamento fragile delle rocce

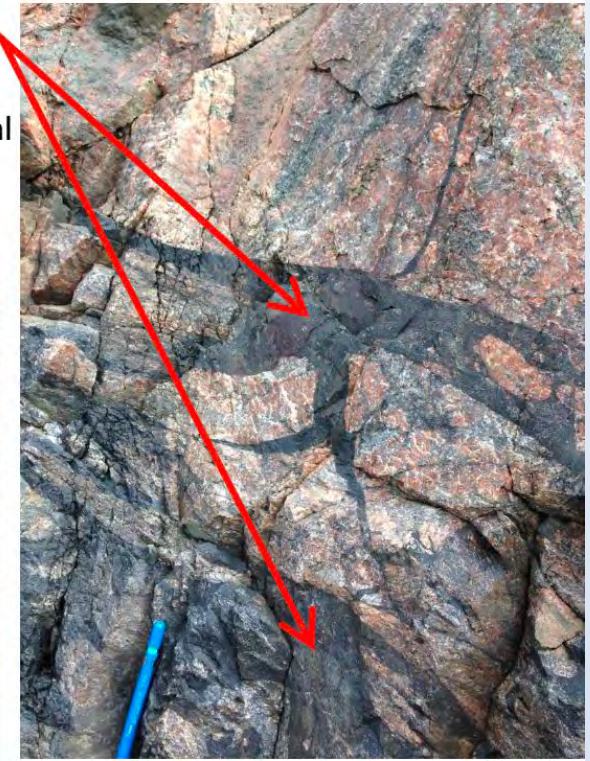


milonite
In zone profonde di faglia (>10-15km): comportamento plastico, struttura orientata



pseudotachilite

con presenza di vetro prodotto dal calore di frizione

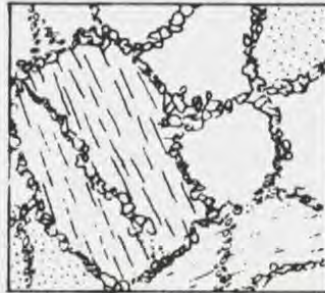


Metamorfismo di cataclasi o dislocazione

Tessiture cataclastiche - milonitiche



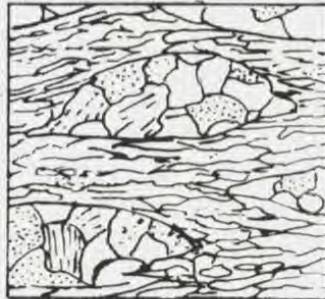
a



b



c



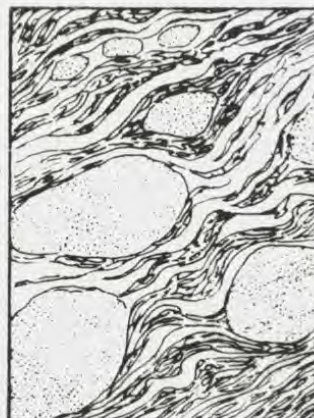
d



e



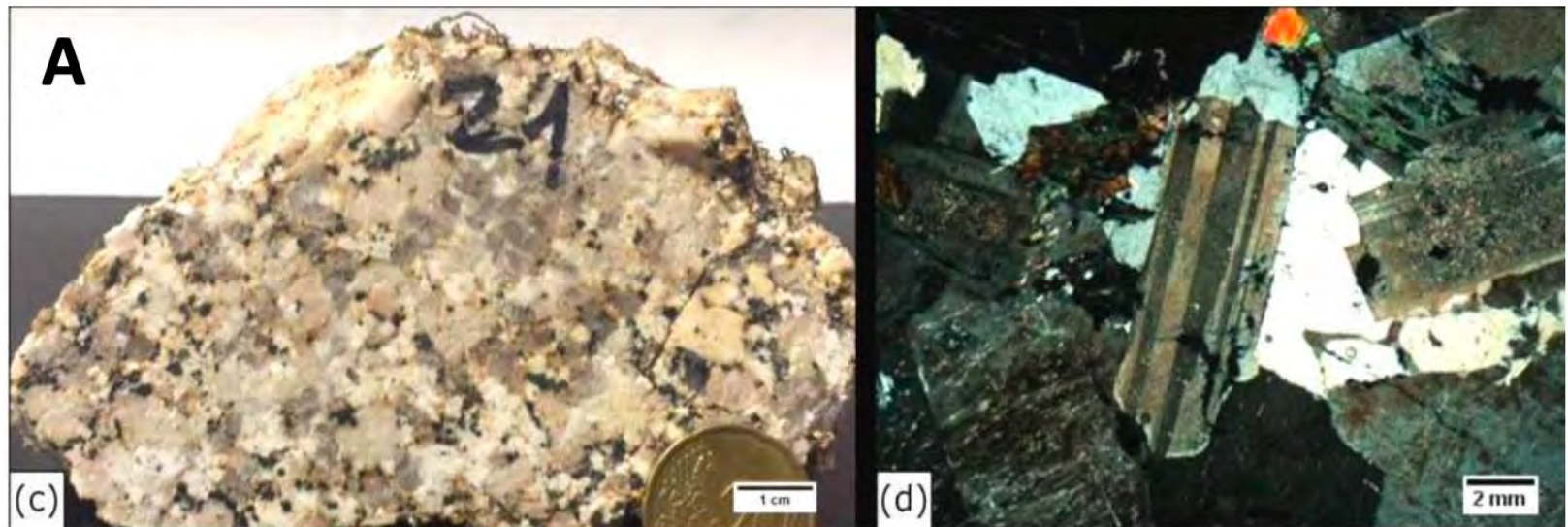
f



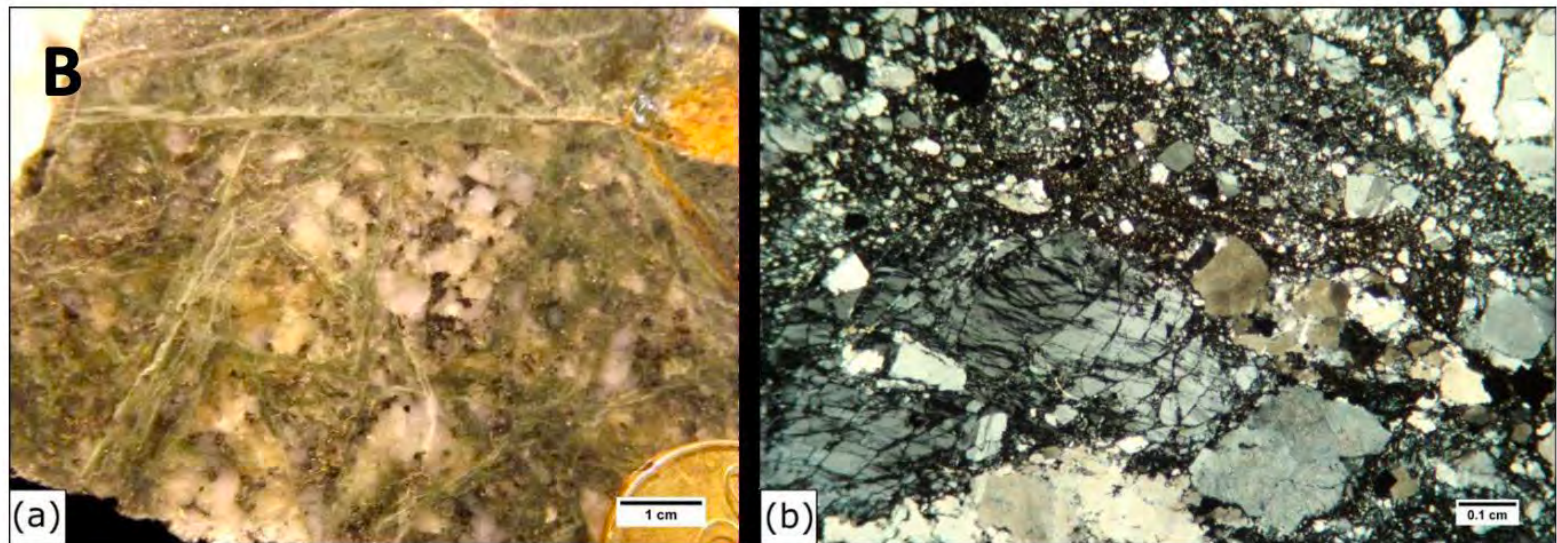
g

- a : **"cataclastica"** : granuli conservati e deformati in matrice a grana fine
- b: **"mortar" ("calcestruzzo")**: scarsa matrice a grana fine intergranulare
- c: adattamenti plastici di cristalli di calcite (marmo)
- d: **"flaser"** : residui lenticolari orientati in abbondante matrice microcristallina
- e : **"milonitica"** : stadio avanzato di **d** , ulteriore riduzione dei residui orientati e matrice microcristallina
- f : **"blastomilonitica"** : residui lenticolari (porfiroclasti) in matrice microcristallina orientata e ricristallizzata
- g : **"occhiadino clastica"** : residui porfiroclastici conferiscono un aspetto "occhiadino"

Metamorfismo di cataclasi o dislocazione

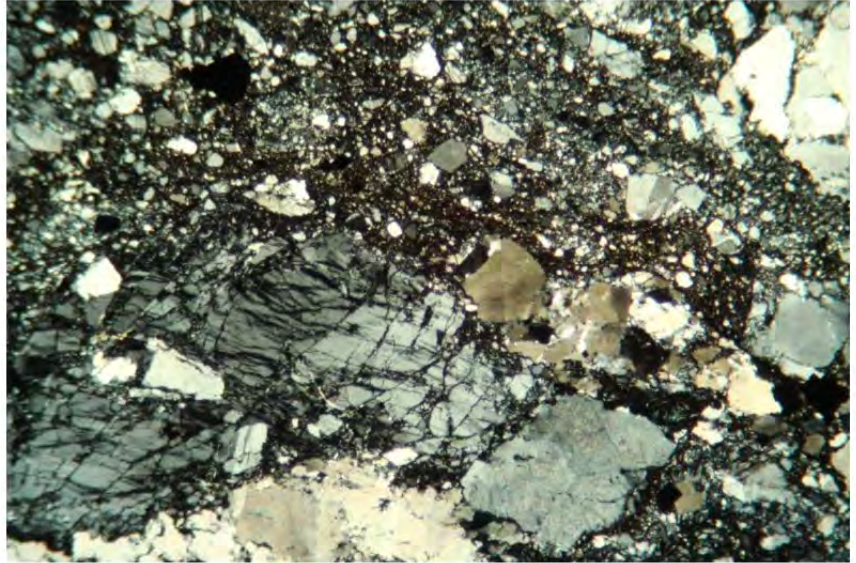
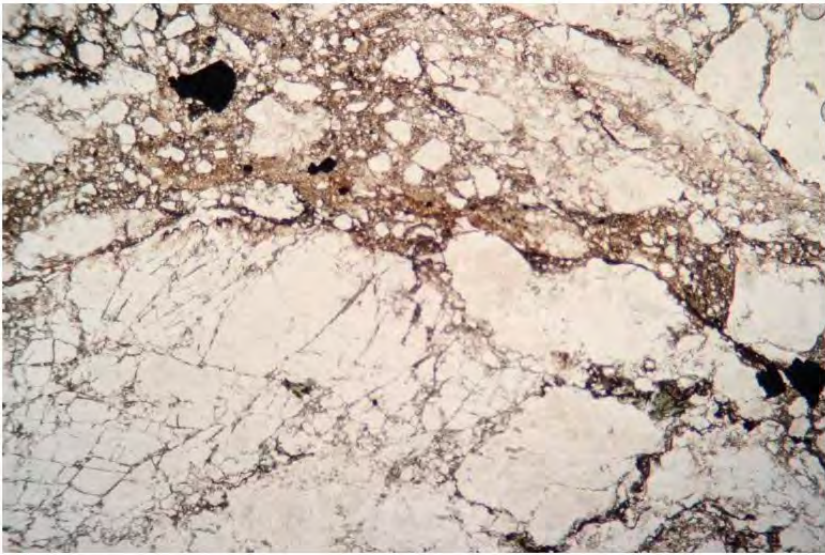


A : granito macro e al microscopio, a tessitura ipidiomorfa (zona centrale del plutone di Valle Mosso ("Serie dei Laghi", Sudalpino occidentale, Piemonte)

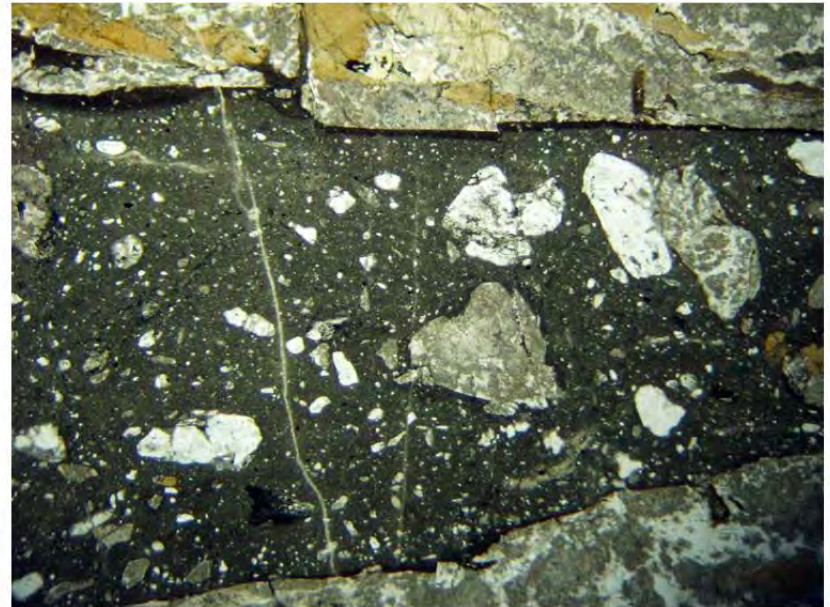
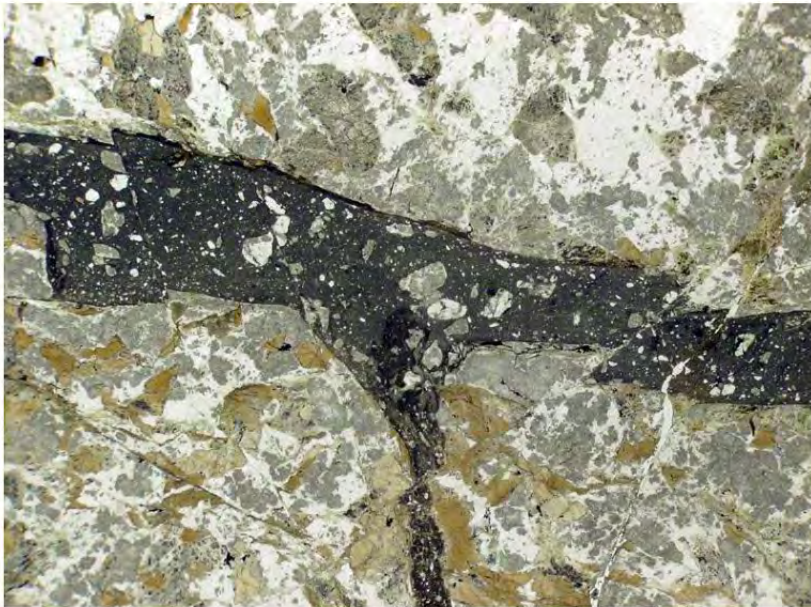


B : stesso granito campionato lungo il sistema di faglia della Cremosina , con tessitura cataclastica

Metamorfismo di cataclasi o dislocazione

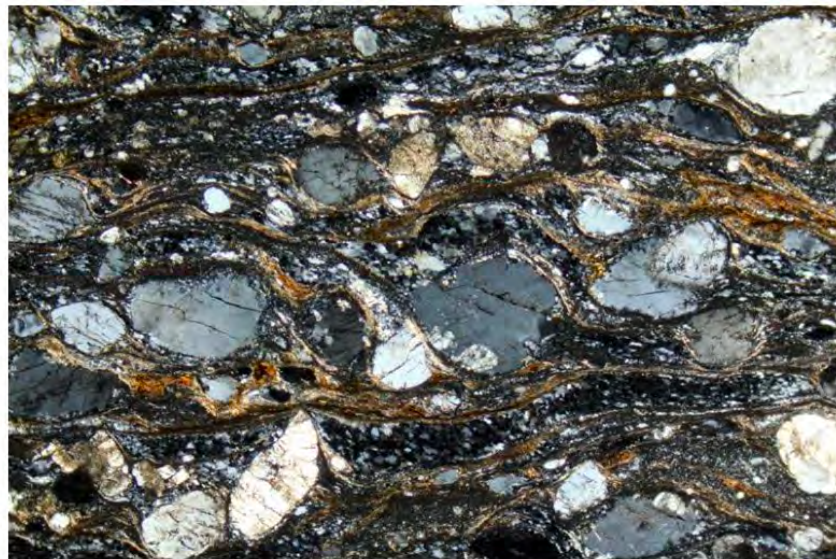


Granito cataclastico N// e NX - (25X) del plutone di ValleMosso ("Serie dei Laghi", Sudalpino Occidentale, Piemonte) campionato lungo il sistema di faglia alpino della Cremosina

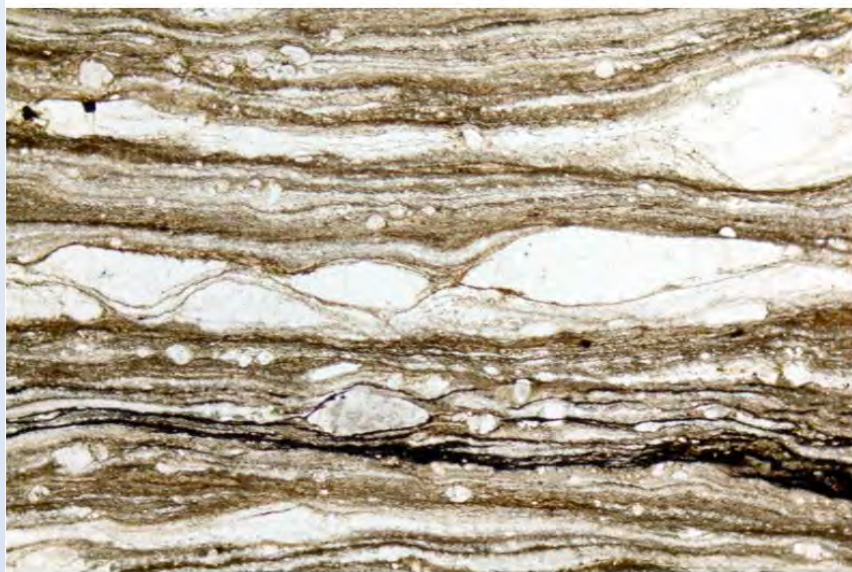


Gabbro cataclastico con pseudotachilite (lato lungo 7mm a dx; 2 mm a sx)

Metamorfismo di cataclasi o dislocazione



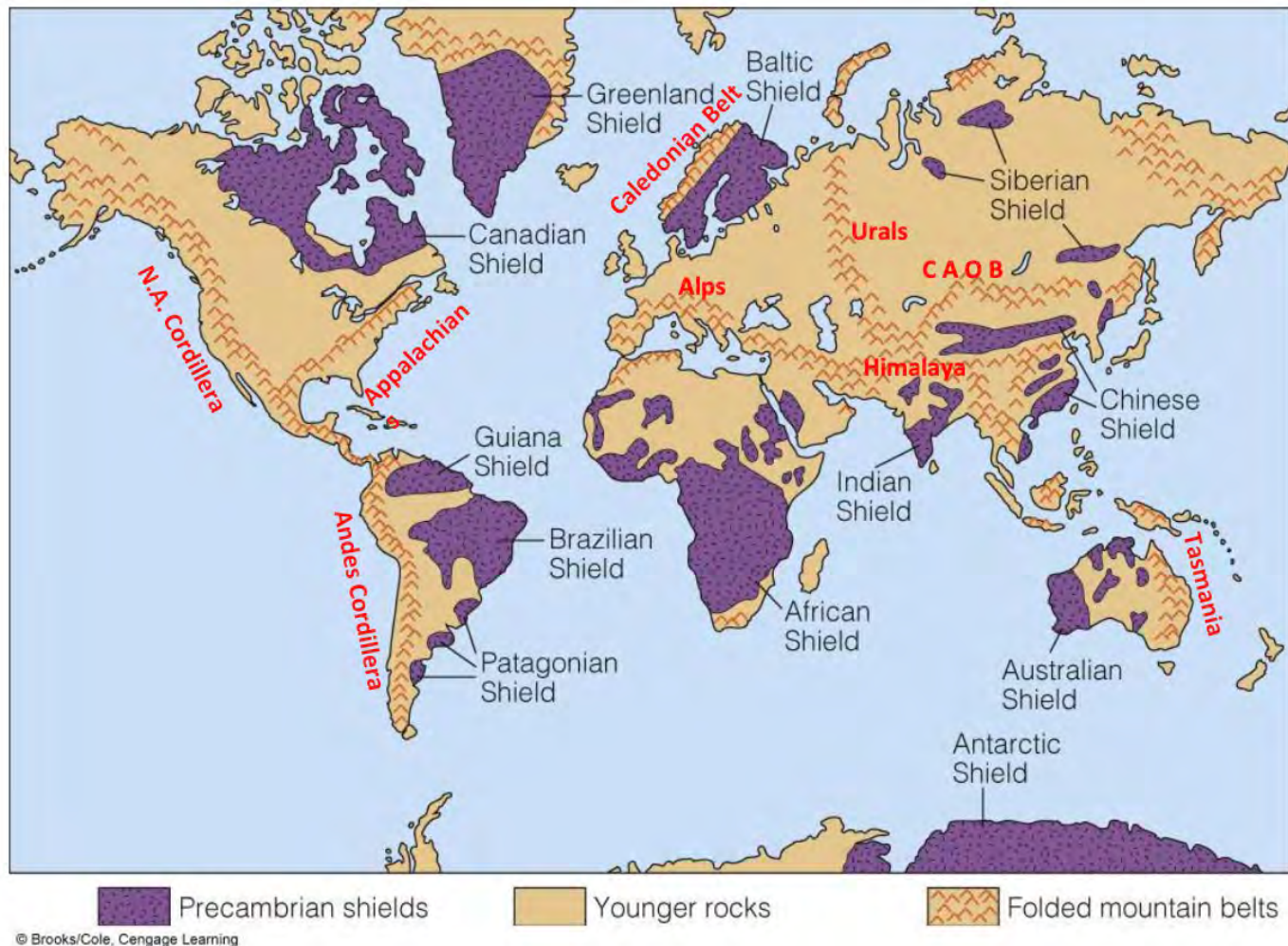
Granito milonitico N// e NX - (lato lungo 7 mm)



Granito ultramilonitico N// e NX - (lato lungo 7 mm)

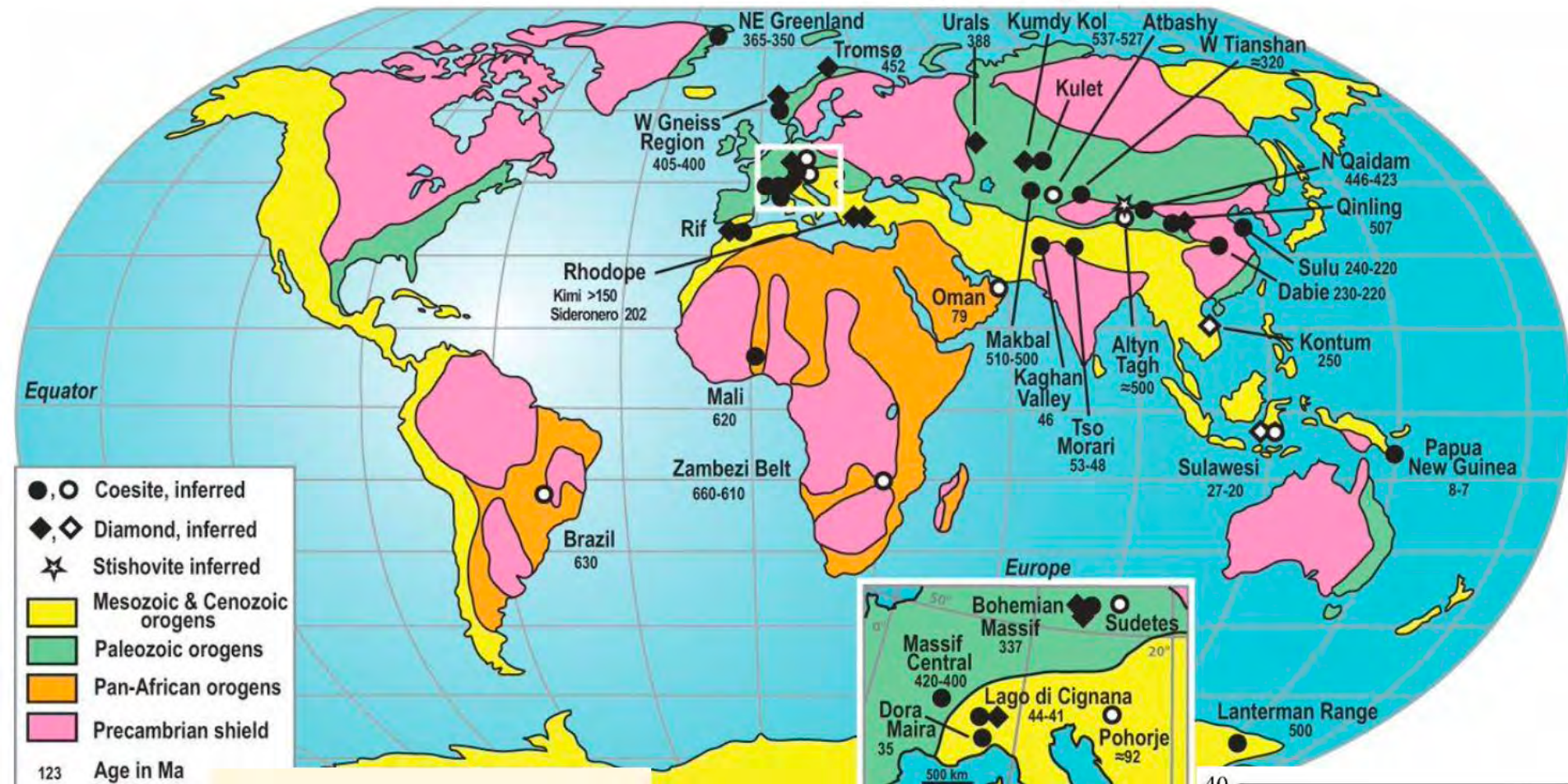
Metamorfismo regionale orogenico

- Spazialmente e geneticamente relazionato alle grandi cinture orogeniche
- Coinvolge migliaia di km² di estensione crostale



Metamorfismo regionale orogenico

Distribuzione ed età degli orogeni



Metamorfismo regionale orogenico

- associato ai margini delle placche litosferiche convergenti

Due parametri:

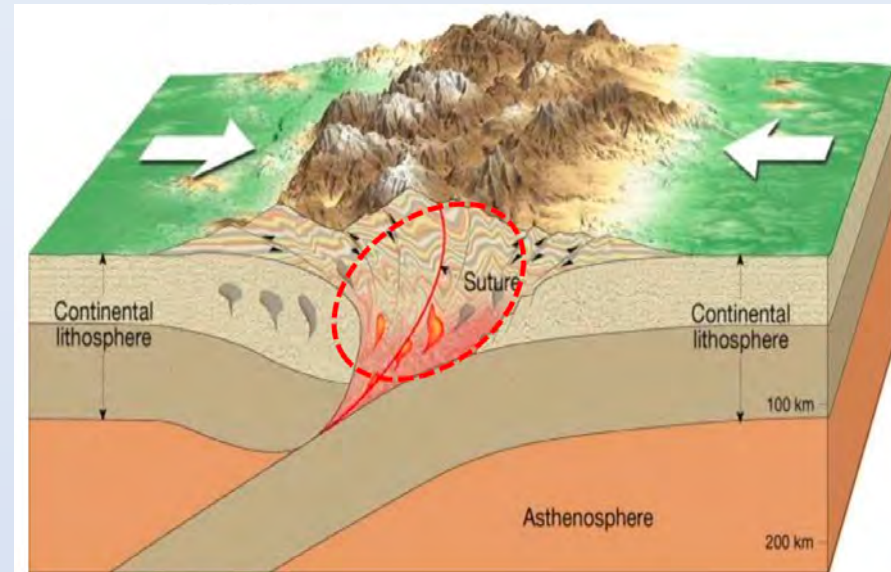
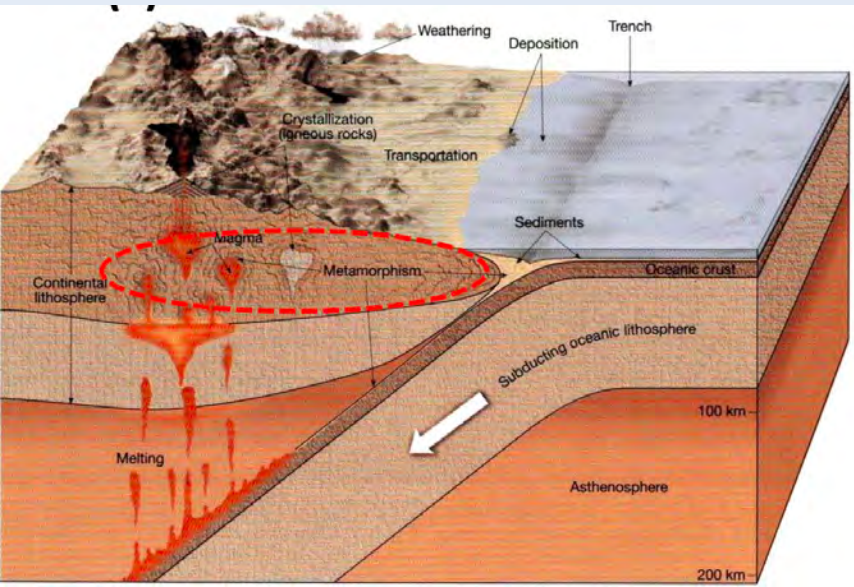
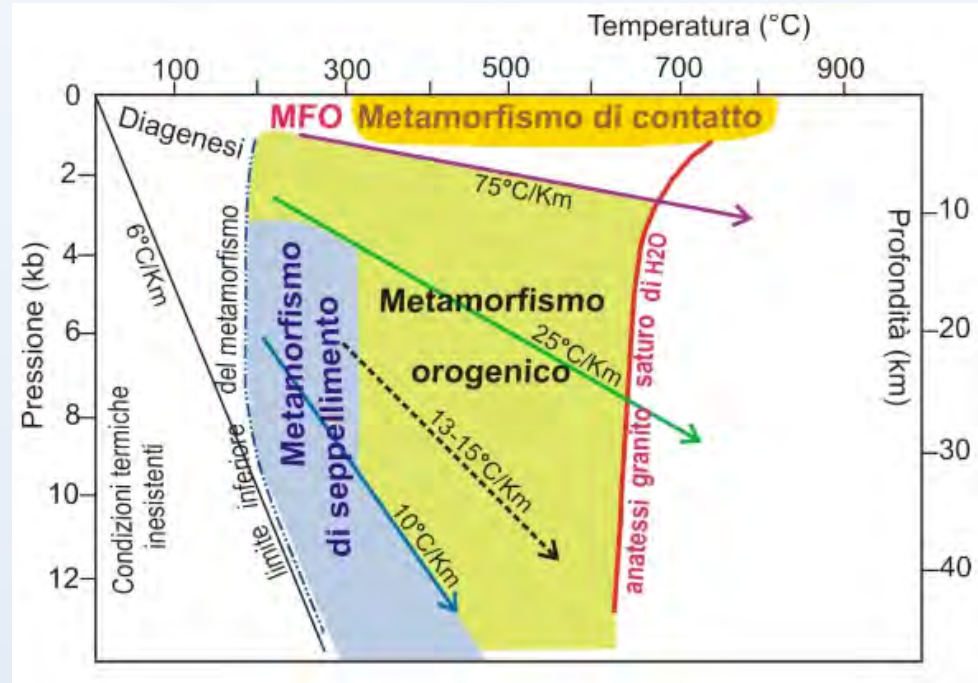
Temperatura

Gradienti termici da medi ad alti.

Cambiamenti mineralogici in f. del gradiente termico

Pressione orientata

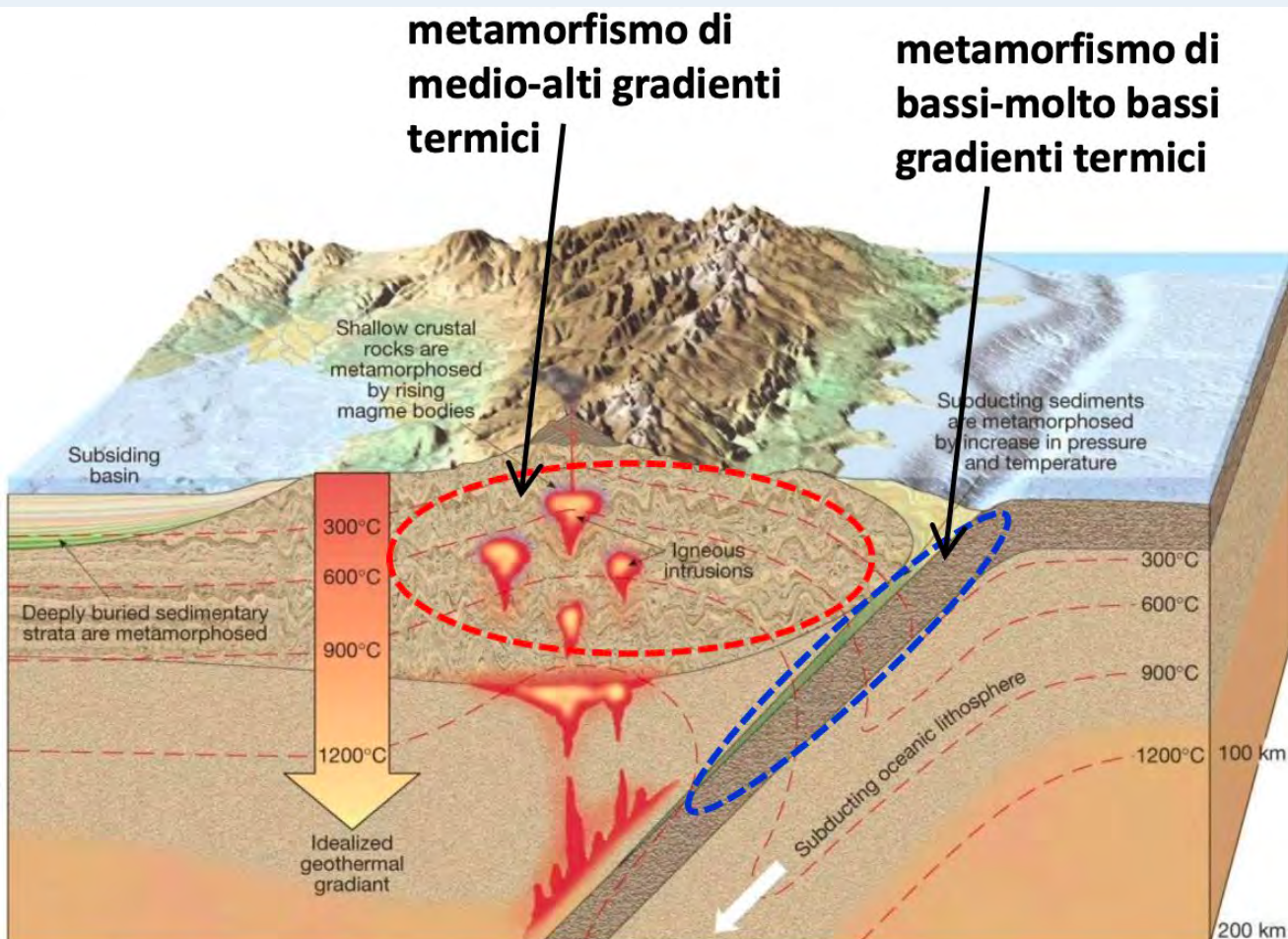
Cambiamenti strutturali/tessiturali,
marcate anisotropie planari/lineari



Metamorfismo regionale orogenico

Collisione placca oceanica - placca continentale

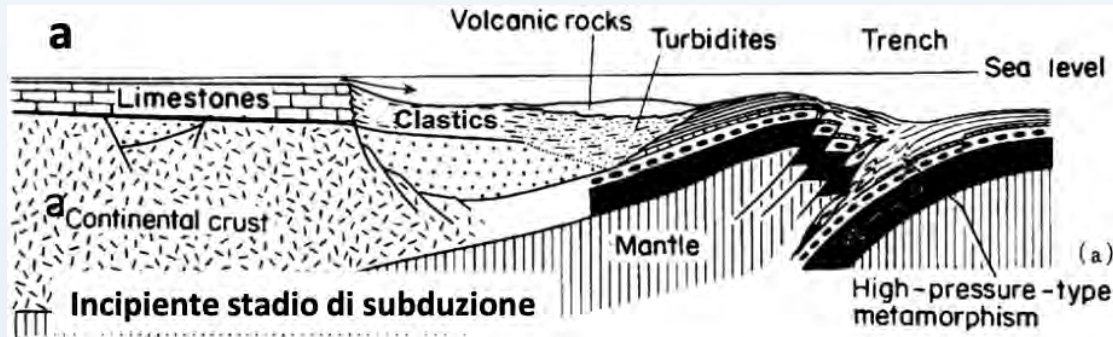
Il margine della placca continentale è sede di intenso magmatismo basico, quindi innalzamento delle isoterme, gradienti termici > “normali”; sede di metamorfismo di alta T/bassa P con gradienti termici alti; presenza di plutoni granitici (da differenziazione magmatica ± assimilazione crostale)



Questo contesto è associato anche metamorfismo di bassa T/alta-altissima P (seppellimento/subduzione), di gradienti termici bassi /molto bassi nella fossa (trench) e lungo il margine delle placca oceanica subdotta.

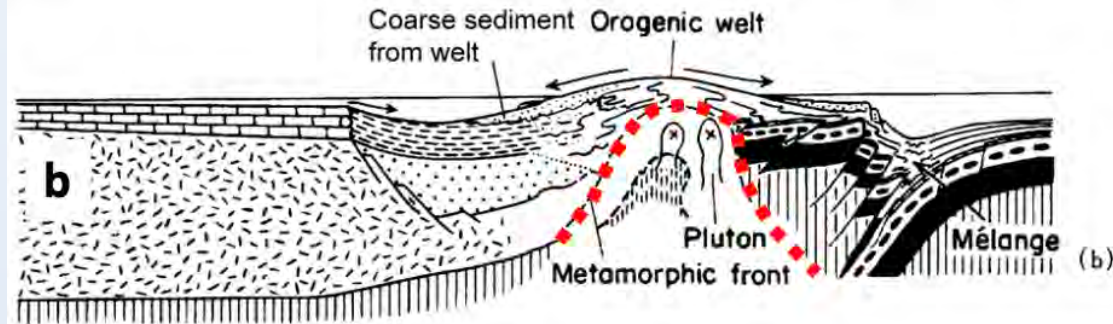
Esempio:
Cordigliera Andina

Metamorfismo regionale orogenico

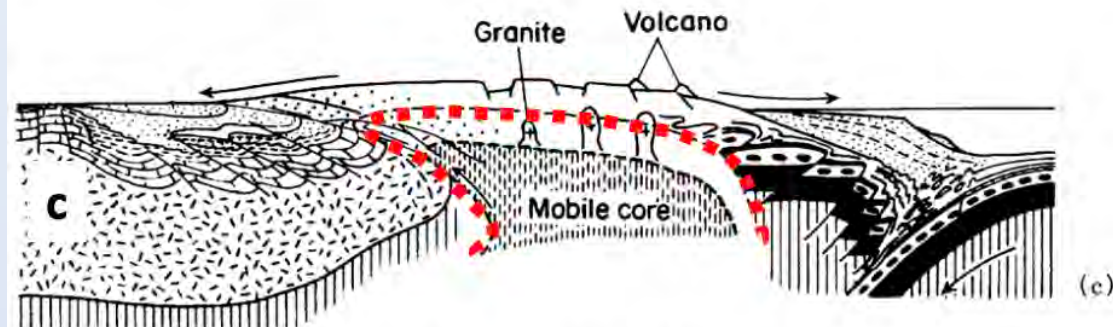


Modello schematico di sviluppo di una cintura orogenica lungo un margine continentale attivo (tipo Cordigliera)

I layers neri e tratteggiati rappresentano le rocce gabbriche e basaltiche della crosta oceanica



b) formazione di un "rigonfiamento" orogenico (orogenic welt) di ispessimento crostale dovuto alla compressione, all'impilamento di porzioni oceaniche e all'aggiunta di materiale magmatico dalle zone sottostanti. Il calore viene fornito al cordone orogenico dai magmi basici che si accumulano alla base della crosta ("underplating"), dai magmi in risalita, dal calore radiogenico prodotto nella crosta ispessita e dai circuiti convettivi che si instaurano nel mantello sovrastante la porzione subdotta: la T aumenta verso l'asse del cordone orogenico, si genera un "duomo termico" dove si concentrano i plutoni granitoidi ed si sviluppa il **METAMORFISMO di ALTO GRADIENTE TERMICO**

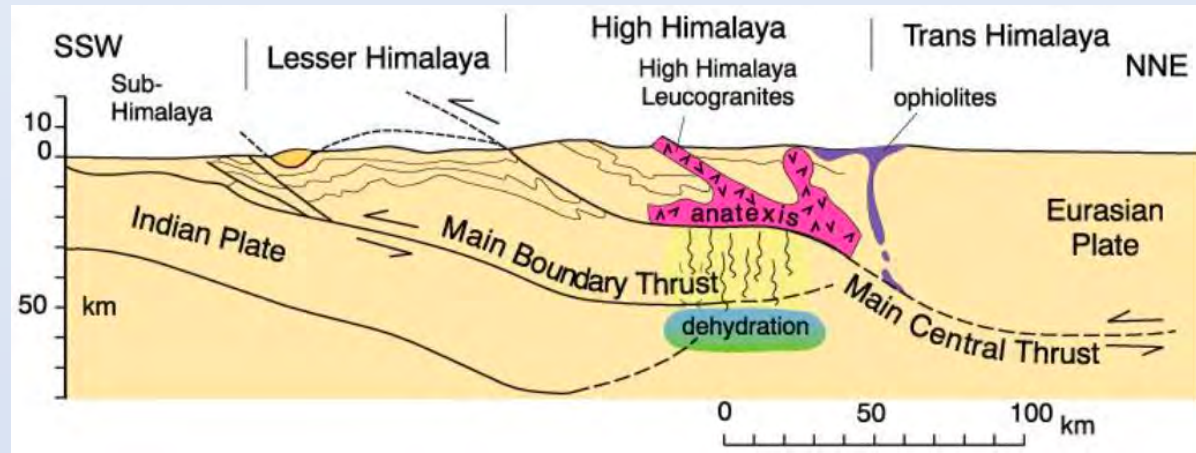
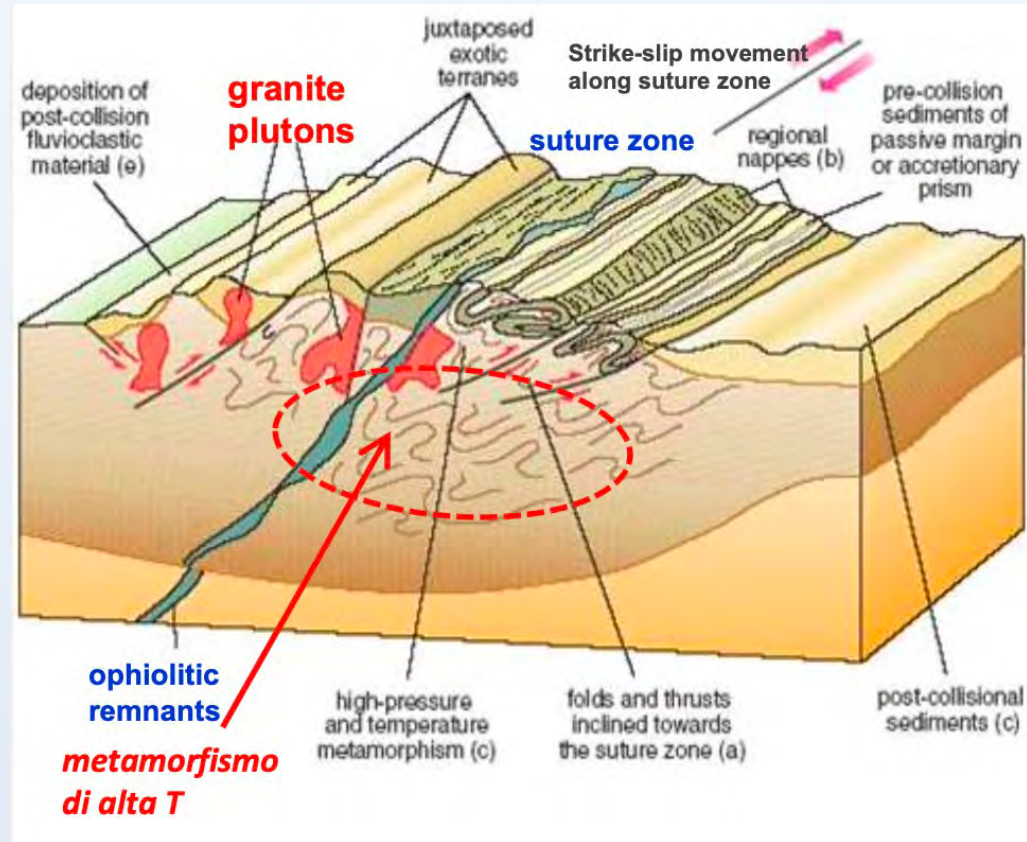


c) il calore si disperde lentamente e il metamorfismo continua anche dopo l'acme della fase deformativa; esso non è causato dalle intrusioni (non è di contatto) perché il suo sviluppo è a scala regionale; sia il metamorfismo che le intrusioni sono dovute a un **disturbo termo-tettonico a grande scala (subduzione e orogenesi)**

Metamorfismo regionale orogenico

Collisione continentale

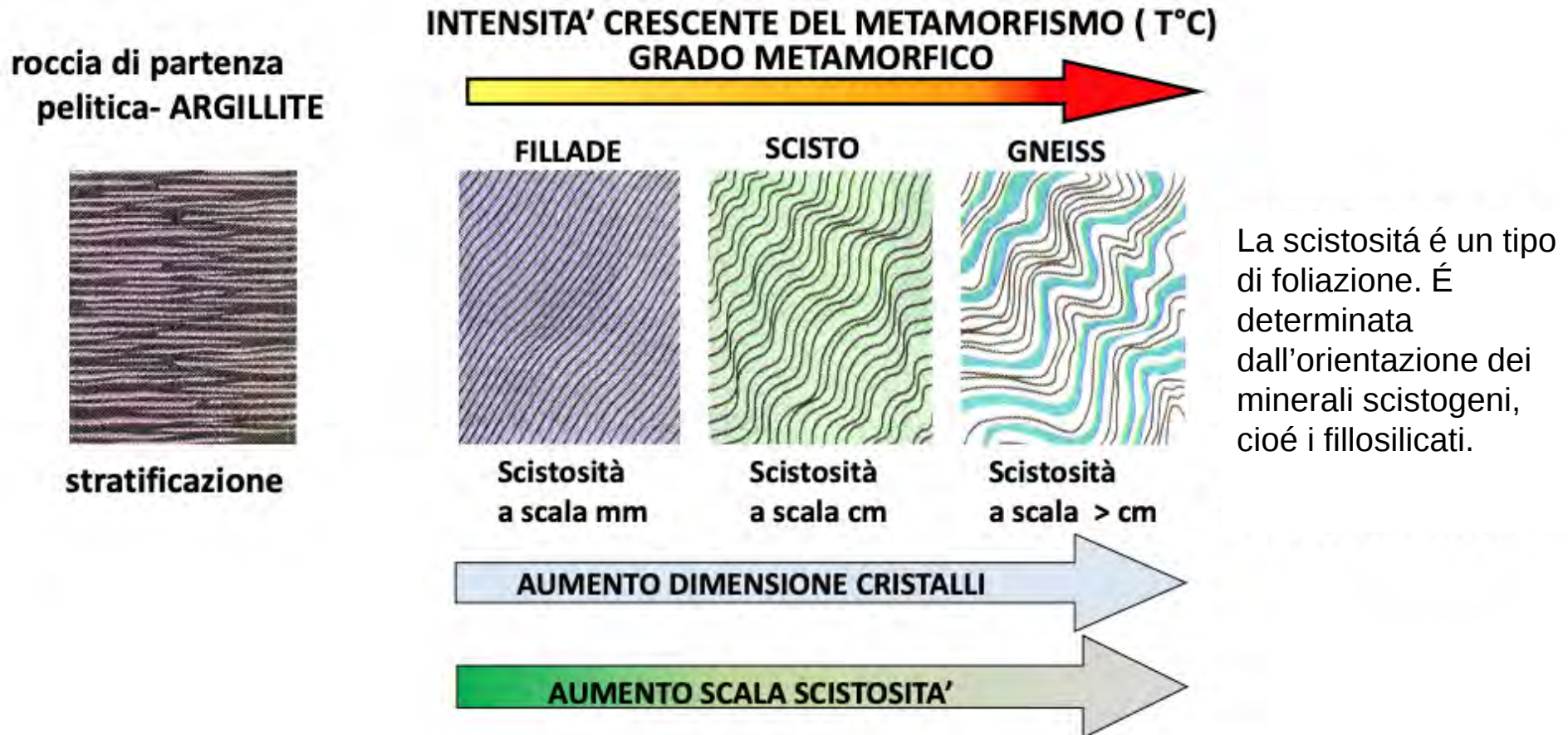
- quadro strutturale complesso (pieghe e sovrascorrimenti inclinati verso la zona di sutura, impilamento di falde tettoniche)
- zona di sutura con *mélange* di rocce e relitti di crosta oceanica (ofioliti)
- innalzamento delle isoterme causato da inspessimento crostale
- gradienti termici medi
- i fluidi rilasciati per deidratazione della crosta profonda innescano un'estesa fusione della crosta sovrastante
- presenza di plutoni granitici



Metamorfismo regionale

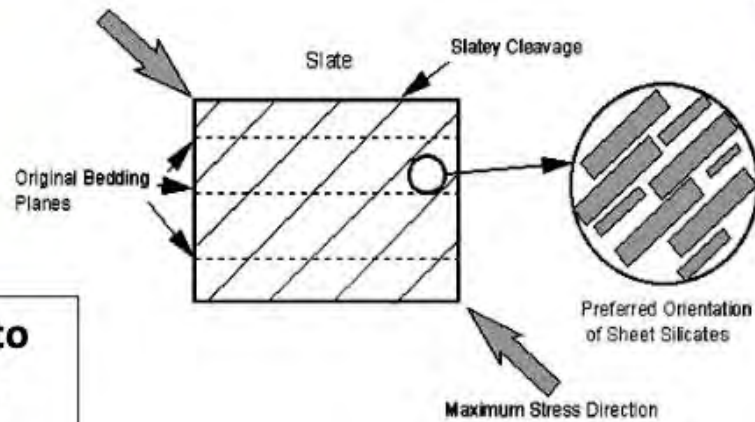
Termini di base strutturali :

- **META-**: prefisso associato ad una roccia magmatica/sedimentaria indicante la trasformazione in roccia metamorfica
- **FILLADE**: roccia metamorfica, originariamente pelitica/argillosa, a grana finissima con piani di scistosità a scala mm. (fissilità) ad andamento piano/ondulato/piegheggiato
- **SCISTO**: roccia metamorfica con distinte anisotropie piani di scistosità che si sviluppano a scala cm
- **GNEISS**: roccia metamorfica quarzosa-feldspatica (scarse miche) a grana medio/grossa e scistosità poco marcata discontinua o non ben definita che si sviluppa a scala > cm, detta gneissosità



Metamorfismo regionale orogenico

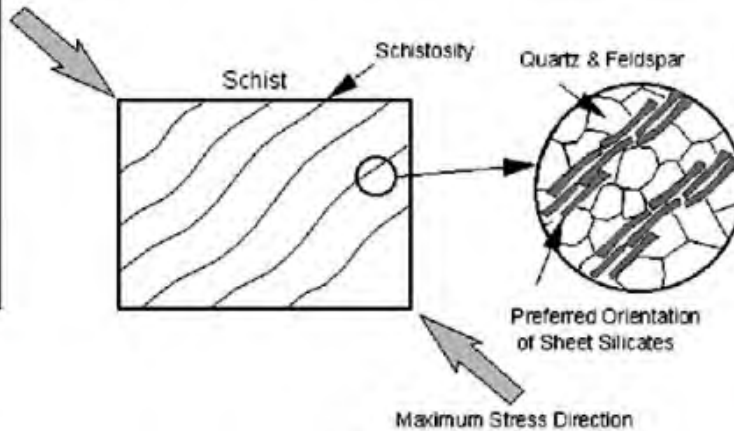
**Cambiamento
dei caratteri
strutturali
all'aumentare
del grado
metamorfico, cioè
TEMPERATURA**



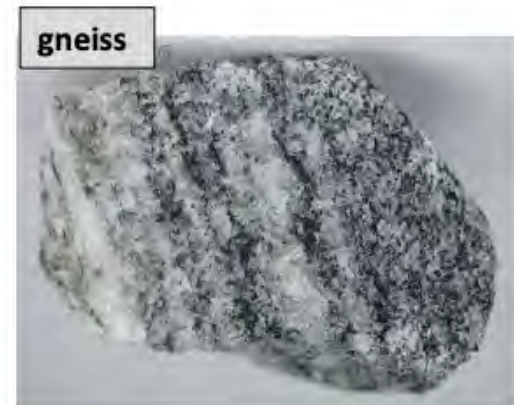
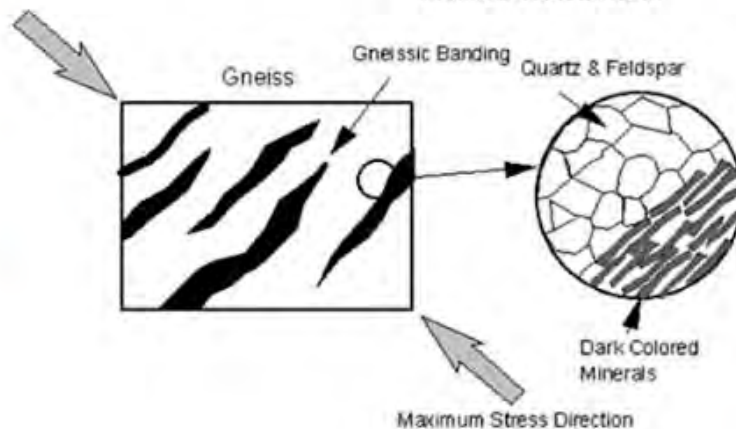
ardesia



fillade



scisto



gneiss

Metamorfismo regionale orogenico

Protolite

Argillite (roccia pelitica)

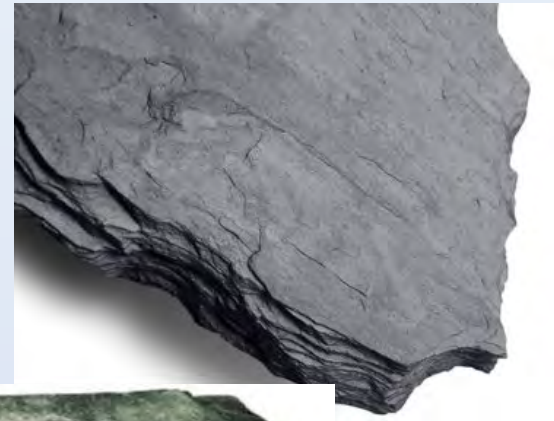
Roccia sedimentaria detritica
(o clastica) formata per
diagenesi di sedimenti argillosi



Roccia metamorfica

Ardesia (o argilloscisto)

Metamorfismo regionale di bassissimo
grado ($T \approx 250^{\circ}\text{C}$); grana finissima;
clivaggio ardesiaco, costituita da
minerali argillosi (subordinato quarzo,
miche e feldspati) spesso con sostanze
carboniose che danno alla roccia il
colore grigio-nerastro.



Metamorfismo regionale orogenico

Ardesia - utilizzi



Metamorfismo regionale orogenico

Fillade

Metamorfismo regionale di grado molto basso ($T \approx 300-350^{\circ}\text{C}$). Derivazione pelitica, da argilloscisto, a grana fine, viva lucentezza, costituita da fillosilicati (clorite, sericite /fengite) + quarzo e feldspati. Scistosità a scala mm.



Metamorfismo regionale orogenico

Scisto

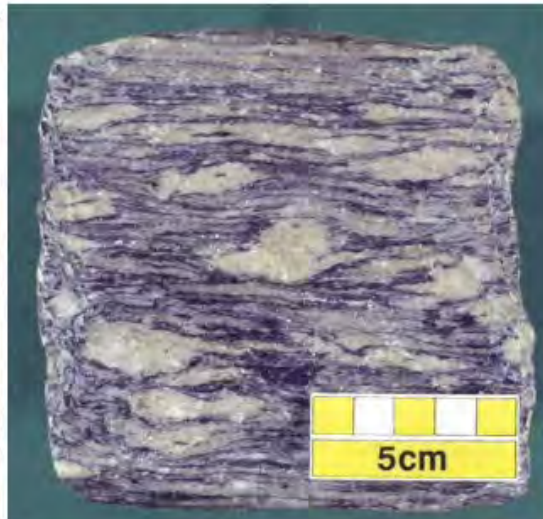
Metamorfismo regionale di basso-medio grado ($T \approx 400\text{--}600^\circ\text{C}$). Derivazione pelitica, a grana media, costituita da abbondanti miche (muscovite + biotite) + quarzo e feldspati $\pm$ granati $\pm$ staurolite $\pm$ cianite/andalusite. Scistosità a scala cm.



Metamorfismo regionale orogenico

Gneiss

Metamorfismo regionale di alto grado ($T > 650^{\circ}\text{C}$) per i PARA-gneiss. Derivazione sia sedimentaria (PARA) che magmatica (ORTO). Prevalenza di quarzo + feldspati su miche (biotite + muscovite). Spesso a grana grossa e a bande (ma dipende dalla derivazione). Scistosità discontinua o irregolare a scala $> \text{cm}$.



Metamorfismo regionale orogenico

Gneiss – utilizzo (termine commerciale: serizzo)



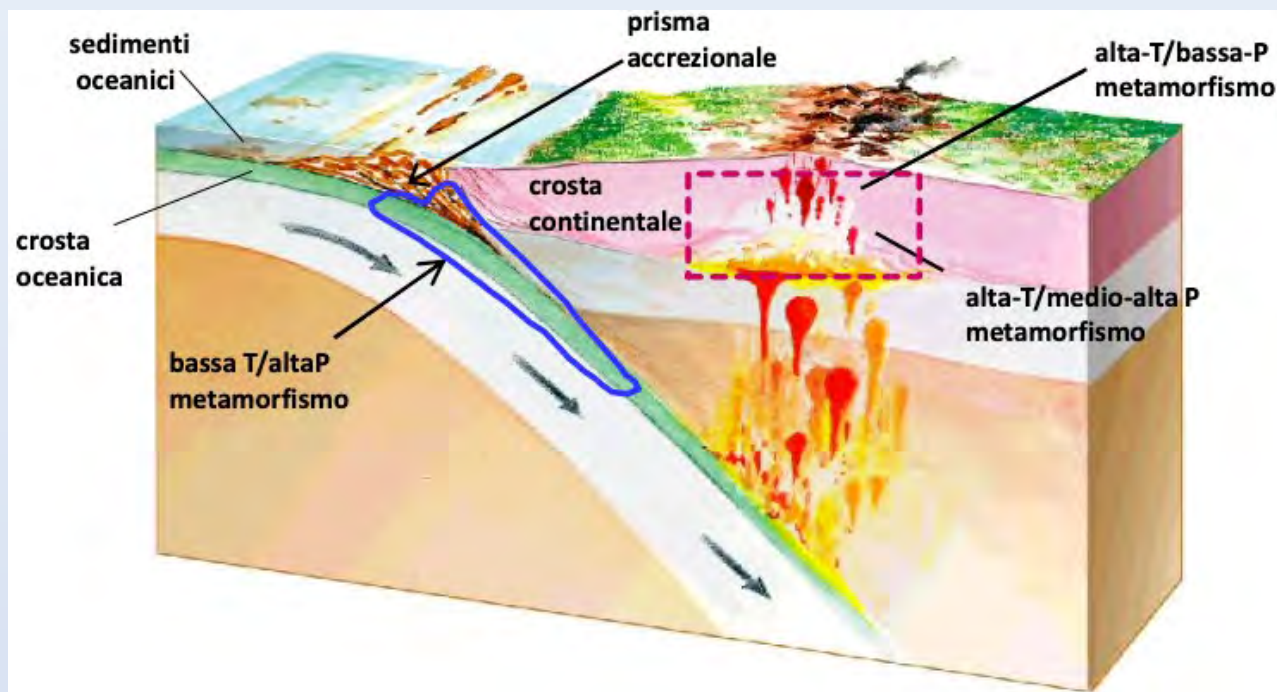
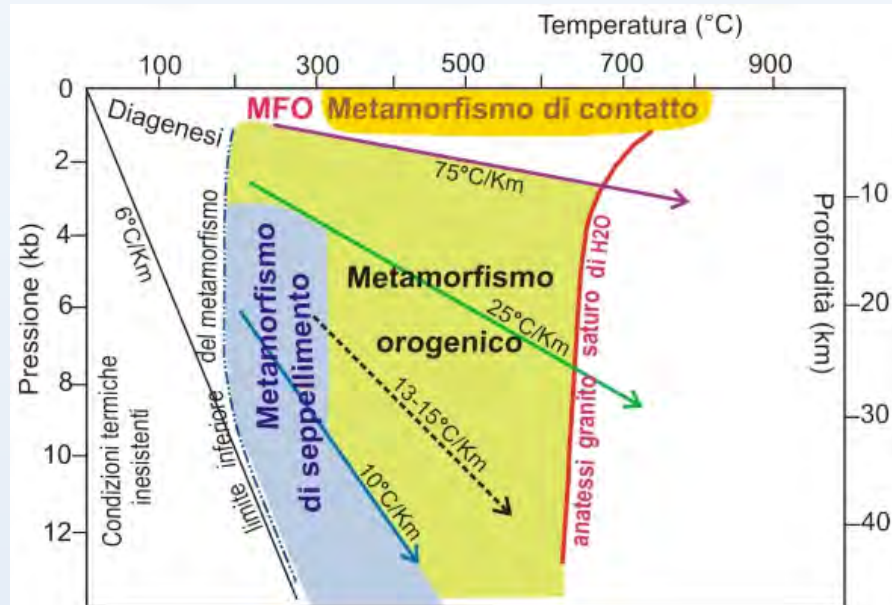
Metamorfismo regionale di seppellimento o subduzione

È un metamorfismo di basso gradiente termico e alta pressione

- Lungo la zona di collisione all'interno della placca oceanica subdotta, in corrispondenza della zona di subduzione
- L'assenza di importanti regimi tensionali si manifesta nella mancanza di effetti deformativi nelle rocce



- Cambiamento strutturale generalmente poco evidente
- Cambiamento mineralogico in funzione di P



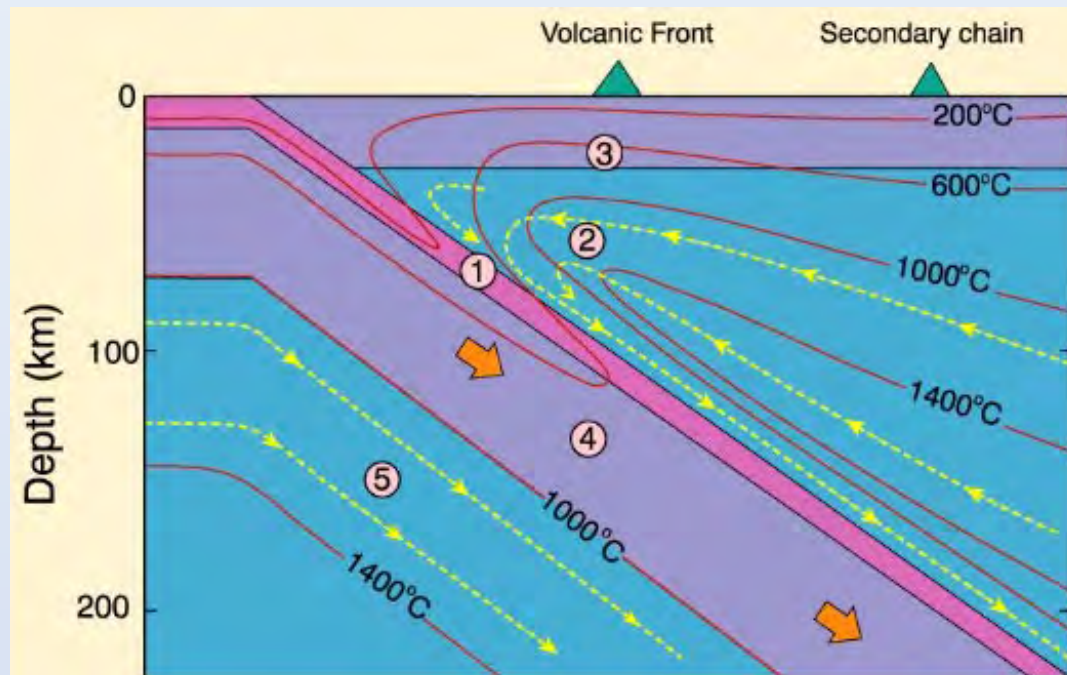
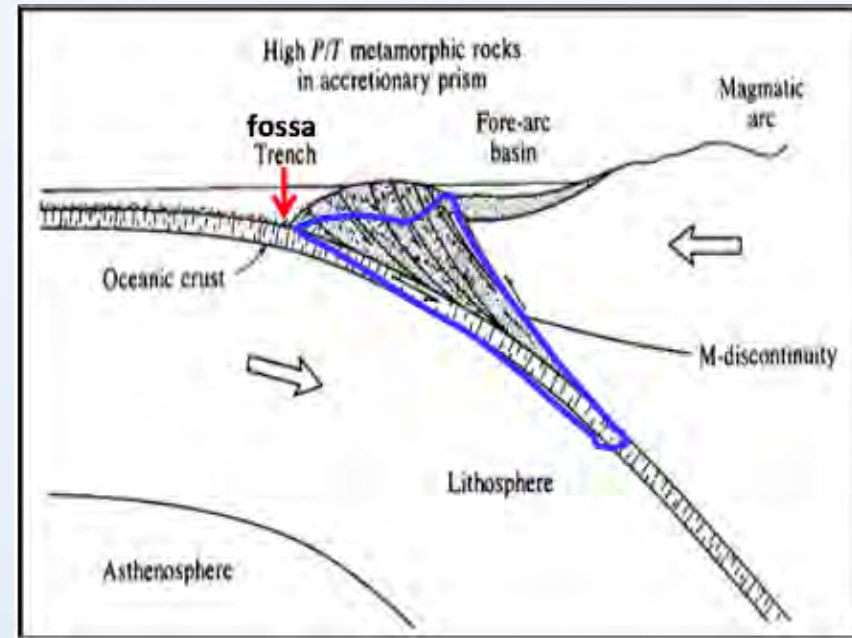
Metamorfismo regionale di seppellimento o subduzione

In corrispondenza della zona di subduzione si crea una fossa ("trench") - una profonda depressione in forte subsidenza che richiama una veloce sedimentazione - e un conseguente impilamento caotico di sedimenti "freddi" della crosta oceanica, detto prisma accrezionale.

Qui le isoterme si deprimono grazie ad una velocità di subduzione relativamente alta e alla bassissima conducibilità termica delle rocce. Sedimenti + crosta oceanica subdotti raggiungono ancora "freddi" elevate profondità e subiscono un metamorfismo di bassa T e alta/altissima P.

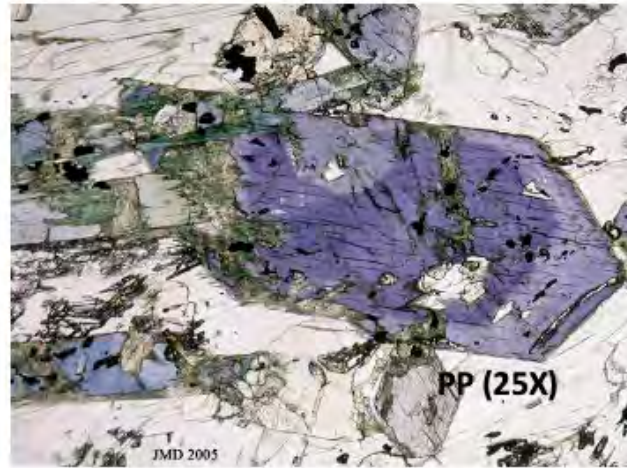
Le trasformazioni mineralogiche sono molto evidenti nelle rocce basiche, mentre le rocce pelitiche sono meno reattive

In corrispondenza dello slab in subduzione l'isoterma dei 600°C si trova a ~ 100 km di profondità, mentre sotto gli archi vulcanici si trova a ~ 20 km.



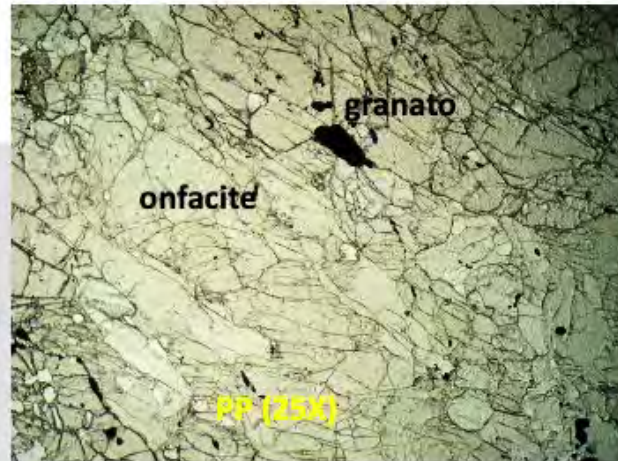
Metamorfismo regionale di seppellimento o subduzione

**Scisto blu, Franciscan melange
(California)**

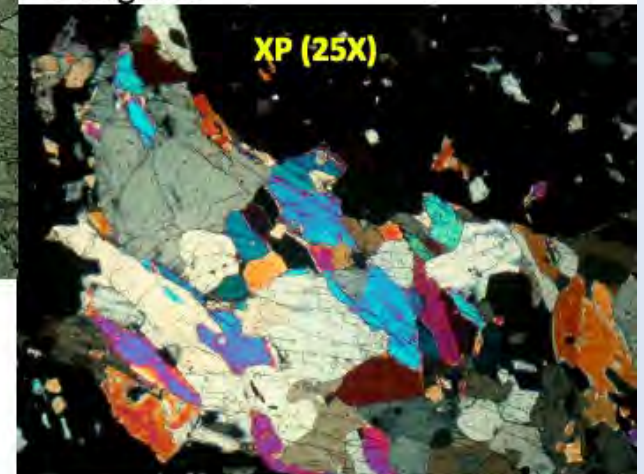


Glaucofane : Na-anfibolo
diagnostico della facies
Scisti Blu

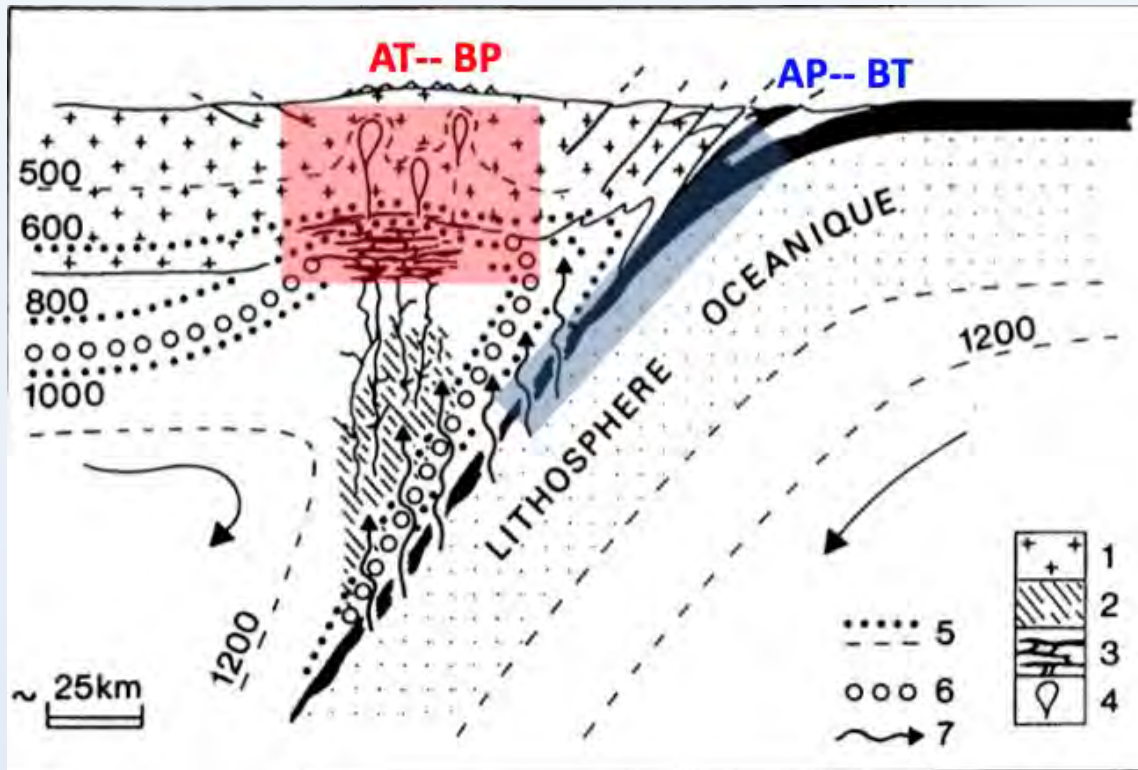
Eclogite (Norvegia)



Onfacite (Na-px)+granato:
minerali diagnostici della facies
eclogitica



Cinture metamorfiche appaiate



AT – BP serie metamorfiche di alto gradiente termico
alta T / bassa P

AP – BT serie metamorfiche di basso gradiente termico
bassa T / alta P

- 1 crosta continentale
- 2 zona produzione magmi basici dal mantello sottocontinentale
- 3 accumulo di magmi basici alla base della crosta ("underplating")
- 4 plutoni granitici
- 5 isoterme
- 6 solidus idrato peridotite
- 7 percolazione H₂O-fluidi provenienti dalla litosfera oceanica subdotta

- L'incuneamento della placca oceanica lungo la zona di subduzione produce un metamorfismo di alta P / bassa T (serie AP-BT);
- La crosta oceanica e il mantello sottostante serpentizzato ricristallizzano in profondità (50-120km) liberando fluidi ricchi in H₂O che percolano nel mantello sottocontinentale e ne provocano la fusione parziale (nota: la placca oceanica è idratata precedentemente mediante metamorfismo di fondo oceanico; vedi slides sotto)
- I magmi basaltici migrano verso la base della crosta continentale, causano l'inarcamento delle isoterme e un metamorfismo di alta T / bassa P (serie AT-BP), fino a provocare la fusione parziale della crosta con produzione di magmi granitici che propagano l'anomalia termica verso la superficie

Cinture metamorfiche appaiate

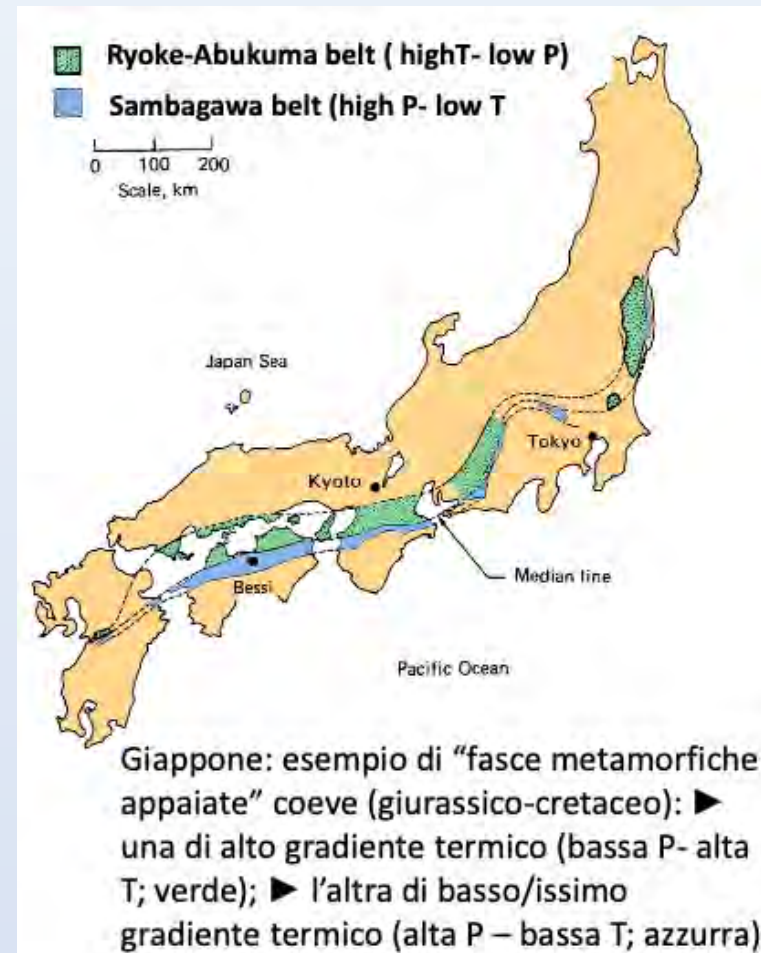
Le cinture metamorfiche appaiate hanno la stessa età geologica ma carattere contrastante,. Sono allungate parallelamente l'una all'altra secondo gli assi orogenici:

- Una di alta P/ bassa T che contiene metabasiti ofiolitiche (crosta oceanica metamorfosata);
- L'altra di alta T/ bassa P, con anche migmatiti (metamorfiti di anatessi) e rocce granitoidi.

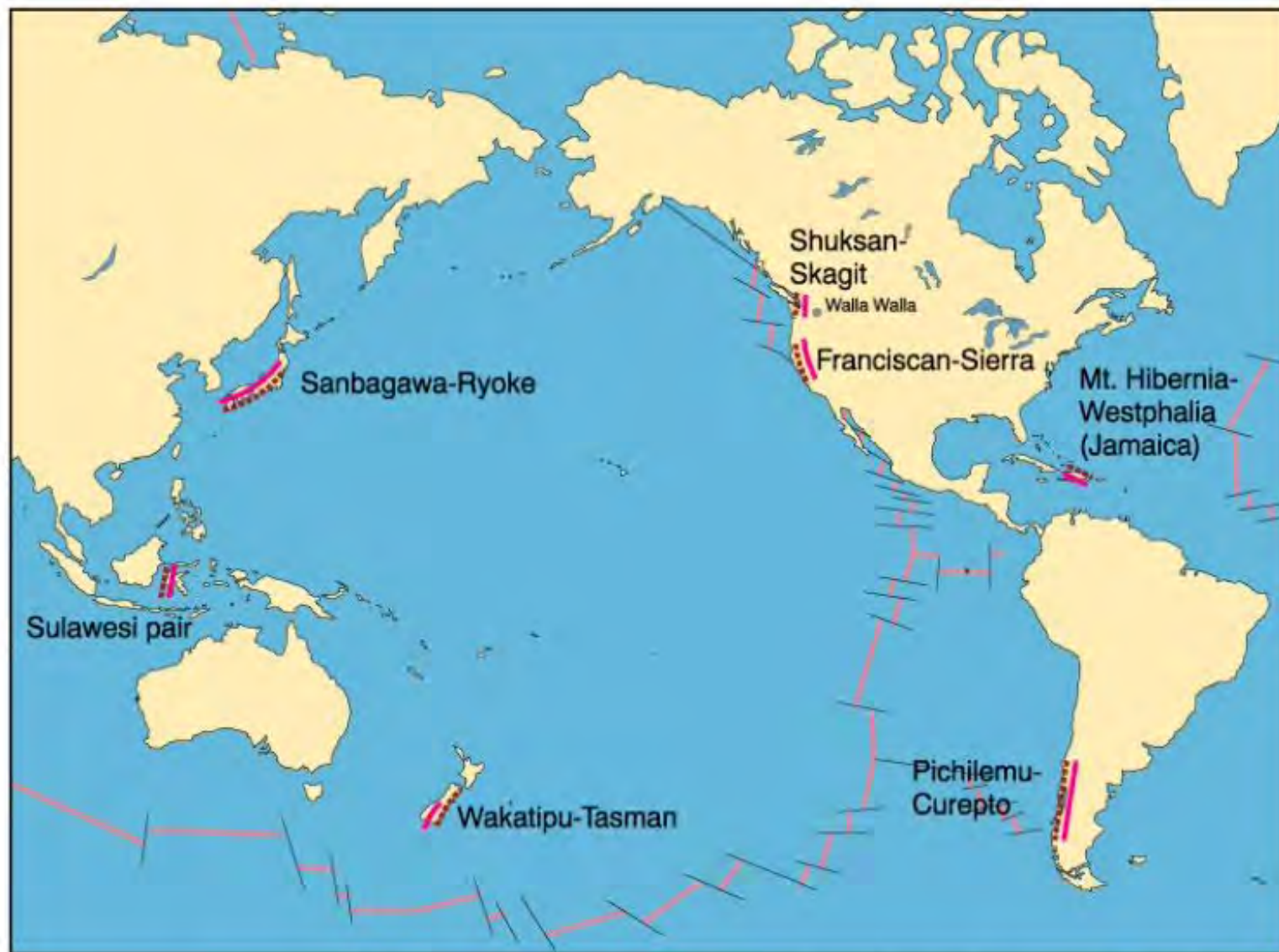
La catena metamorfica di alta P è dalla parte dell'oceano (corrispondente ad una regione di fossa oceanica),

quella di bassa P è dalla parte del margine continentale, che è anche sede di vulcanesimo andesitico sin-orogenico (corrispondente all'arco magmatico)

Esempi di catene appaiate si trovano in Giappone ed in altre regioni circumpacifiche



Cinture metamorfiche appaiate

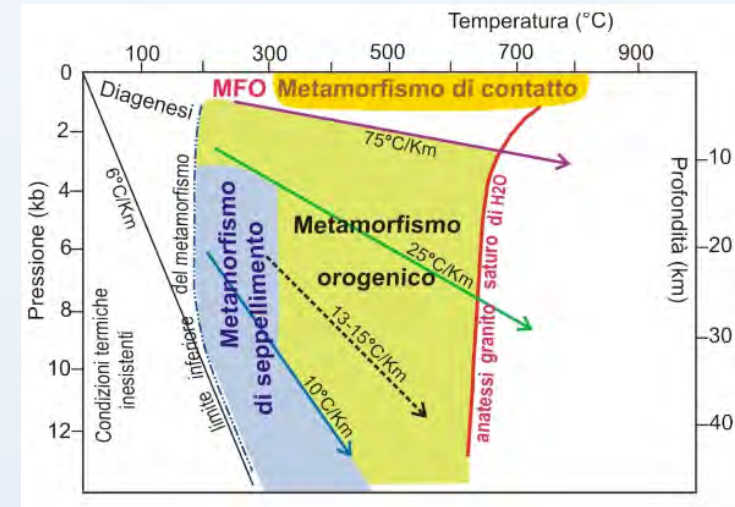


..... bassa T/alta P
— alta T/bassa P

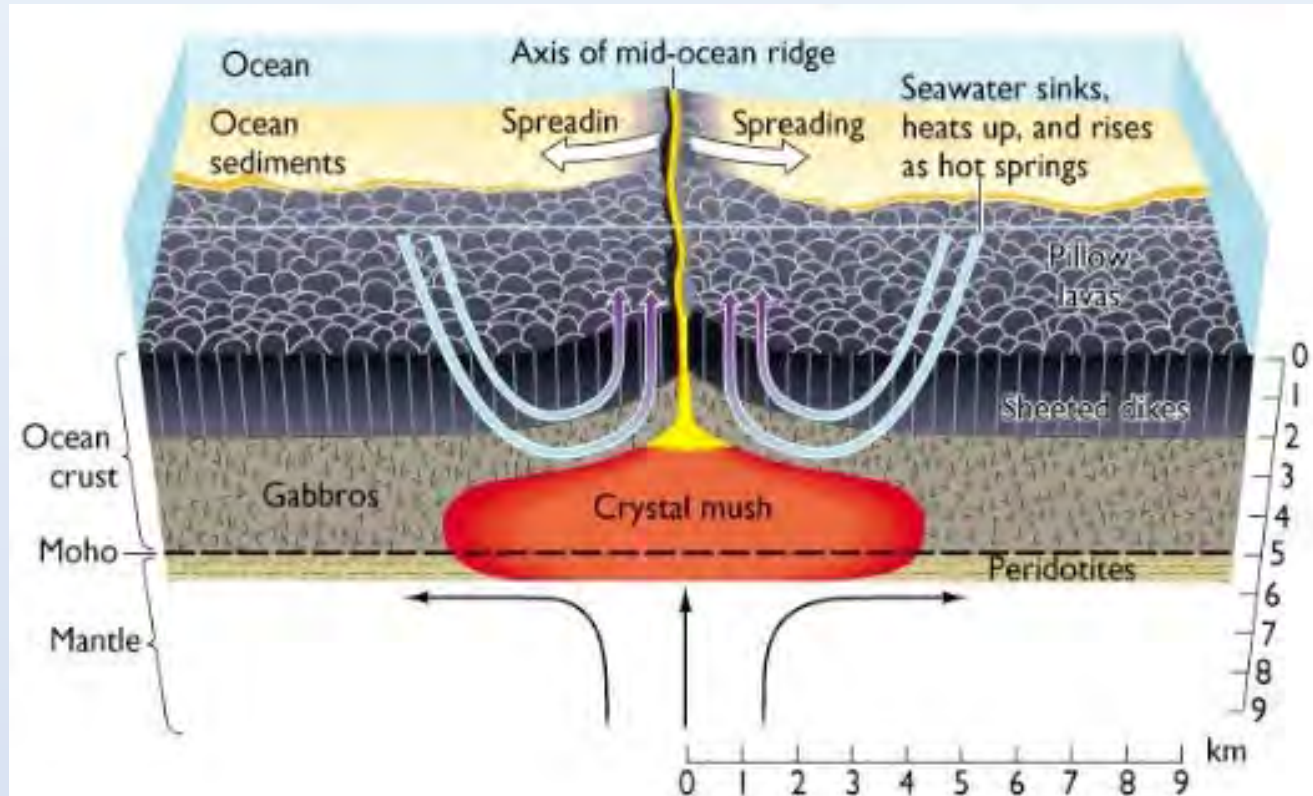
Some of the paired metamorphic belts in the circum-Pacific region. From Miyashiro (1994) *Metamorphic Petrology*. Oxford University Press.

Metamorfismo regionale di fondo oceanico

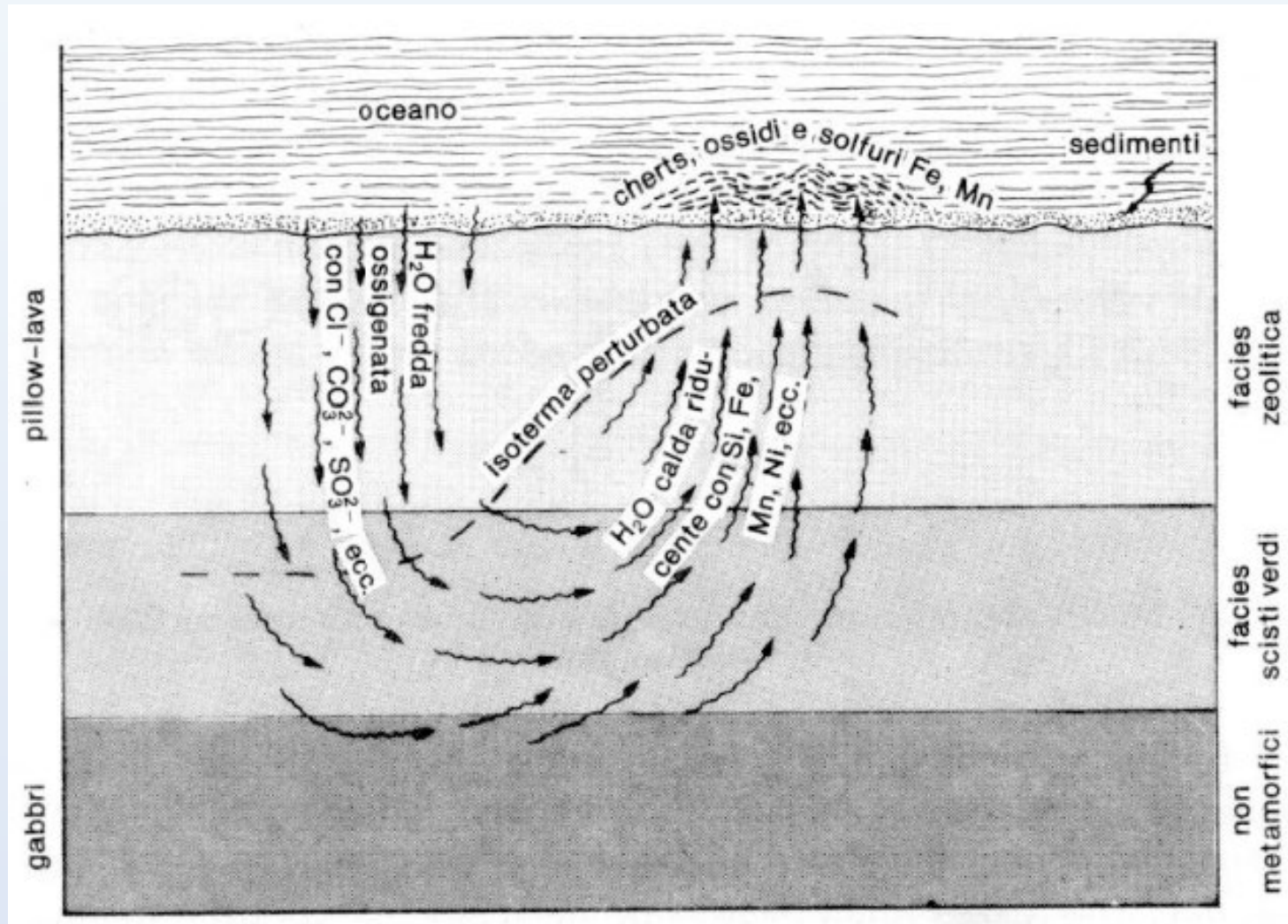
- Coinvolge la crosta oceanica in corrispondenza della dorsali medio-oceaniche
- La risalita di magma basaltico provoca un'anomalia termica con produzione di gradienti termici molto elevati, fino a $150^{\circ}\text{C}/\text{Km}$ in prossimità dei centri effusivi
- Condizioni metamorfiche: $T \sim 150\text{--}500^{\circ}\text{C}$ $P \leq 1\text{ kbar}$



- Questo metamorfismo è causato da circuiti termoconvettivi di fluidi ricchi in H_2O : questi penetrano nella crosta, grazie alla fratturazione. I fluidi quindi si riscaldano e risalgono.
- L'interazione H_2O -roccia provoca effetti di idratazione e metasomatici lungo i circuiti termoconvettivi



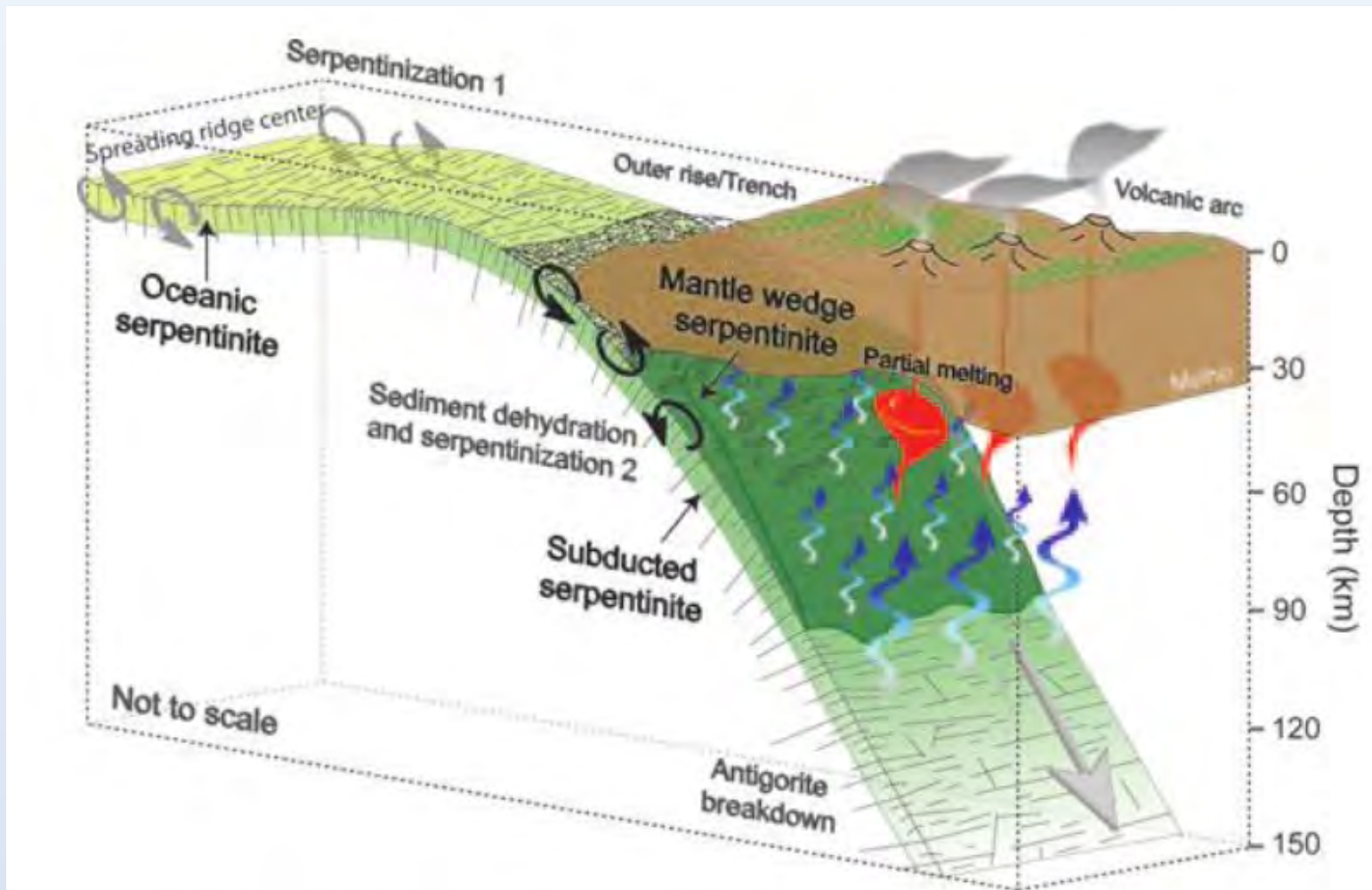
Metamorfismo regionale di fondo oceanico



- I processi di idratazione spiegano perché la crosta oceanica subdotta nelle zone di convergenza rilascia fluidi ricchi in H₂O, che sono indispensabili per la fusione del mantello sottocontinentale.

Metamorfismo regionale di fondo oceanico

- I processi di idratazione spiegano perché la crosta oceanica subdotta nelle zone di convergenza rilascia fluidi ricchi in H_2O , che sono indispensabili per la fusione del mantello sottocontinentale.



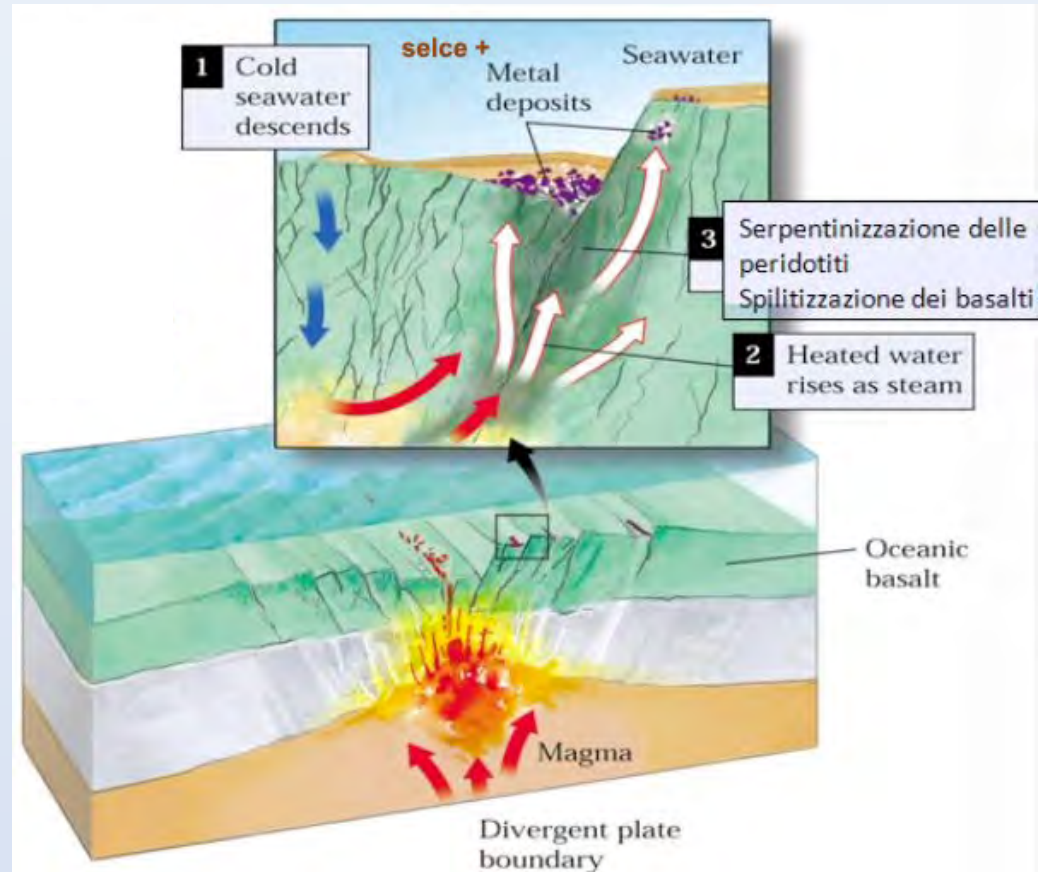
da: Deschamps et al. (Lithos, 2013; 178, 96-127)

Metamorfismo regionale di fondo oceanico

- L'acqua discendente è fredda e ricca di anioni (Cl^- , HCO_3^- , CO_3^{2-} , SO_4^{2-} , etc). Si hanno reazioni di ossidazione (formazione di ematite, magnetite + pirite, calcite, etc) che liberano SiO_2 , la quale va a formare depositi selciferi abissali assieme alla SiO_2 organogena.
- I fluidi ascendenti "calda" hanno un effetto riducente: gli elementi metallici (V, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Co, etc), lisciviati dalle rocce e trasportati come cloruri solubili, precipitano sul fondo oceanico come composti colloidali (idrossidi di Fe, Mn, solfuri), formando anche depositi metallici (anche di interesse economico)

Effetti globali della percolazione di acqua:

1. Idratazione e modifiche composizionali di basalti e gabbri/peridotiti; idratazione del vetro dei basalti (in minerali argillosi)
2. serpentinizzazione delle peridotiti $\text{Mg}_2\text{SiO}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$
3. cristallizzazione di calcite e solfuri nelle fratture
4. formazione di depositi selciferi (SiO_2 da reazioni di trasformazioni dei basalti)
5. concentrazione e deposito di metalli pesanti V, Mn, Fe, Co, Ni, Zn, Cd, Ag nei sedimenti sovrastanti i basalti



Metamorfismo regionale di fondo oceanico

- Sviluppo in profondità di paragenesi mineralogiche in facies zeolitica e in facies scisti verdi ($T \leq 500^\circ\text{C}$)



Alterazione metasomatica dei basalti in **spiliti** ($>\text{Na, Mg}$; $<\text{Fe, Ca, Si}$ del basalto):

albite (albitizzazione del plagioclasio) + zeoliti, epidoti, actinolite, clorite, calcite.

