

Strutture vs. Tessiture

La natura frattale
della geologia

Diagram showing that structural and fabric elements are generally consistent in style and orientation at all scales. From Best (1982). *Igneous and Metamorphic Petrology*. W. H. Freeman. San Francisco.

STRUTTURE – TESSITURE DELLE ROCCE METAMORFICHE

DEFINIZIONI DI BASE

STRUTTURA = la disposizione delle parti di una roccia, che include:
le relazioni spaziali fra le parti
le loro dimensioni e relative forme
le caratteristiche interne delle parti

} macro-scala

TESSITURA = MICROSTRUTTURA = caratteri osservabili al microscopio

STRUTTURE

ISOTROPA



disposizione casuale, identica in tutte le direzioni,
degli elementi strutturali



struttura **GRANOFELSICA** (roccia **FELS**)
i granuli mineralogici hanno orientazione casuale

ANISOTROPA



orientazione preferenziale di elementi strutturali



PLANARI



LINEARI

ANISOTROPIE PLANARI

SUPERFICI DI DISCONTINUITA' PLANARE

FOLIAZIONE

LAYERING (o struttura a bande di composizione diversa)

CLIVAGGIO

SCISTOSITA'

STRUTTURA GNEISSICA

FOLIAZIONE: struttura planare penetrativa (= che si presenta in modo ripetitivo) in un corpo roccioso →

superfici S

CLIVAGGIO : tipo di foliazione determinata da superfici parallele spaziate a scala mm lungo le quali la roccia si spacca facilmente (**FISSILITA'**)

Piani dove NON si è ancora verificata una (ri)cristallizzazione orientata

Piani di dislocazione di preesistenti anisotropie planari.

Diversi tipi di clivaggio:

Clivaggio ardesiaco (slaty cleavage) : costituito dall'isorientazione di fillosilicati a grana finissima

Clivaggio di crenulazione : collegato allo sviluppo di micropieghe (= *crenulazioni*) che deformano una precedente struttura planare

Clivaggio di frattura: definito da un insieme di fratture finemente spaziate

ANISOTROPIE PLANARI

SUPERFICI DI DISCONTINUITA' PLANARE

FOLIAZIONE

LAYERING (o struttura a bande di composizione diversa)

CLIVAGGIO

SCISTOSITA'

STRUTTURA GNEISSICA

SCISTOSITA' : tipo di foliazione determinata dalla cristallizzazione di nuovi minerali lamellari fillosilicatici (o ricristallizzazione) secondo una direzione preferenziale.

→ formazione di superfici lungo le quali la roccia si divide a scala cm

GNEISSOSITA' (= **struttura gneissica**) : tipo di foliazione determinata dalla cristallizzazione di nuovi granuli con formazione di superfici scistose lungo le quali la roccia si divide a scala > cm

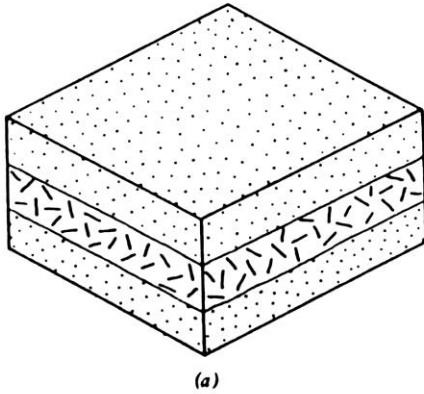
E' definita da :

- a) bande irregolari o mal definite
- b) occhi o aggregati lenticolari di granuli (struttura occhiadina)
- c) minerali fillosilicatici scarsi e/o debolmente orientati

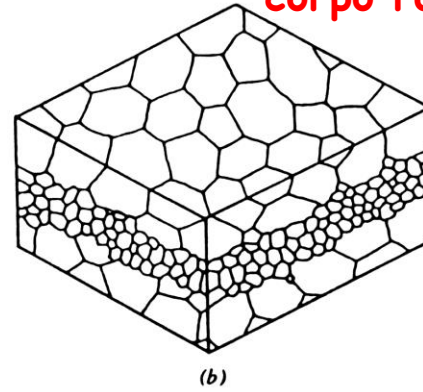
ANISOTROPIE PLANARI : FOLIAZIONE S

FOLIAZIONE = qualsiasi struttura planare penetrativa visibile in un corpo roccioso - detta S

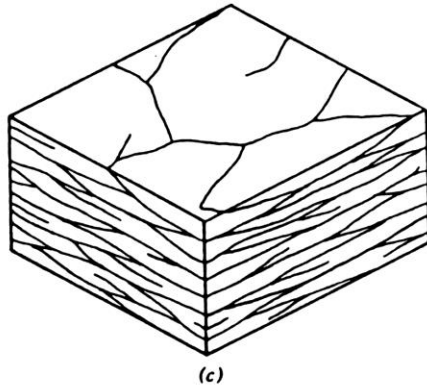
layering
composizionale



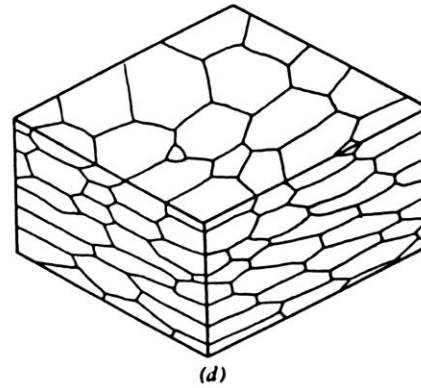
layering
granulometrico



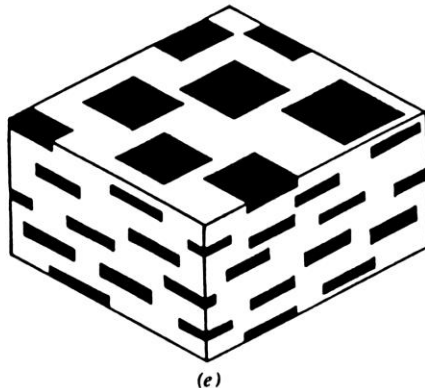
fratture
regolarmente
spaziate
Es, un tipo di
CLIVAGGIO



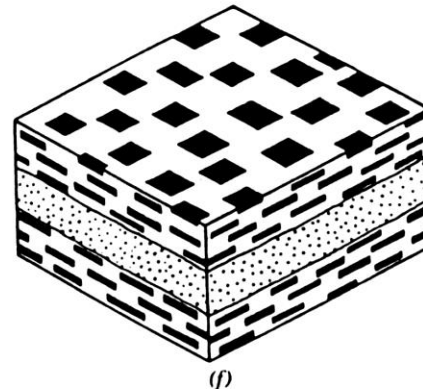
orientazione
preferenziale
di minerali
non lamellari
(es, qz, feldspati,
calcite)



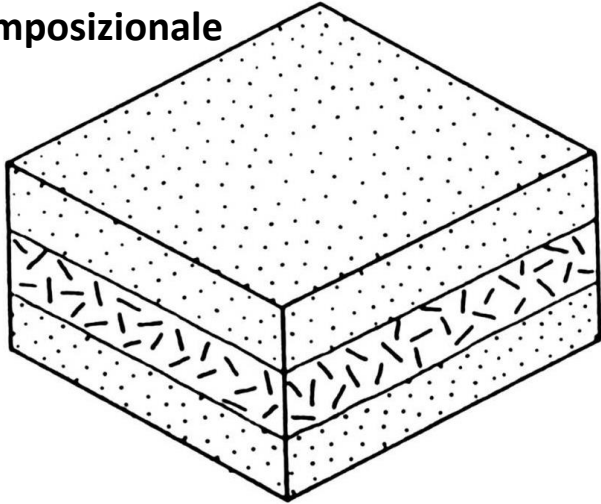
orientazione
preferenziale
di fillosilicati
SCISTOSITA'



combinazione
di diverse foliazioni
(layering composizionale
+ scistosità)



layering
composizionale



(a)

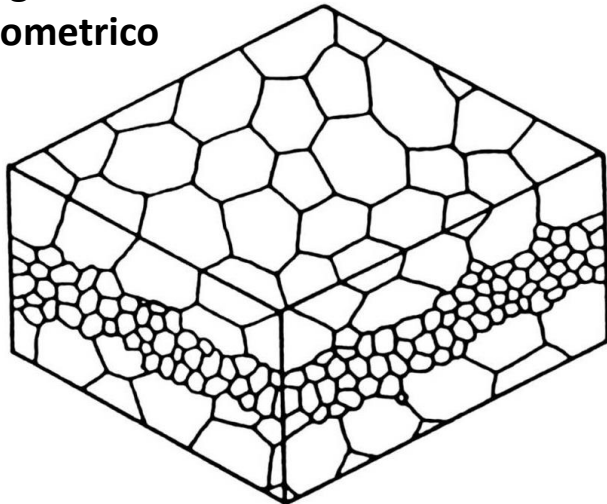
Gneiss a bande



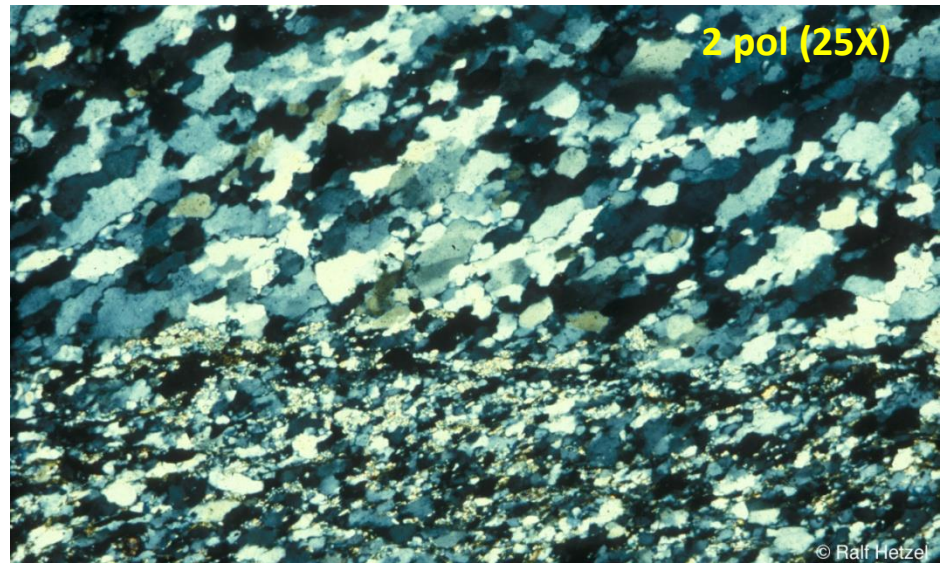
hornflels a bande



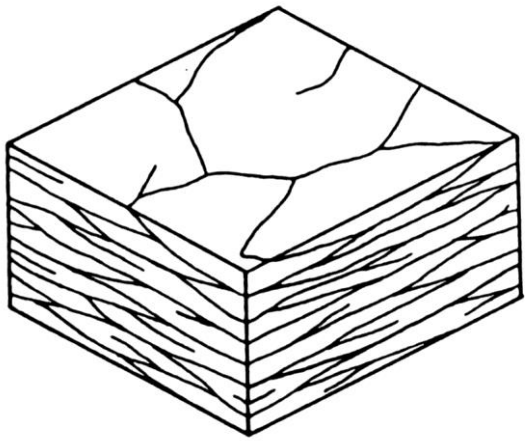
layering
granulometrico



(b)



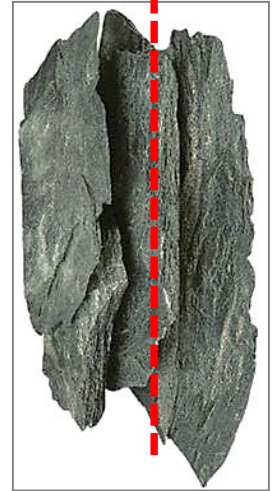
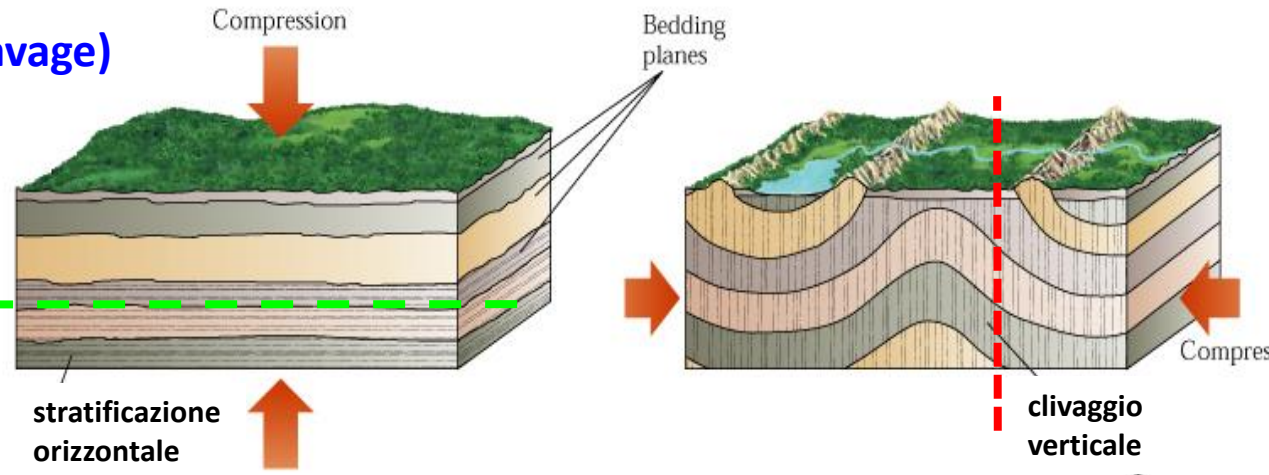
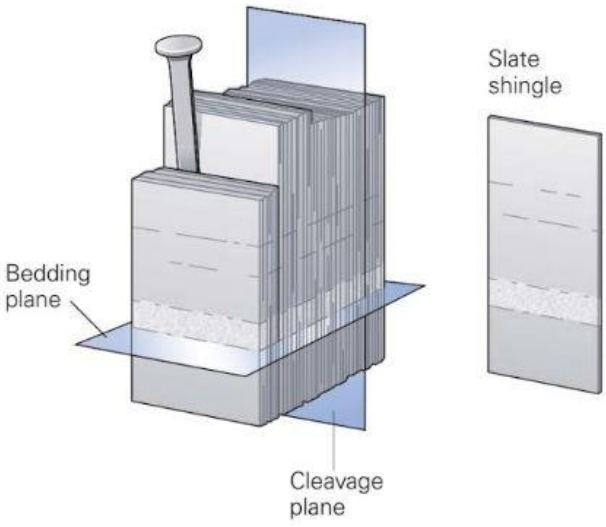
CLIVAGGIO ardesiaco (slaty cleavage)



(c)

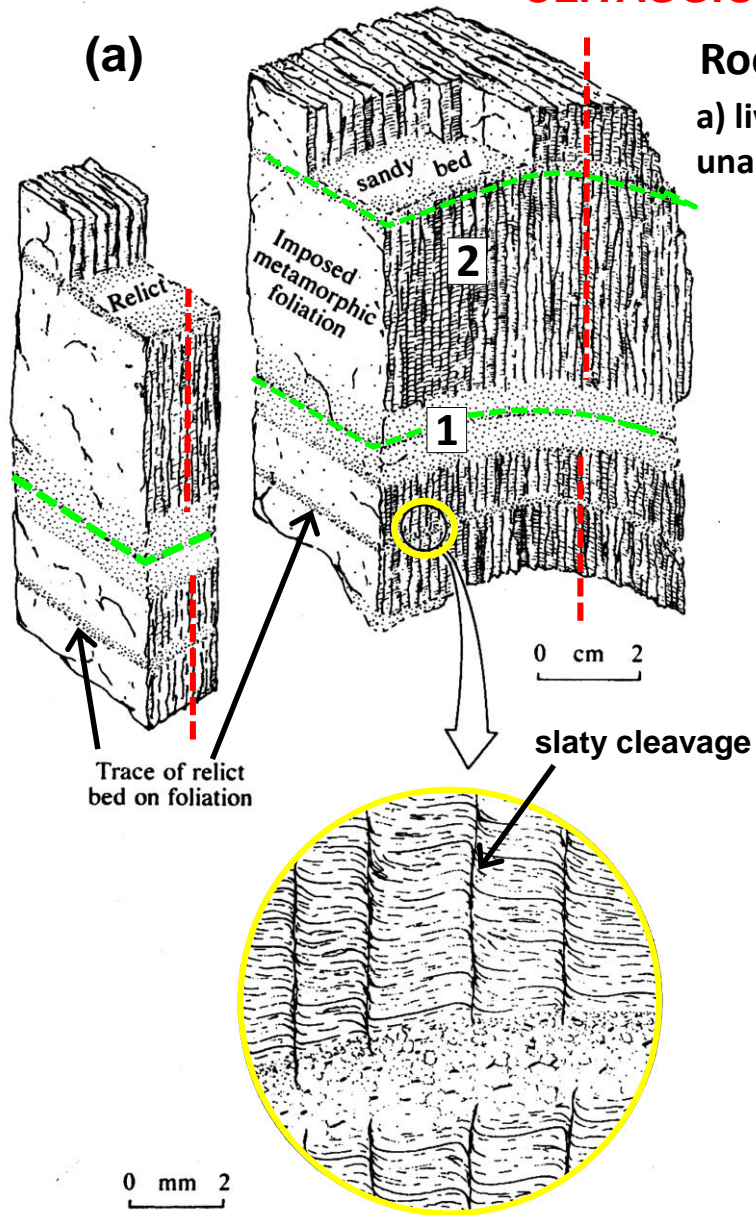
argilloscisti (ardesie - slate)

Superfici parallele fittamente spaziate lungo le quali la roccia si spacca facilmente



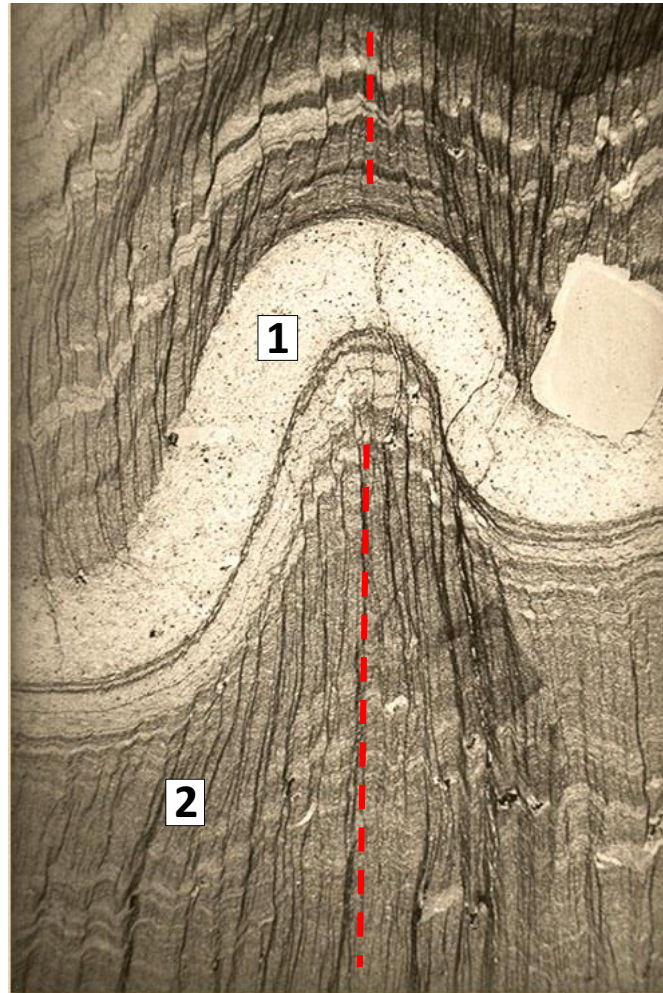
CLIVAGGIO in argilloscisto (ardesia = slate)

(a)



Roccia pelitica molto debolmente metamorfosata

a) livelli arenacei (1) e livelli argillosi (2); solo questi ultimi interessati da una foliazione metamorfica (piani verticali: clivaggio)

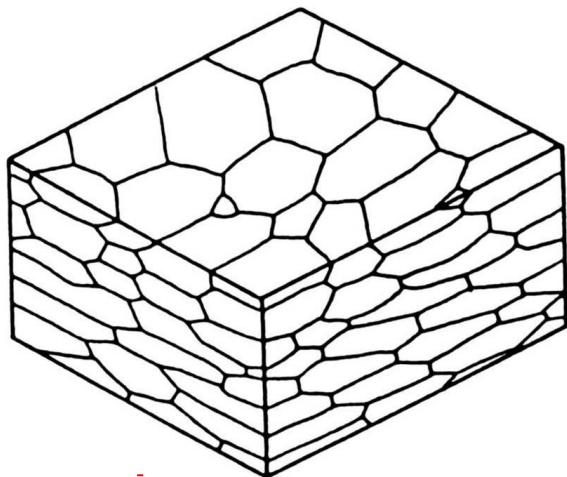


Traccia dei piani clivaggio ad andamento subverticale nei livelli pelitici.

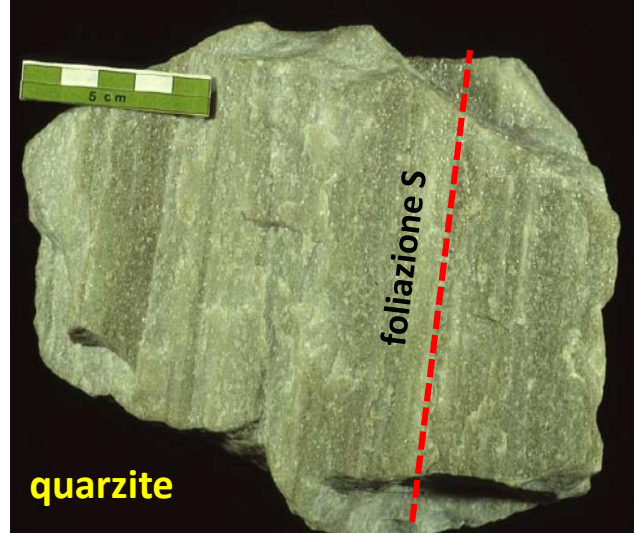
Il clivaggio si sviluppa negli strati ricchi in fillosilicati, non in quelli ricchi in quarzo (bianchi). (altezza foto 20mm. 1 Pol.

da Passchier & Trouw, 2005)

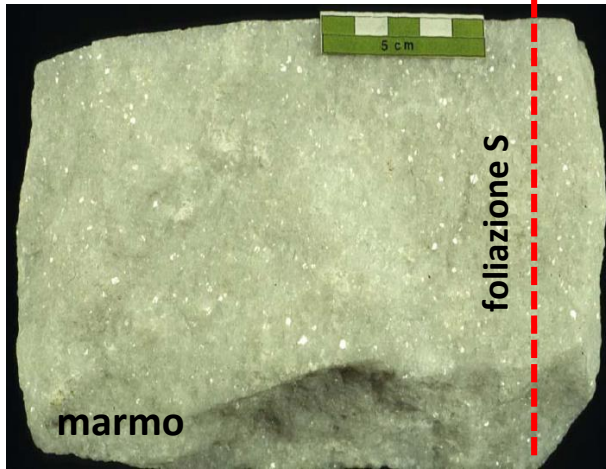
orientazione preferenziale di minerali non lamellari (es, calcite, quarzo)



(d)

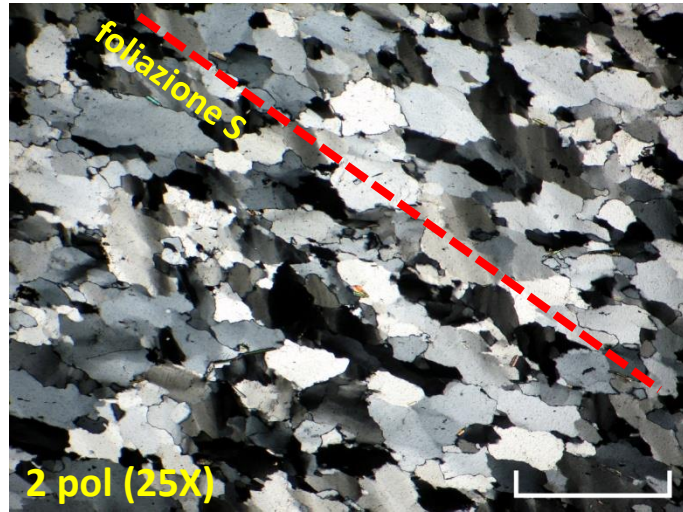


quarzite



marmo

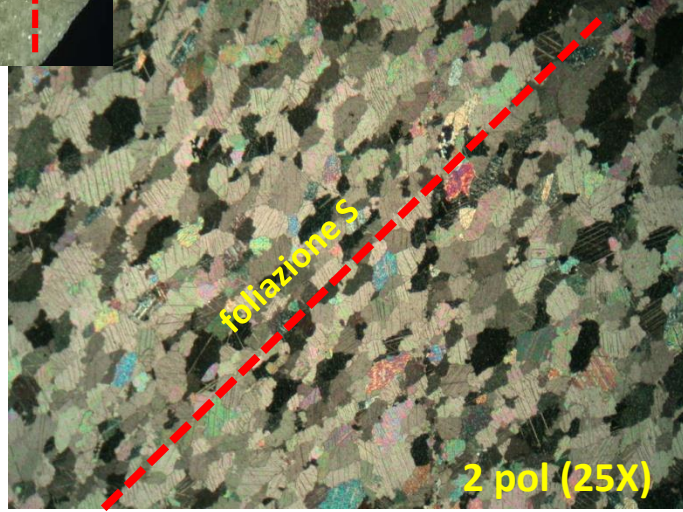
NB: la sezione sottile è sempre fatta sul piano perpendicolare alla foliazione! Al microscopio quindi identifico la traccia del piano di foliazione



2 pol (25X)

quarzo orientato

traccia del piano di foliazione S



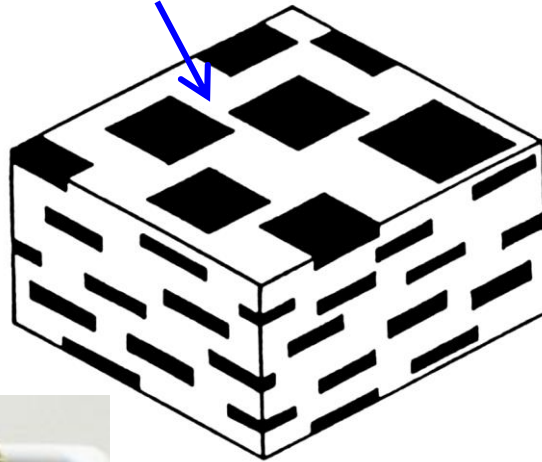
calcite orientata

2 pol (25X)

orientazione preferenziale
di fillosilicati

foliazione= SCISTOSITA'

piano di scistosità



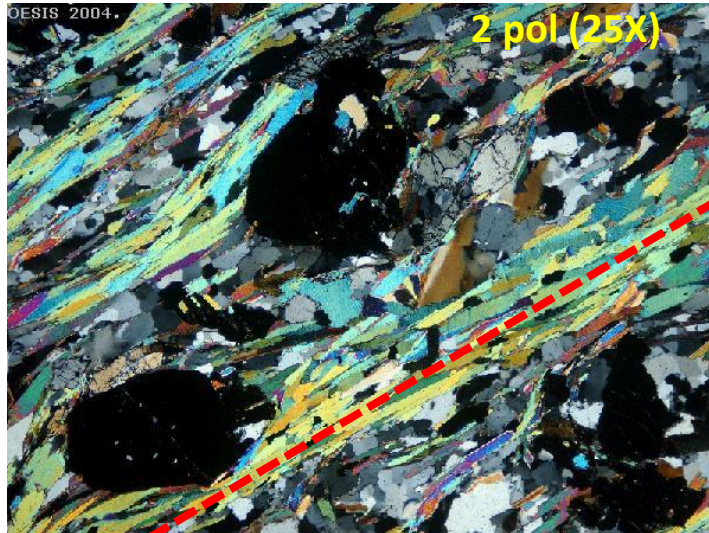
(e)

la sezione sottile è
sempre fatta sul
piano perpendicolare
alla foliazione!
Al microscopio quindi
identifico la traccia
del piano di foliazione

piano di scistosità

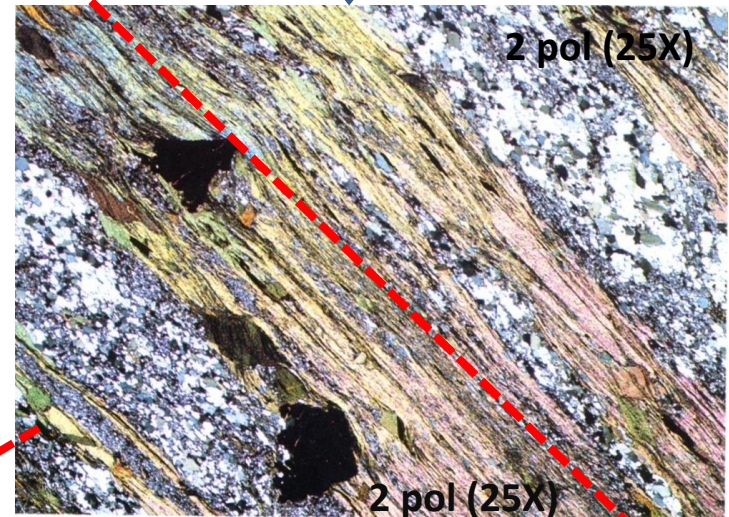
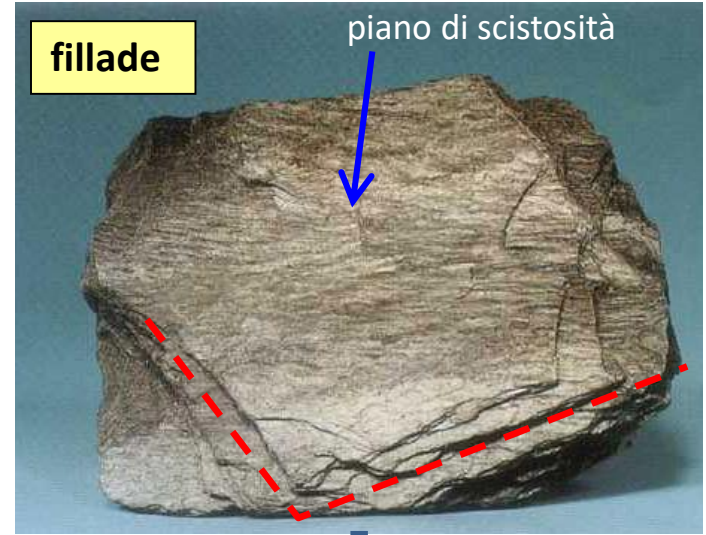


scisto

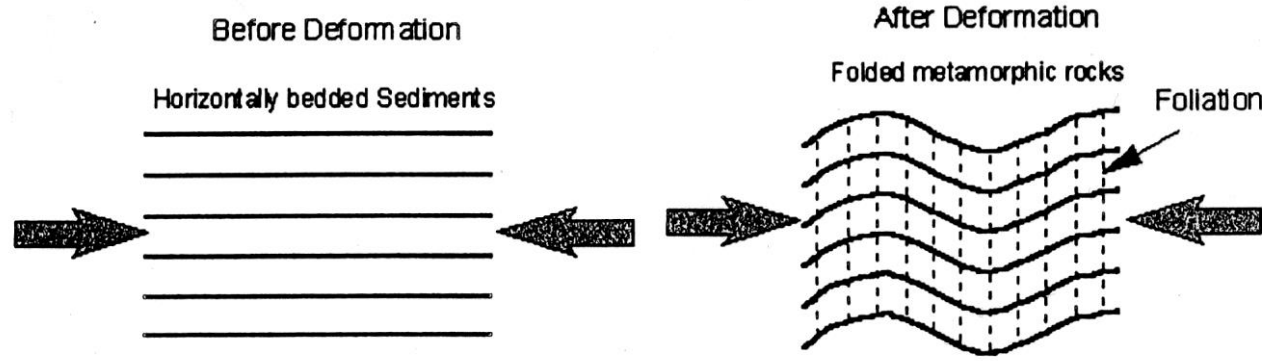


fillade

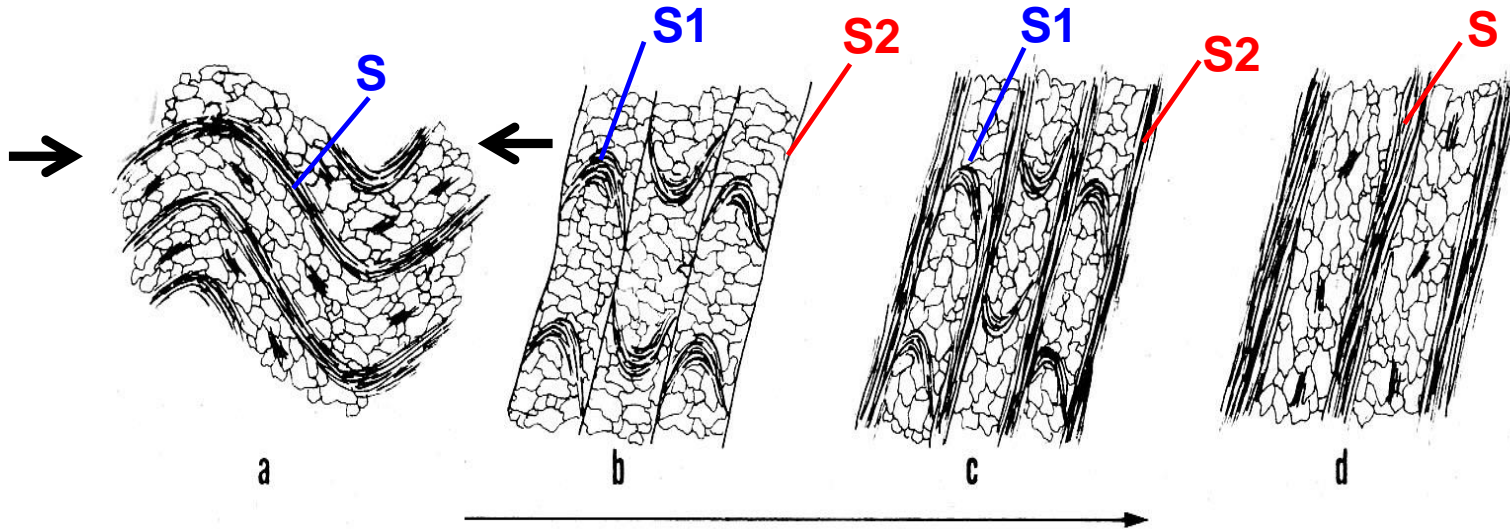
piano di scistosità



traccia del piano di foliazione S
(SCISTOSITA' in questo caso)



**EVOLUZIONE DA
LAMINAZIONE
SEDIMENTARIA A
CLIVAGGIO A
SCISTOSITA'**

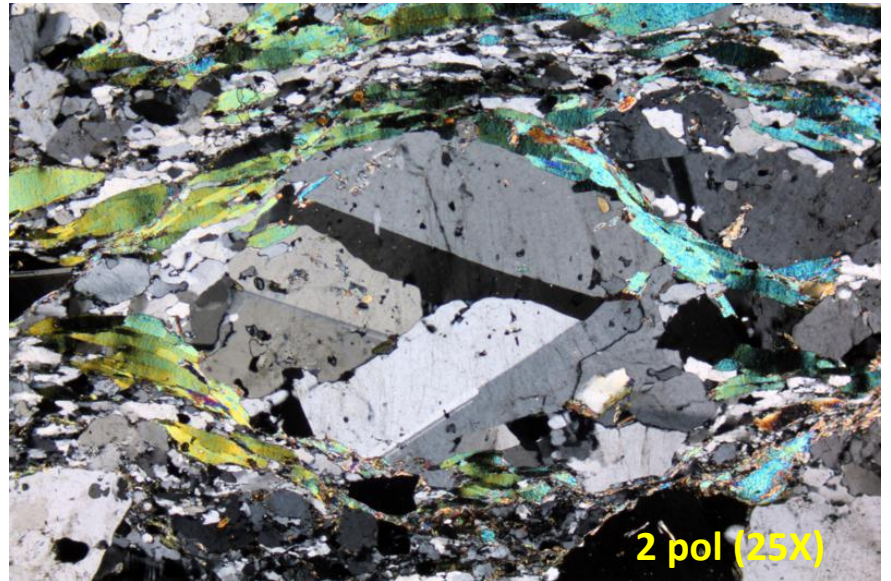
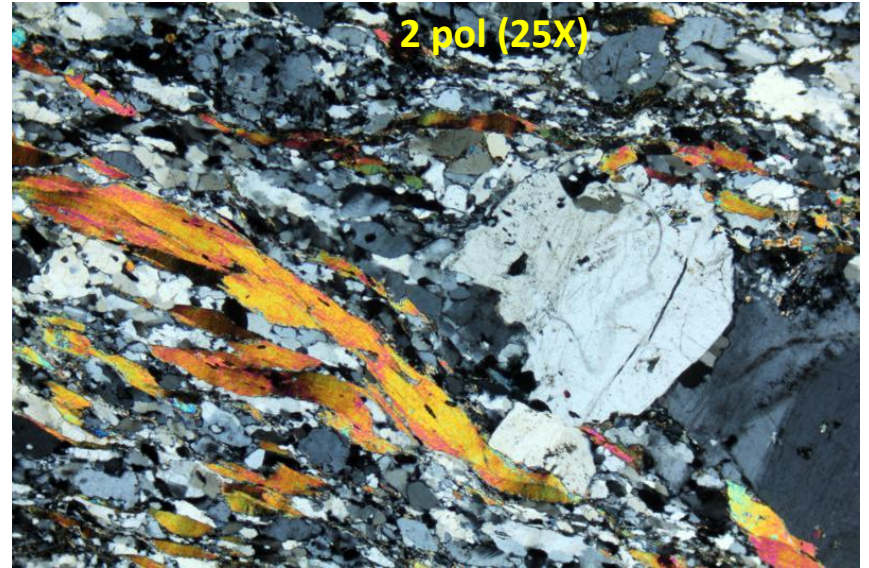


a) Alternanza laminare ondulata di lettini quarzoso-feldspatici e lettini fillosilicatici. S può essere una laminazione sedimentaria o una generica foliazione S di partenza. Sforzi compressivi hanno ondulato (“crenulato”) una S originariamente piana; b) per la compressione si creano superfici di **CLIVAGGIO** trasversali **S2** che interrompono e dislocano **S1** con slittamenti differenziali; c) lungo **S2** cristallizzano i **fillosilicati** contemporaneamente agli sforzi compressivi (cristallizzazione sin-cinematica). Le superfici **S2** sono ora diventati **piani di SCISTOSITA'**. Permangono ancora residui di **S1**; d) la cristallizzazione sin-cinematica è proseguita fino all’eliminazione dei residui **S1**. Ora si ha soltanto la foliazione **S2** che, senza il controllo dei passaggi precedenti, non potremmo definire se **S1** o **S2**, ma genericamente **S**.

GNEISSOSITA'



© Stephanie Sykora (<http://www.exploringtheearth.com>)

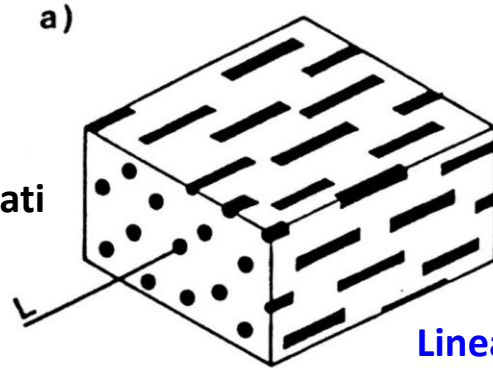


ANISOTROPIE LINEARI – LINEAZIONE L

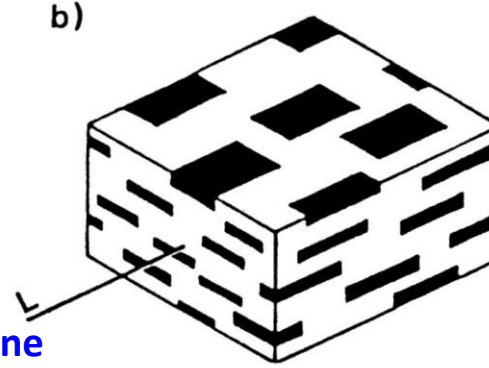
LINEAZIONE = qualsiasi struttura lineare penetrativa visibile in un corpo roccioso - detta L

orientazione preferenziale di minerali allungati (es. anfiboli)

Lineazione mineralogica



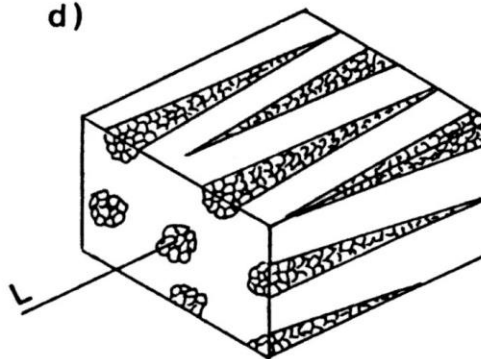
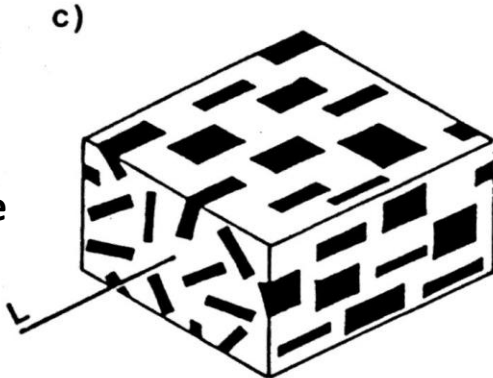
Lineazione mineralogica



combinazione di lineazione + foliazione di tipo scistosità orientazione preferenziale di minerali lamellari (fillosilicati)

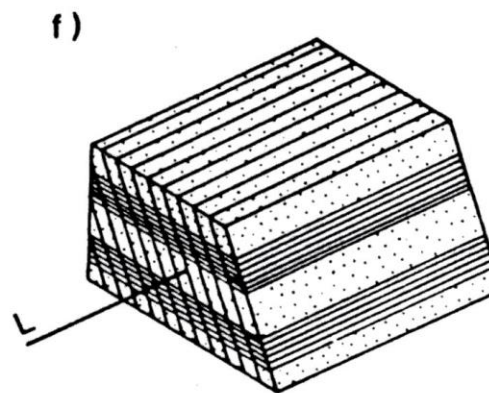
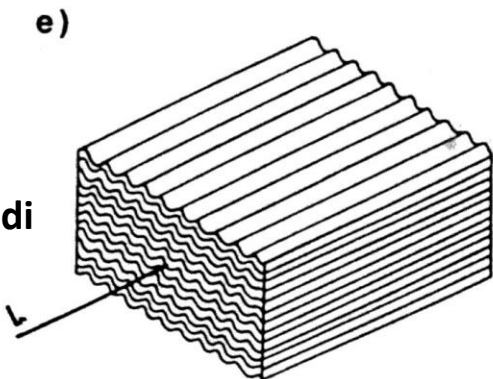
cf. schema foliazioni fig. (e)

asse comune di minerali tabulari variamente orientati



allineamento di aggregati granulari fusiformi

lineazione per crenulazione (linee di cerniera di micropieghe)

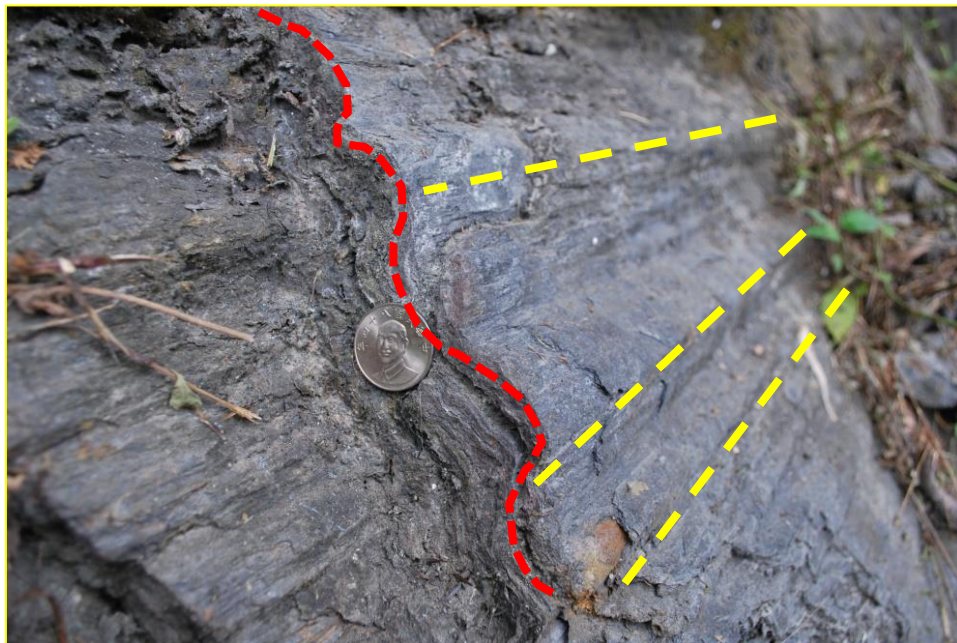
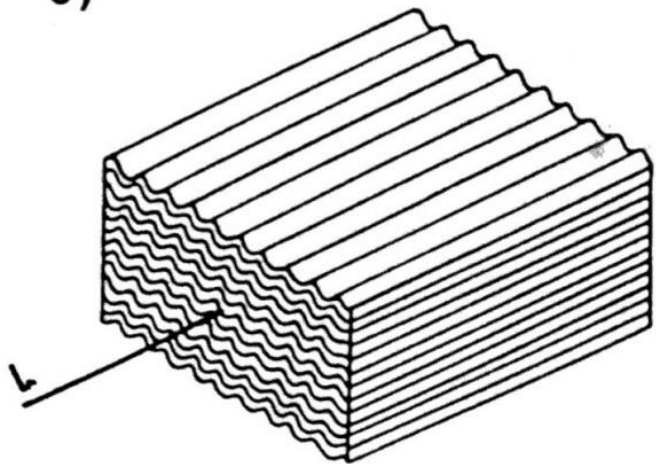


intersezione di 2 foliazioni (es: layering composizionale + clivaggio)

Lineazione per intersezione

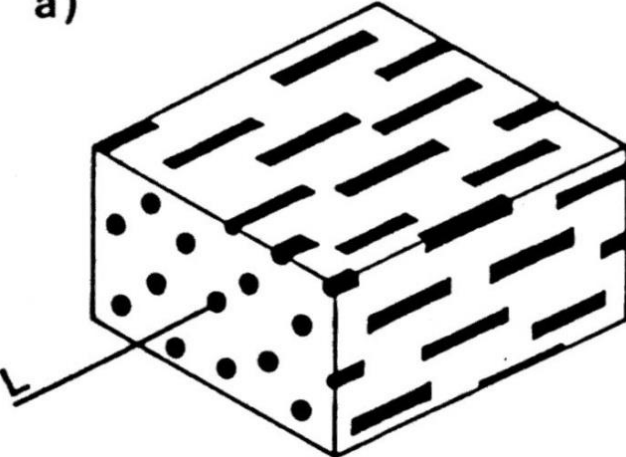
LINEAZIONE per crenulazione

e)

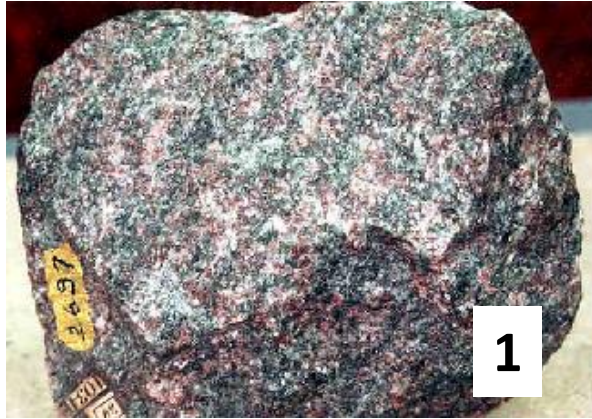


LINEAZIONE mineralogica

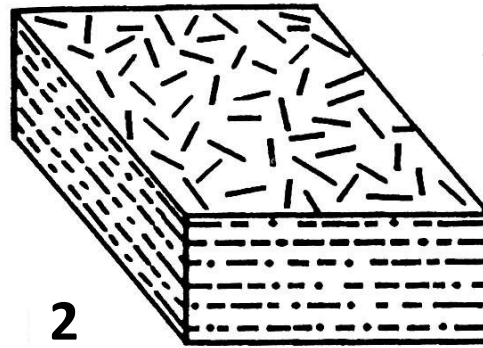
a)



ANISOTROPIE PLANARI E LINEARI

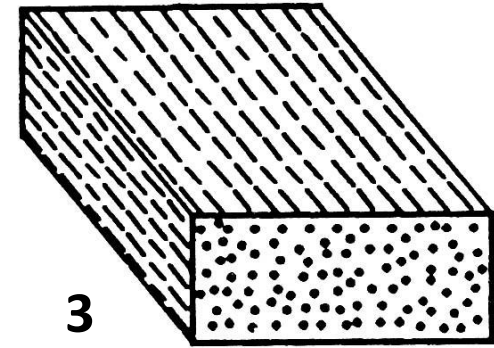


Struttura isotropa (eclogite)



2

Anisotropia planare
Foliazione S : scistosità



3

Anisotropia lineare
Lineazione L

Linear and planar fabrics

How are features organised?

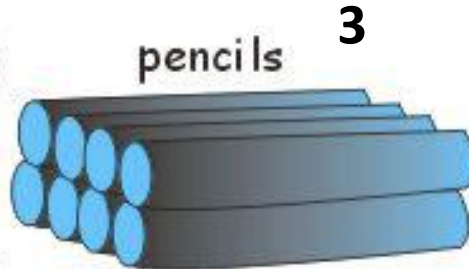
1

DIMENSIONALITY

2



balls
no structures



pencils

3

lines

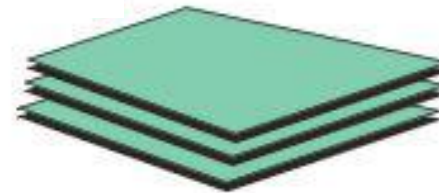
structure:
LINEATION

e.g.

FOLD HINGE LINE

WORM TUBE

STRETCHING LINEATION



sheets

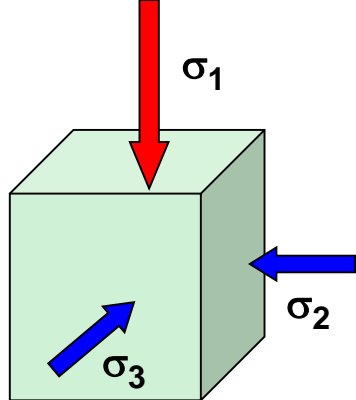
structure:

FOLIATION

e.g.

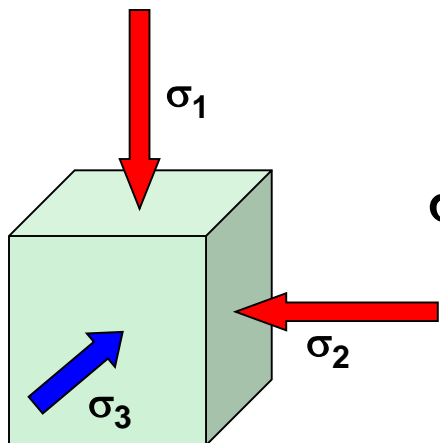
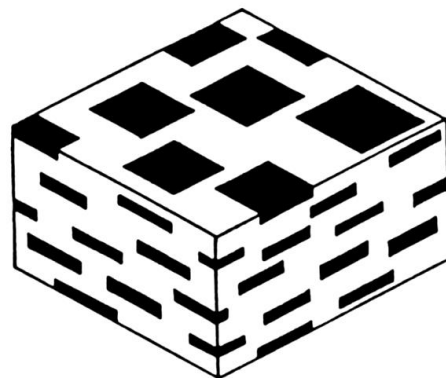
CLEAVAGE PLANE

BEDDING PLANE



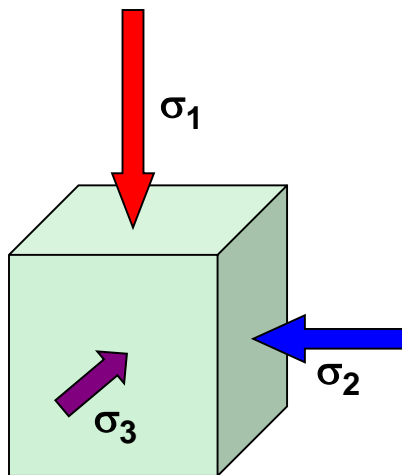
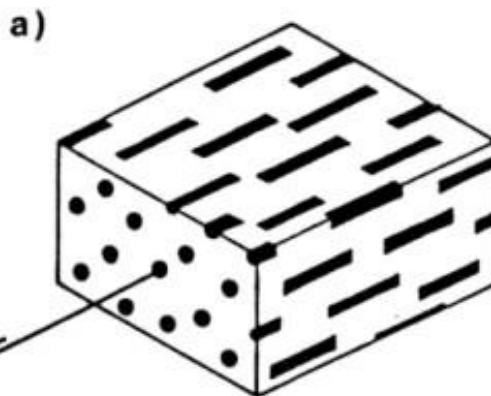
$$\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$$

FOLIAZIONE



$$\sigma_1 = \sigma_2 > \sigma_3$$

LINEAZIONE

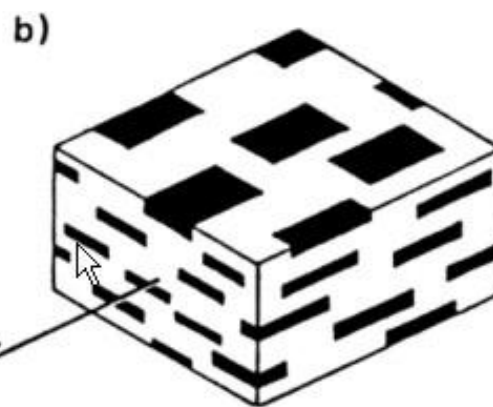


$$\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$$

FOLIAZIONE

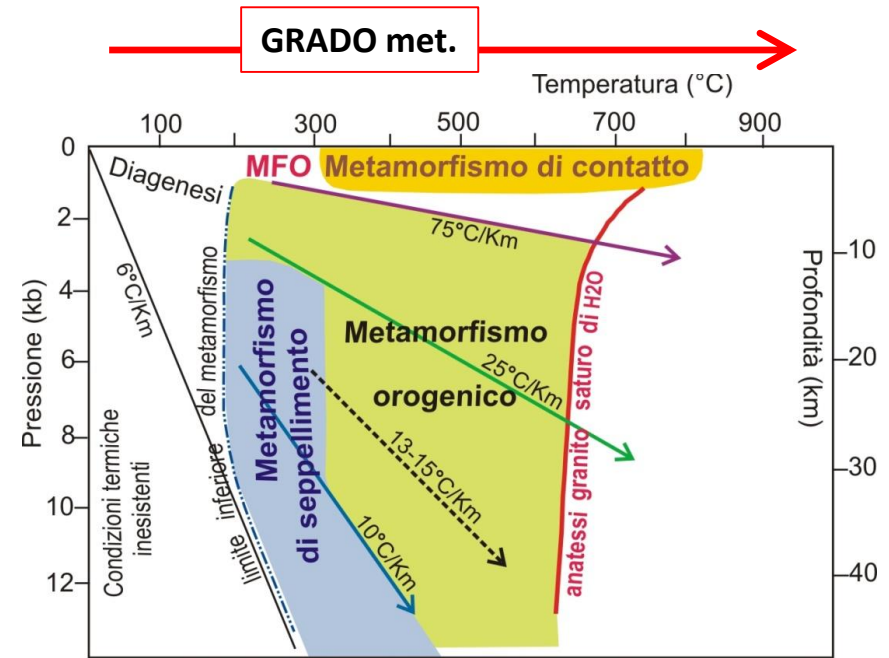
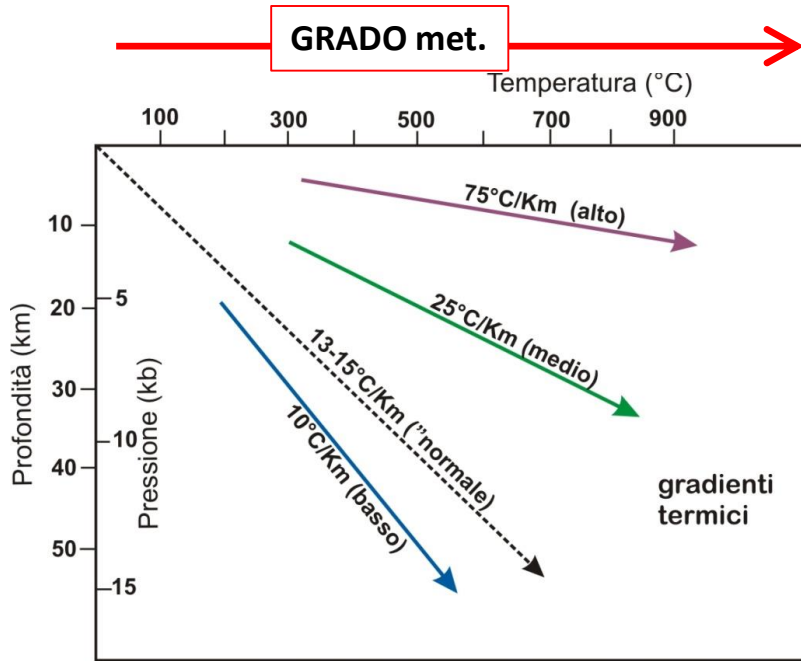
+

LINEAZIONE



in entrambi i casi illustrati, L è una lineazione mineralogica

GRADUALITA' DEI PROCESSI METAMORFICI



► **GRADO metamorfico** : BASSO – MEDIO – ALTO

generale indicazione di T°C crescenti durante il metamorfismo
SENZA specificare la relazione tra T°C e P (o profondità)

► **GRADIENTE TERMICO** : BASSO – MEDIO – ALTO

relazione tra T°C e P (o profondità)

□ **AMBIENTI GEODINAMICI DIVERSI** sono caratterizzati da **GRADIENTI TERMICI DIVERSI**:
zone di collisione, di subduzione, di estensione

la T°C NON varia in modo fisso con la P o profondità

INDICATORI DELLA GRADUALITA' DEI PROCESSI METAMORFICI

1) Concetto di ZONE METAMORFICHE in base alla PROFONDITA'

Becke (1903)
Grubenmann (1904)



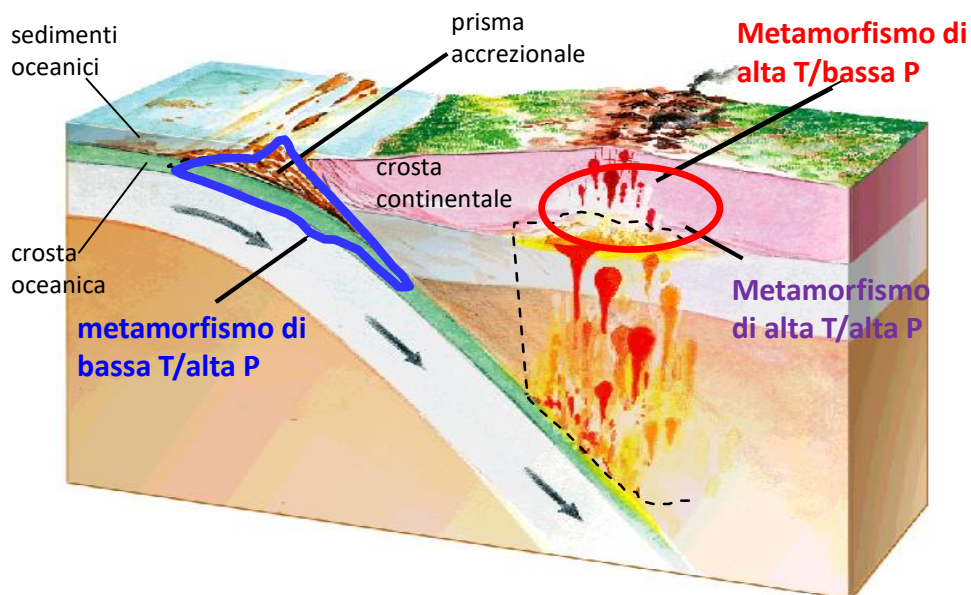
Epizona
Mesozona
Catazona



Presuppone un costante
aumento di T°C con la
profondità

| Zone | Temperatura | Pressione litostatica | Pressione orientata |
|-----------------|----------------|-----------------------|---------------------------------------|
| EPIZONA | bassa-moderata | bassa | elevata |
| MESOZONA | moderata-alta | intermedia | meno elevata |
| CATAZONA | alta | alta-molto alta | molto meno elevata, spesso assente |

NO



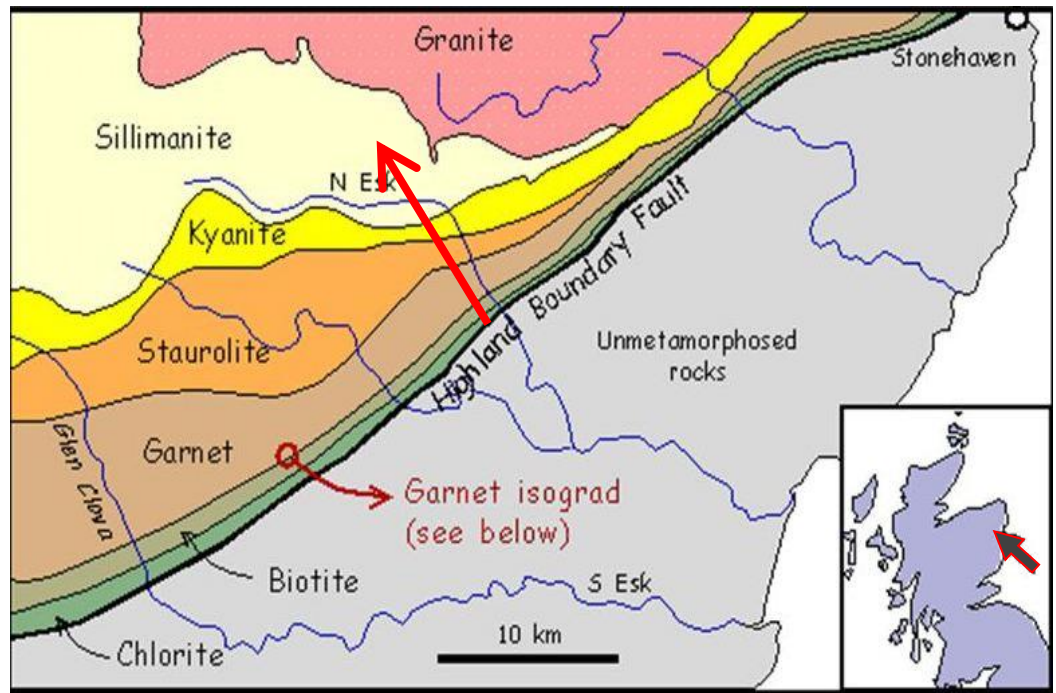
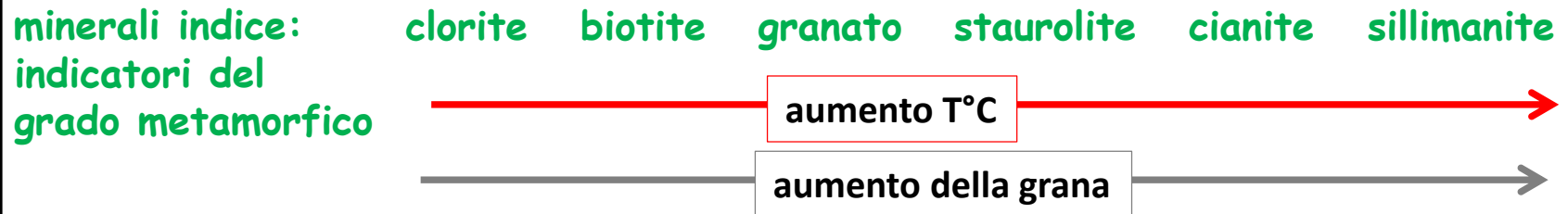
concetto superato perché lega
l'aumento del grado met (T°C)
alla profondità

all'epoca: mancanza della conoscenza
della diversa distribuzione del calore
nei diversi contesti geodinamici !!

**oggi: il grado metamorfico NON è
univocamente legato alla profondità**

2) ZONE METAMORFICHE basate sui MINERALI INDICE ⇒ ZONE MINERALOGICHE

Barrow (1883) – studio dei terreni metamorfici delle Highlands Scozia – protoliti **PELITICI**



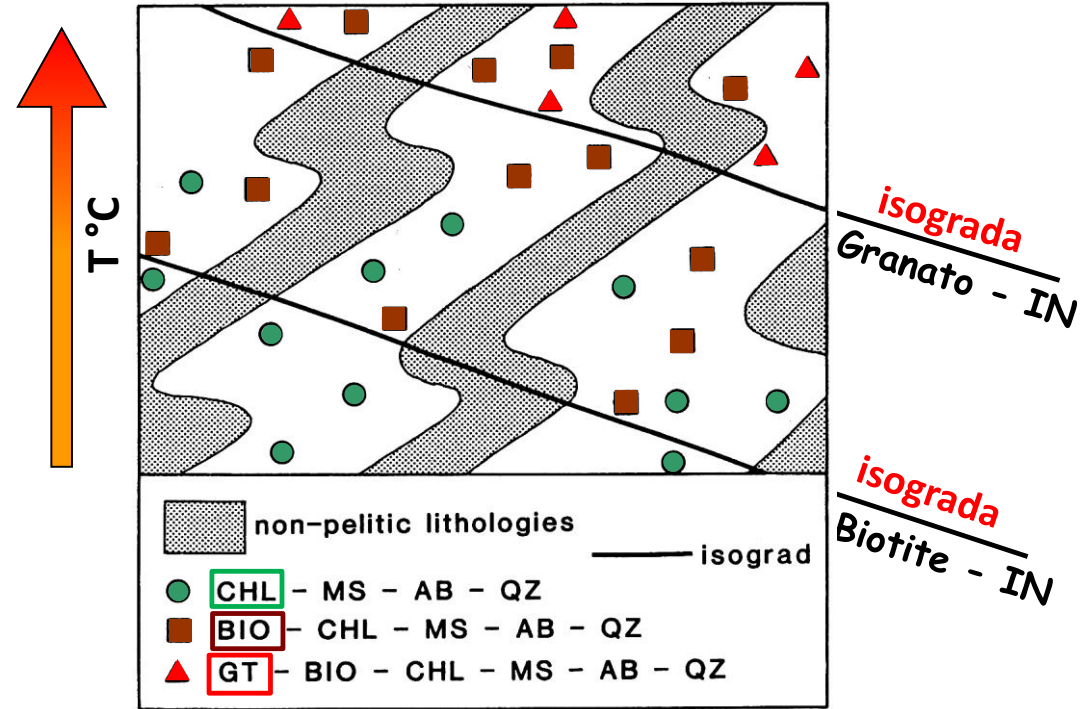
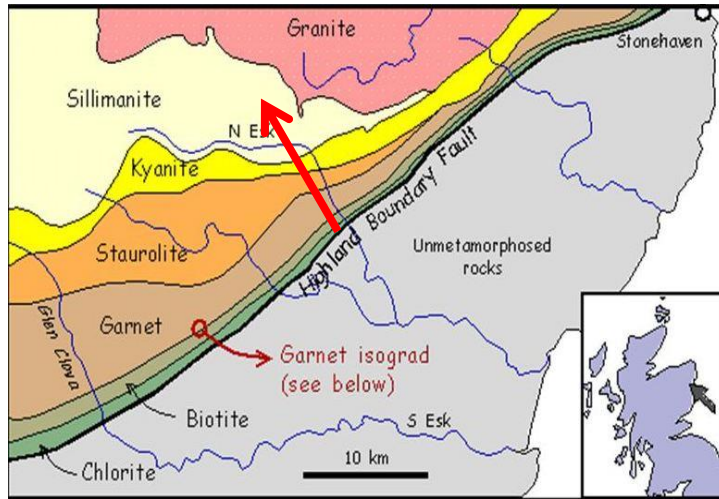
I minerali indice definiscono 6 zone metamorfiche a T°C (grado) crescente dette **ZONE BARROVIANE**

zona a clorite – zona a biotite – zona a granato – zona a staurolite – zona a cianite – zona a sillimanite

MINERALI INDICE:
la loro **PRIMA COMPARSA** definisce la **ZONA** !
possono però continuare ad essere presenti anche nelle zone successive
La loro comparsa è funzione del grado metamorfico

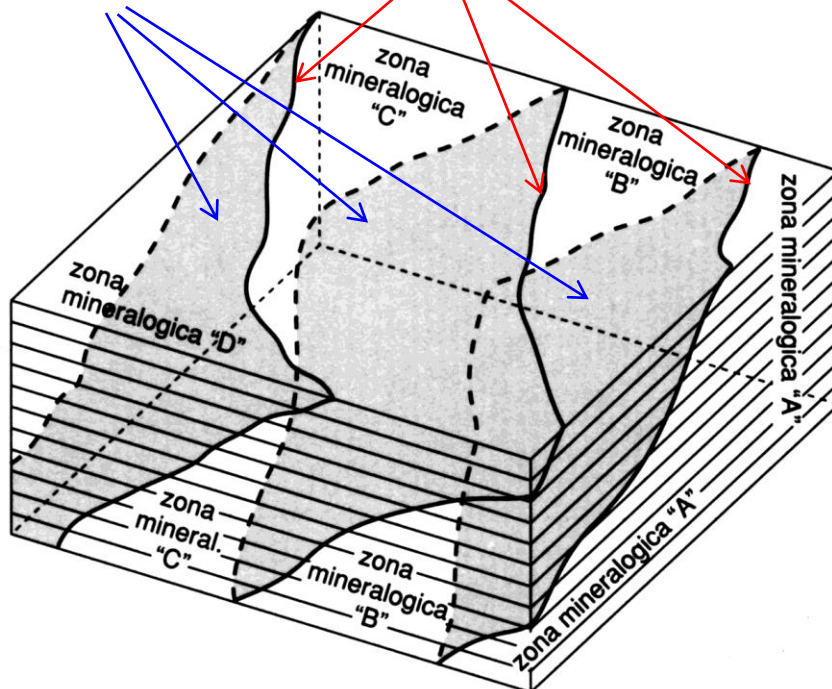
Limitazioni : 1) terreni con protoliti PELITICI 2) valido per gradienti termici medi max 40°C/km

Zoneografia metamorfica → Zone mineralogiche → CONCETTO di ISOGRADA



superfici isograda

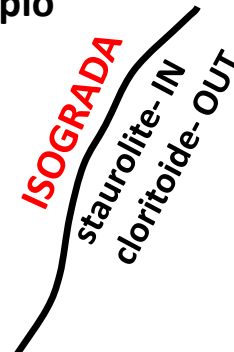
Isograda in pianta



ISOGRADA (Tilley, 1925) superficie all'interno del terreno metamorfico – rappresentata sulle carte geologiche da una linea – che separa 2 ZONE adiacenti di diverso GRADO metamorfico **è il luogo dei punti di uguale grado metamorfico**

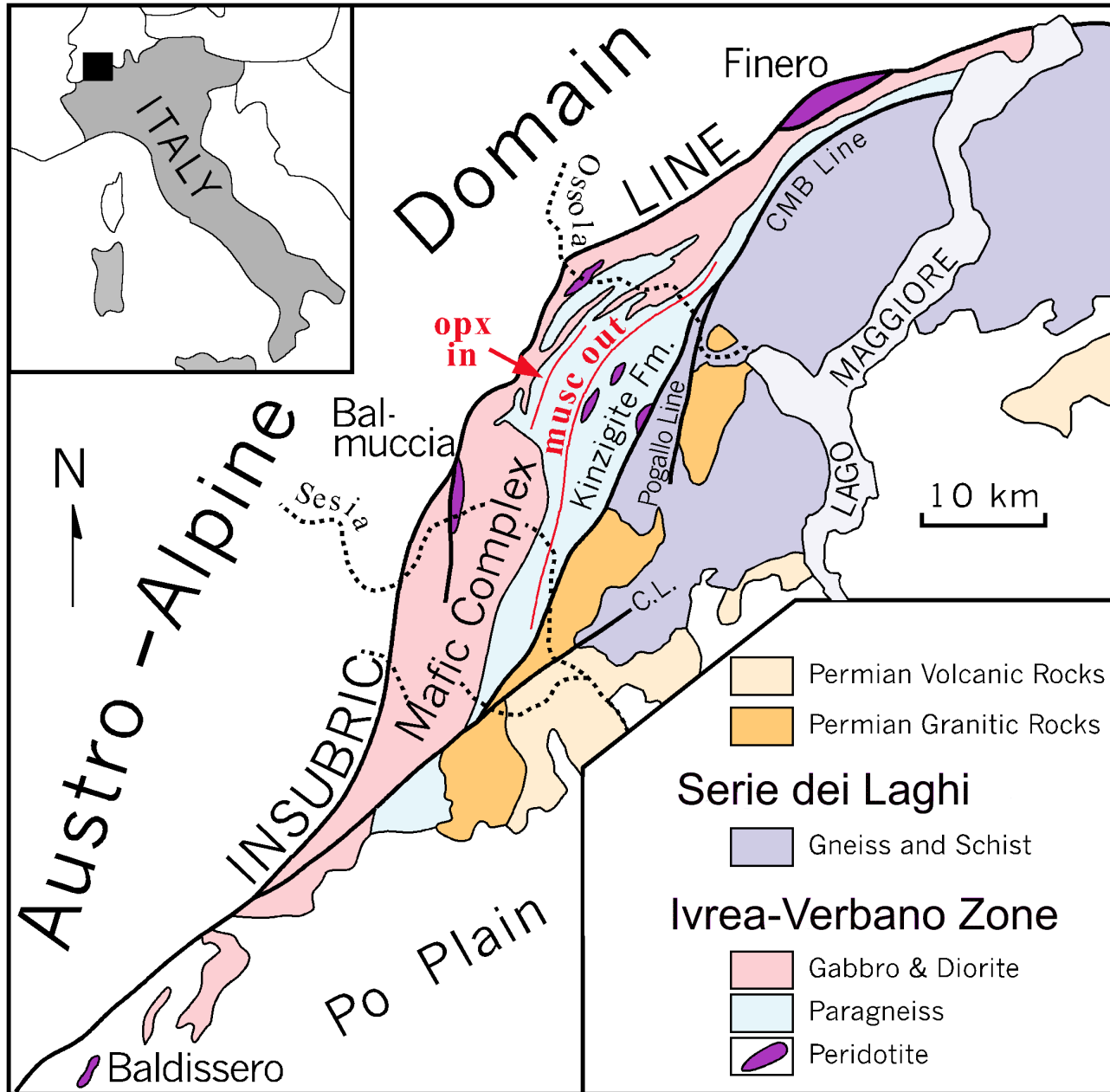
esempio

ZONA "B"
cloritoide +
 almandino
 + clorite +
 muscovite + qz



ZONA "C"
staurolite +
 biotite
 + almandino +
 muscovite + qz

ESEMPI DI ISOGRADE



southern Alps: Ivrea-Verbano Zone and "Serie dei Laghi" (Zingg,1983).

ISOGRADE in rosso

muscovite-out (musc out)
orthopyroxene-in (opx in)

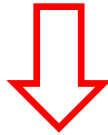
3) Concetto di FACIES METAMORFICHE

Eskola (1915) – definisce il concetto di facies metamorfica

“In qualsiasi roccia metamorfica che abbia raggiunto l’equilibrio chimico durante il metamorfismo, a T e P costanti la composizione mineralogica sarà controllata dalla composizione della roccia”

Verhoogen et al. (1970)

“Una facies metamorfica è un insieme di associazioni mineralogiche associate nello spazio e nel tempo. Esiste perciò una costante e prevedibile relazione fra composizione chimica della roccia e la sua mineralogia, a date condizioni ambientali (T-P)”



FACIES

NON un singolo MINERALE

**NON una singola/specifica
ASSOCIAZIONE MINERALOGICA**

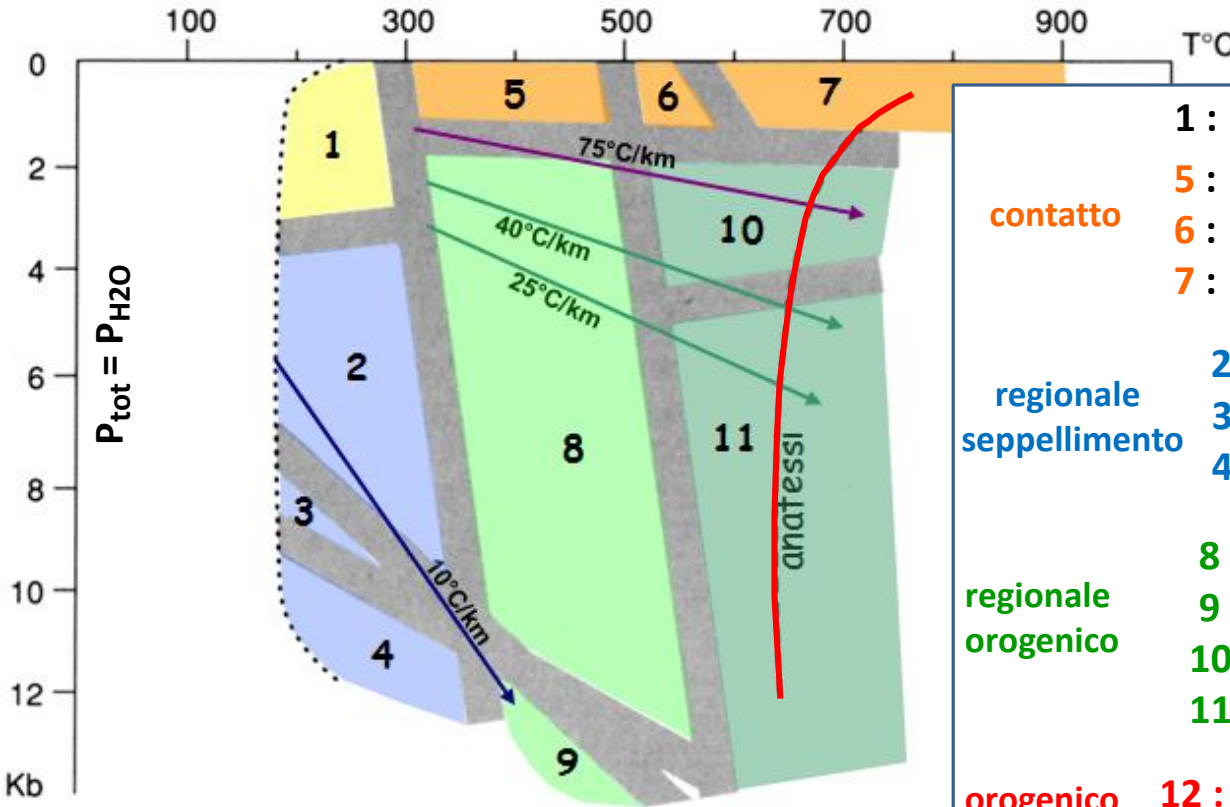
**ma un INSIEME di ASSOCIAZIONI
MINERALOGICHE controllate dalla
composizione del protolito e collegate ad uno
specifico CAMPO P-T**

Eskola (1920) propose 5 facies, basate sui suoi studi metamorfiti di derivazione basica (metabasiti). Questo spiega il nome che diede alle facie (es: facies degli SCISTI VERDI, facies delle ANFIBOLITI)

Alle 5 facies di Eskola (1920,1939) sono state aggiunte altre

FACIES METAMORFICHE

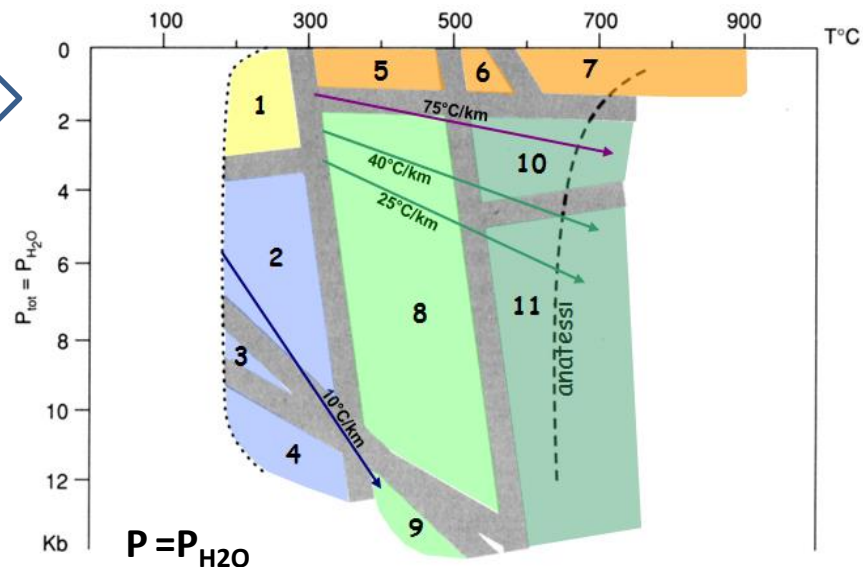
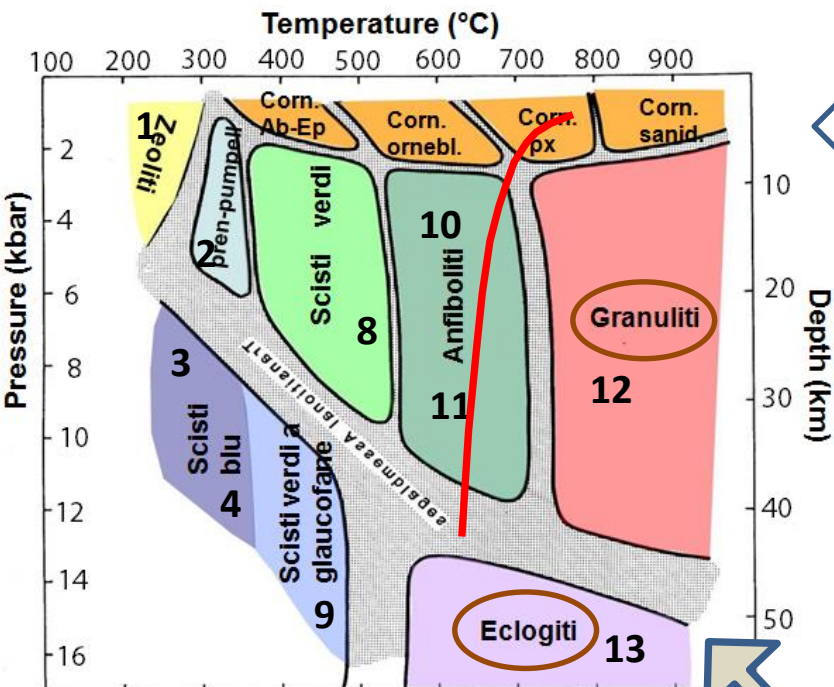
Campi P-T delle facies
per $P_{H_2O} = P_{tot}$



- 1** : f. zeoliti
 - 5** : f. cornubianiti ad albite + epidoto
 - 6** : f. cornubianiti ad hornblenda
 - 7** : f. cornubianiti a cordierite + K-feld
 - 2** : f. lawsonite – albite
 - 3** : f. lawsonite – giadeite + quarzo
 - 4** : f. lawsonite – **glaucofane**
 - 8** : f. SCISTI VERDI
 - 9** : f. SCISTI VERDI a glaucofane (AP)
 - 10** : f. ANFIBOLITICA a cordierite (BP)
 - 11** : f. ANFIBOLITICA ad almandino (AP)
 - 12** : f. GRANULITICA
 - 13** : f. ECLOGITICA
- contatto**
- regionale seppellimento**
- regionale orogenico**
- orogenico**
- subduzione**
- Facies : 1-11 $P_{H_2O} = P_{tot}$
Facies : granulitica + eclogitica $P_{H_2O} \ll P_{tot}$

| | | | | | |
|-------------|-------------|---|-----------------------------|---|----------|
| = protolito | per = P - T | → | = associazione mineralogica | → | = FACIES |
| ≠ protolito | per = P - T | → | ≠ associazione mineralogica | → | = FACIES |
| = protolito | per ≠ P - T | → | ≠ associazione mineralogica | → | ≠ FACIES |

FACIES – CONTESTO GEODINAMICO

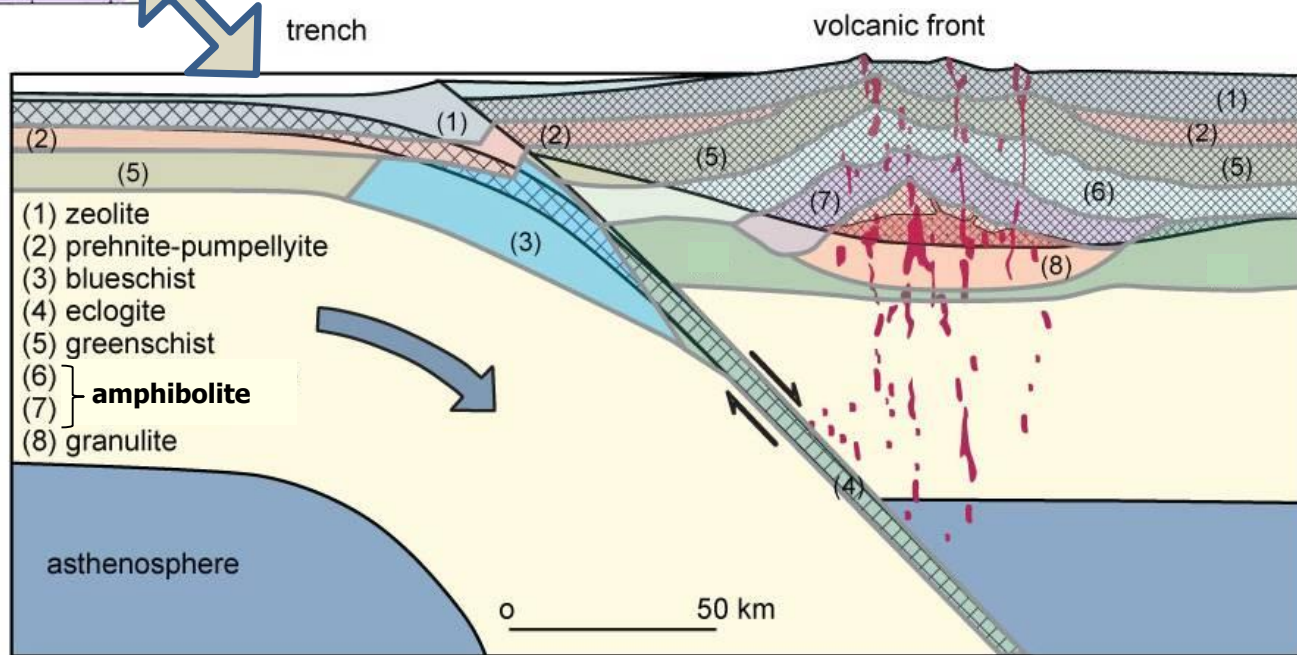


Campi P-T corrispondenti alle facies per $P = P_{tot}$

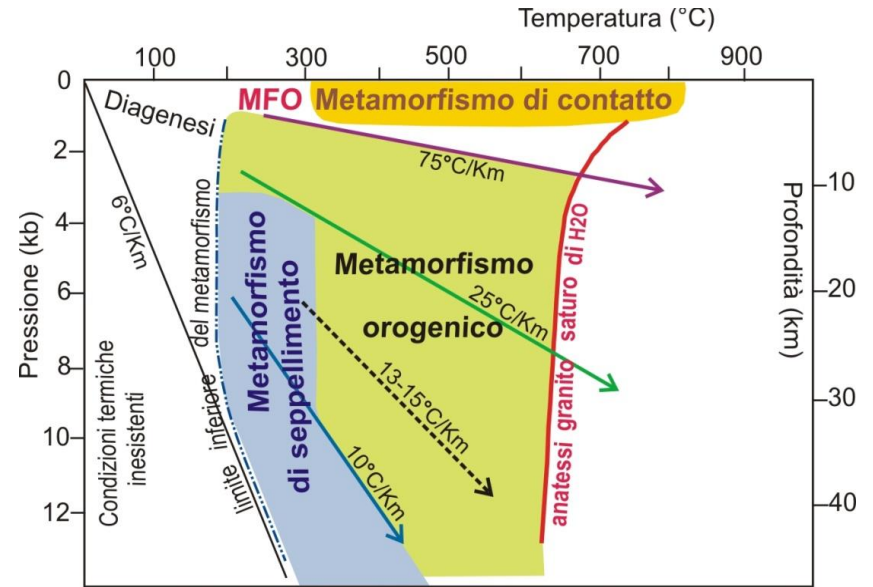
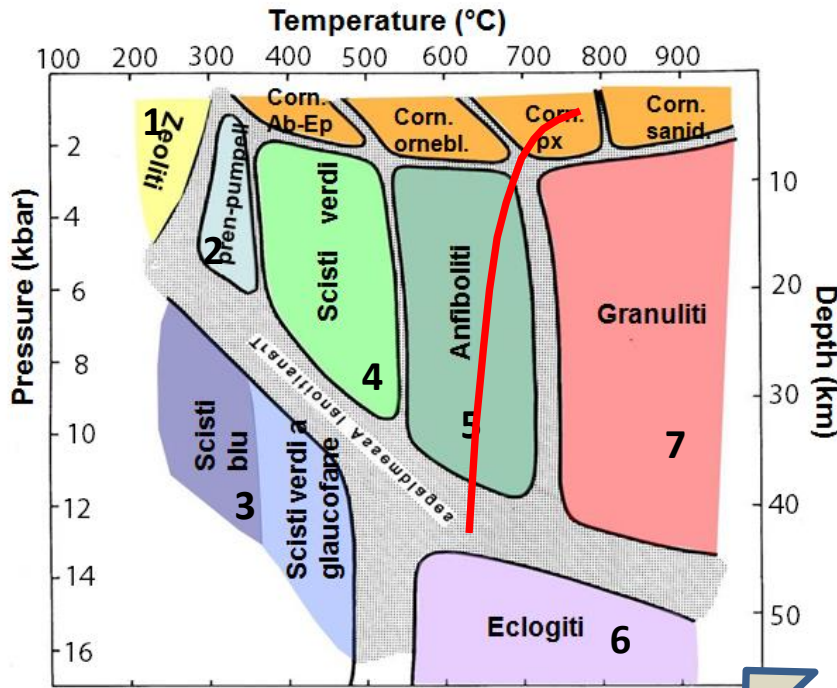
(da Yardley, 1989)

Inquadramento schematico delle facies nell'ambito della tettonica a placche per zone di convergenza litosferica

(da Winter, 2010; Ernst, 1976; modif.)



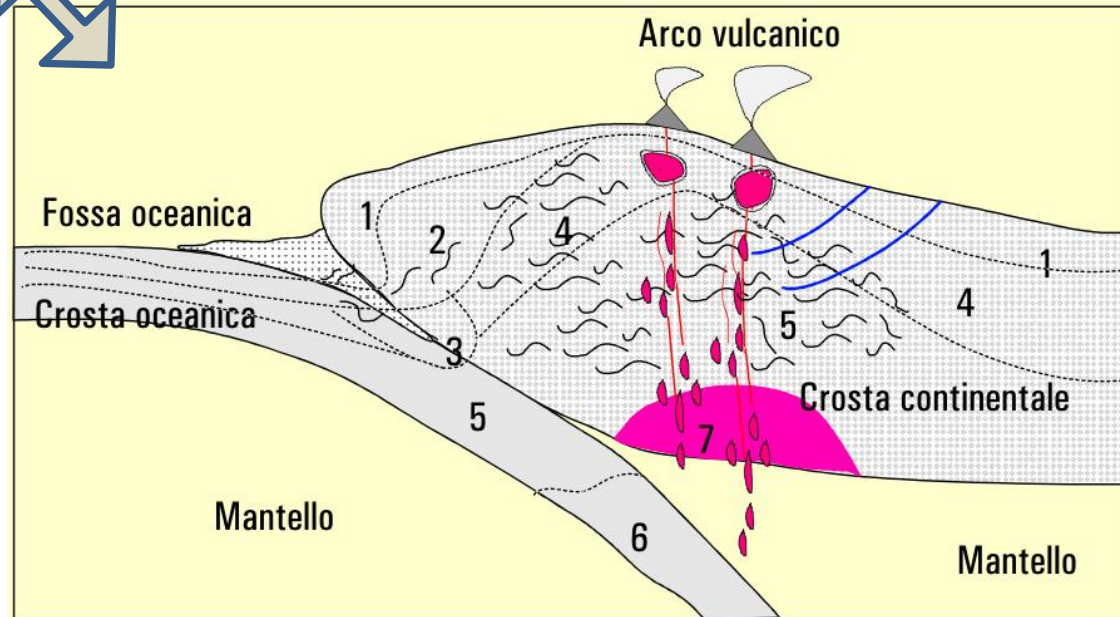
FACIES – CONTESTO GEODINAMICO

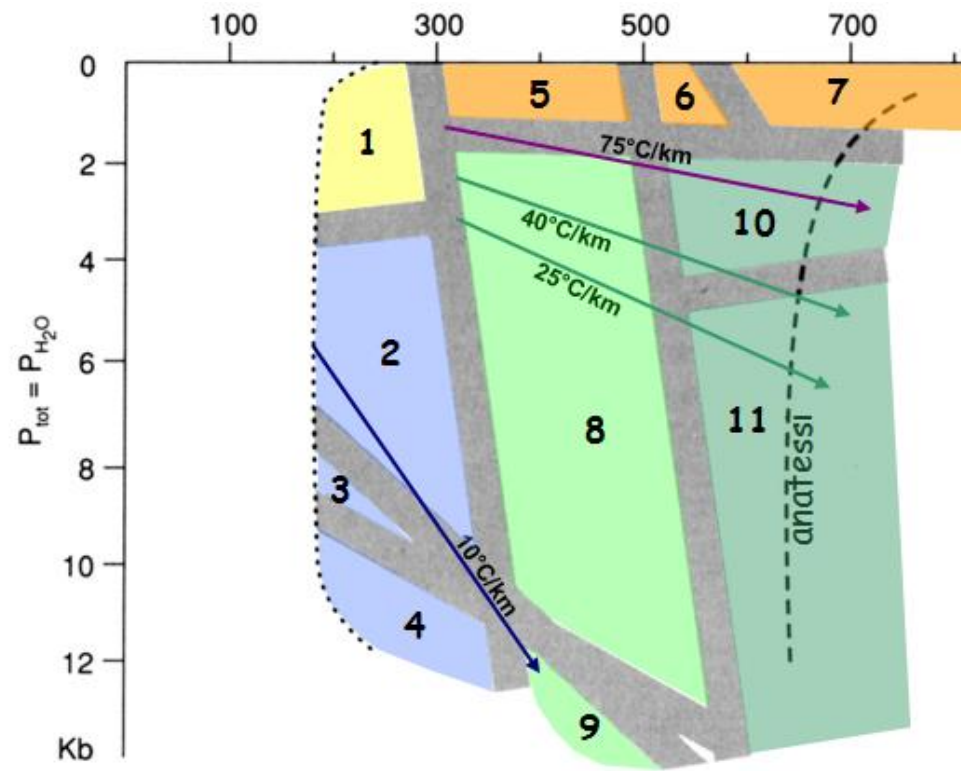
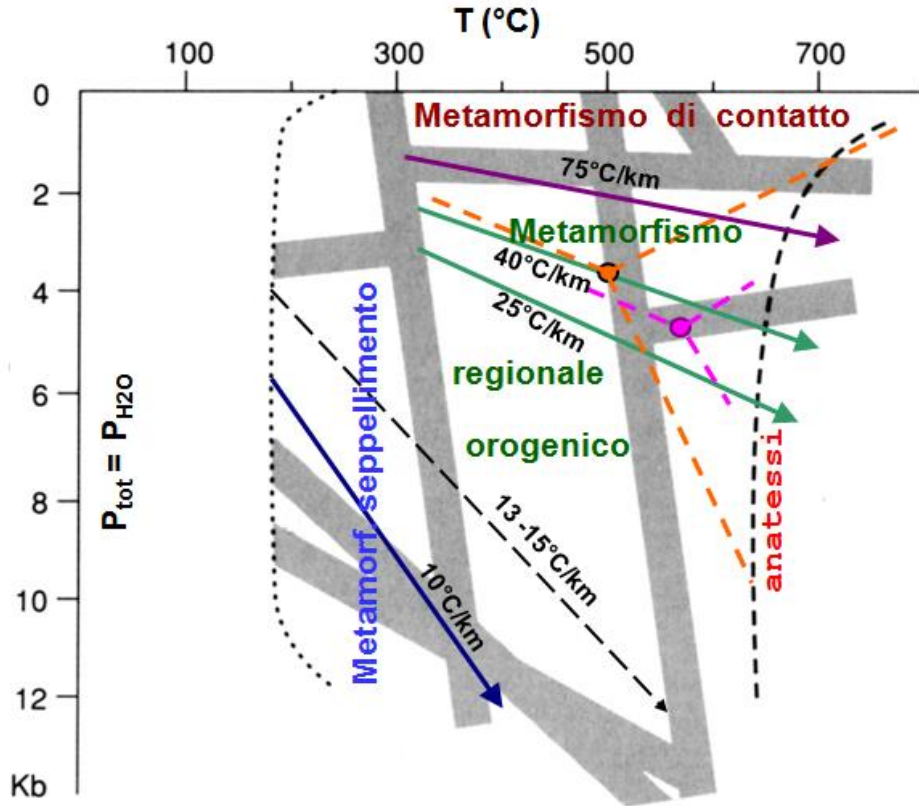


facies metamorfiche nelle zone di convergenza litosferica

1. Facies zeoliti 2. Facies prehnite e pumpellyite; 3 Facies a glaucofane (scisti blu); 4. Facies scisti verdi; 5. Facies delle amphiboliti; le rocce a $T \geq 650$ iniziano a fondere (anatessi); 6. Facies eclogitica; 7. Facies delle granuliti - rocce residuali di fusione crostale (anatessi).

NB: facies rinumerate per coerenza con lo schema della convergenza





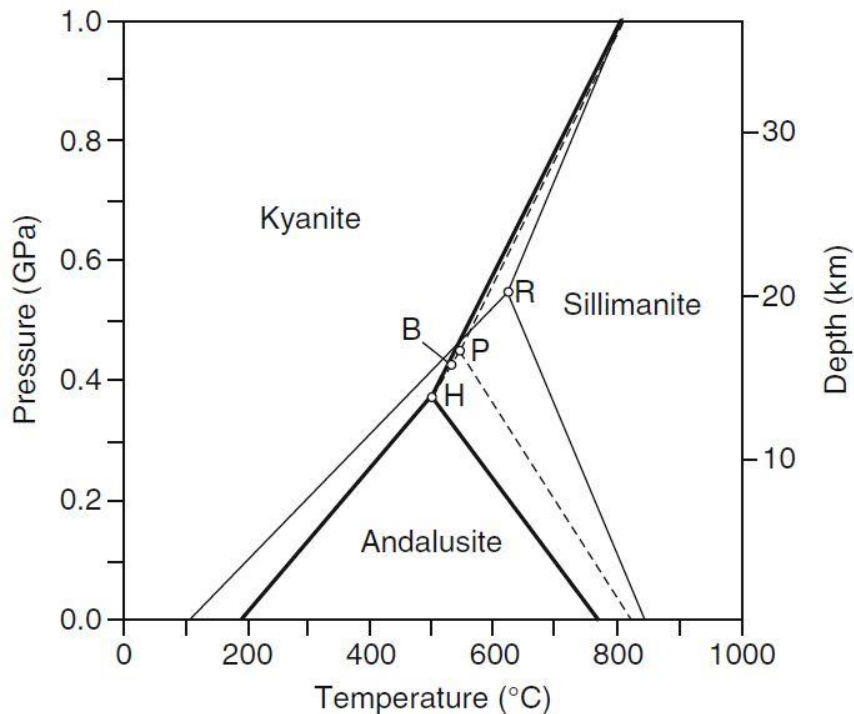
punto triplo Al_2SiO_5 {

- Holdaway, 1971 (dati sperimentali)
- proposto da Greenwood (1976), basato su paragenesi naturali

- - - - - ➔ gradiente termico "normale" = 1HFU
 (fondi oceanici lontani da dorsali; aree continentali stabili lontane dai margini attivi)

Griglia delle FACIES metamorfiche

POLIMORFI Al_2SiO_5



Campi di stabilità di Al_2SiO_5 e localizzazione del punto triplo ottenuto sperimentalmente da :

R = Richardson et al. (1969) : $T = 620^\circ\text{C}$ $P = 5.5 \text{ Kbar}$

H = Holdaway (1971) : $T = 500^\circ\text{C}$ $P = 3.8 \text{ Kbar}$

B = Bohlen et al. (1991) $T = 530^\circ\text{C}$ $P = 4.2 \text{ Kbar}$

P = Pattison (1992) $T = 550^\circ\text{C}$ $P = 4.5 \text{ Kbar}$

e dalla combinazione di osservazioni sul terreno e disponibili dati sperimentali e termodinamici da

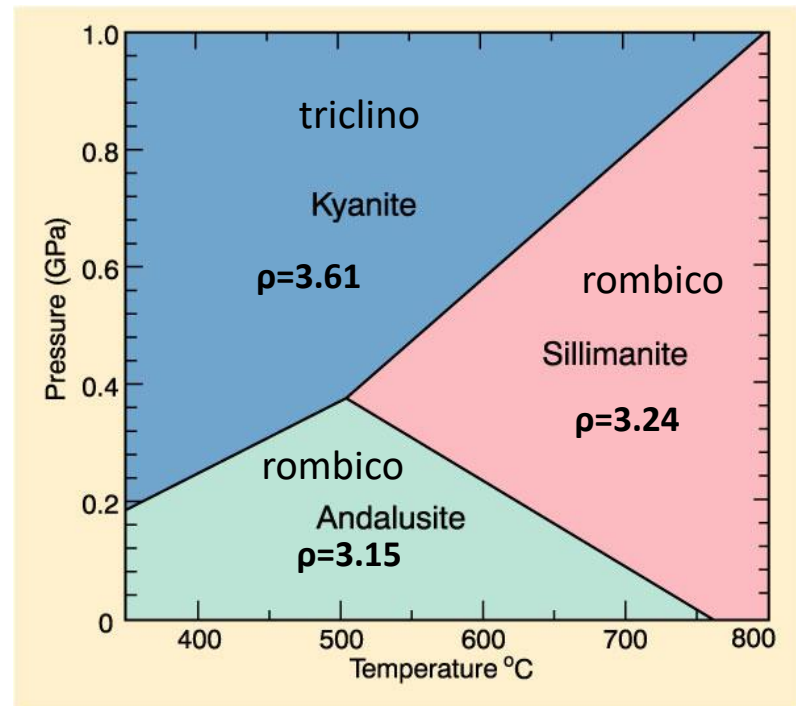
P = Pattison (1992) $T = 550^\circ\text{C}$ $P = 4.5 \text{ Kbar}$

(da Bucher & Grapes, 2011)

CIANITE

ANDALUSITE

SILLIMANITE



secondo Holdaway, 1971

Nesosilicati importanti per individuare:

- ▶ **FACIES** (indicazione P-T delle rocce)
 - cianite: da bassa ad alta T, alta/altissima P
 - andalusite: medio-alta T, bassa/issima P
 - sillimanite: alta T , P variabile
- ▶ **PROTOLITO** : sedimentario ricco in Al, di tipo pelitico

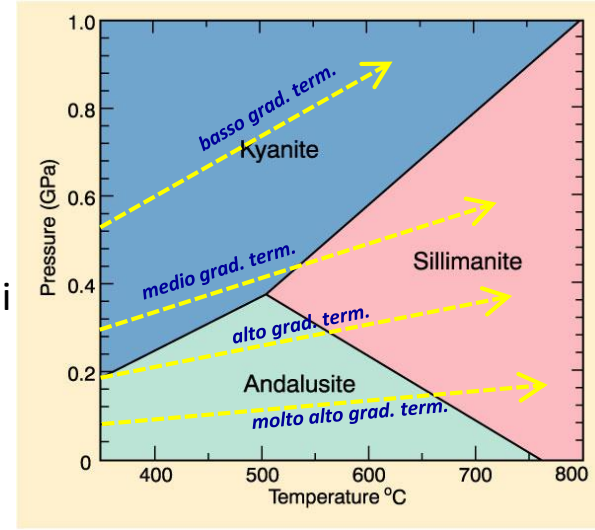


POLIMORFI Al_2SiO_5

Cianite (distene)

Cristalli tabulari allungati di colore azzurro cielo, trasparenti o traslucidi

Metamorfismo regionale di alta P
basso-medio gradiente termico
MAI in metamorfismo di contatto



andalusite

Cristalli prismatici tozzi, a sezione quadrata, di colore rosato, bruno o rosso, traslucidi o opachi

Met. regionale di alta T (alto gradiente termico)
Met. contatto (molto alto grad.term.)



sillimanite

Cristalli aciculari, di colore grigio, bruno o verde chiaro, spesso in aggregati fibrosi (detta fibrolite), trasparenti o traslucidi

Met. regionale di alta T (medio-alto gradiente termico)
Met. contatto (molto alto grad.term.)



cianite



cianite

1 cm

granato

Scisti a cianite e granato

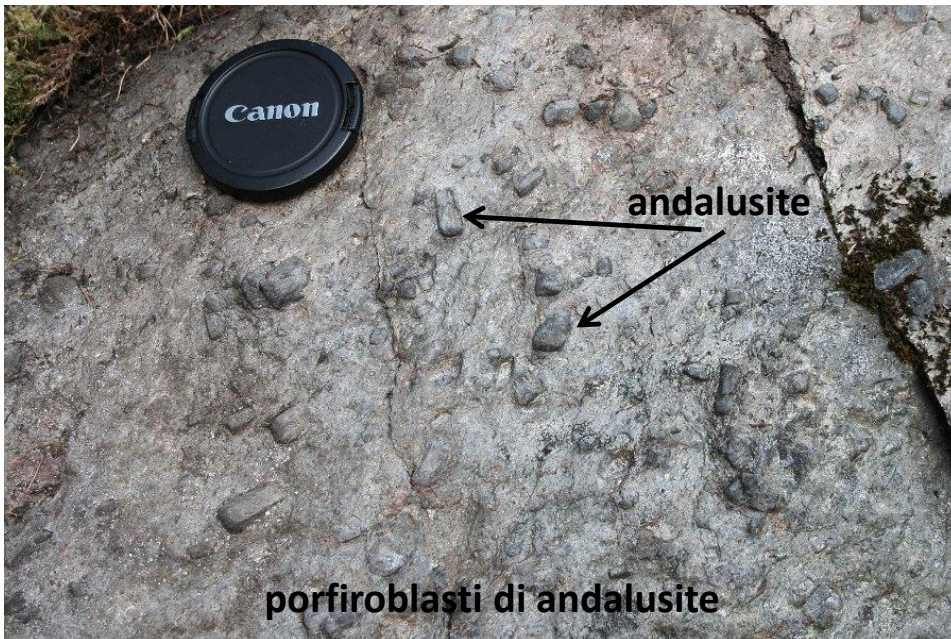


cianite

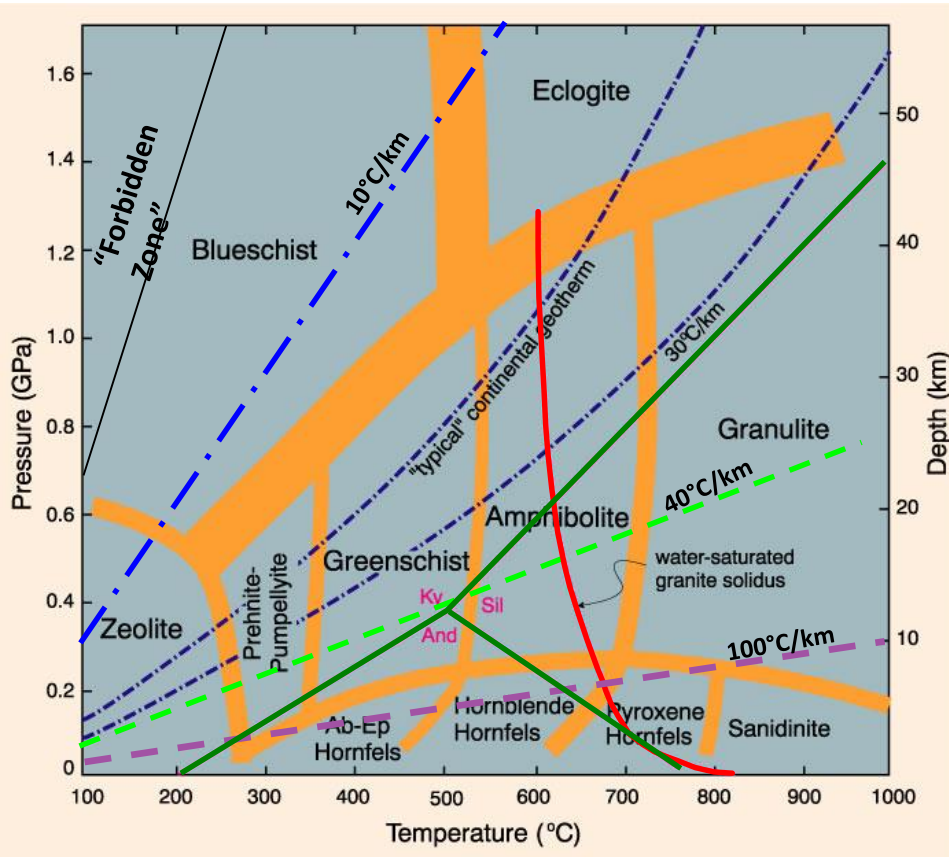
granato

ANDALUSITE

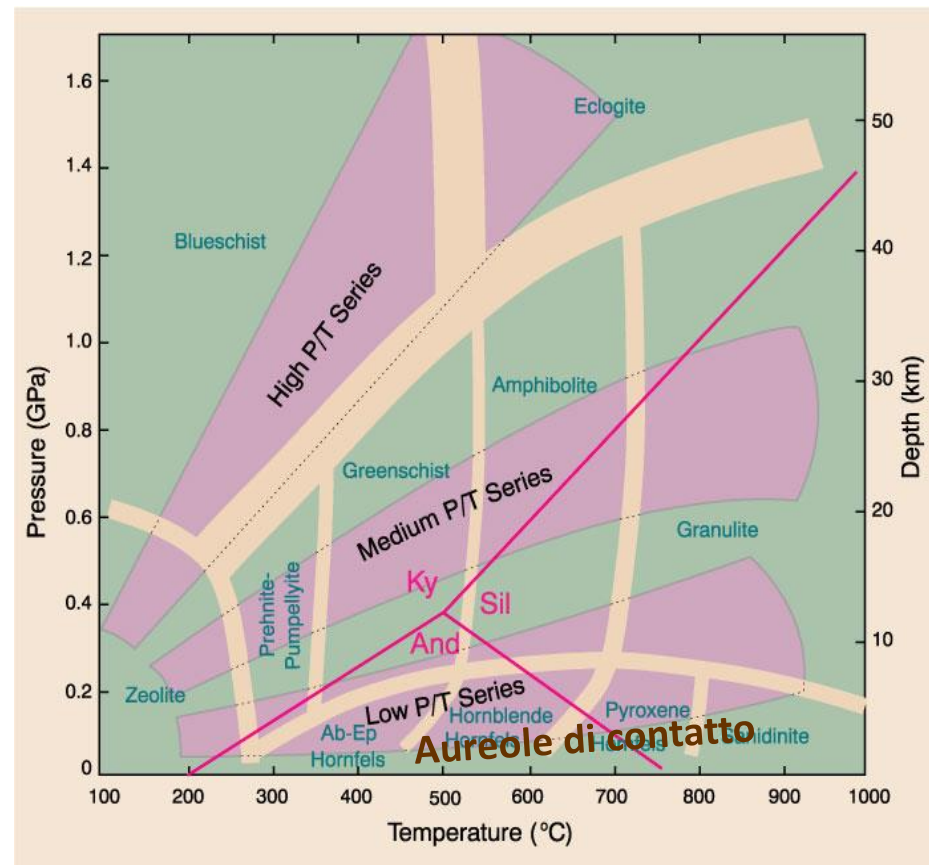
varietà chiastolite : contiene fini inclusioni carboniose scure, inglobate durante la crescita del cristallo e orientate in modo da formare una croce in sezione trasversale



FACIES –SERIE DI FACIES METAMORFICHE – CONTESTO GEODINAMICO

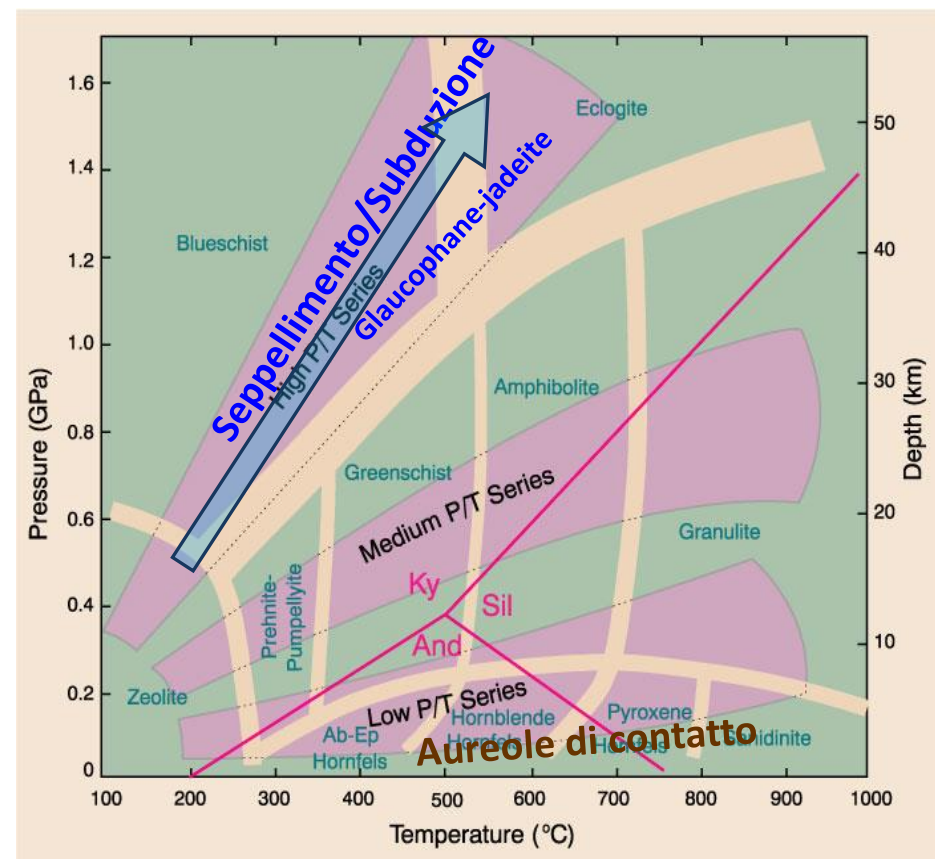
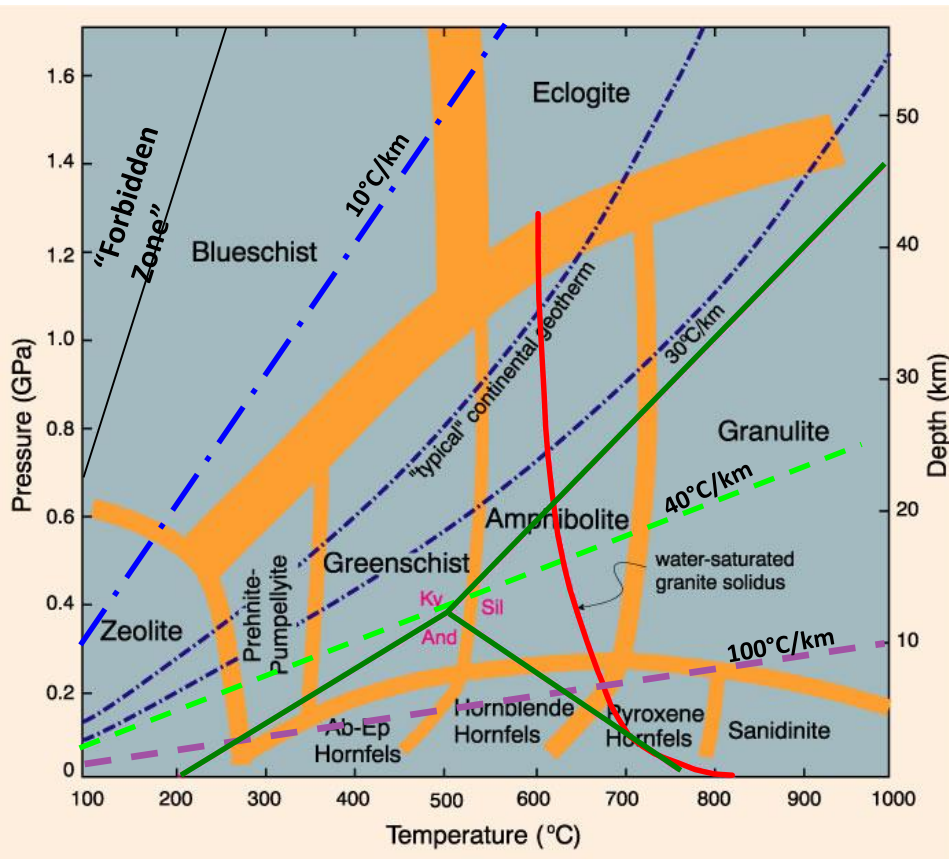


griglia delle facies, gradienti termici, curva di anatesi di granito a $P_{lit} = P_{H_2O}$ e campi di stabilità dei polimorfi Al_2SiO_5 (Holdaway, 1976)



Le 3 fondamentali serie di facies metamorfiche, relate a diversi contesti geotettonici e prodotte da diversi gradienti geotermici

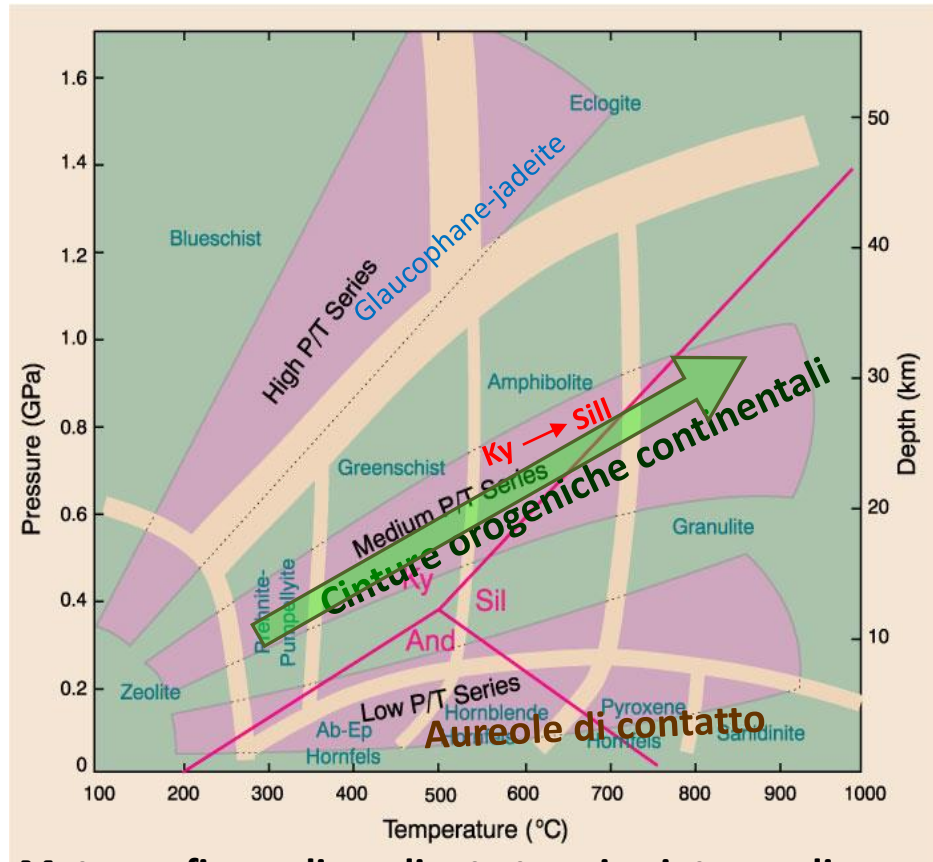
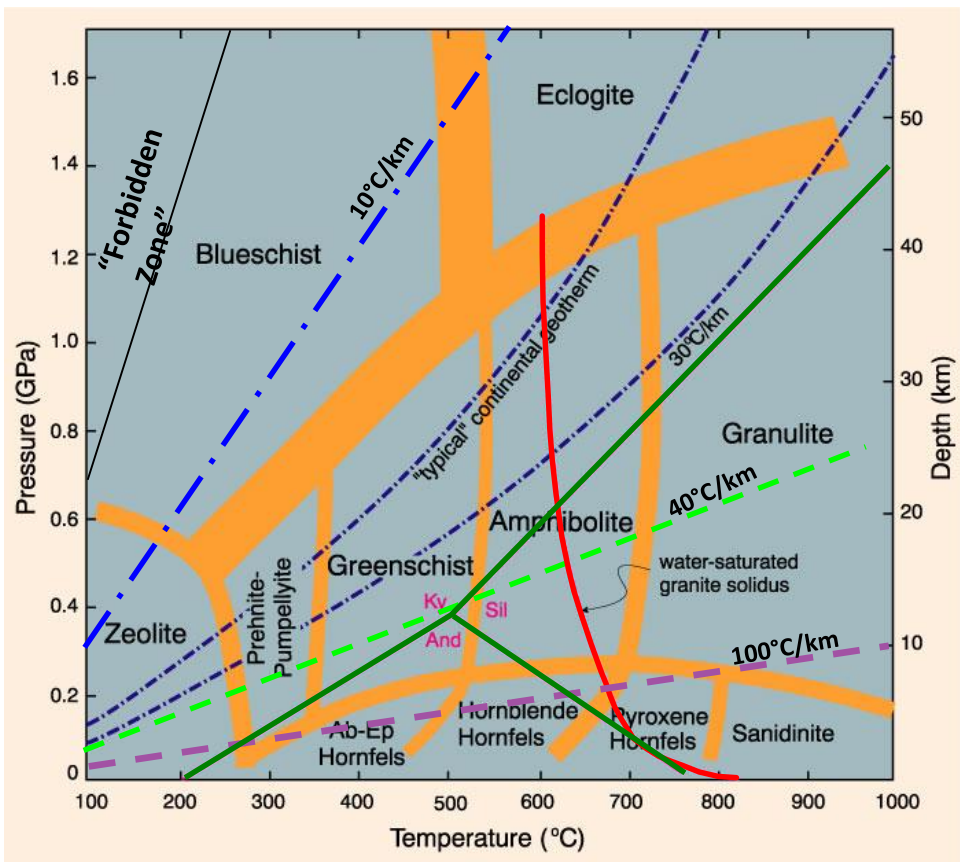
FACIES –SERIE DI FACIES METAMORFICHE – CONTESTO GEODINAMICO



griglia delle facies, gradienti termici,
 curva di anatessi di granito a $P_{lit} = P_{H_2O}$
 e campi di stabilità dei polimorfi Al_2SiO_5

Metamorfismo di basso gradiente termico
 (<15°C/km) , o di alta P e bassa T (=alto P/T)
Zone di seppellimento/subduzione
 Facies caratteristiche: scisti blu-eclogite
 Comparsa di **glaucofane** (anfibolo) che per il suo
 colore blu dà il nome alla facies : **FACIES SCISTI BLU**

FACIES –SERIE DI FACIES METAMORFICHE – CONTESTO GEODINAMICO



griglia delle facies, gradienti termici,
 curva di anatesi di granito a $P_{lit} = P_{H_2O}$
 e campi di stabilità dei polimorfi Al_2SiO_5

IP=intermedia Pressione

Metamorfismo di gradiente termico intermedio
 (15-40°C/km) = medio P/T)

Zone di collisione: catene orogeniche continentali

Serie metamorfiche di tipo Barroviano

Sequenza facies di IP: sc.verdi-anfibolite-granulite

Serie metamorfiche a cianite – sillimanite

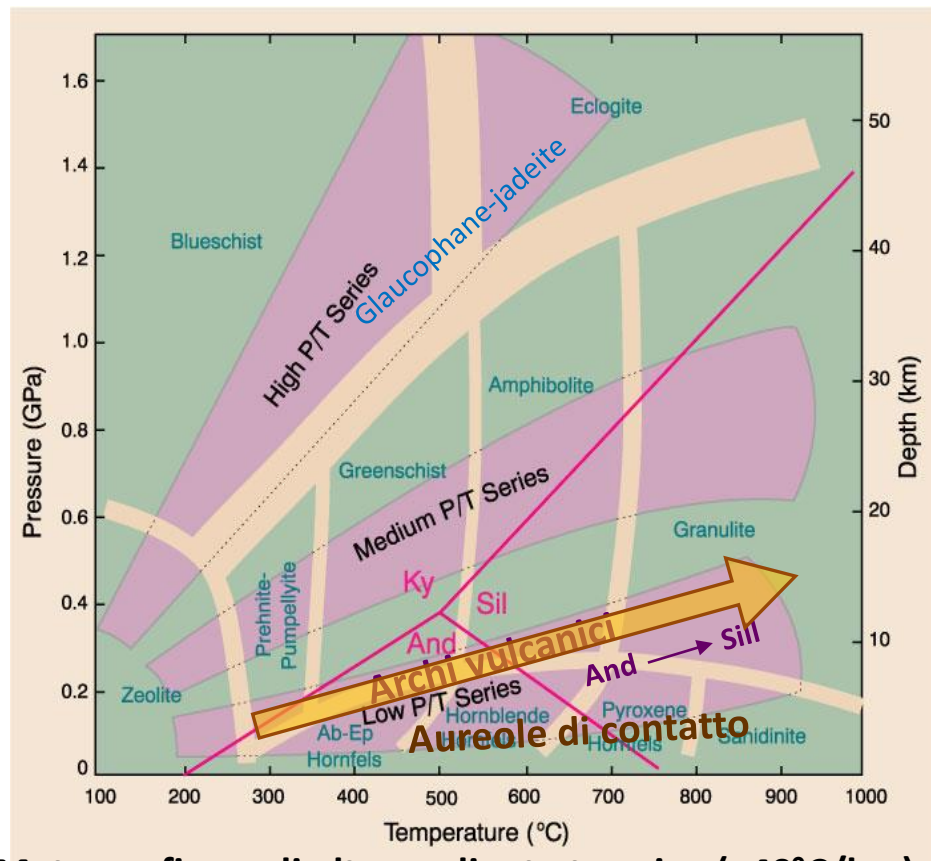
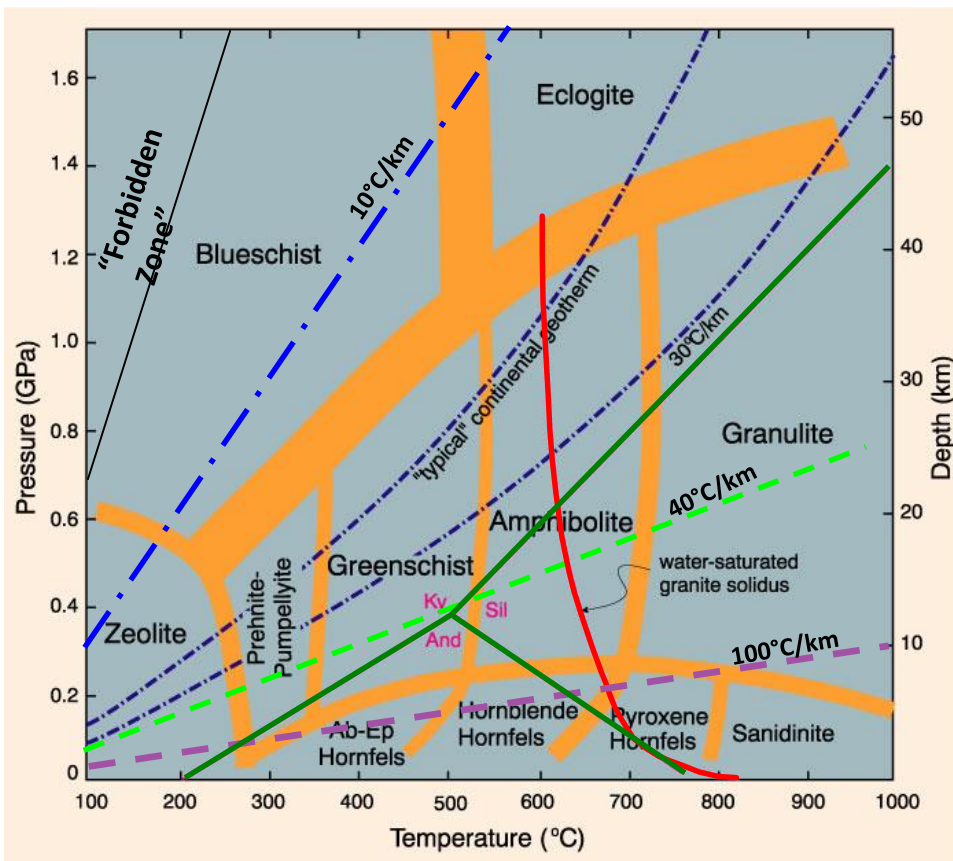
per T crescente in rocce pelitiche:

Clorite-biotite-granato-stauroilite-cianite-sillimanite

Presenza di Fe-granato (almandino)

Assenza di andalusite e cordierite

FACIES –SERIE DI FACIES METAMORFICHE – CONTESTO GEODINAMICO



griglia delle facies, gradienti termici,
 curva di anatesi di granito a $P_{lit} = P_{H_2O}$
 e campi di stabilità dei polimorfi Al_2SiO_5

BP=bassa Pressione

Metamorfismo di alto gradiente termico ($>40^\circ C/km$)
 o di bassa P e alta T (=basso P/T)

Cinture orogeniche con alto flusso di calore, archi vulcanici (+ dorsali oceaniche + met. di contatto)

Sequenza facies: sc.verdi-anfiboliti-granuliti MA di BP

Serie metamorfiche a andalusite – sillimanite

a T crescente in r.pelitiche:

Clorite-biotite-**andalusite-cordierite**-sillimanite

Presenza di andalusite e cordierite

Assenza di staurolite, cianite e granato