

CONCETTI DI BASE

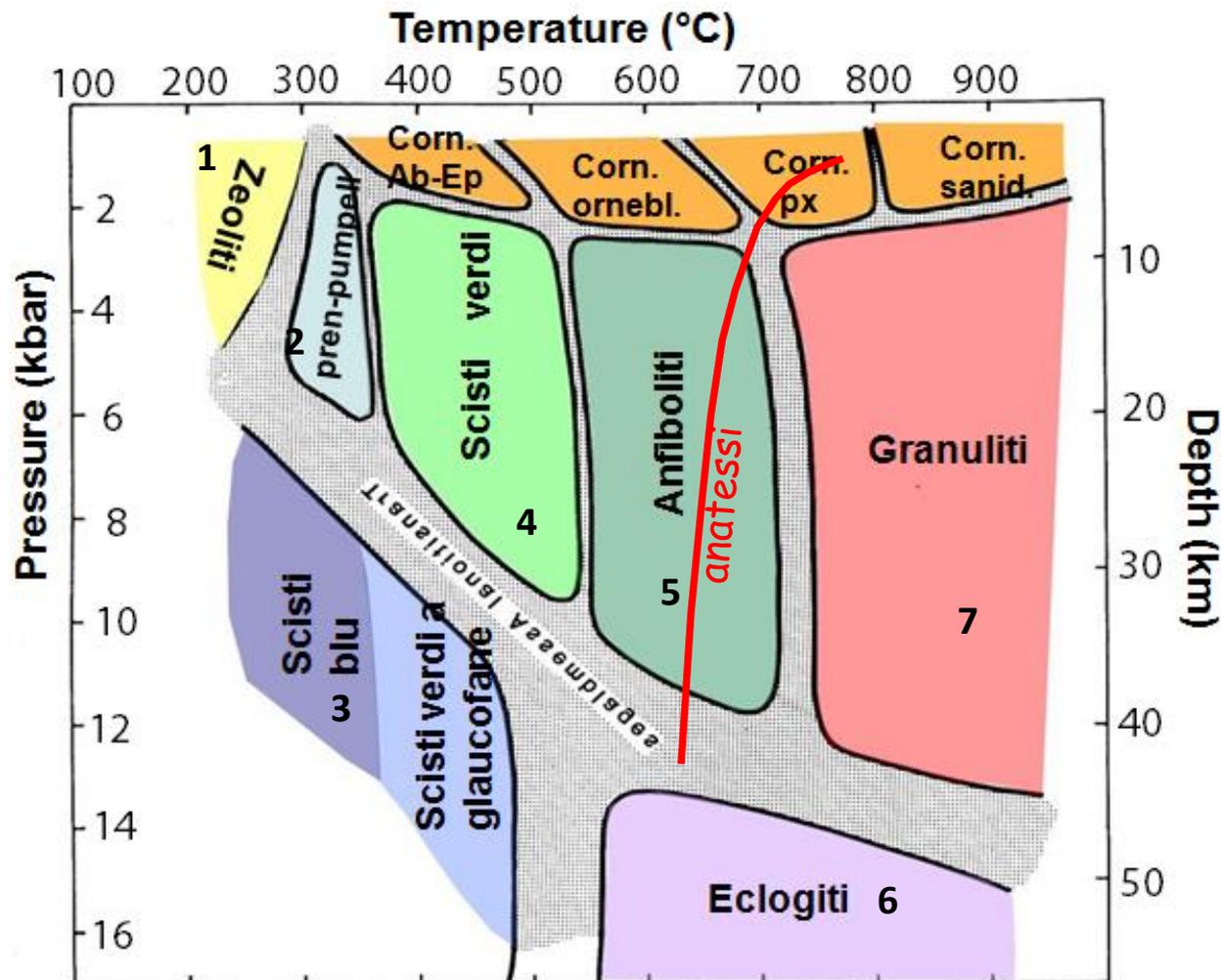
GRADO METAMORFICO : intensità del processo metamorfico; dipende dalla temperatura (es, alto grado = alta T)

ZONA METAMORFICA : porzione di un terreno metamorfico caratterizzato da un definito grado metamorfico. Per analogo protolito (all'equilibrio), le rocce appartenenti alla stessa zona avranno la stessa associazione di minerali

FACIES METAMORFICA : condizioni P-T in cui (all'equilibrio) si sviluppano determinate associazioni di minerali in funzione della composizione del protolito

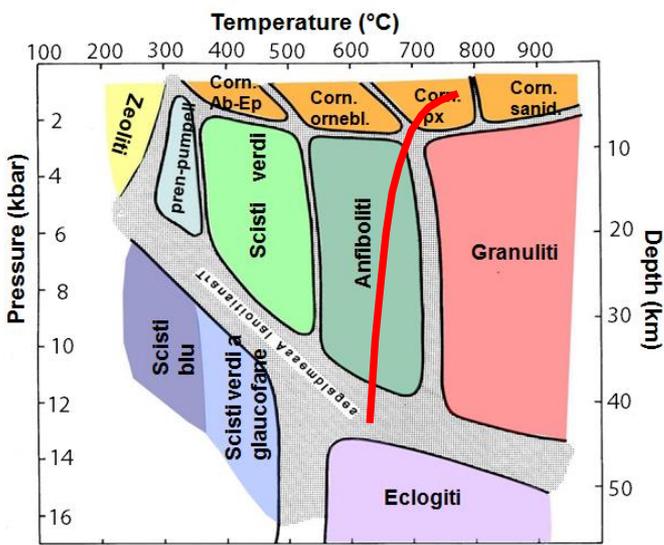
SERIE METAMORFICA : sequenza di facies metamorfiche controllata da un definito gradiente termico. 3 serie metamorfiche: di alto ($>40^{\circ}\text{C}/\text{km}$), intermedio ($15\text{-}40^{\circ}\text{C}/\text{km}$) e basso gradiente termico ($10^{\circ}\text{C}/\text{km}$)

MINERALI INDICE : minerali che si formano in determinate condizioni P-T e rimangono stabili solo entro ben definiti intervalli P-T



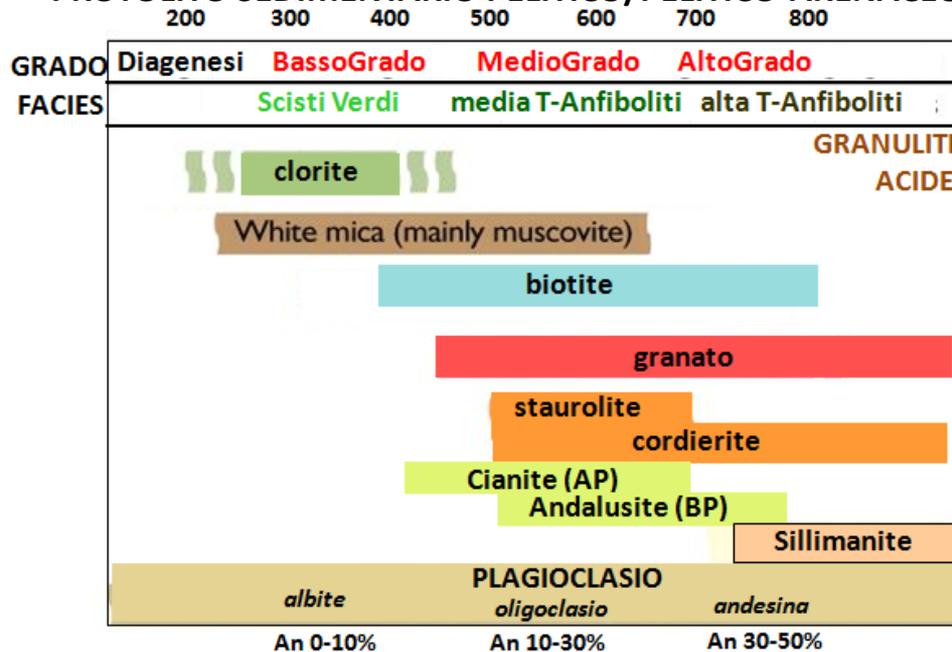
Le associazioni mineralogiche presenti in una roccia metamorfica dipendono da:

- ▶ Composizione chimica del protolito
- ▶ Grado metamorfico - Facies metamorfica

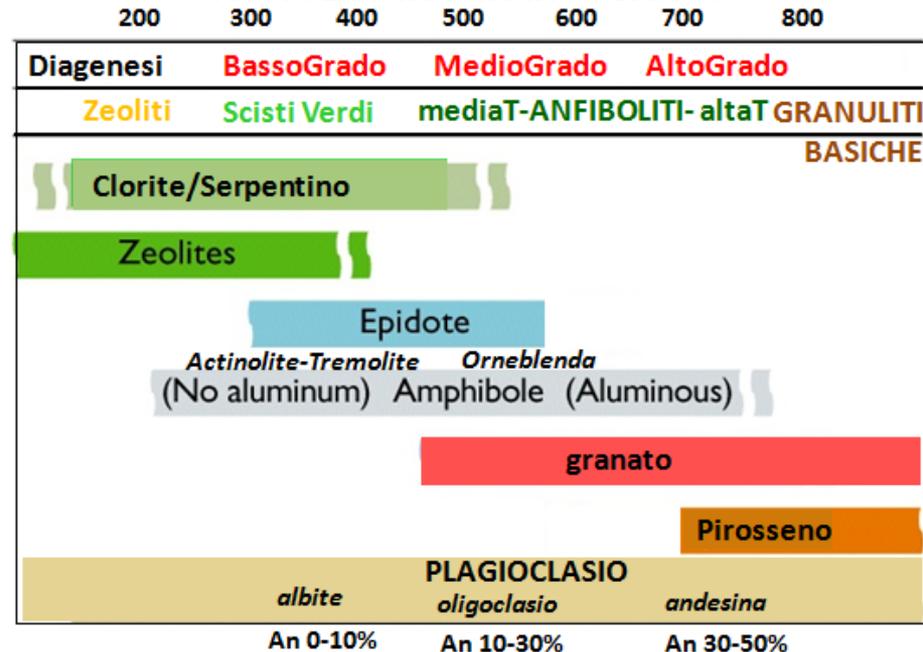


GRADO	intervallo T°(C)
molto basso	200-300/350 °C
basso	300/350-500/550 °C
medio	500/550-600/650°C
alto	>650°C

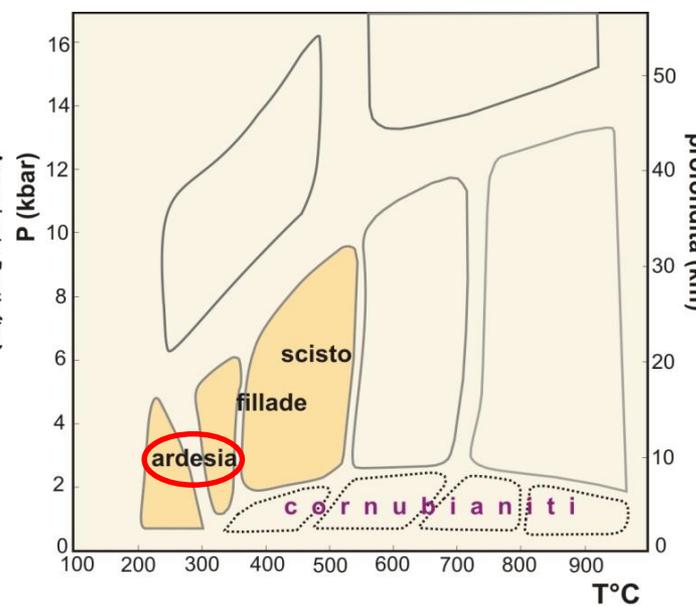
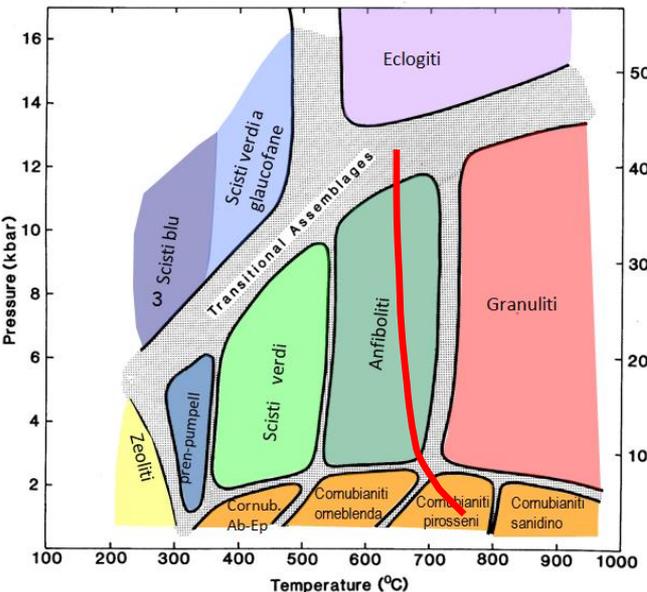
PROTOLITO SEDIMENTARIO PELITICO/PELITICO-ARENACEO



PROTOLITO MAGMATICO BASICO

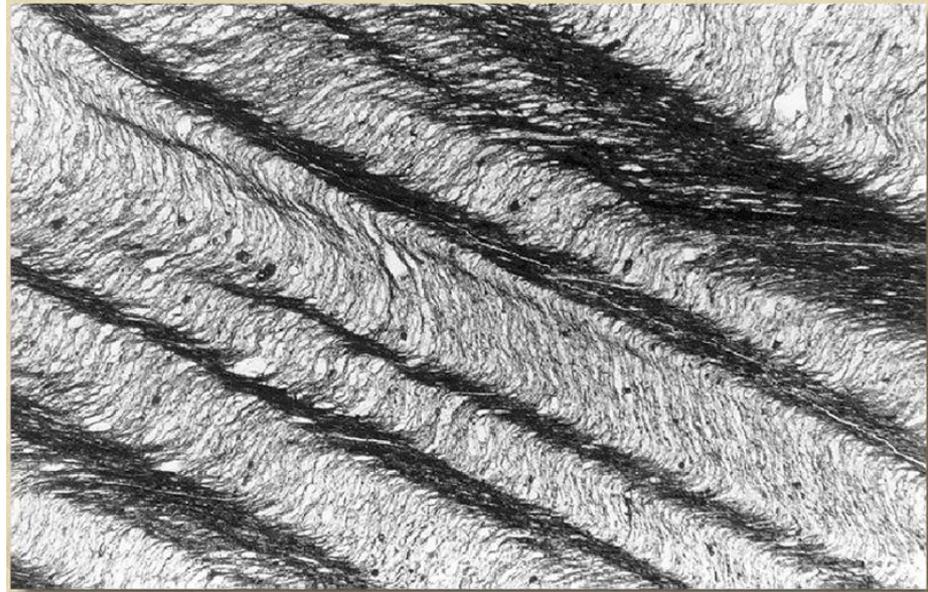


Schema semplificato della composizione mineralogica in funzione del GRADO e FACIES metamorfica nel metamorfismo REGIONALE orogenico (non riportati minerali della facies scisti blu e eclogiti)



Protolito : roccia sedimentaria pelitica (argillite)

Fig. 4.13



Zonal crenulation cleavage with a percentage of cleavage domains variable from about 25% in the lower left part to almost 50% in the upper right part of the photograph; note the gradual transition between cleavage domains and microlithons, and the asymmetric character of microfolds resulting in relative mica enrichment predominantly in one of two alternating fold limbs (cf. Fig. 4.12, where both limbs are identical) Leiden Collection. Width of view 4 mm. PPL.

**Grado metamorfico MOLTO BASSO
 (=anchimetamorfismo o semimetamorfismo)
 → Argilloscisto (ardesia)**

Clivaggio in argilloscisto al microscopio
 (1 pol; larghezza foto 4mm)

microfolding producing
crenulation cleavage

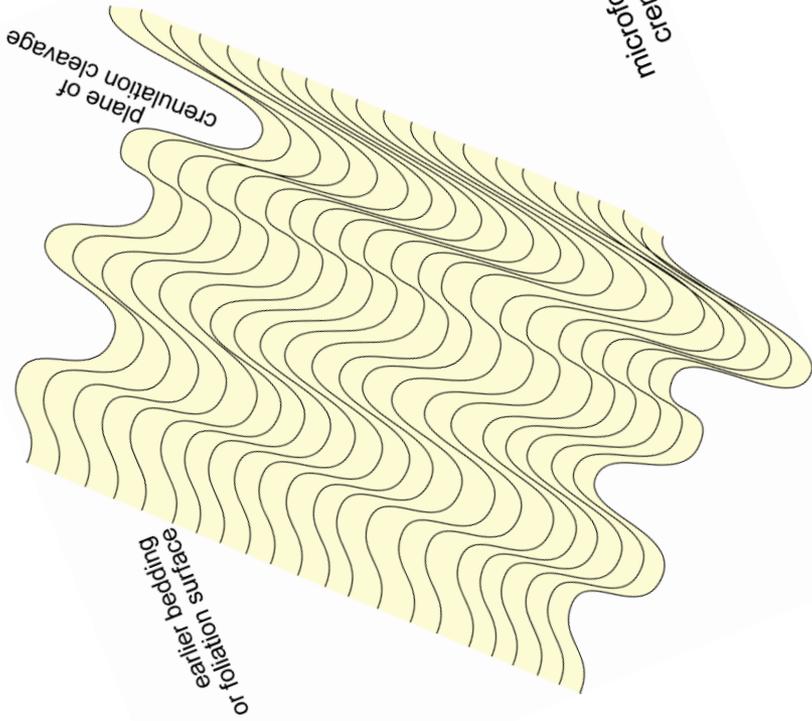
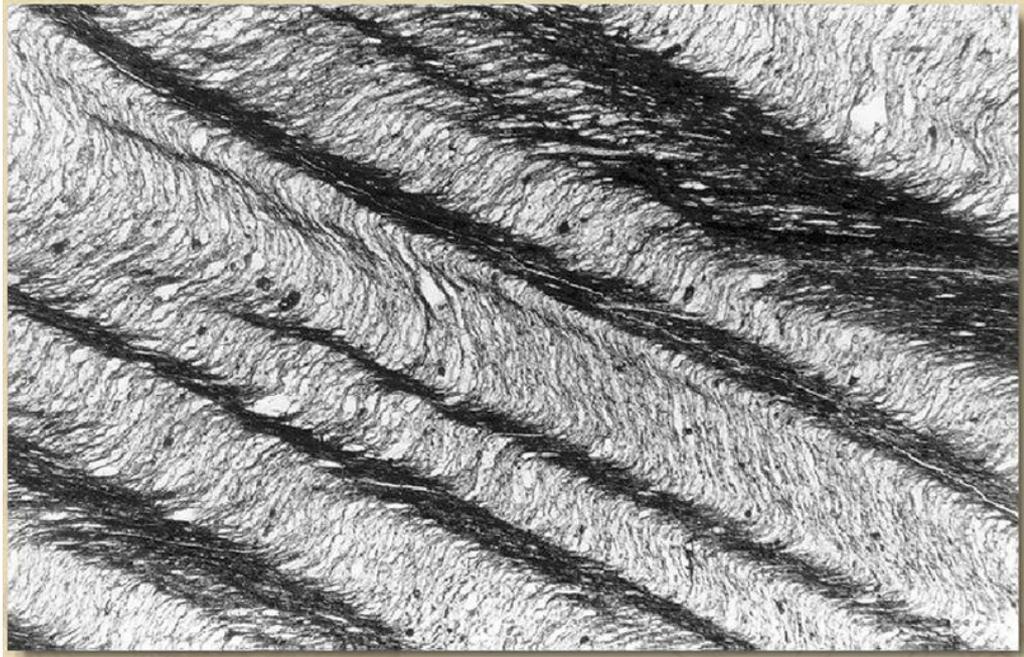
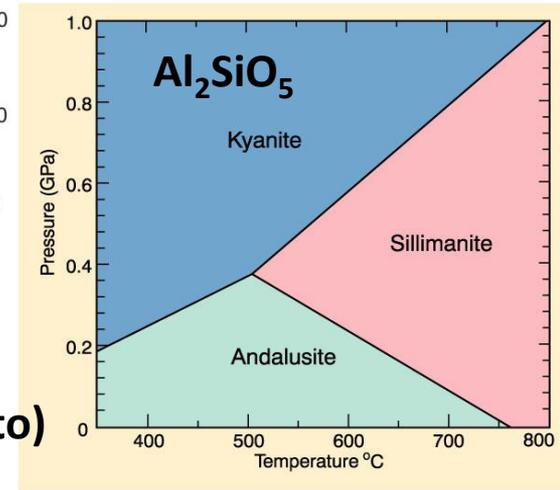
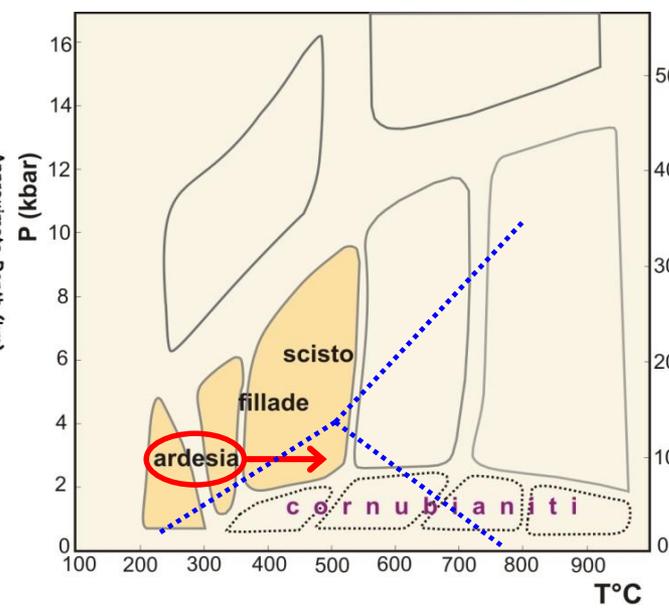
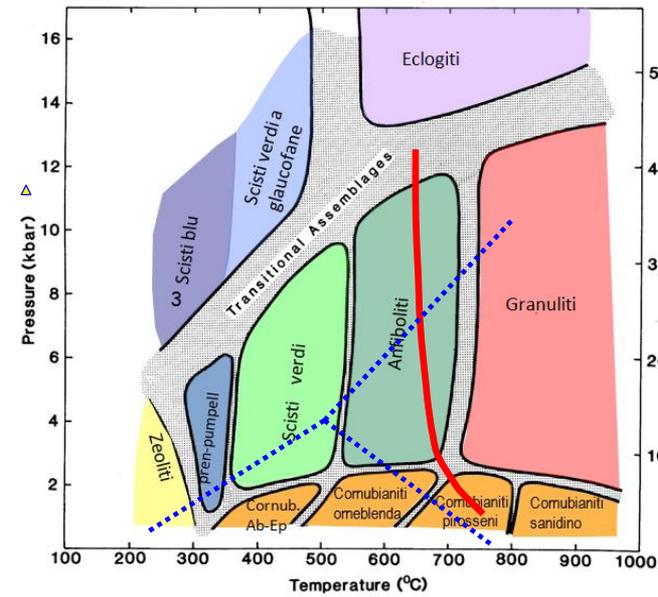


Fig. 4.13



Zonal crenulation cleavage with a percentage of cleavage domains variable from about 25% in the *lower left part* to almost 50% in the *upper right part* of the photograph; note the gradual transition between cleavage domains and microlithons, and the asymmetric character of microfolds resulting in relative mica enrichment predominantly in one of two alternating fold limbs (cf. Fig. 4.12, where both limbs are identical) Leiden Collection. Width of view 4 mm. PPL.



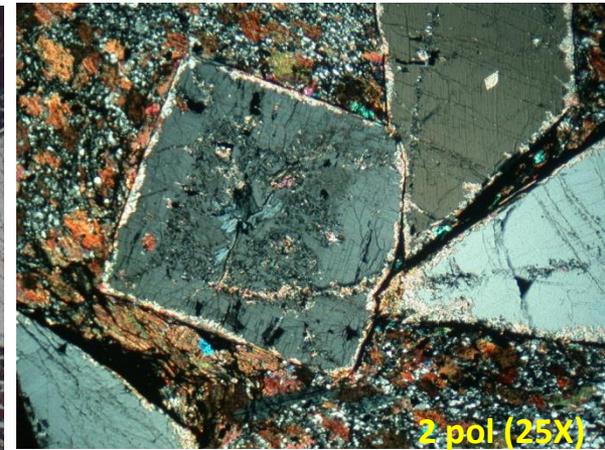
Argilloscisto (ardesia) sottoposto a metamorfismo termico (aureole di contatto)

Grado met. da MOLTO BASSO (ardesia) a MEDIO a bassa P (contatto)

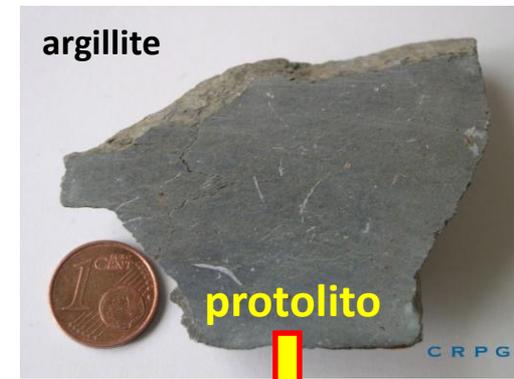
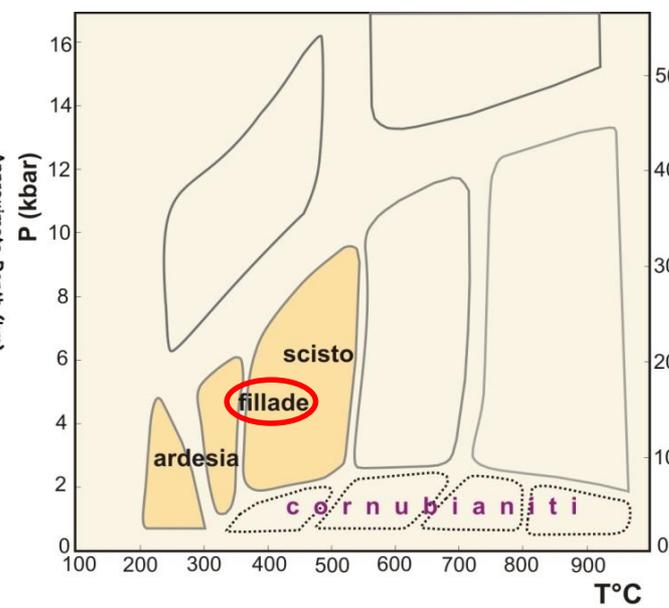
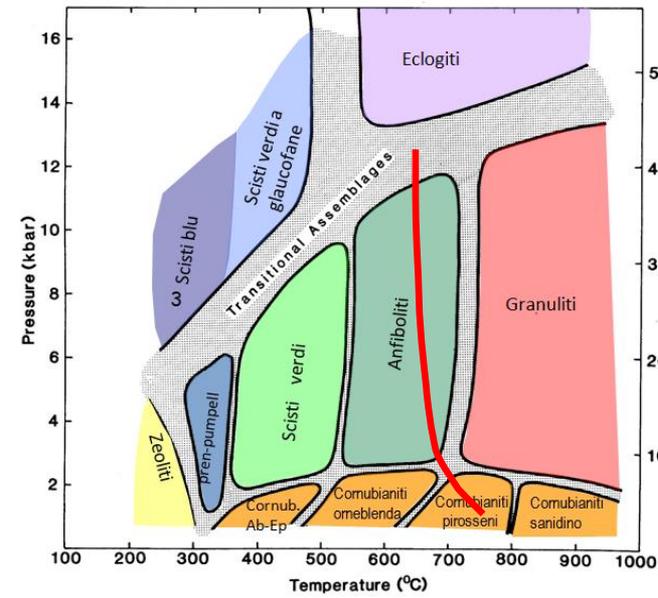
→ Argilloscisto ad andalusite



Argilloscisto ad andalusite prodotta per termo-metamorfismo

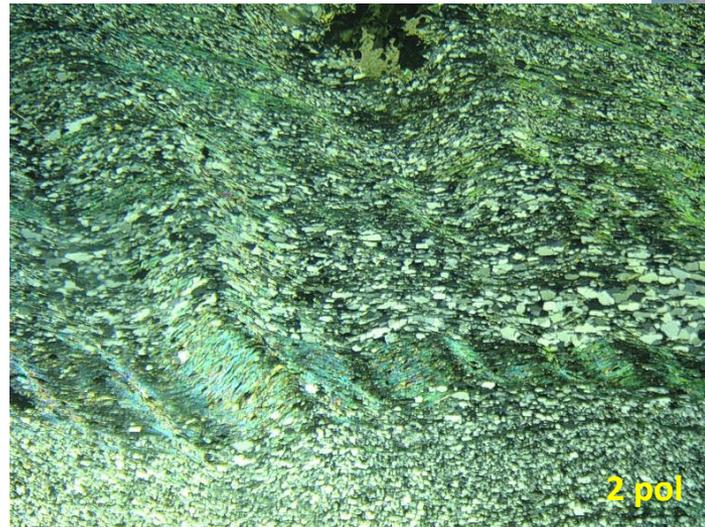
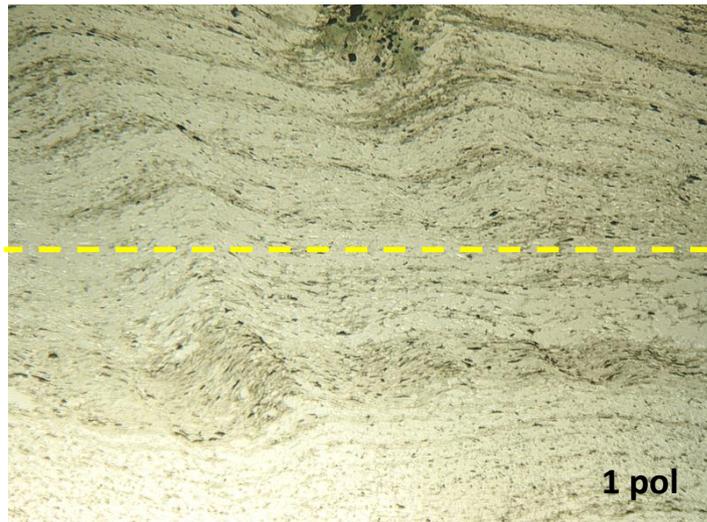


Al microscopio: blasti idiomorfi di andalusite in sezione basale



Protolito : roccia pelitica (argillite)

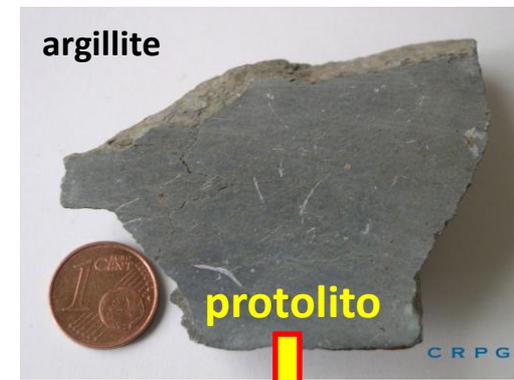
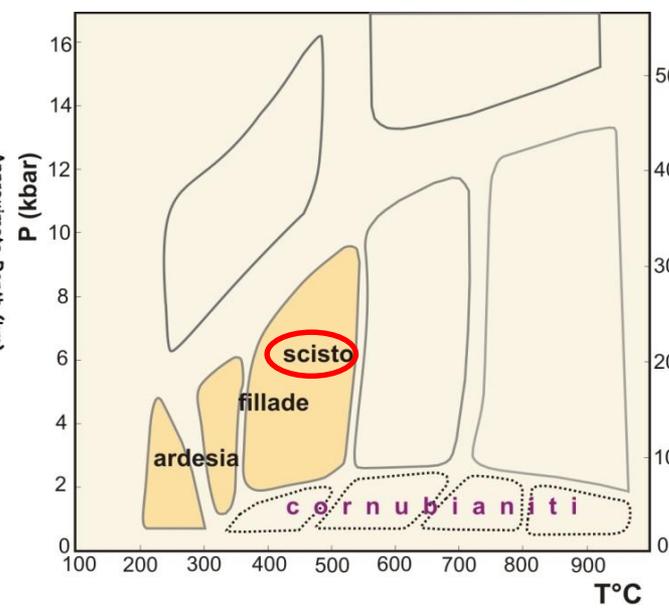
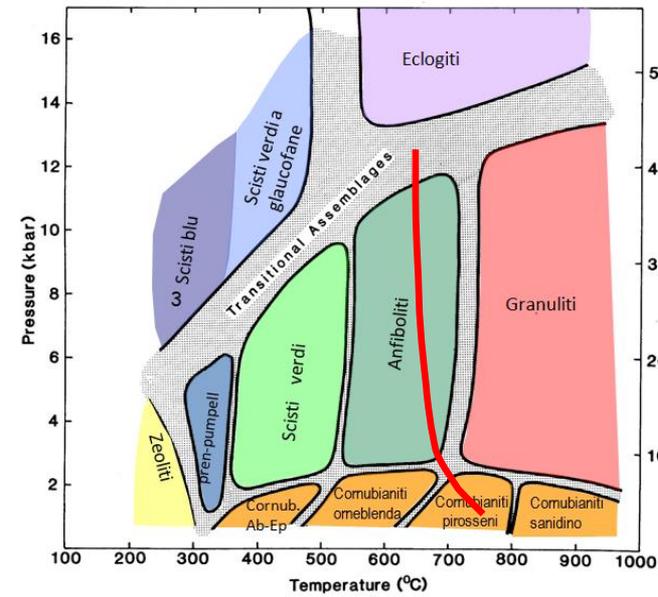
BASSO Grado metamorfico → Fillade – F. SCISTI VERDI



1 pol

2 pol

Fillade al microscopio: clorite verde pallido, muscovite incolore e quarzo definiscono la scistosità (linea gialla tratteggiata) debolmente crenulata (=ondulata); grana fine; campo visivo= 9 mm.



profondità (km)

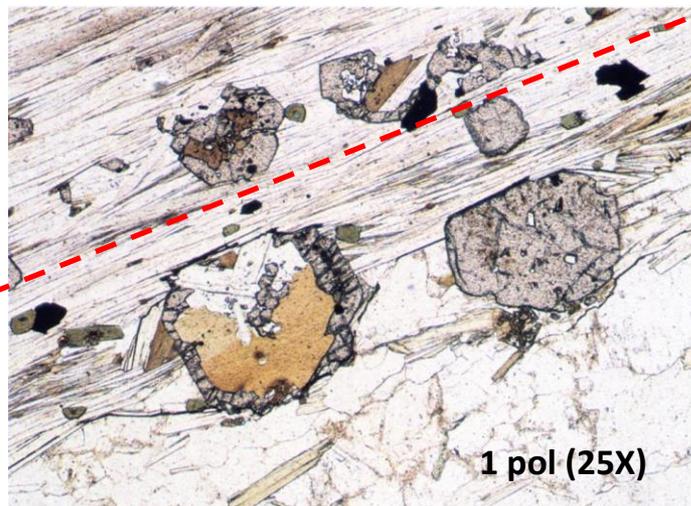
50
40
30
20
10
0

Protolito : roccia pelitica (argillite)

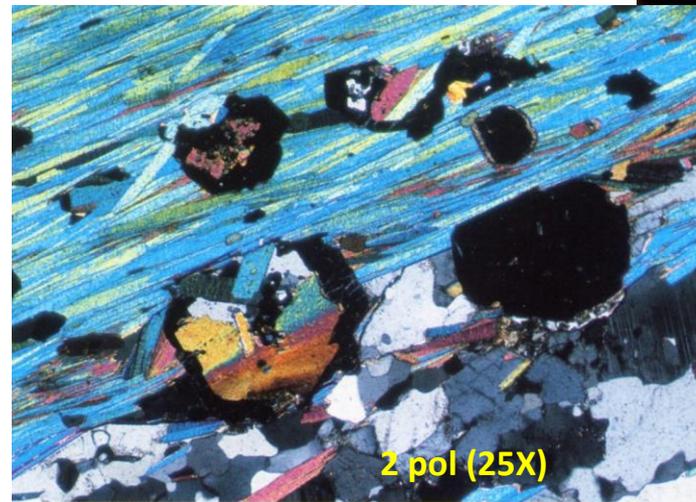
BASSO Grado met. → Scisti a muscovite – F. SCISTI VERDI



scisto a muscovite+granato

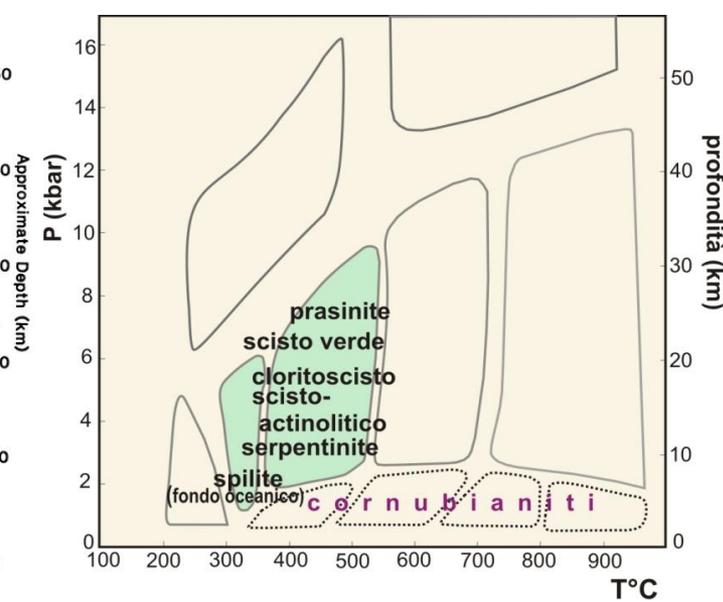
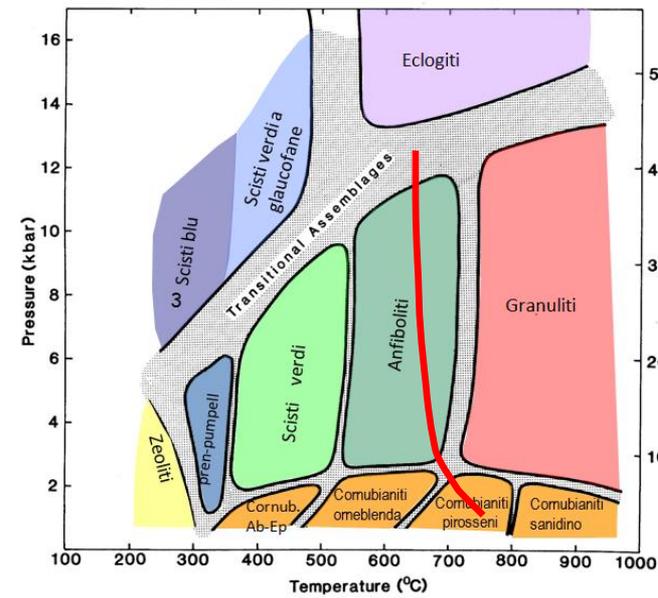


1 pol (25X)



2 pol (25X)

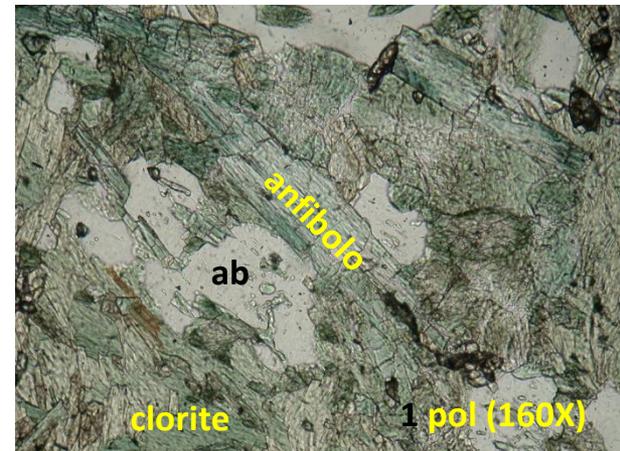
Scisto a muscovite, granato, quarzo al microscopio: oltre a questi minerali possono essere presenti biotite (ma scarsa), clorite, albite; linea rossa tratteggiata= traccia del piano di scistosità.



protoliti

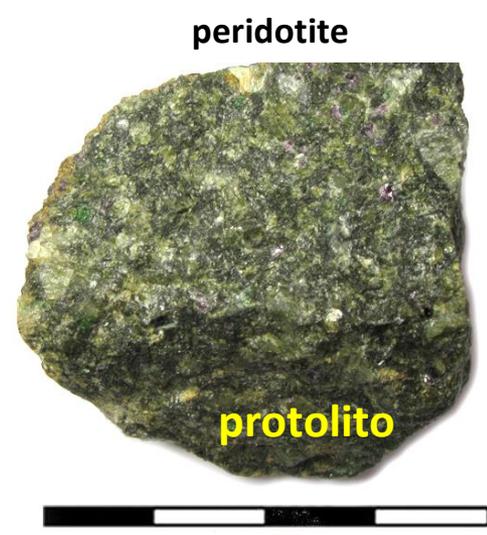
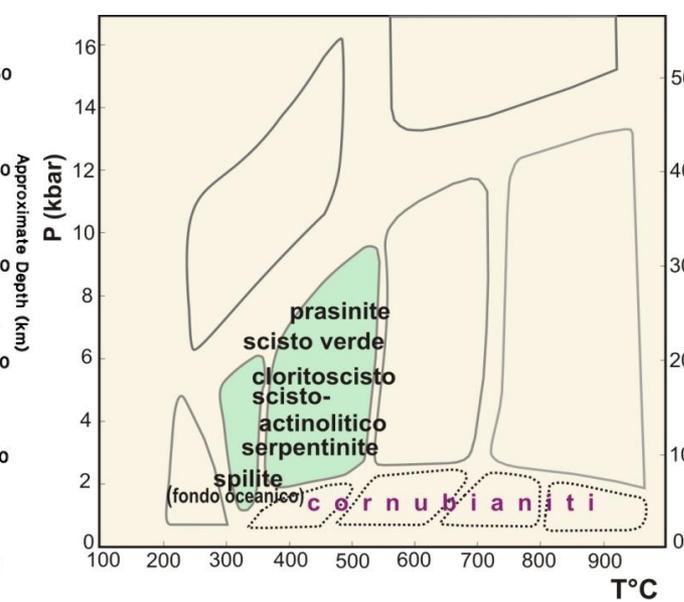
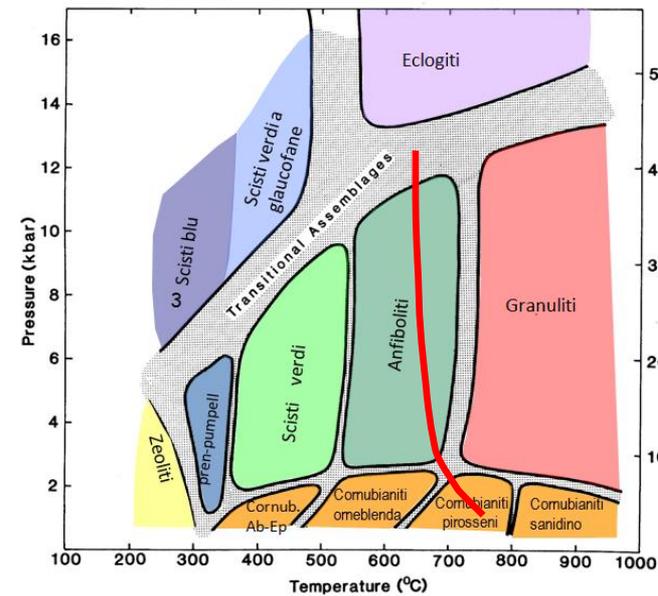
Protolito : roccia magmatica basica (basalto/gabbro, diorite/andesite)

BASSO Grado met. → Cloritoscisti/prasiniti – F. SCISTI VERDI



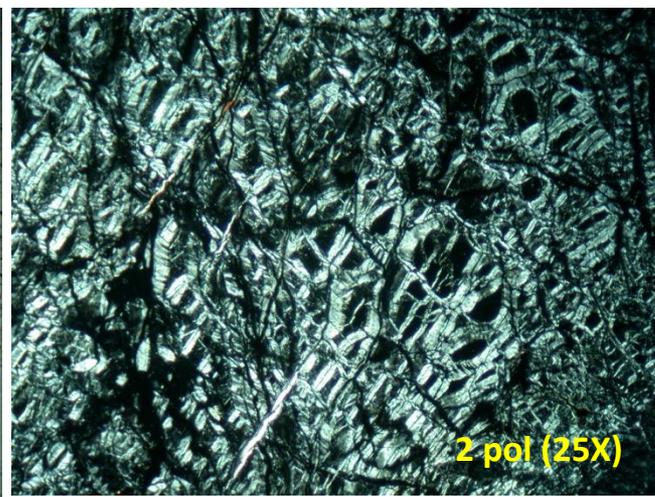
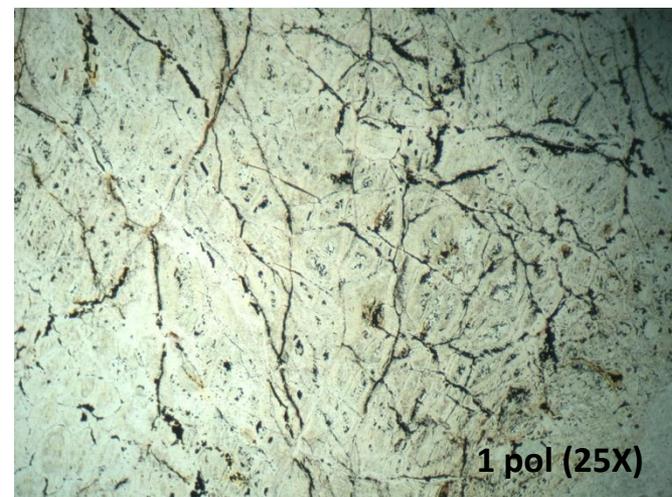
Prasinite al microscopio: grana fine, costituita da anfiboli (actinolite), clorite, epidoti (non nella foto) e albite (ab)





Protolito : roccia magmatica ultrabasica : peridotite

BASSO Grado metamorfico → serpentiniti – F. SCISTI VERDI

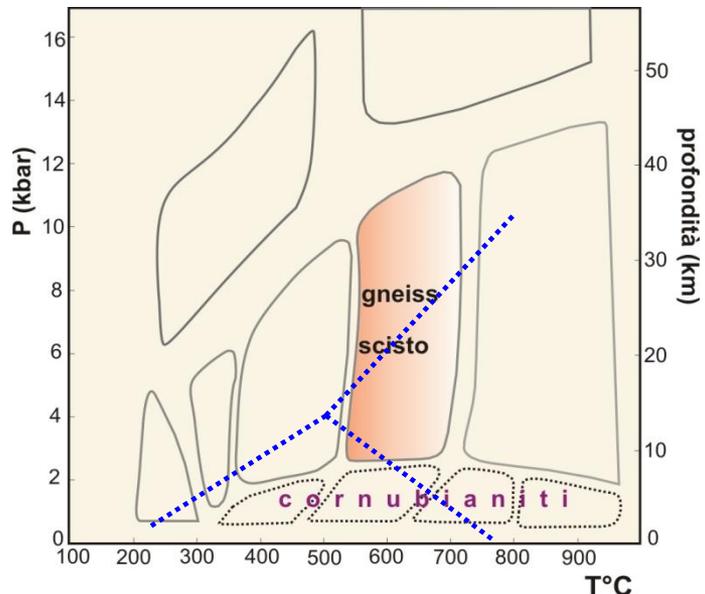
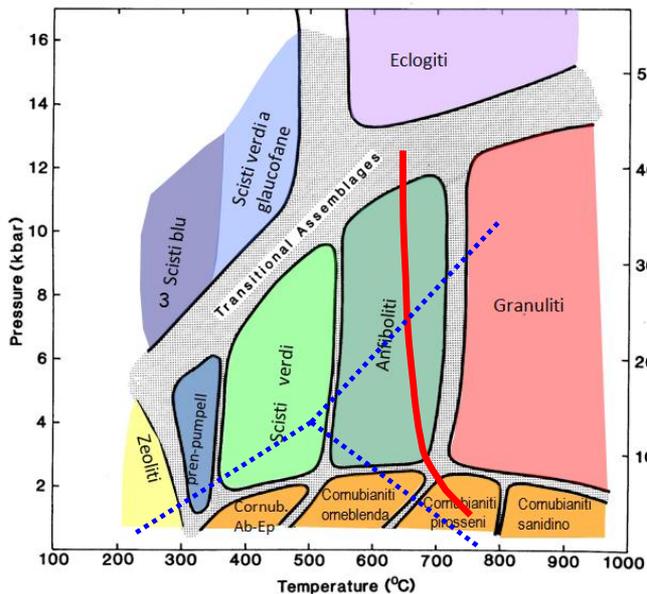


anche prodotto di metamorfismo di fondo oceanico/idrotermale

serpentino



Serpentinite al microscopio: costituita quasi totalmente da serpentino $\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ derivato dalla trasformazione dell'olivina ($\text{olivina} + \text{H}_2\text{O} = \text{serpentino} + \text{magnetite}$)



Protolito : roccia pelitica (argillite)

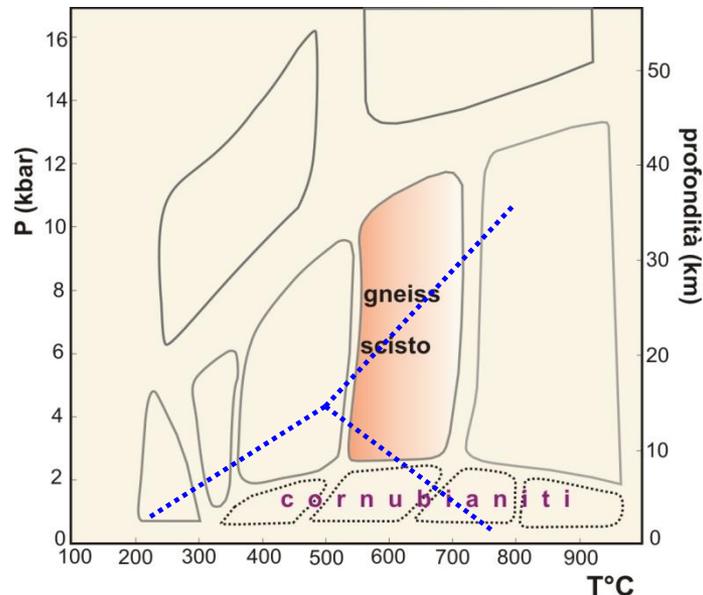
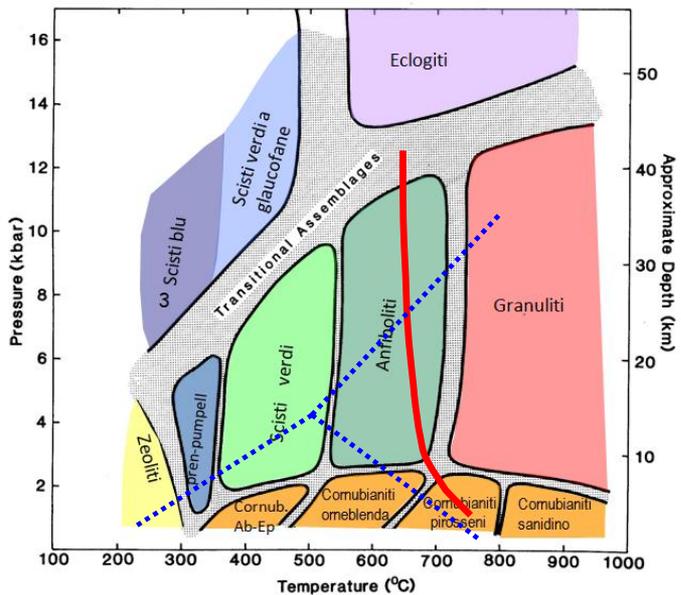
MEDIO Grado metam. → Scisti a staurolite+granato : FACIES ANFIBOLITICA di medio/alta P



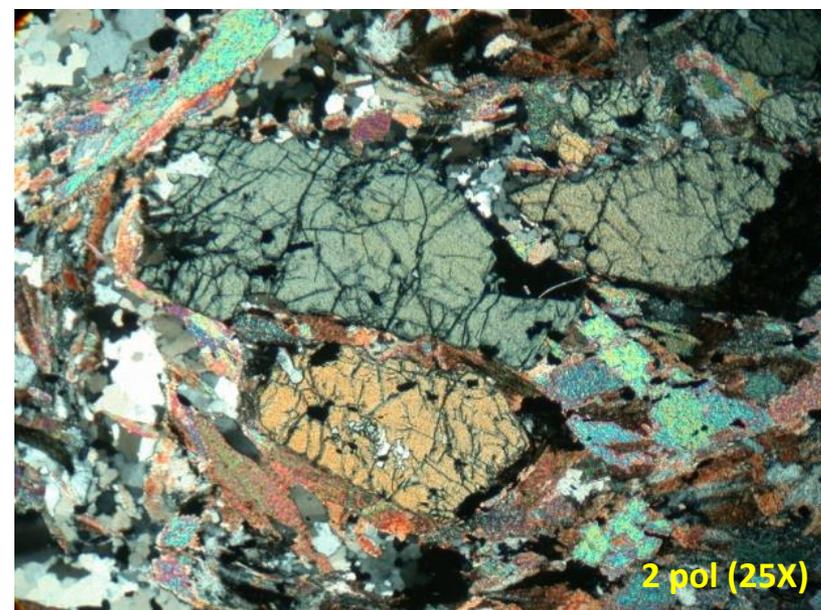
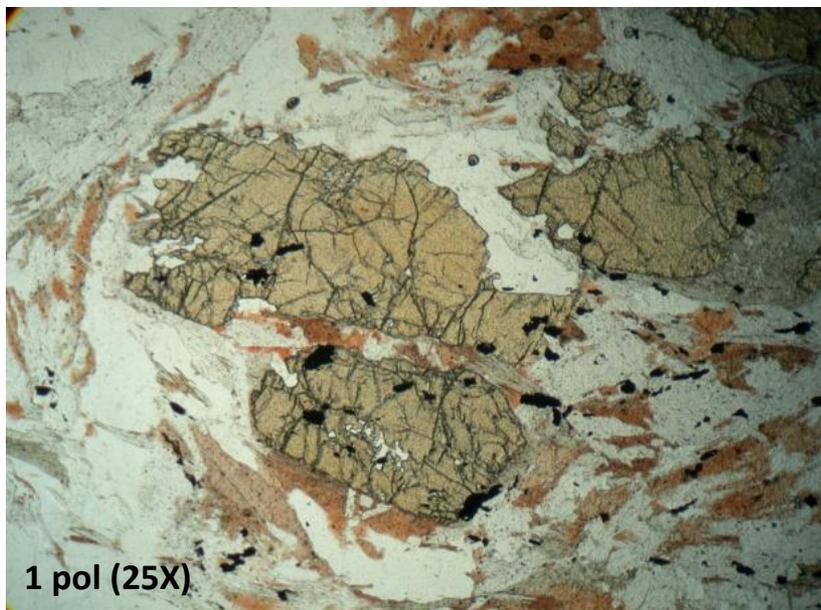
STAUROLITE $(Fe,Mg)_2(Al,Fe,Ti)_9O_6[(Si,Al)O_4]_4(O,OH)_2$
MINERALE INDICE del MEDIO grado-facies anfibolitica



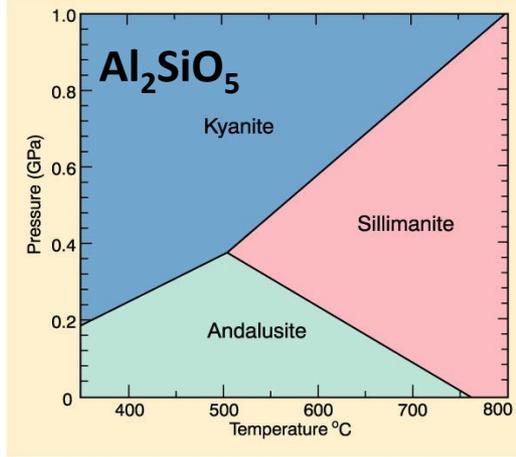
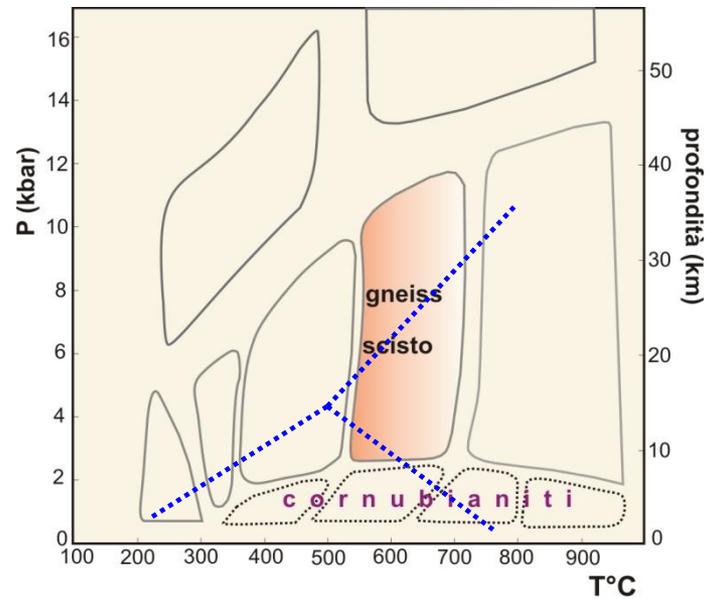
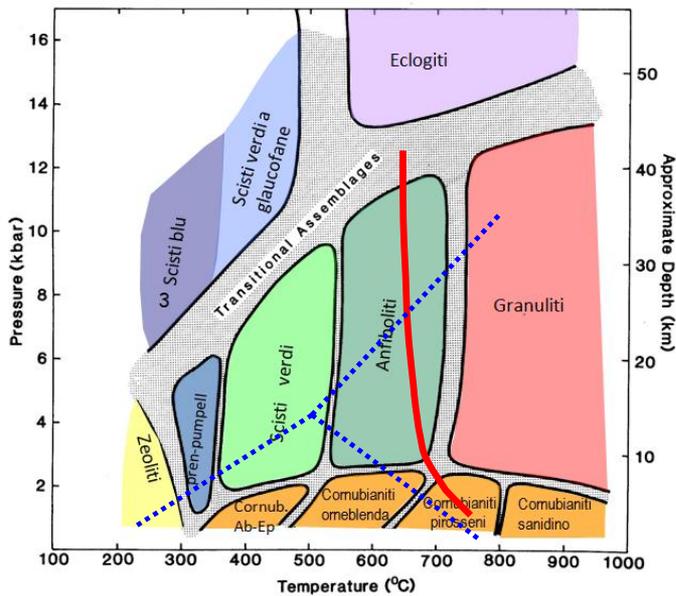
Scisti a porfiroblasti di staurolite (1), staurolite+granato (2); particolare della geminazione a croce di staurolite (3)



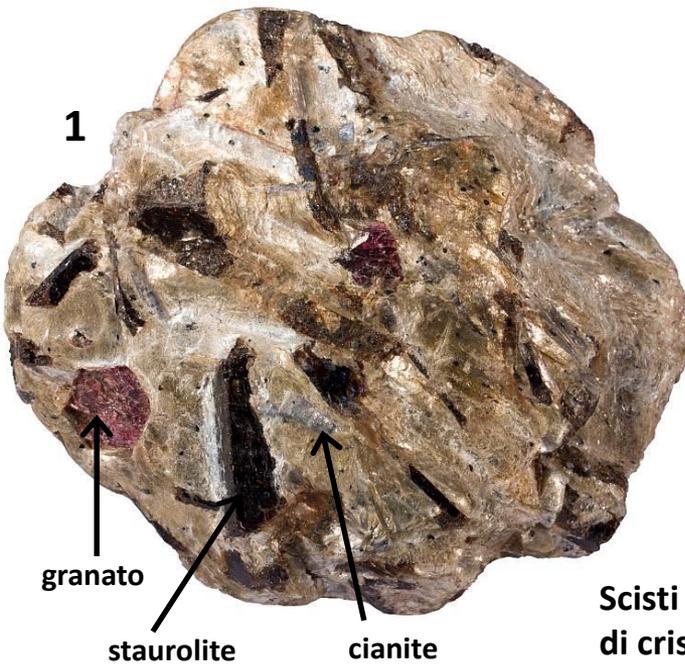
STAUROLITE $(\text{Fe,Mg})_2(\text{Al,Fe,Ti})_9\text{O}_6[(\text{Si,Al})\text{O}_4]_4(\text{O,OH})_2$: MINERALE INDICE del medio grado-facies anfibolitica di medio-alta P



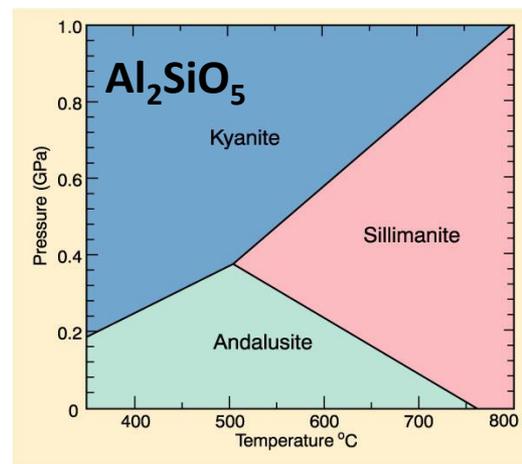
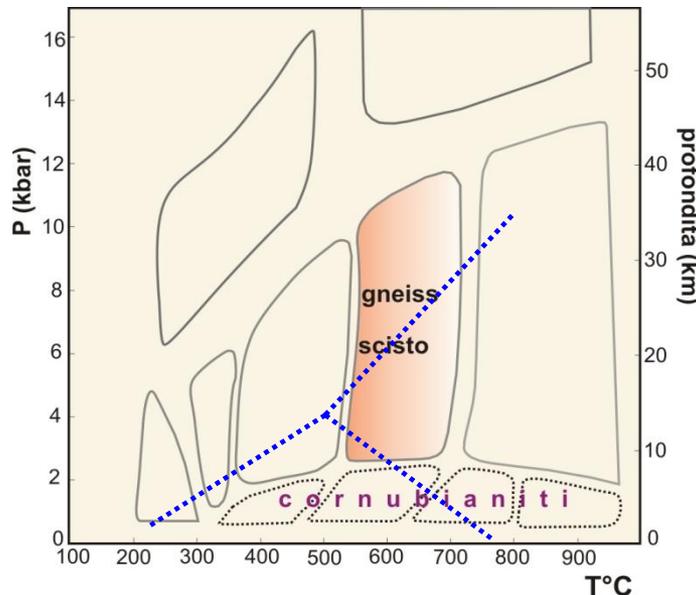
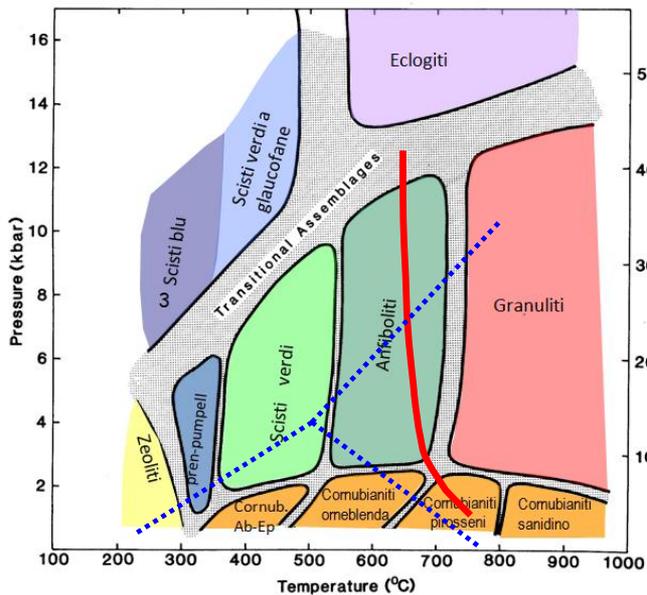
Scisto a staurolite, muscovite, biotite e granato (quest'ultimo non visibile nella foto) – il colore giallo oro e il marcato pleocroismo è un carattere diagnostico della staurolite



Protolito : roccia pelitica (argillite)
MEDIO Grado metamorfico → Scisti a cianite±staurolite±granato
F. ANFIBOLITICA di medio-alta P

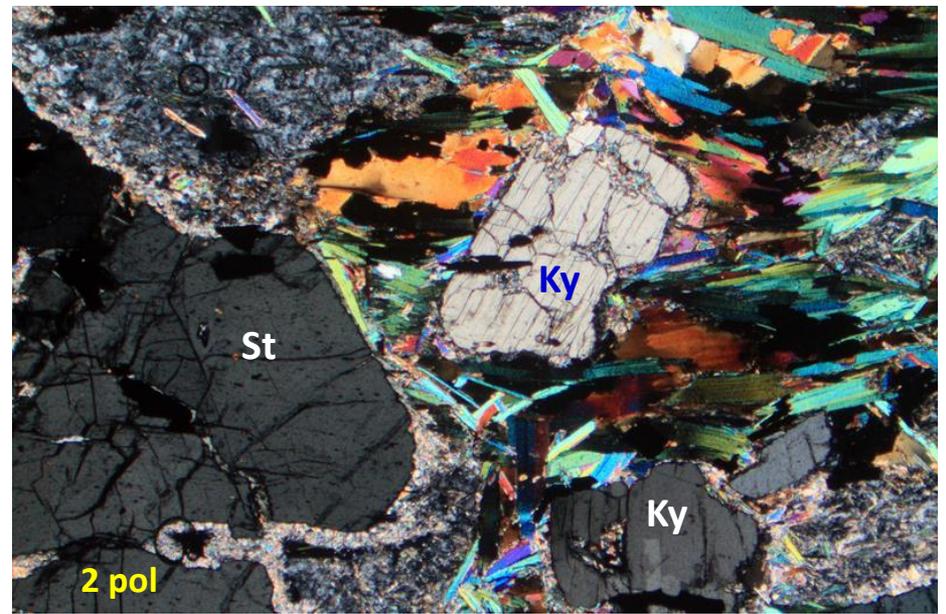
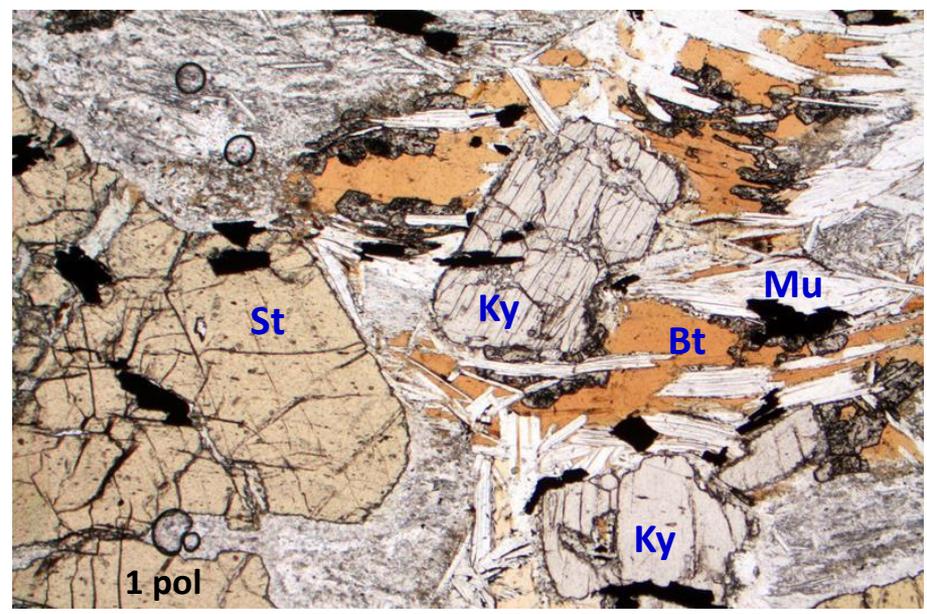


Scisti a cianite+granato+staurolite+muscovite (1); a cianite+staurolite (2) e particolare di cristalli di cianite (3) – Nota il colore azzurrognolo della cianite macroscopica

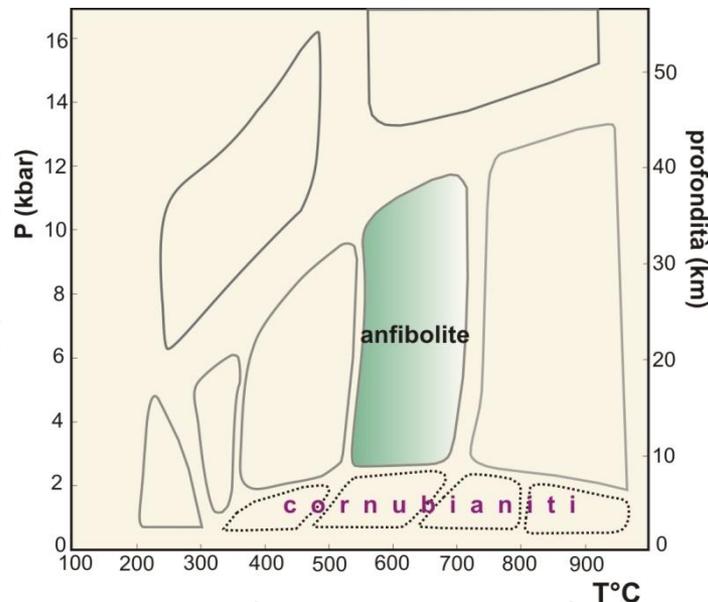
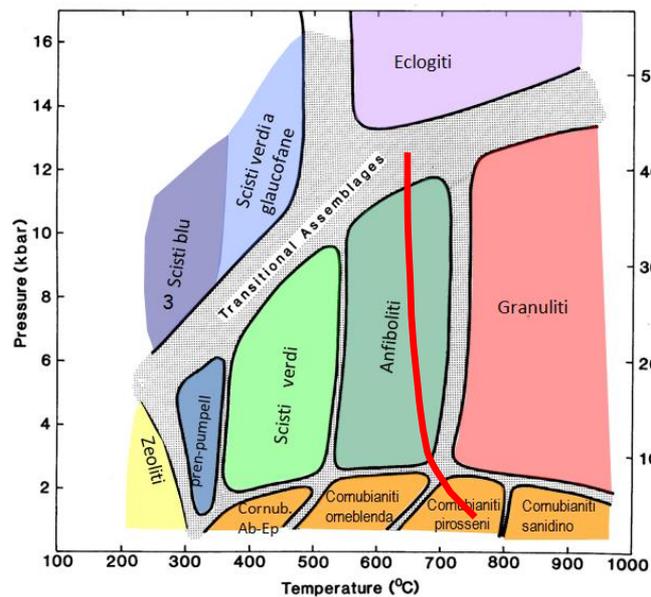


MEDIO Grado metamorfico → Scisti a cianite ± staurolite ± granato

F. ANFIBOLITICA di medio-alta P



Scisto a staurolite (st) + cianite (Ky) + biotite (Bt) + muscovite (Mu) (granato non in foto) – ampiezza foto 4 mm



basalto



gabbro

protoliti



Protolito : roccia magmatica basica (basalto/gabbro, diorite/andesite)

MEDIO Grado metamorfico → Anfiboliti – F. ANFIBOLITICA



1

Anfibolite con e senza granato:
1 e 2, rispettivamente.
(lunghezza campioni 9cm)

Anfibolo verde di tipo
orneblenda, plagioclasio di
tipo oligoclasio ± quarzo



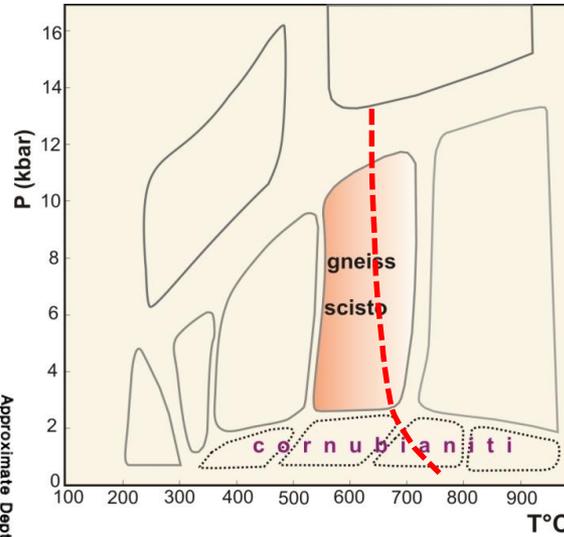
2



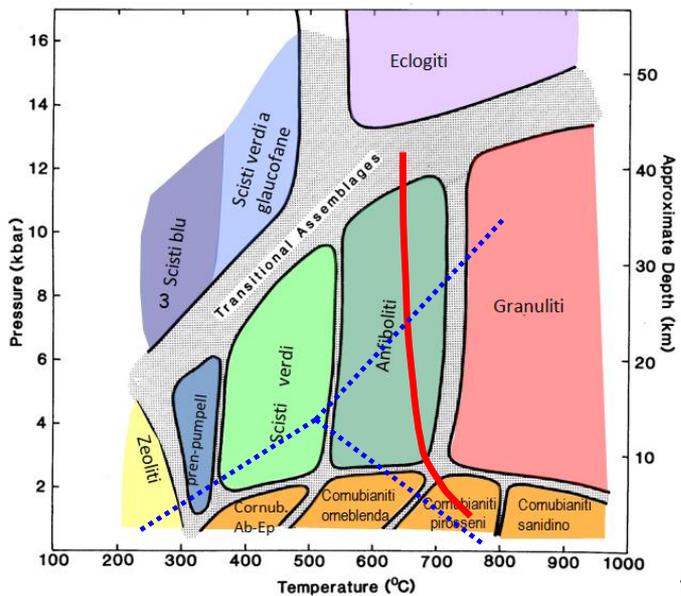
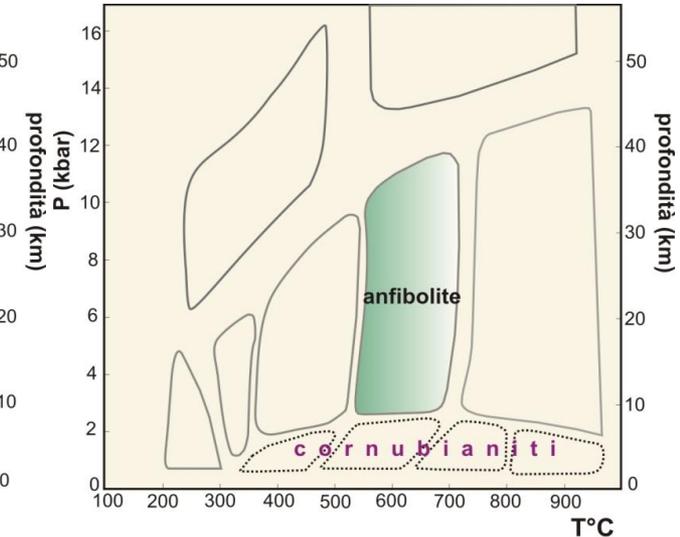
Anfibolite al microscopio– ampiezza della foto 2 mm

Facies ANFIBOLITICA di MEDIO GRADO

protolito pelitico

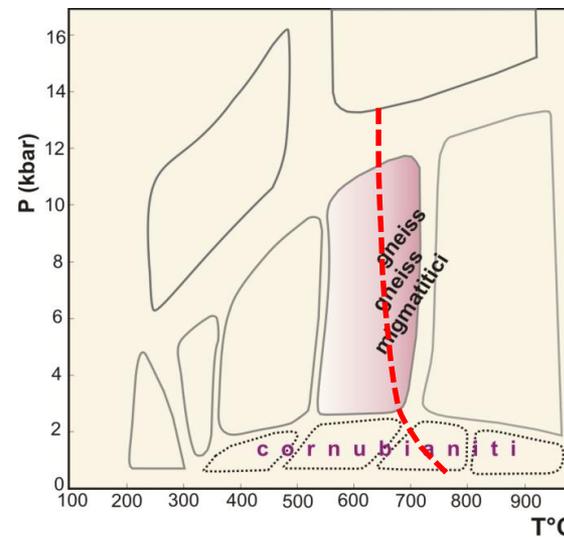


protolito basico

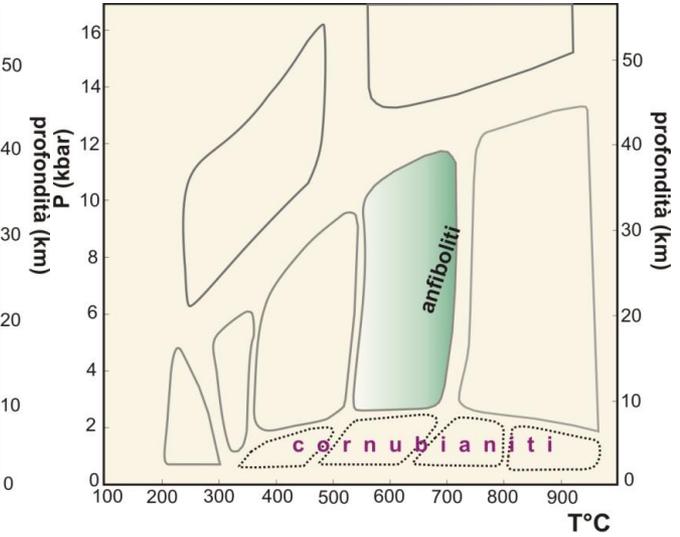


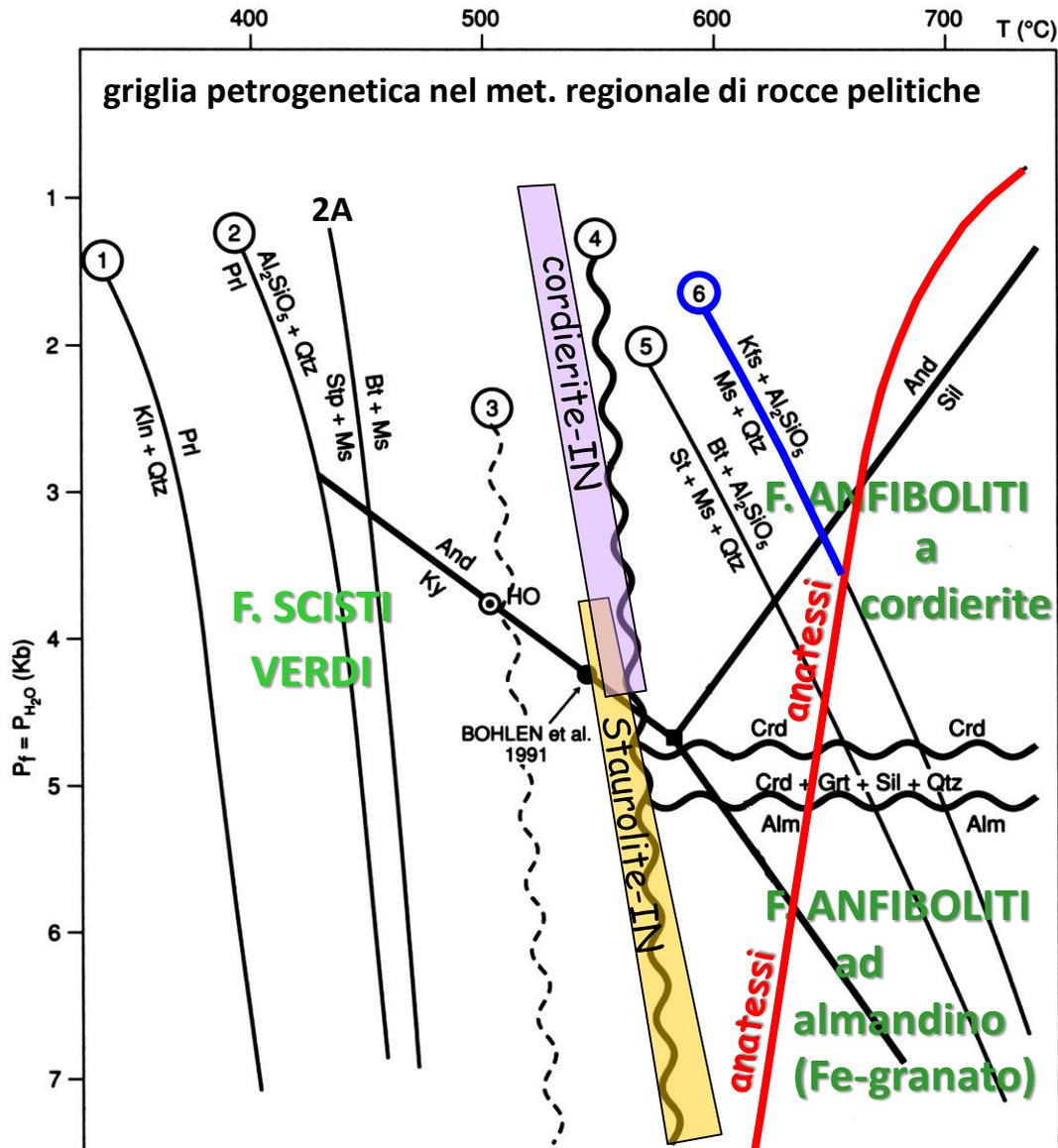
Facies ANFIBOLITICA di ALTO GRADO

protolito pelitico



protolito basico





1) scomparsa dei minerali argillosi
(es: kaolinite + qz = pirofillite + H₂O)
INIZIO FACIES SCISTI VERDI (basso grado met.)

2) comparsa di Al₂SiO₅ (Andalusite o Cianite in funzione di P)

2A) comparsa della BIOTITE

3) comparsa del GRANATO almandino
(=Fe- granato, Fe₃Al₂Si₃O₁₂) alla più alte T della facies SCISTI VERDI

4) **PASSAGGIO F. SCISTI VERDI – F. ANFIBOLITICA**
(da basso a medio grado metamorfico):

in protoliti pelitici

- comparsa di CORDIERITE (<P) f. anfiboliti a cord.
- comparsa STAUROLITE (>P) f. anfiboliti a granato

in protoliti basici

- comparsa del PLAGIOCLASIO (oligoclasio) e scomparsa di ALBITE + EPIDOTO (zoisite)
- comparsa di ORNEBLANDA e scomparsa di ACTINOLITE + CLORITI

5) scomparsa di staurolite (1 delle possibili reazioni)

INIZIO facies ANFIBOLITICA di ALTO grado met.
(passaggio da medio a alto grado) mediante:

6) scomparsa di MUSCOVITE e comparsa di K-feldspato + Al₂SiO₅ per P < 3.5 kbar

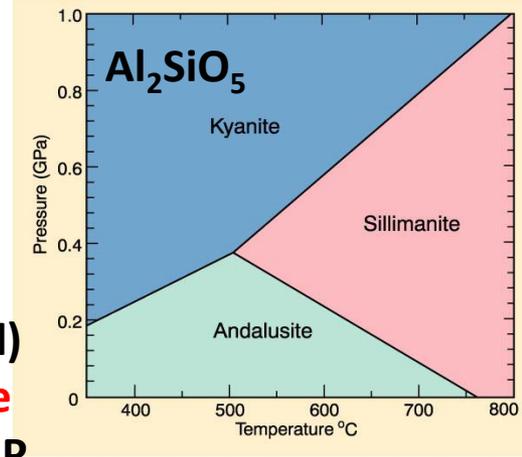
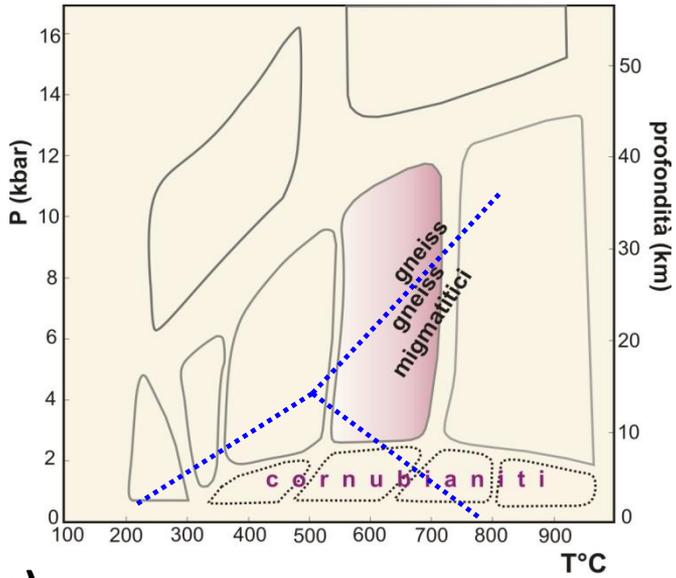
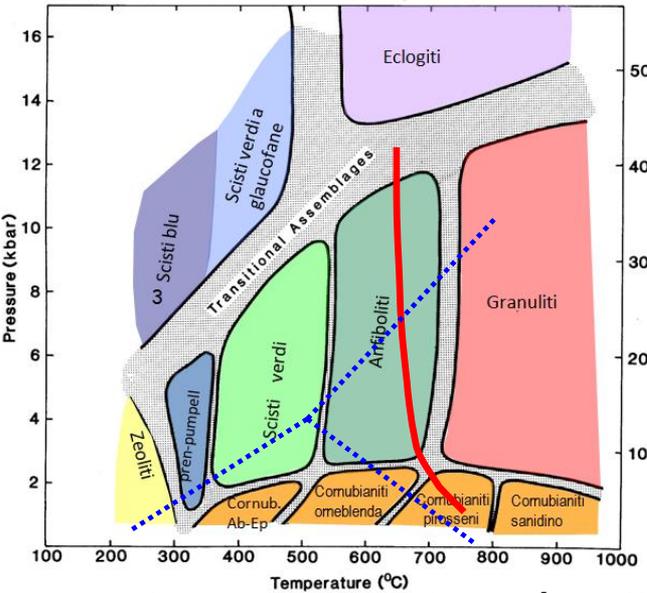
7) ANATESSI (fusione parziale)

per P > 3.5 kbar e P_{tot} = P_{H2O}

Punto triplo Al₂SiO₅: ■ = Greenwood (1976);

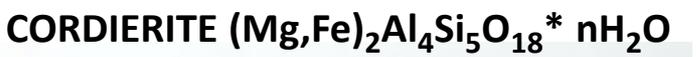
● = Bohlen et al (1991) ≈ Pattison (1992); HO = Holdaway (1971)

La posizione del campo ondulato è valida per cordierite con Mg/Fe=0.5
e si sposta in f.ne del Mg/Fe della cordierite (> Mg > P stabilità della cordierite)



Protolito : roccia pelitica (argillite)

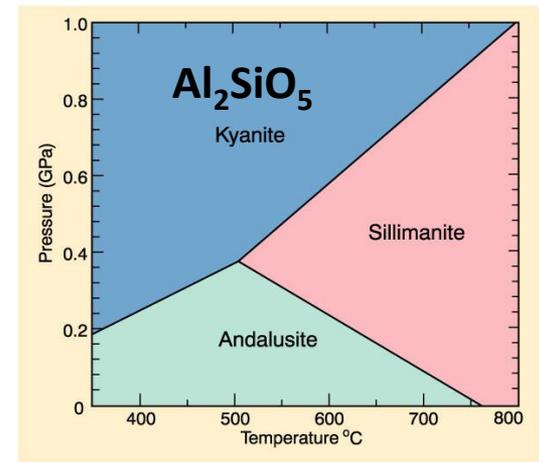
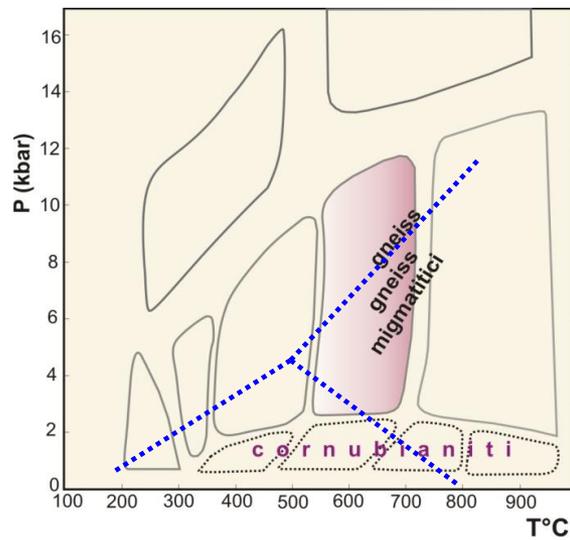
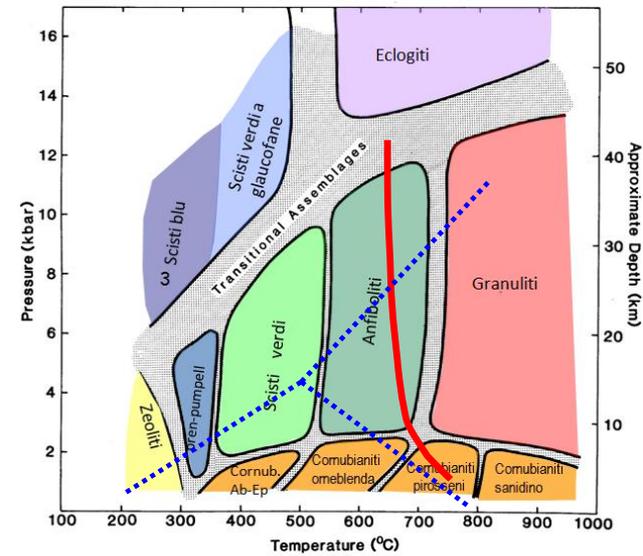
ALTO Grado metam. → scisti/gneiss a cordierite ±Al₂SiO₅ (and/sill) +biotite ± granato **NO muscovite**
F. ANFIBOLITICA di bassa/media P



Scisto di alto grado a porfiroblasti di cordierite e biotite

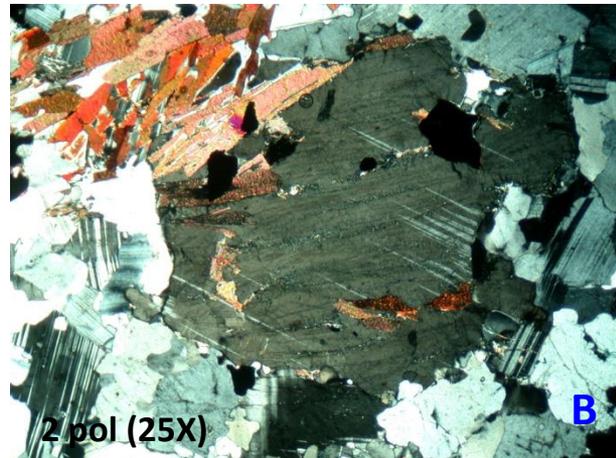
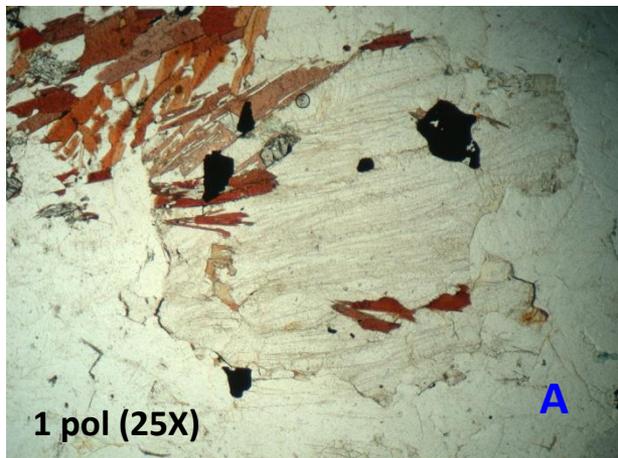
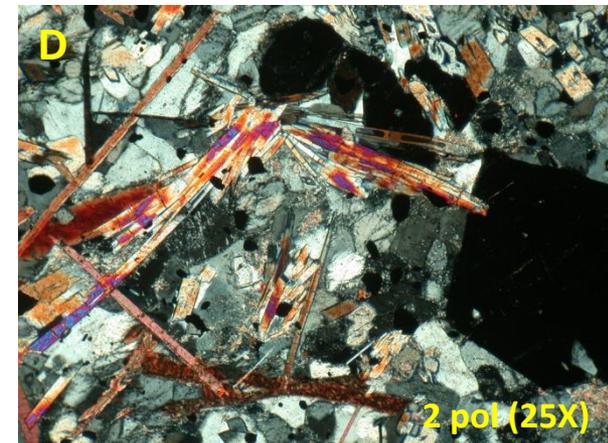
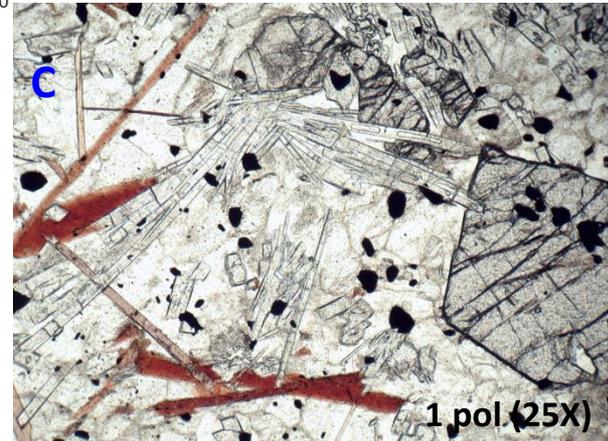
La CORDIERITE è minerale indice del medio grado ma il suo campo di stabilità si amplia nell'alto grado, per T>600°C e P variabili in funzione della sua composizione (rapporto Fe/Mg)





CORDIERITE $(Mg,Fe)_2Al_4Si_5O_{18} \cdot nH_2O$:

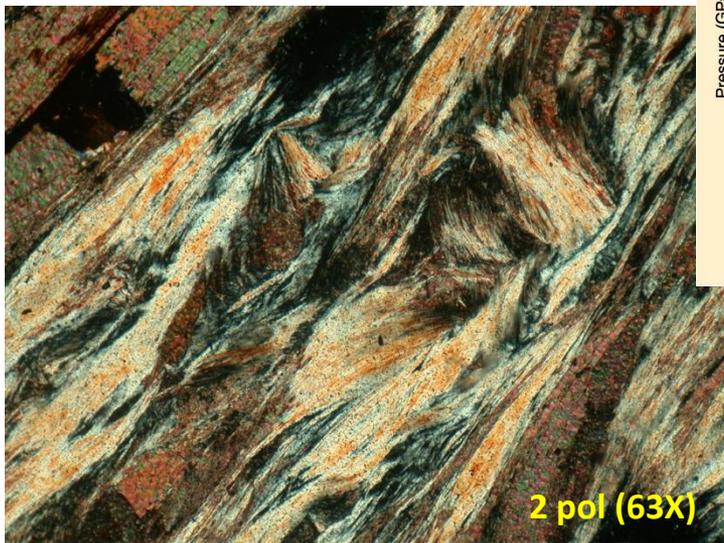
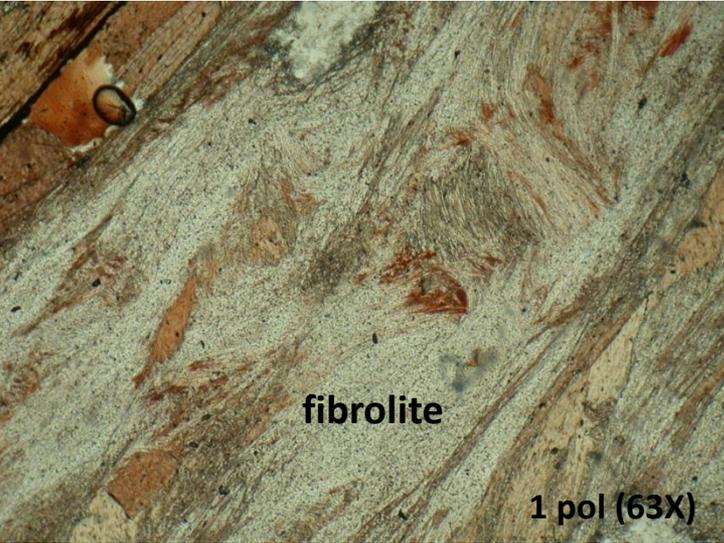
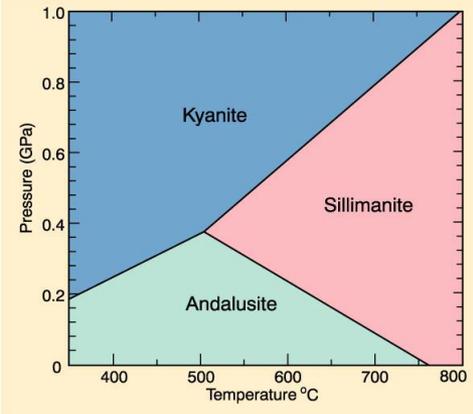
Esempi di alto grado-facies anfibolitica dove la cordierite è associata a sillimanite agiforme detta FIBROLITE – NO muscovite !! solo biotite !!



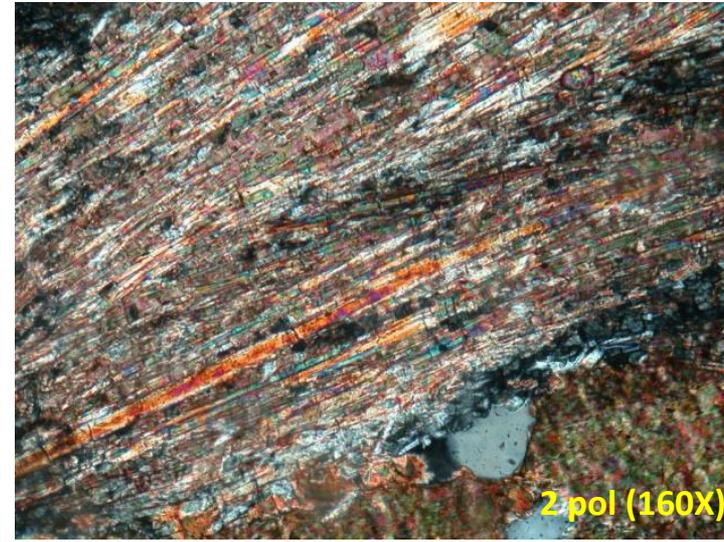
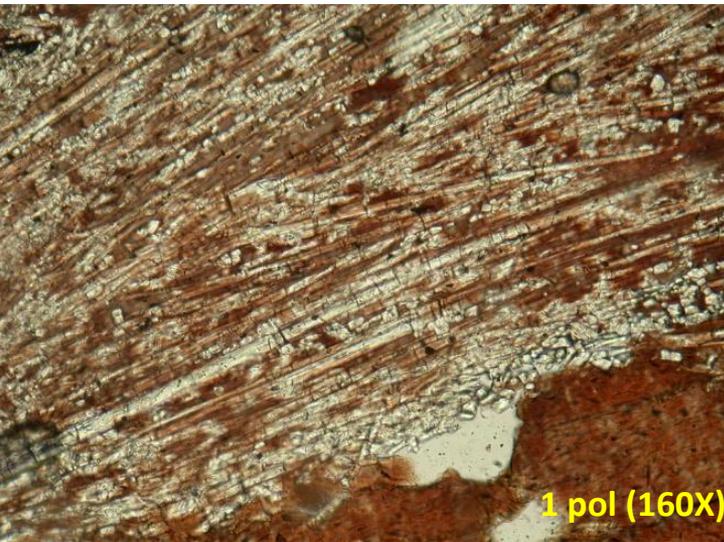
A-B : Gneiss in facies anfibolitica di alto grado a pofiroblasti di cordierite + granato + sillimanite (non in foto) + solo biotite; nota le tipiche geminazioni polisintetiche della cordierite

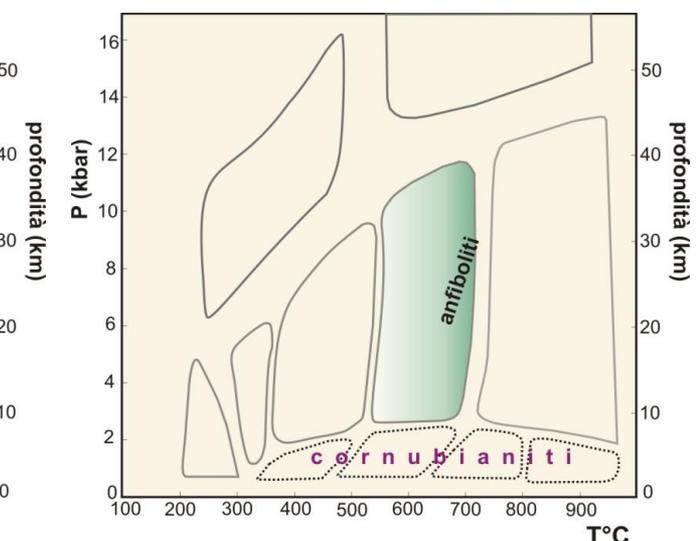
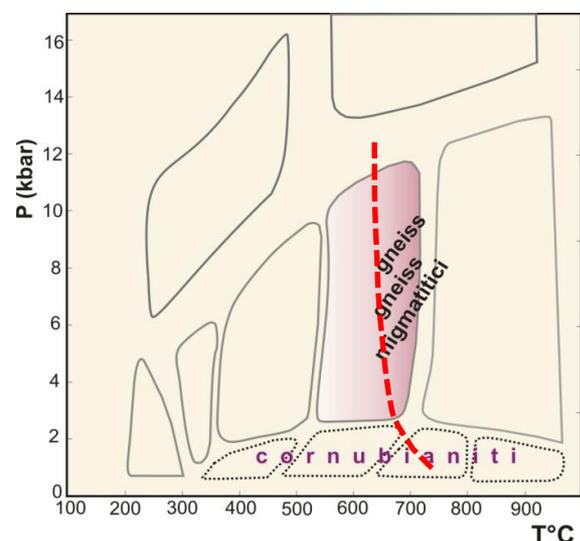
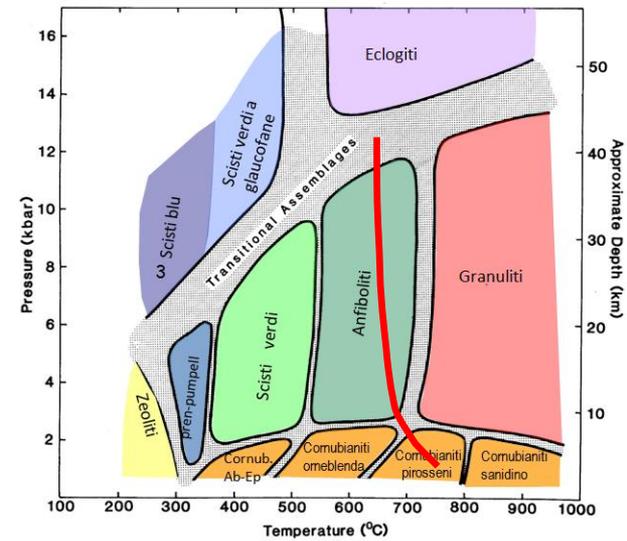
C-D : Gneiss in facies anfibolitica di alto grado a granato+sillimanite (in aghi; FIBROLITE) + solo biotite + cordierite in minuti blasti

Facies anfibolitica di alto grado : sillimanite tipo fibrolite



Esempi sillimanite fibrolitica in intercrescita con biotite in gneiss/scisti di alto grado



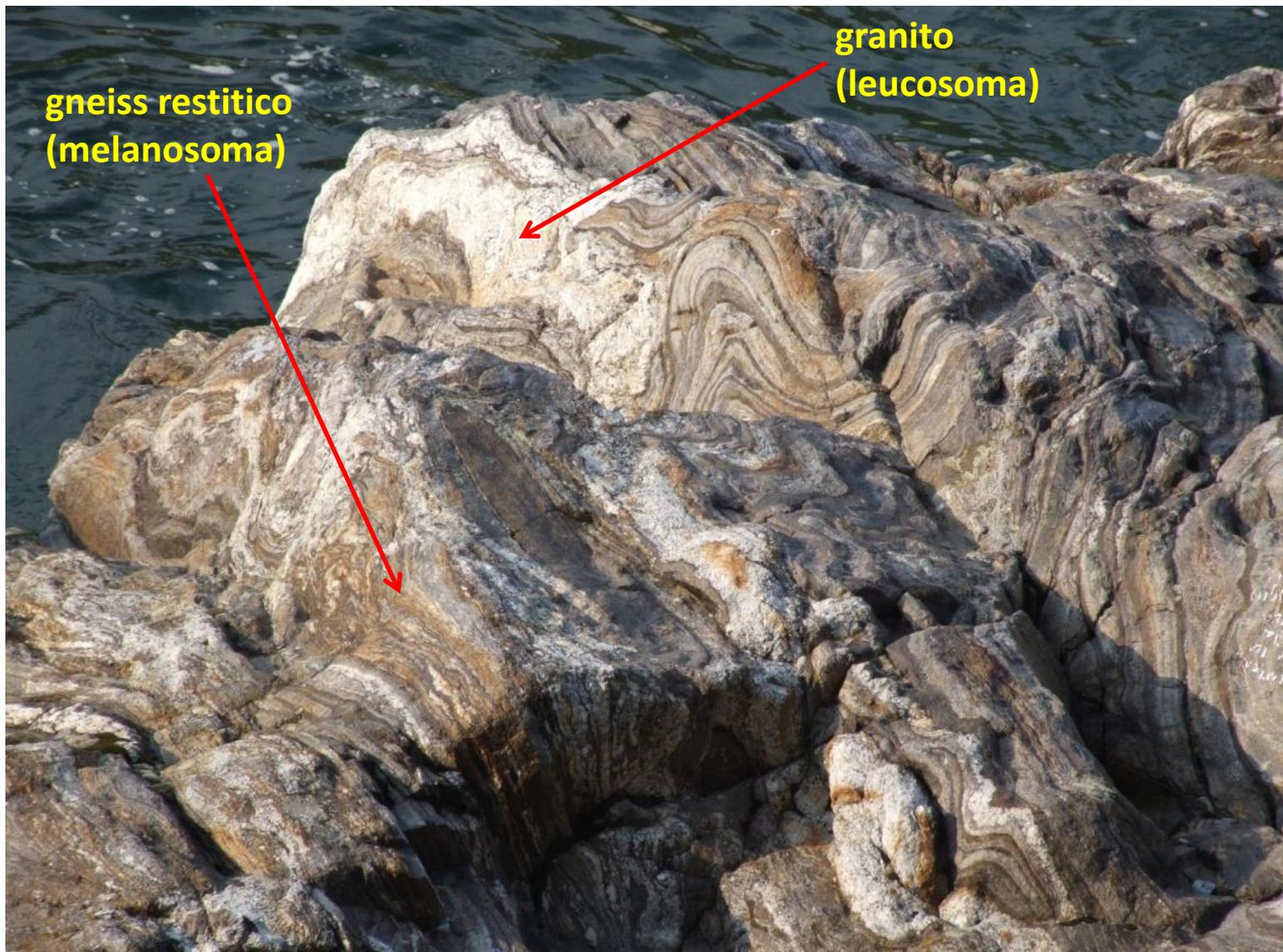


ALTO GRADO METAMORFICO – LIMITE SUPERIORE DEL METAMORFISMO MIGMATITI

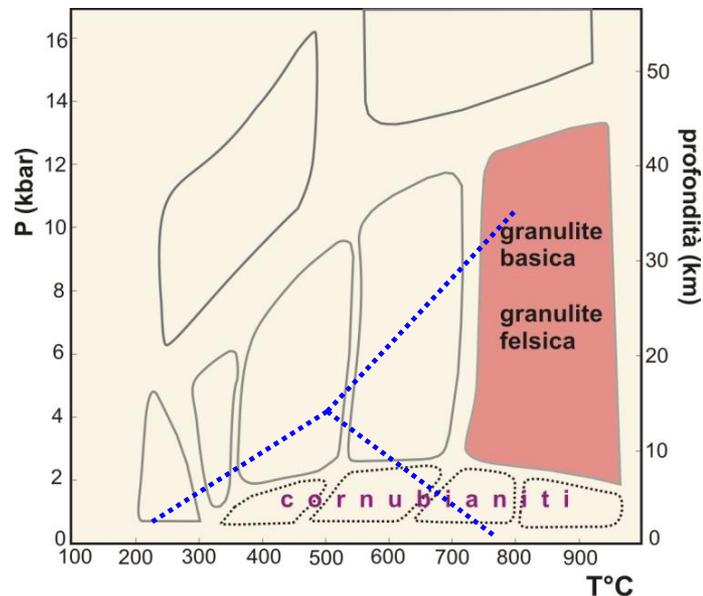
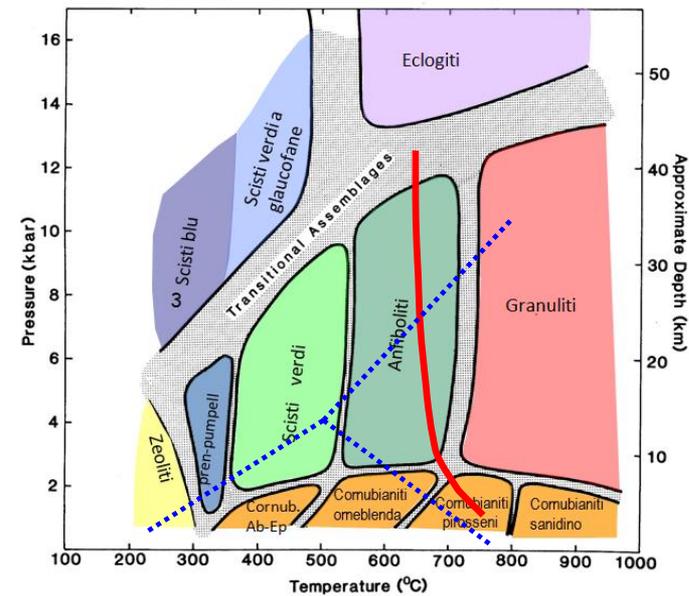


I terreni metamorfici di alto grado sono caratterizzati dalla presenza di **MIGMATITI** (da "migma" = **mescolanza**), rocce eterogenee prodotte dal processo di anatessi, costituite da :

- # domini chiari **LEUCOSOMA** che rappresenta il fuso granitico generato dalla fusione parziale
- # domini scuri **MELANOSOMA** che rappresenta il solido residuo (**RESTITE**) della fusione. Sono gneiss ricchi di biotite, granato+sillimanite+ Ca-plagioclasio + quarzo ± cordierite



MIGMATITE (Crevola, Varallo Sesia) al contatto tra la parte superiore del Complesso Basico Ivrea-Verbano e l'incassante metamorfico (Formazione Kinzigitica)



**QUALSIASI
PROTOLITO**

FACIES GRANULITICA

derivazione : da qualunque protolito silicatico sottoposto a condizioni di :

- 1) assenza/estrema scarsità di H₂O-fluidi : $P_{H_2O} = 0$ o $P_{H_2O} \ll P_{tot}$
- 2) $T > 700-750^{\circ}C$, che provoca la scomparsa di minerali idrati e la comparsa di quelli anidri tra cui (diagnostici) i pirosseni
- 3) Ampio intervallo di P

caratteri strutturali-tessiturali : molto vari, foliazione da assente ad accentuata (quindi rocce da massive ad orientate), strutture da granoblastiche a milonitiche, grana variabile

caratteri mineralogici: ASSENZA di MICHE, assenza/scarsità di anfiboli, abbondanza di granati, presenza di PIROSSENI, SILLIMANITE PRISMATICA (raramente cianite), plagioclasio antipertitico, K-feldspato pertitico spesso mesopertito, quarzo ricco di rutilo (TiO₂) aghiforme; minerale accessorio rutilo

le granuliti si producono per :

- **polimetamorfismo** : più eventi metamorfici, separati nel tempo, di grado progressivamente crescente con reazioni che portano alla completa disidratazione della roccia (scomparsa dei minerali idrati)
- **spinta anatessi** con produzione di >50% di fuso granitico (spinta degranitizzazione della crosta continentale)

terreni granulitici : dove ed età

- sono le rocce metamorfiche dominanti della crosta continentale profonda (>30km)
- costituiscono i basamenti cristallini polimetamorfici antichi
- non si conoscono granuliti in aree metamorfiche di età alpina (età < 100Ma circa), compaiono nei terreni Ercinici (350-250Ma) e sono molto diffuse nei terreni precambrici (>540Ma).

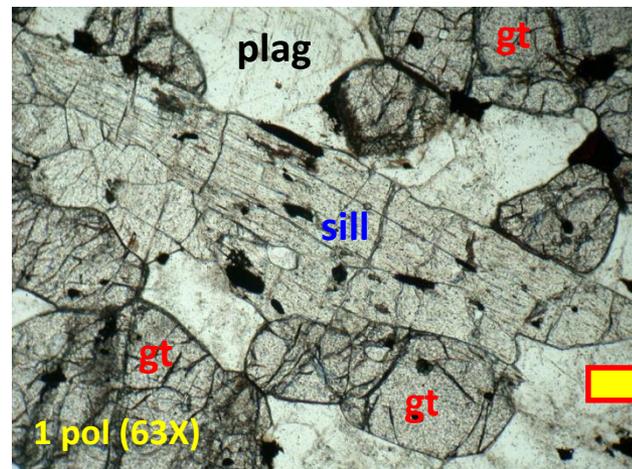
In Italia: in Piemonte (zona Ivrea-Verbano) ed in Calabria centro-settentrionale

granuliti : contesti tettonici

- ispessimento crostale (catene collisionali)
- underplating di magmi basici (contesti estensionali)

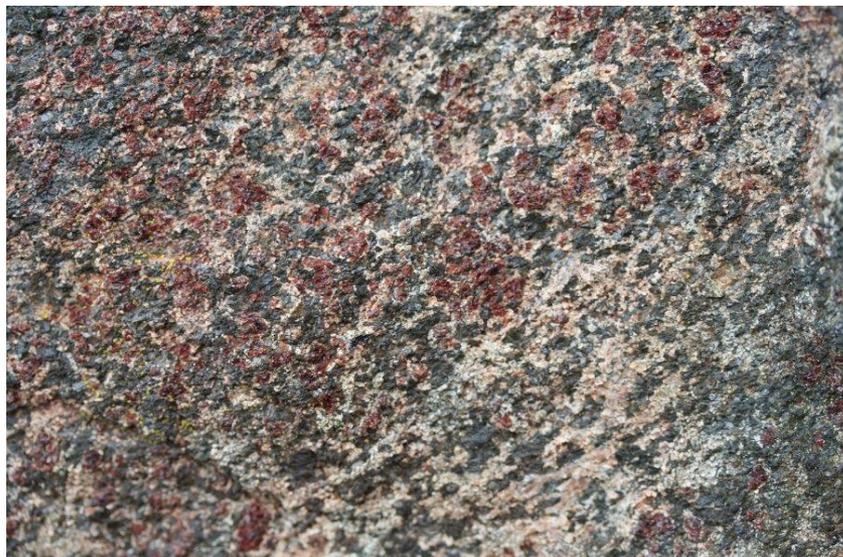
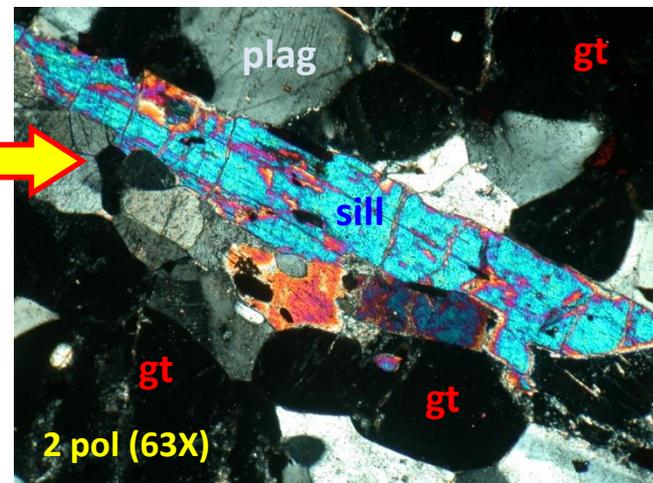


Lunghezza campione 12cm

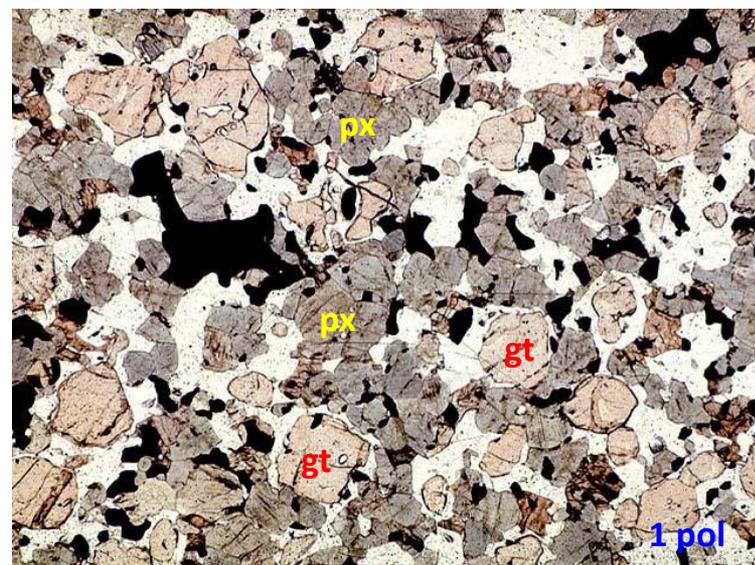


Granulite acida da metapelite
(granato, \pm cordierite, sillimanite,
quarzo, K-feldspato, plagioclasio,
biotite assente o in tracce)

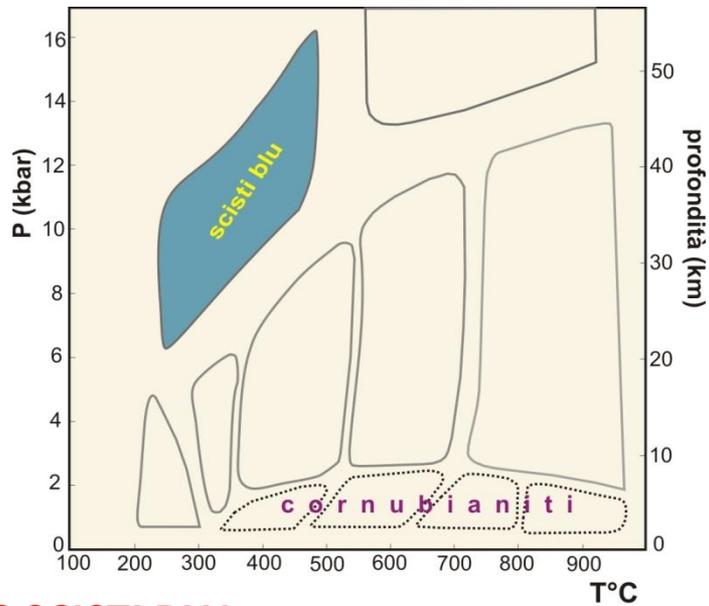
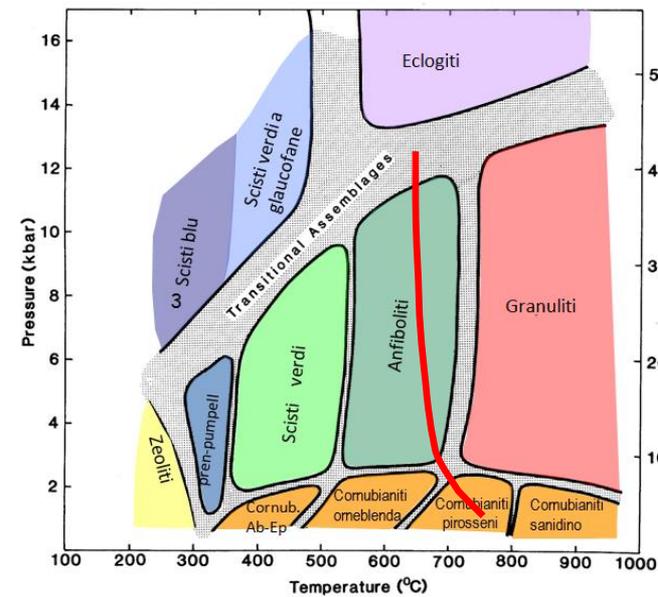
Granulite da protolito pelitico al
microscopio : granato, plagioclasio,
quarzo e SILLIMANITE PRISMATICA



Granulite da magmatite basica (granato, pirosseni,
plagioclasio) lunghezza foto 4cm



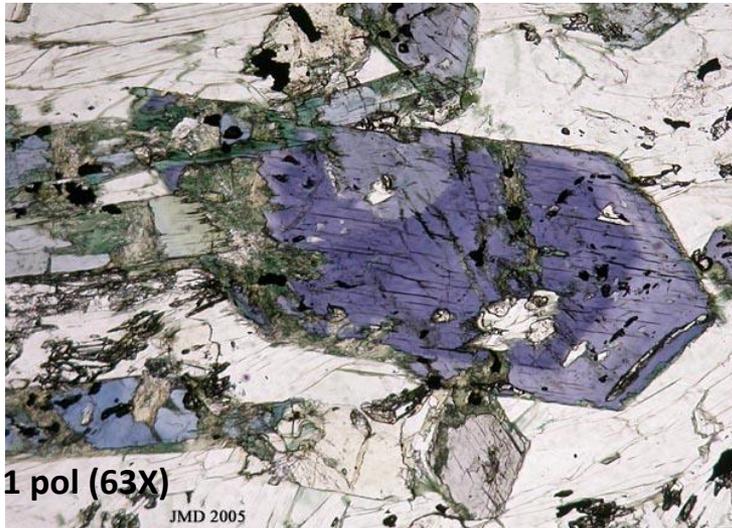
Granulite da magmatite basica al microscopio: granato (gt),
pirosseni (px), plagioclasio (bianco), ossidi; ampiezza foto 4mm



FACIES SCISTI BLU

derivazione : protoliti basici quali basalti e sedimenti derivati da questi, in condizioni di BASSO grado metamorfico e alta P.

diagnostica presenza di anfibolo GLAUCOFANE $\text{Na}_2(\text{Mg,Fe})_3(\text{Al,Fe})_2\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$

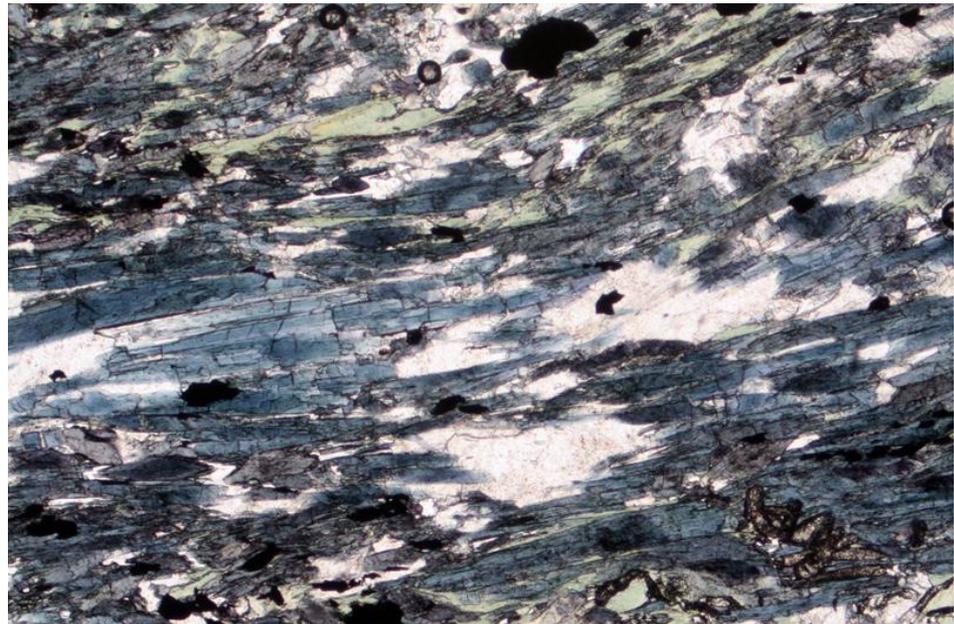


Minerali associati: granato, epidoto, clorite, Napirosseno

metamorfismo di seppellimento , nella zona di fossa in corrispondenza della zona di subduzione

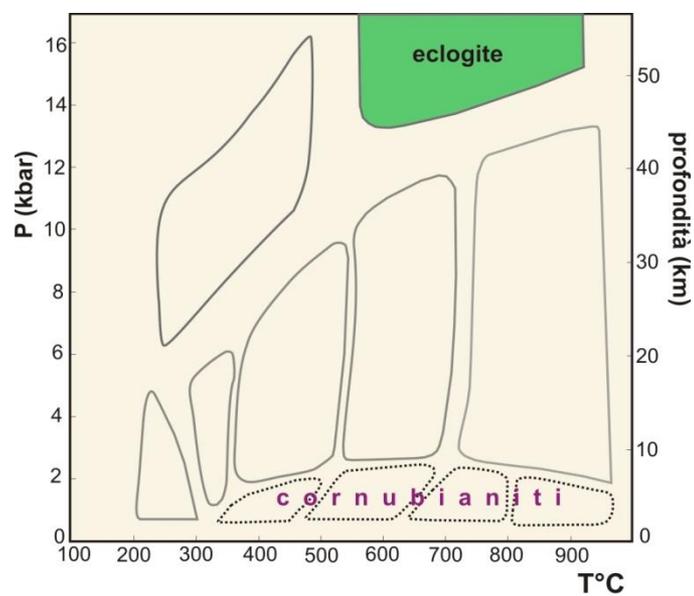
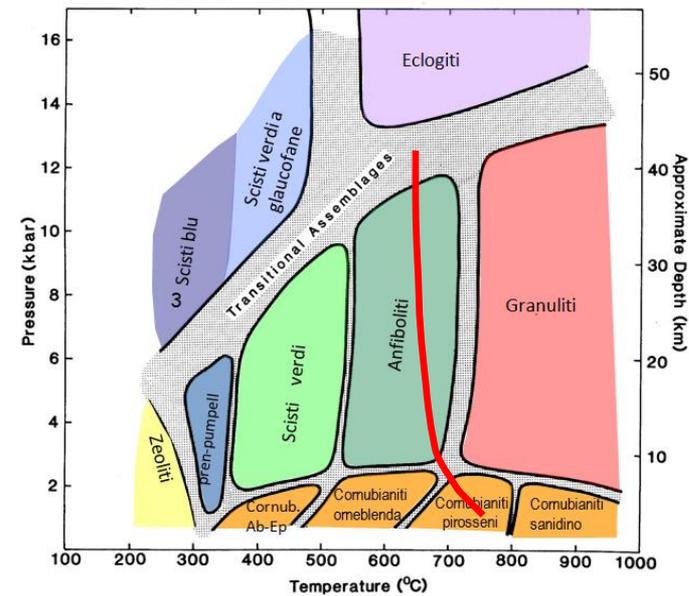


Scisto blu. Blu = glaucofane, rosso = granato, verde = epidoto



Glaucofane in scisto blu al microscopio (lato lungo foto = 7mm)





FACIES ECLOGITICA

derivazione : da protoliti basici (basalti/gabbri), in condizioni di

- 1) assenza/estrema scarsità di H₂O-fluidi : $P_{H_2O} = 0$ o $P_{H_2O} \ll P_{tot}$
- 2) alta/altissima P ($P > 12$ kbar)
- 3) ampio intervallo di T (da 500°C a 900°C)
- 4) diagnostica associazione mineralogica :

GRANATO + pirosseno OMFACITE $[Ca(Mg,Fe)Si_2O_6 * NaAlSi_2O_6]$ – **NO PLAGIOCLASIO !!**

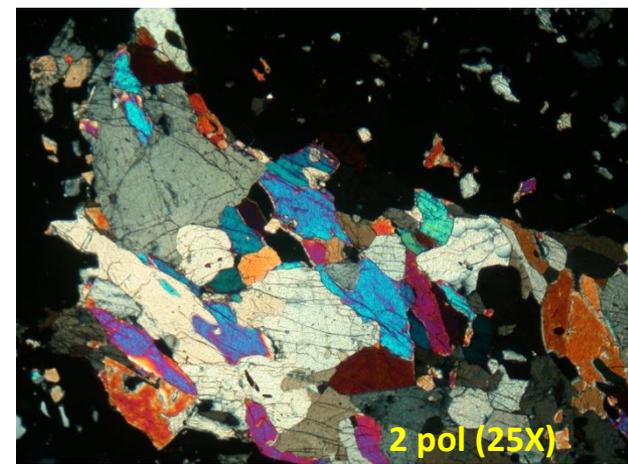
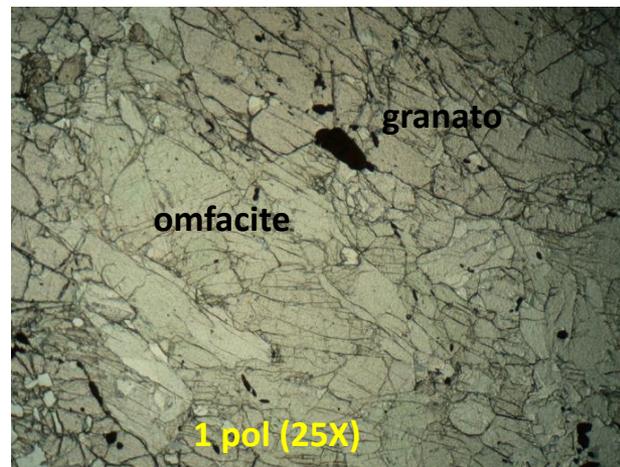
- 5) Altri minerali presenti in f.ne della T : anfibolo tipo glaucofane , cianite, epidoti, coesite

Le eclogiti non costituiscono mai terreni metamorfici a sviluppo regionale, MA:

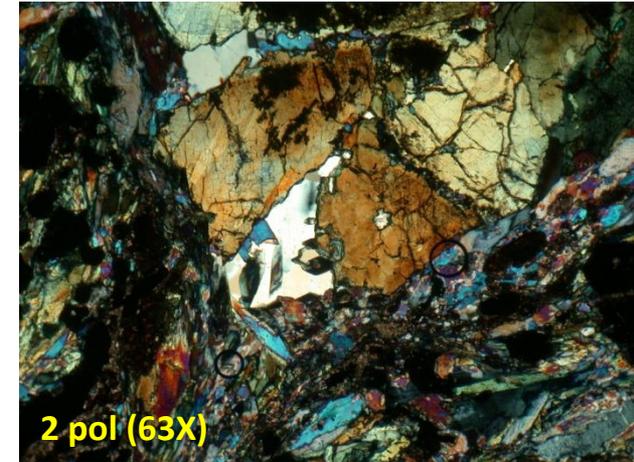
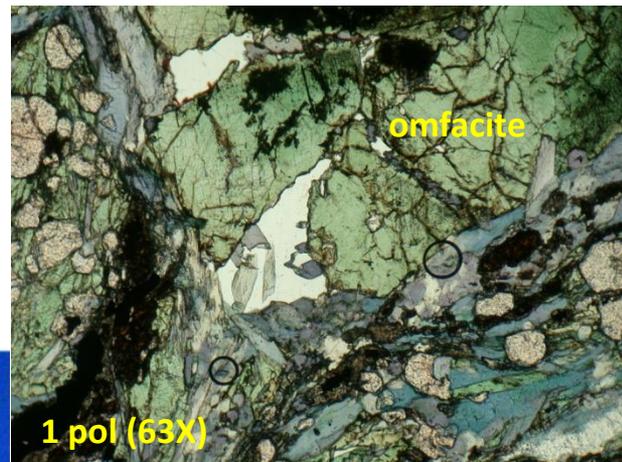
Xenoliti inclusi in peridotiti di mantello

Piccole masse, bande o lenti incluse in terreni di alto grado (anfiboliti,gneiss)

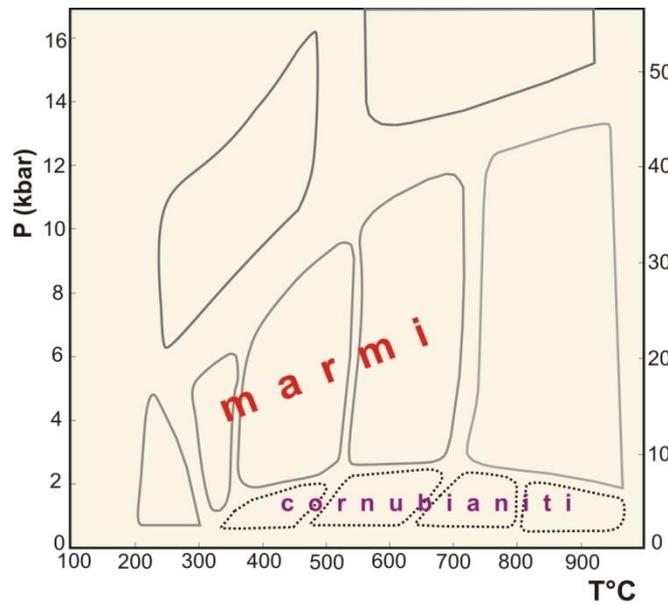
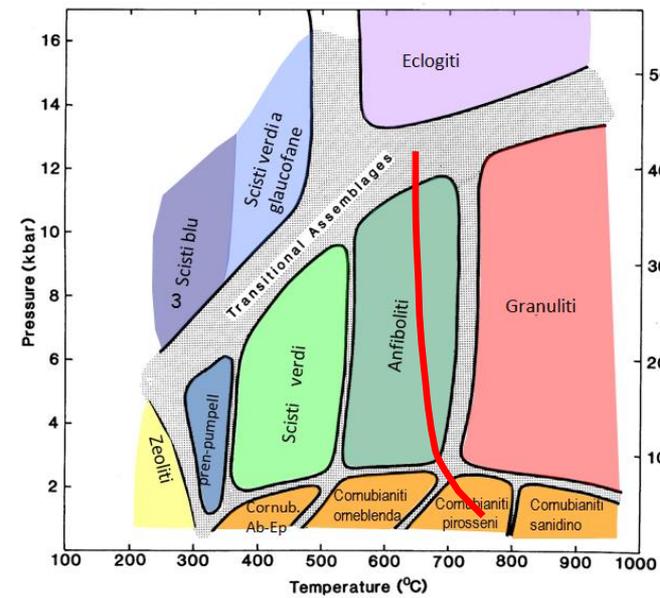
Bande o lenti associate a scisti blu (scisti a glaucofane)



Eclogite tipo 1 al microscopio: omfacite+granato + quarzo (non nella foto)



Eclogite tipo 2 al microscopio: omfacite (verde) +granato + glaucofane (azzurro) +quarzo. Il minerale opaco è rutilo (TiO_2)



Protolito : roccia carbonatica pura (calcare)

Grado metamorfico BASSO-MEDIO-ALTO → MARMO



Cava di marmo nelle Alpi Apuane



MARMO: da protoliti carbonatici puri; possono essere variamente venati e la natura delle impurezze determina il colore delle venature; calcite (CaCO_3 , >95%) \pm dolomite [$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$] \pm accessori quali fillosilicati (cloriti, miche), grafite, quarzo etc..All'aumentare del grado metamorfico aumenta la grana e cambiano i minerali silicatici accessori.

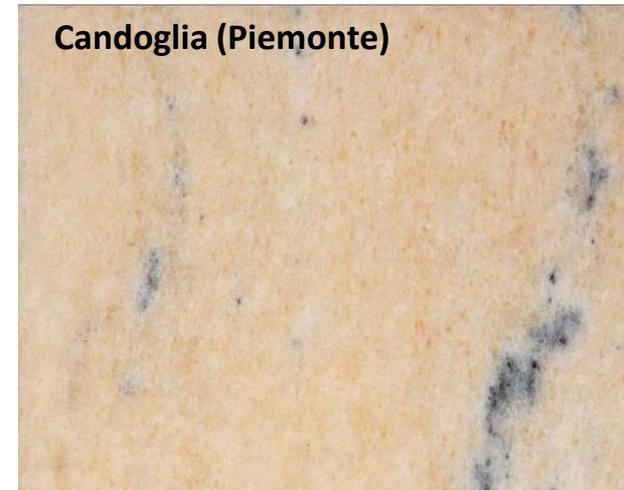
Statuario Venato-Carrara



Bardiglio-Carrara

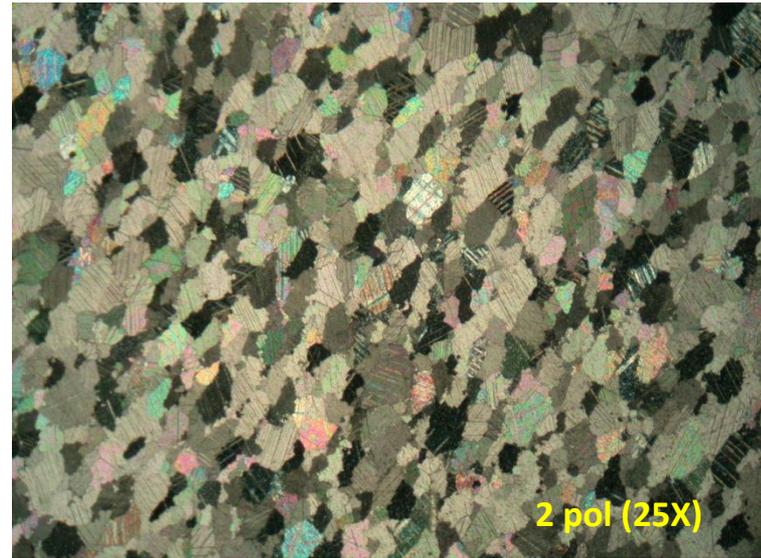


Candoglia (Piemonte)

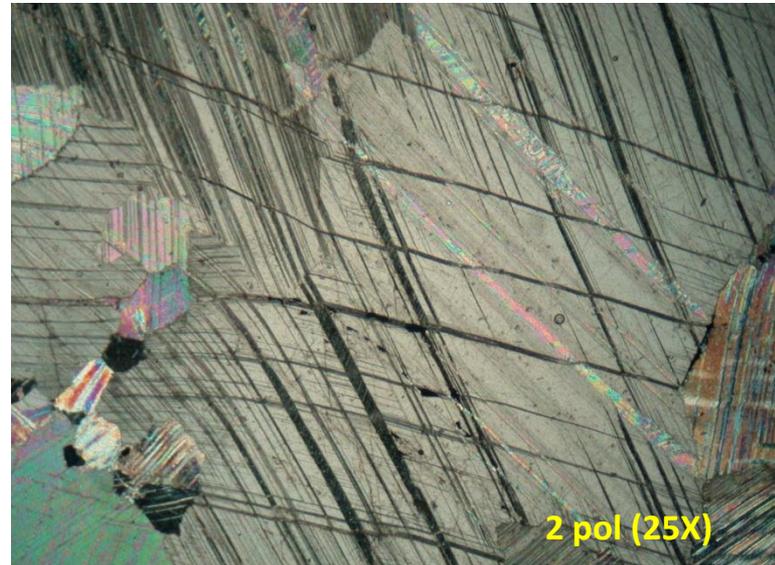


Basso grado – facies scisti verdi
Marmi delle Alpi Apuane

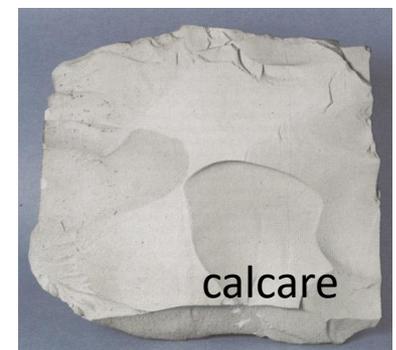
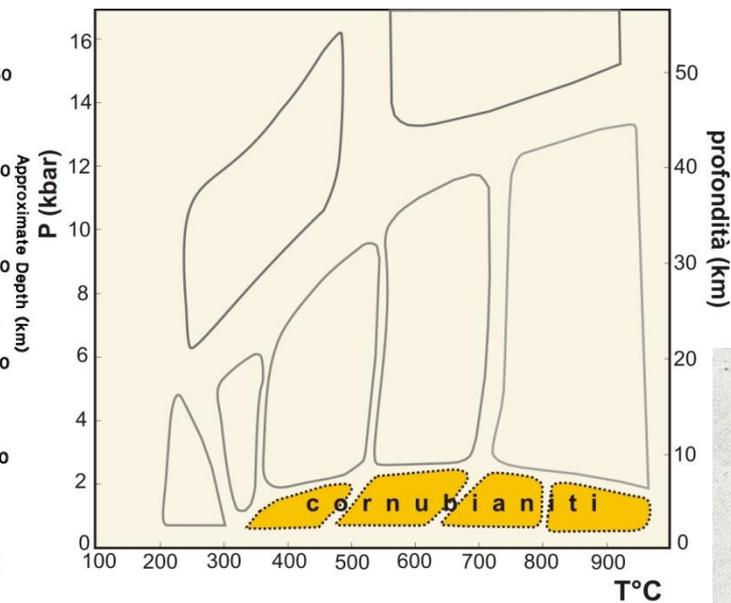
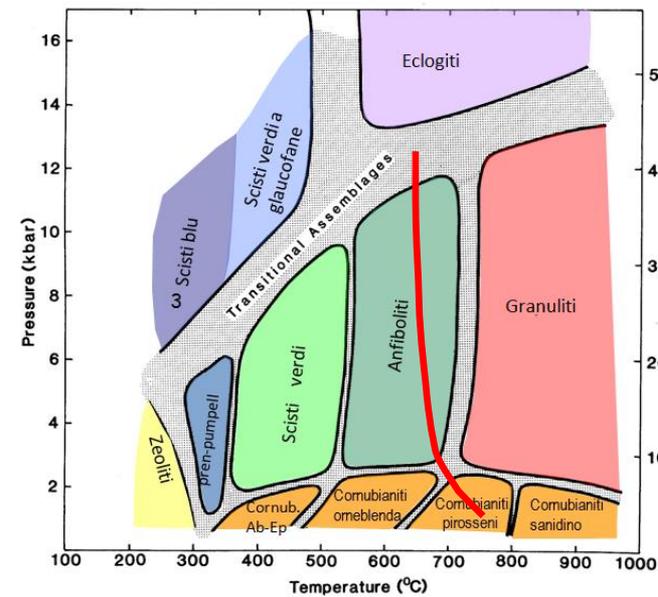
facies anfibolitica di alto grado
Marmo della Val d'Ossola



Marmo a grana minuta orientato (basso grado met) – nota gli altissimi colori di'interferenza della calcite



Marmo a grana grossa (medio-alto grado metamorfico) – nota la geminazioni polisintetiche della calcite



TERMO-METAMORFISMO : FACIES delle CORNUBIANITI

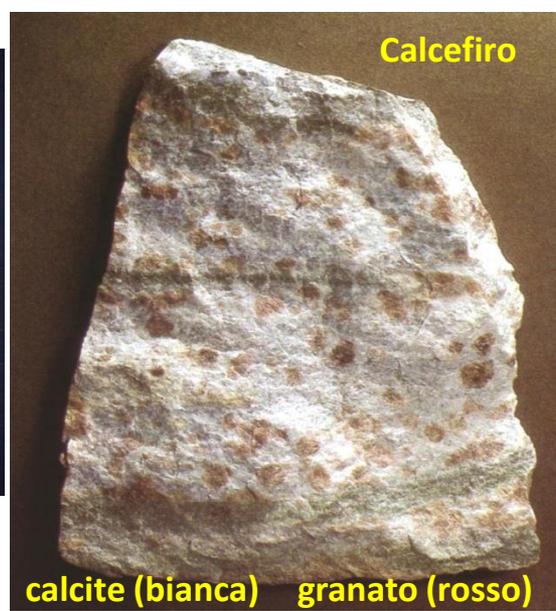
- # protolito : roccia sedimentaria carbonatica pura (calcare/dolomia)
- # protolito : roccia sedimentaria carbonatica impura
- # protolito : roccia sedimentaria pelitico/arenacea

- MARMO
- CALCEFIRO
- CORNUBIANITE

In Italia : nelle aureole metamorfiche attorno ai plutoni granitici-tonalitici delle Alpi (Adamello, Predazzo-Monzoni, Cima d'Asta, Bressanone, etc.); Mte Capanne (Isola d'Elba); attorno ai plutoni calabresi e sardi.



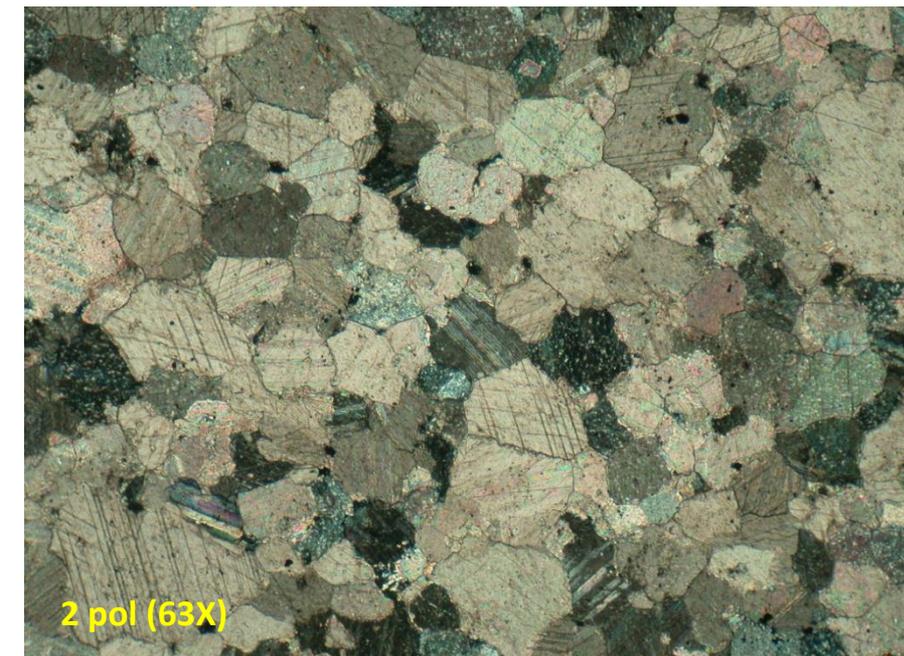
Marmo (calcite)



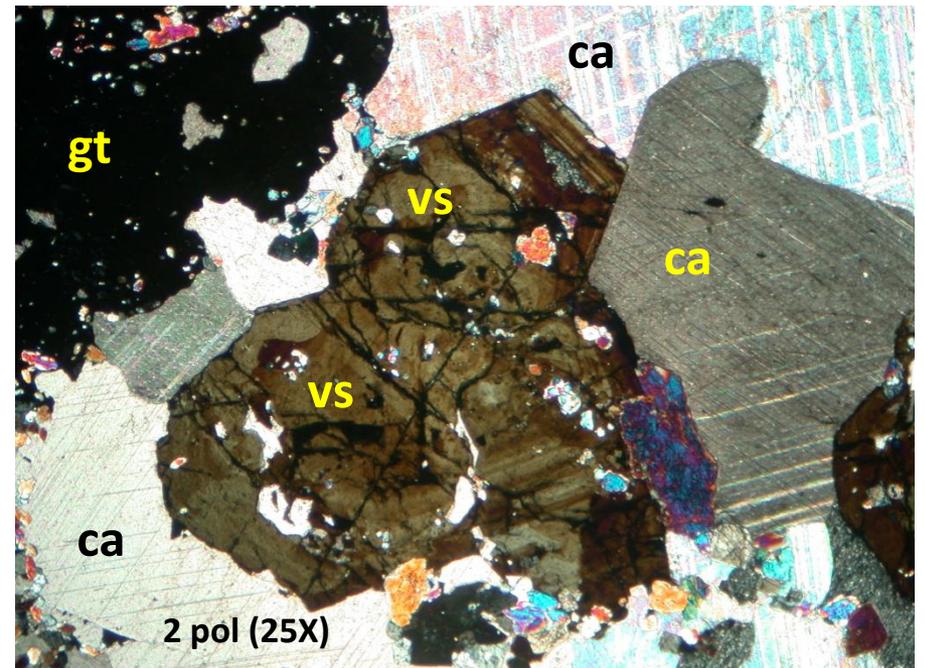
calcite (bianca) granato (rosso)



calcite (grigia), granato (rosso), vesuviana (giallo-verde)-campione lungo 6cm



Marmo a grana minuta (solo calcite) con tessitura a tendenza poligonale



Calcefiro a calcite (ca), granato(gt) e vesuviana (vs)

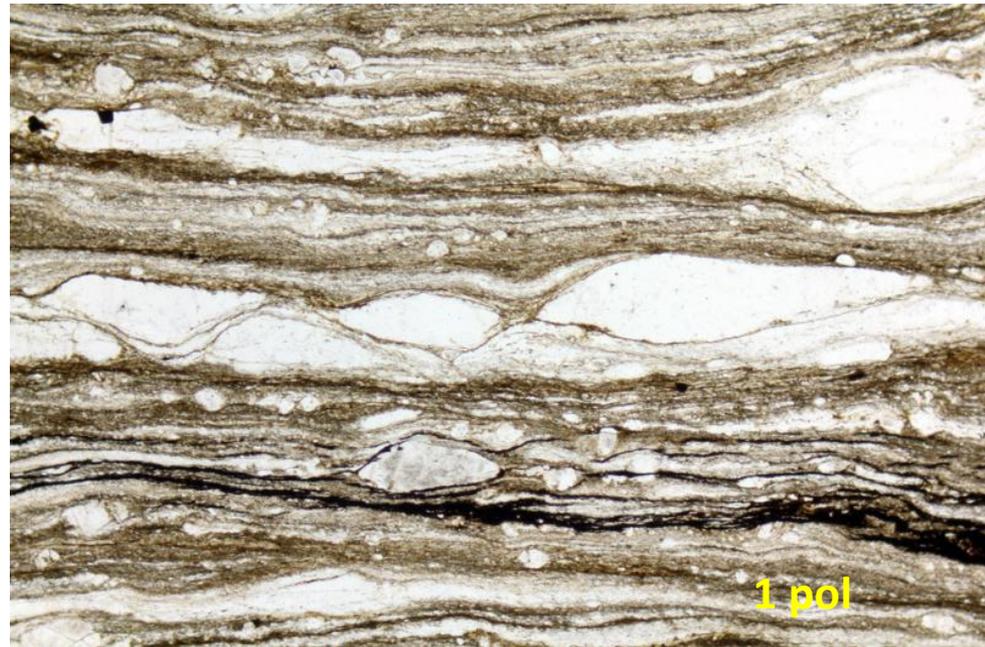
METAMORFISMO di CATACLASI (o di DISLOCAZIONE)

cataclasiti - miloniti

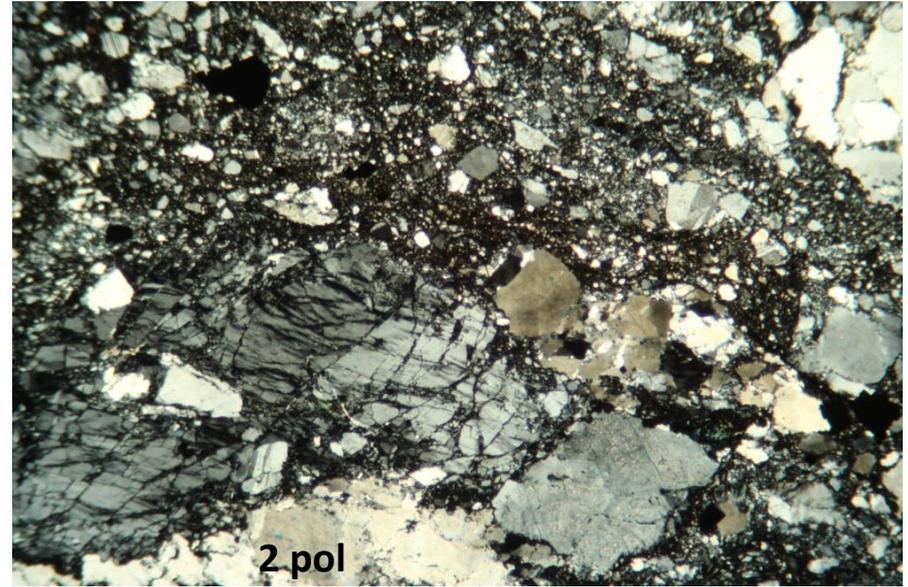
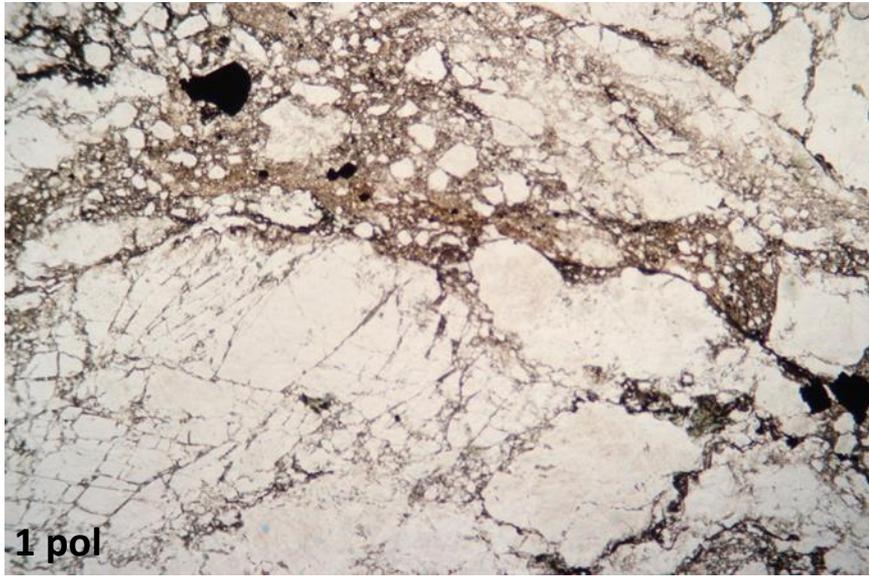


Milonite granitica

A dx: milonite granitica al microscopio.
Nota la microstuttura orientata, la matrice a
grana finissima e quarzo nastriforme.
lunghezza foto 2mm



cataclasite



milonite

