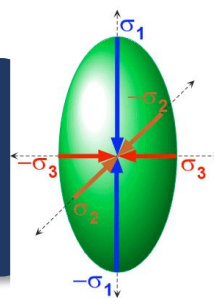


Geologia generale pt. 2:
*Strutture geologiche e
meccanismi di deformazione
delle rocce*

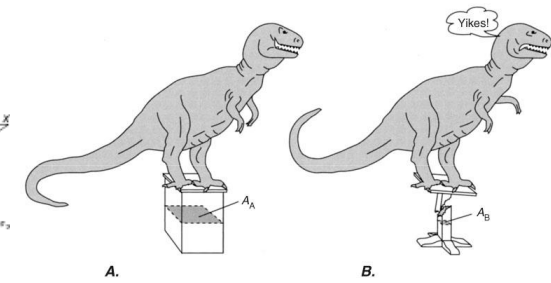
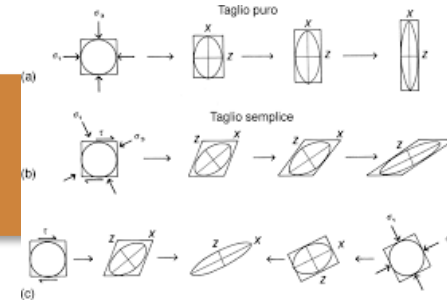
Pieruccioni Diego

diegopieruccioni@isprambiente.it

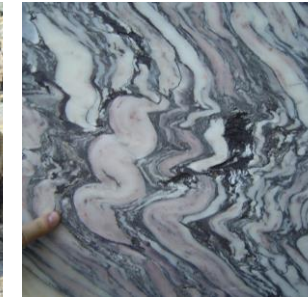
Definizione di geologia strutturale e deformazione



Concetti generali di stress e strain



Pieghe



Faglie e zone di taglio



La geologia strutturale

La **geologia strutturale** studia le strutture derivanti dalla **deformazione** delle rocce, studia la geometria della crosta e le modalità con cui è stata acquisita.



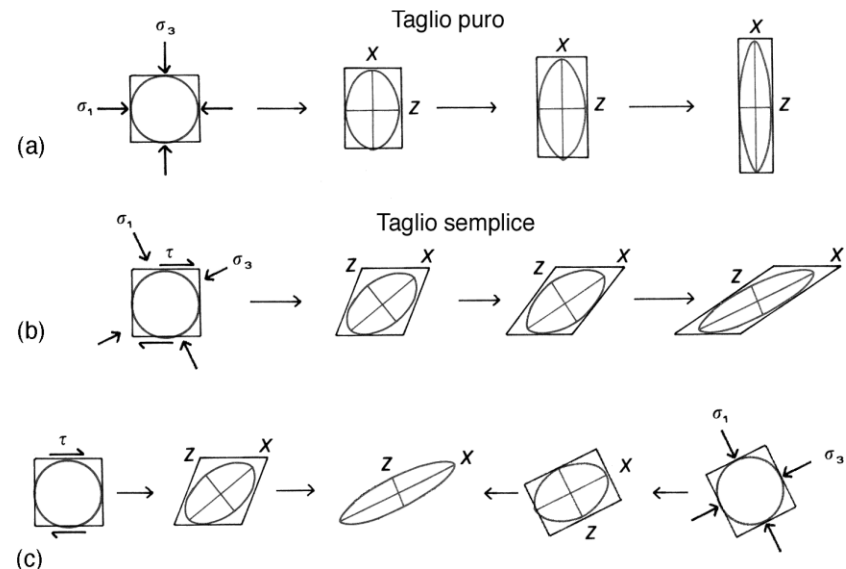
La deformazione

Il termine **deformazione** è un termine generale che indica ogni cambiamento di forma o di volume della roccia.

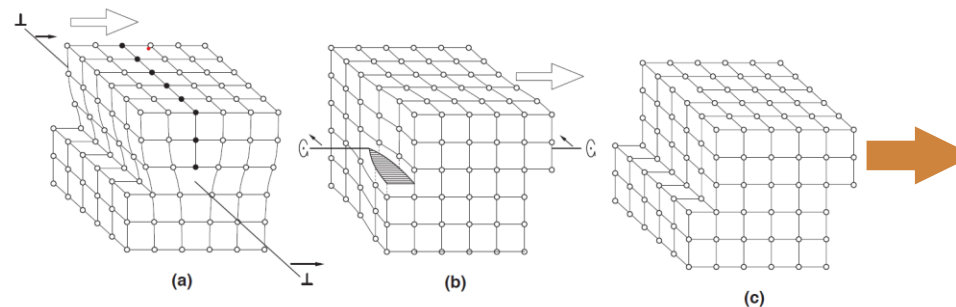
Avviene **a tutte le scale**, da quella atomica/cristallina alla scala dell'intera catena montuosa, ed è il risultato di applicazioni di forze sulle rocce (es. due placche che collidono).



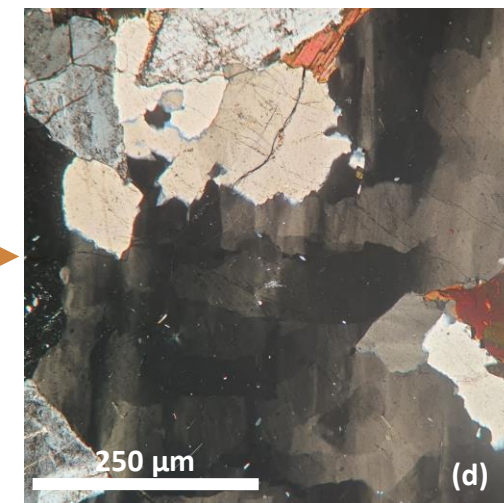
Piega (sinclinale) nel fianco della monte Sichelchamm, in Svizzera (da Bernhard Edmaier Photography).



Tipi di deformazione, X, Z: asse maggiore e minore dell'ellisse della deformazione. (a) Deformazione progressiva per taglio puro. (b) Deformazione progressiva per taglio semplice. Si noti che per incrementi infinitesimi di deformazione gli assi X e Z sono orientati a 45° rispetto al sigma₁ (c) Il solito oggetto deformato si può ottenere sia per taglio semplice che per taglio puro (più rotazione). (da Conti & Schmid 2020)



Tipi di dislocazioni a scala atomica. (a) Dislocazioni a spigolo. (b) Dislocazioni a vite. (c) Forma finale del cristallo quando le dislocazioni lo hanno attraversato completamente. La freccia bianca indica la direzione di spostamento del reticolo cristallino (da Conti & Schmid 2020). (d) Estinzione a scacchiera in un cristallo di quarzo di un granito deformato dell'Isola Asinara (NW Sardegna).

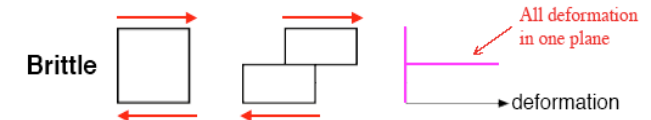
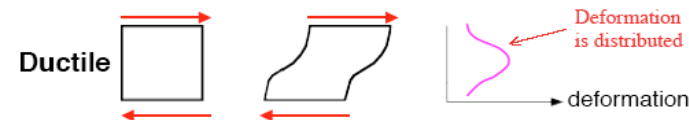
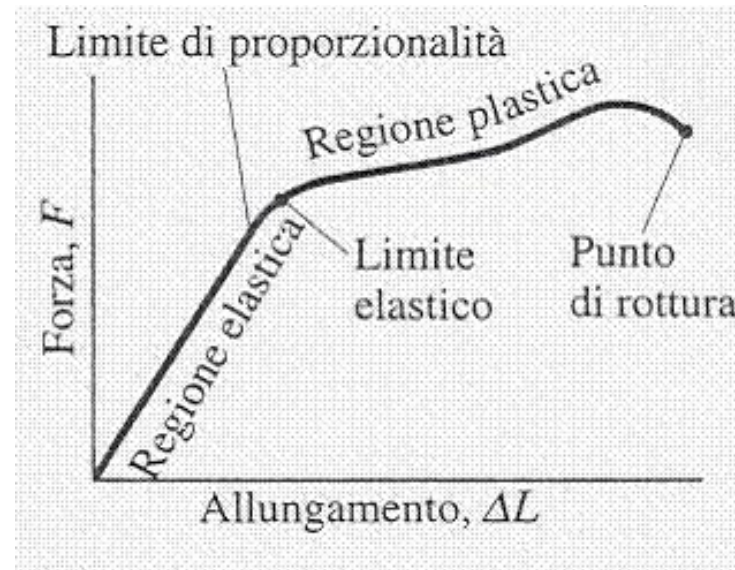


La deformazione

Se sottoponiamo un corpo a delle forze variamente orientate esso si deforma.

I materiali si comportano in maniera **elastica**, la deformazione è proporzionale allo sforzo applicato, finché non raggiunge uno sforzo critico (**limite elastico**) oltre il quale i materiali fragili si deformano per fratturazione, mentre quelli duttili si deformano per flusso o scorrimento.

Il limite elastico è funzione di **temperatura** e **pressione** in natura però dobbiamo anche considerare la variabile **tempo** (strain rate, ovvero tasso di deformazione nel tempo)!!



La deformazione

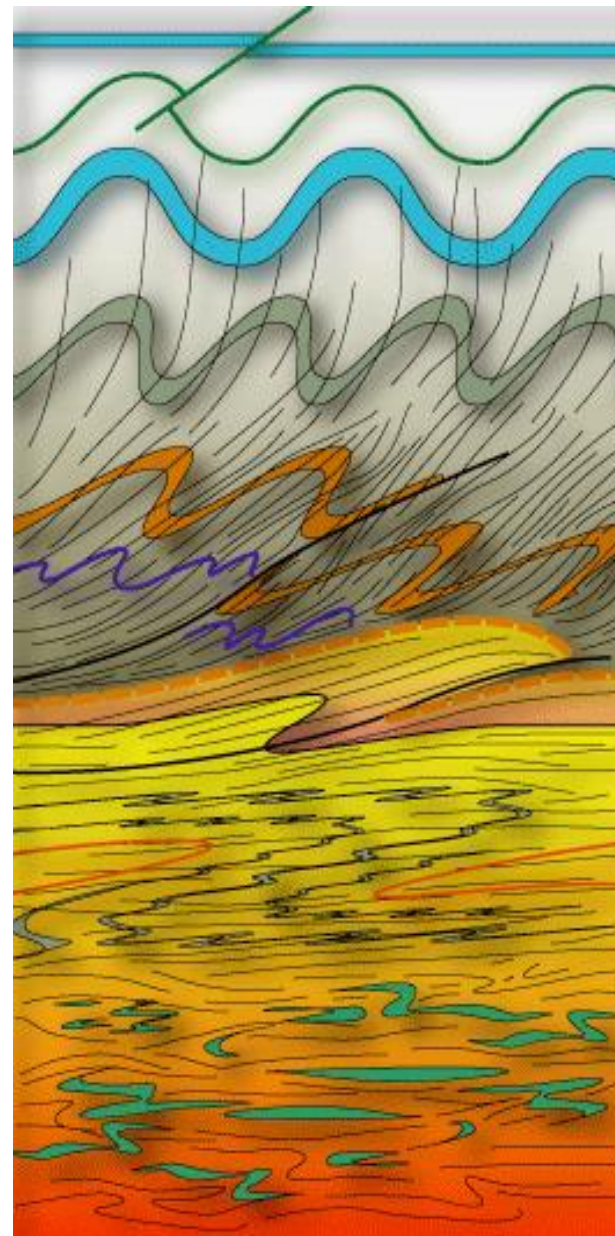
Il limite elastico è per lo più funzione della temperatura e della pressione, che quindi controllano il comportamento dei materiali.

- La pressione aumenta con la profondità con un tasso di 33 MPa/Km o **0,33 Kbar/Km**: ciò è dovuto al carico litostatico delle rocce sovrastanti e, in certe aree della terra, anche a forze tettoniche.
- La temperatura aumenta con la profondità ad un tasso medio di circa **25°C/Km** e ha l'effetto di favorire il comportamento plastico dei materiali (esempio: cera; lava che fuoriesce da un vulcano).

Quindi, le rocce mostreranno diversi tipi di deformazione e strutture a seconda della profondità a cui sono state deformate.

Pressione e temperatura

Profondità



Faglie

Pieghe aperte con rare foliazioni di piano assiale

Pieghe da chiuse a isoclinali

Pieghe isoclinali con foliazione penetrativa di piano assiale

Trasposizione tettonica

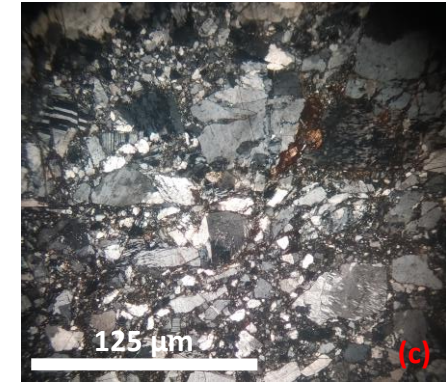
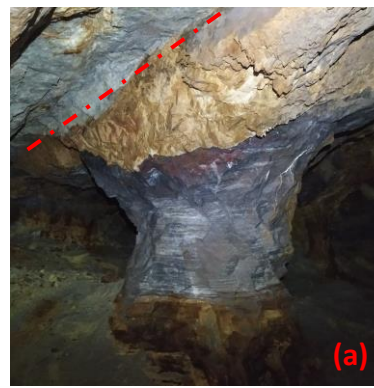
Fusione parziale delle rocce

La deformazione

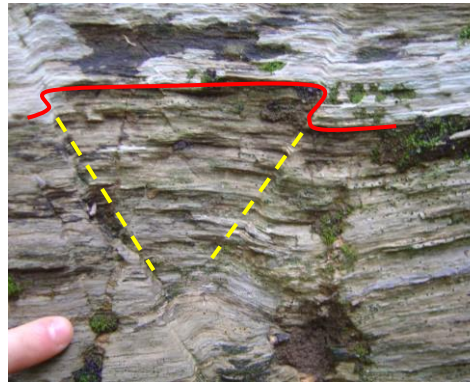
Schematizzando (molto!!) abbiamo che:

- nei **primi 10 Km** della crosta le rocce mostrano un comportamento **fragile** e rispondono alle deformazioni con fratture e faglie (livello strutturale superiore);
- tra **10 e 15 Km** avviene la transizione **fragile-duttile** ovvero il passaggio graduale tra il comportamento fragile e il comportamento plastico: questa transizione segna un livello importante, al di sotto del quale le rocce sono più deboli da un punto di vista meccanico;
- al di **sotto dei 15 Km** la deformazione delle rocce avviene in maniera **plastica**; tipiche strutture sono le pieghe, la presenza di superfici pervasive nelle rocce (foliazioni) e zone di taglio duttili associate a migmatiti.

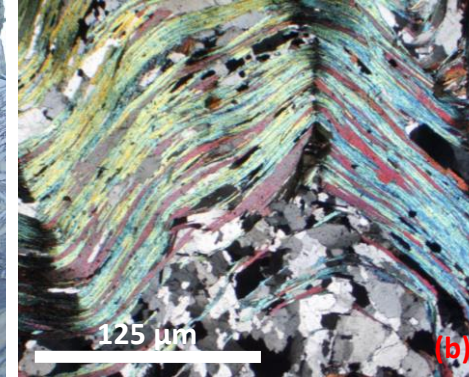
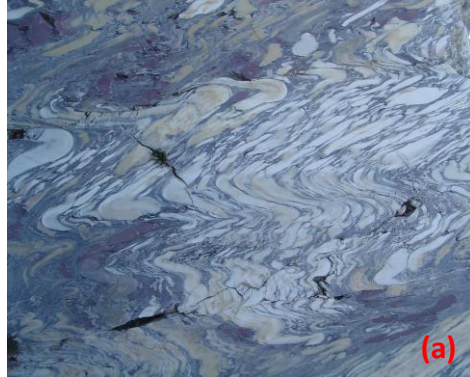
Fragile



(a-b) Faglie in metadolomie (Alpi Apuane); (c) cataclasite in sezione sottile (Isola Asinara; NW Sardegna)



Box-fold (Piegia a scatola) in scisti sericitici (Alpi Apuane)



(a) Pieghe chiuse in marmo (Alpi Apuane); (b) micropiegia in micascisti (Sardegna; da www.alexstrekeisen.it); (c) Zona di taglio duttile in migmatiti (SE Corsica)

Duttile

La deformazione (strain)

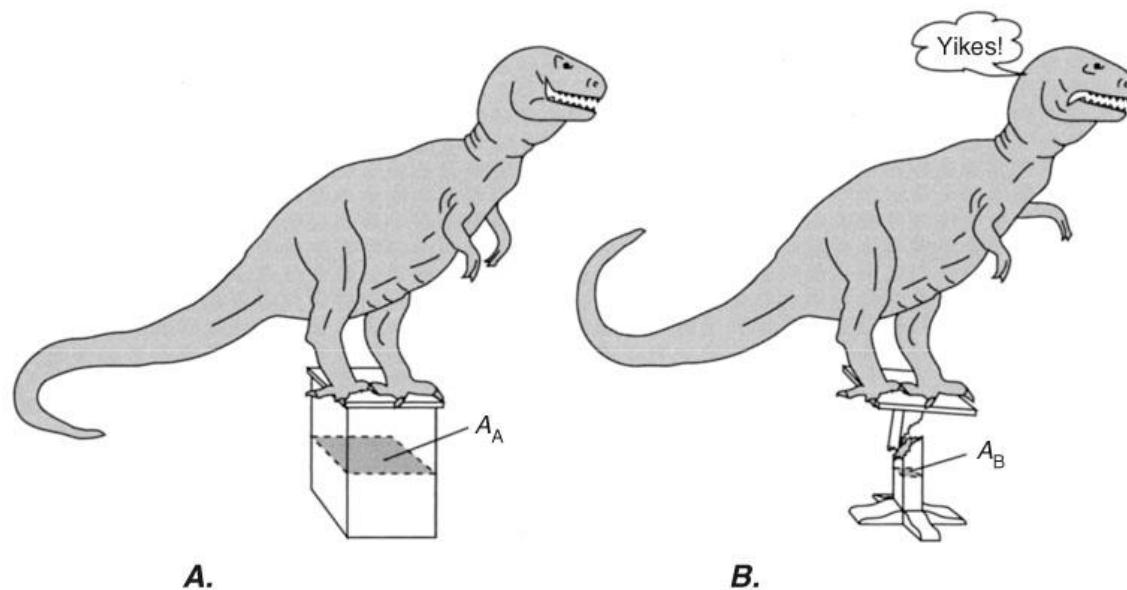
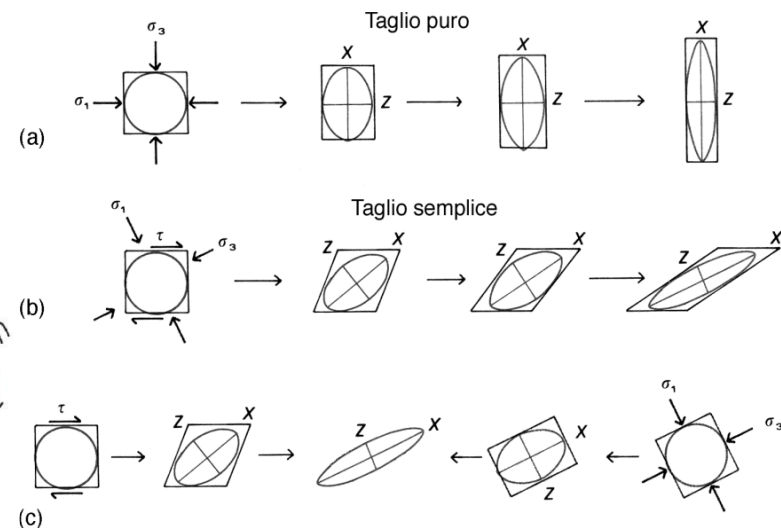
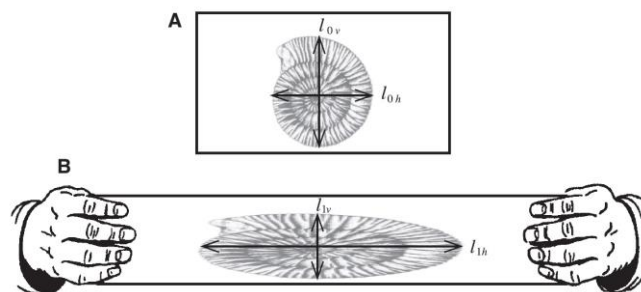
Quando applichiamo delle forze su un materiale produciamo dei cambiamenti fisici nel materiale, cioè si ha una deformazione (**strain**).

Le forze che agiscono su una porzione di una roccia producono una certa quantità di STRESS. La quantità di deformazione, causata dallo stress è misurata dal cambiamento di forma e/o volume. Questi cambiamenti costituiscono la **distorsione s.s.** o **strain**.

Esiste una differenza tra **forza** e **stress**.

Lo **stress** è definito come una coppia di forze uguali ed opposte che agiscono per unità di area di un corpo. Quindi **lo stress non va confuso con la forza** perché dipende, oltre che dalla grandezza della forza anche dalla grandezza e dalla orientazione della superficie sulla quale agisce.

$$\text{STRESS} = \text{FORZA} / \text{AREA}$$



Lo stress

Se consideriamo un sistema (per es. un cubo di roccia) sollecitato da un insieme di forze, ci sono nove componenti dello stress, 3 su ciascuna faccia del cubo (gli stress su facce opposte sono identici).

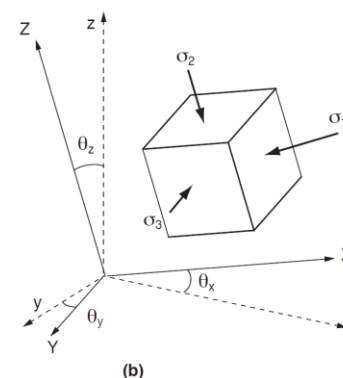
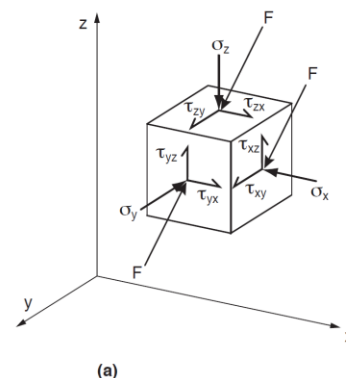
In ogni punto di un campo di stress esistono 3 piani tra loro perpendicolari sui quali le componenti di taglio sono nulle detti **piani principali dello stress**.

Gli stress normali a questi piani sono detti **assi principali dello stress** e sono indicati con σ_1 , σ_2 , σ_3 .

Per convenzione si assume che $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$.

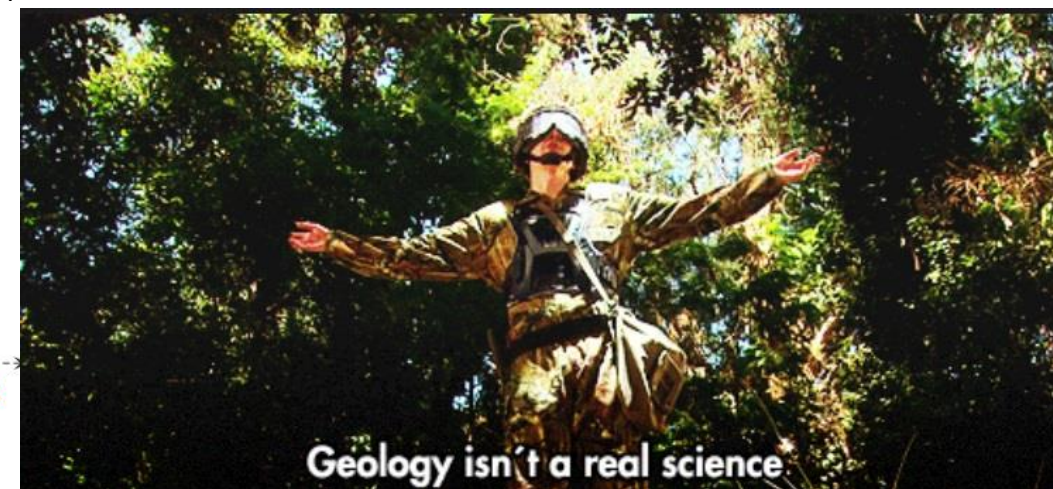
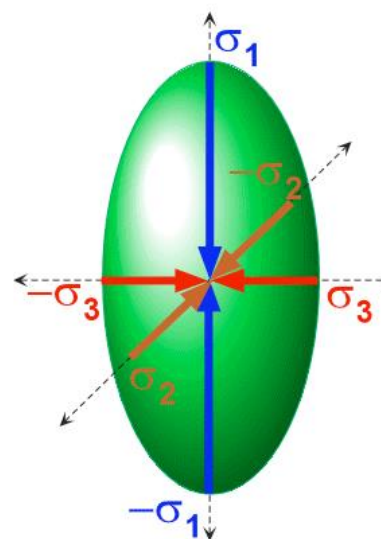
Questi assi definiscono un ellissoide a triassiale detto **ellissoide dello stress**.

Per convenzione si assume che gli stress compressivi sono POSITIVI mentre quelli tensili sono NEGATIVI



$\frac{\partial T_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial T_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial T_{zx}}{\partial z} + b_x = 0,$	Forma scalare
$\frac{\partial T_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial T_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial T_{zy}}{\partial z} + b_y = 0,$	"
$\frac{\partial T_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial T_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial T_{zz}}{\partial z} + b_z = 0.$	"
$T_{ji,j} + b_i = 0 \quad (i = 1, 2, 3)$	Forma indiciale
$\begin{bmatrix} \partial T_{11}/\partial x_1 & \partial T_{21}/\partial x_2 & \partial T_{31}/\partial x_3 \\ \partial T_{21}/\partial x_1 & \partial T_{22}/\partial x_2 & \partial T_{32}/\partial x_3 \\ \partial T_{13}/\partial x_1 & \partial T_{23}/\partial x_2 & \partial T_{33}/\partial x_3 \end{bmatrix} + \begin{Bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix}; \quad \text{Div}T + \mathbf{b} = \mathbf{0}$	Forma matriciale / tensoriale

(a) Componenti dello sforzo per un cubo infinitesimo sottoposto ad una coppia di forze compressive F in un sistema di coordinate x, y, z. (b) In un nuovo sistema di riferimento X,Y,Z è possibile definire un nuovo cubo infinitesimo con una nuova orientazione sulle cui facce gli sforzi di taglio sono nulli, gli sforzi ortogonali a tali facce sono gli sforzi principali σ_1 , σ_2 e σ_3 .



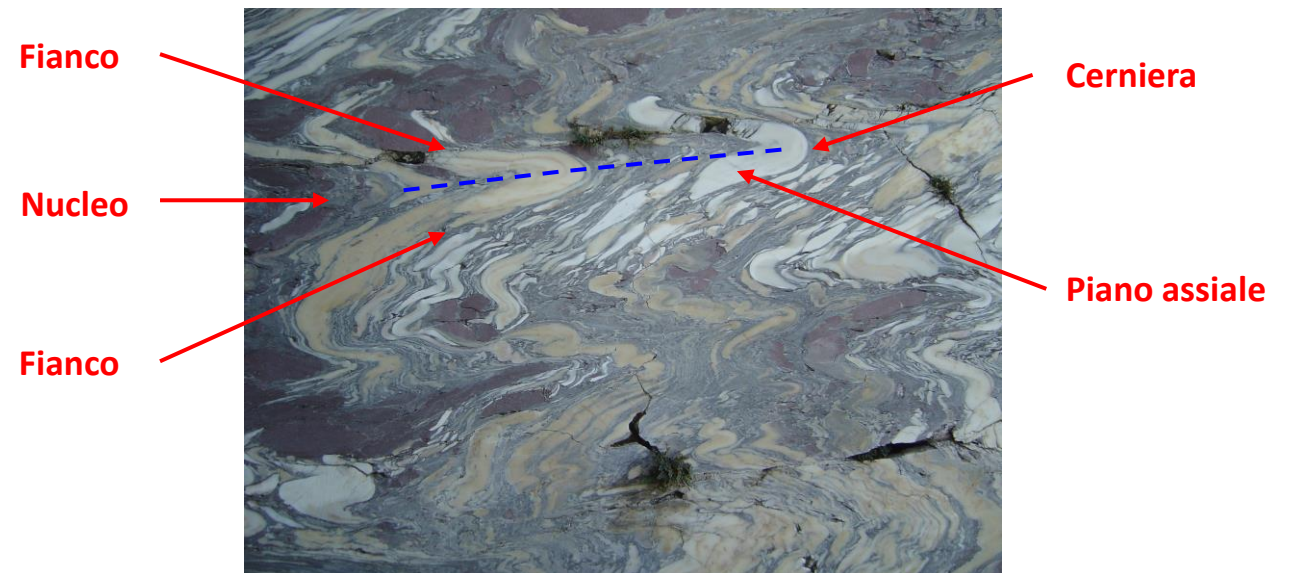
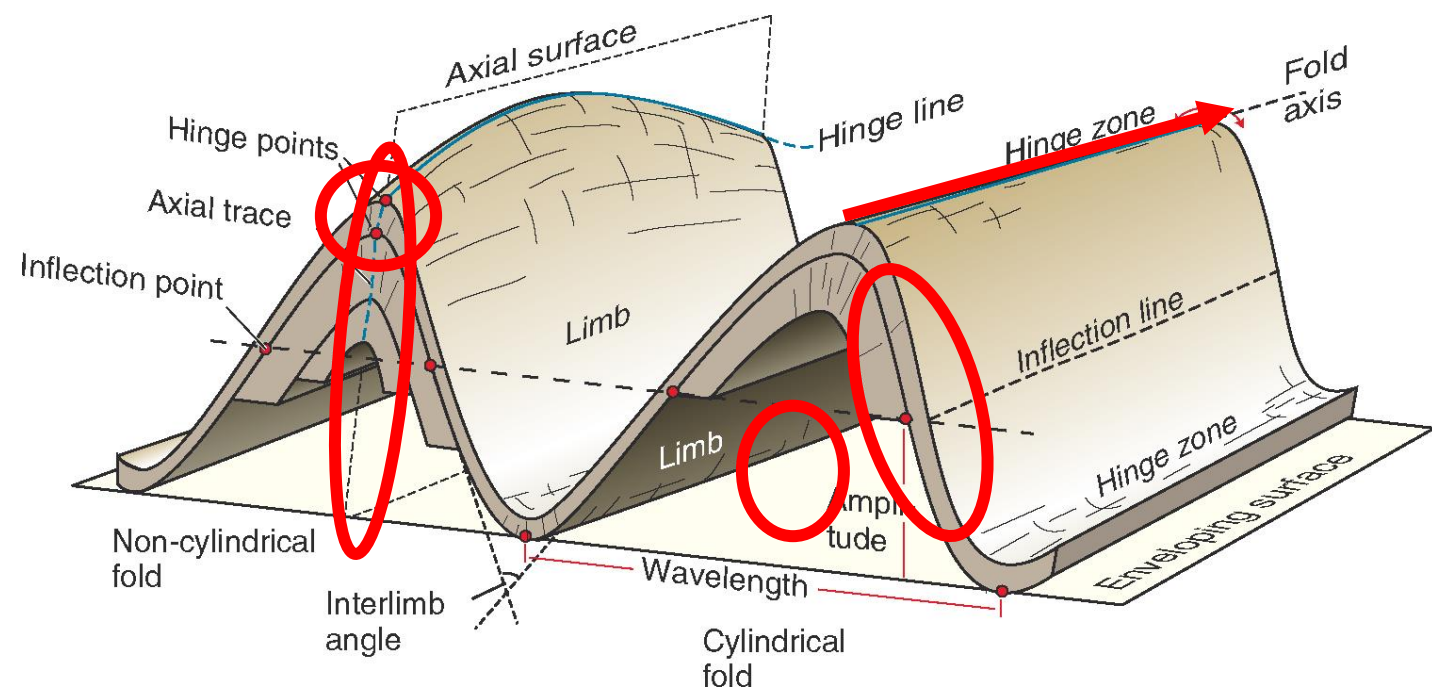
Alla base della comprensione dei meccanismi di deformazione delle rocce c'è una complessa trattazione matematica delle forze in gioco!!

Le pieghe

In ambito geologico viene definita piega una deformazione duttile di masse rocciose nella quale alcune superfici, in origine planari (es. strati di rocce sedimentarie, foliazioni metamorfiche), vengono piegate o curvate.

Si distinguono, pertanto, in una piega:

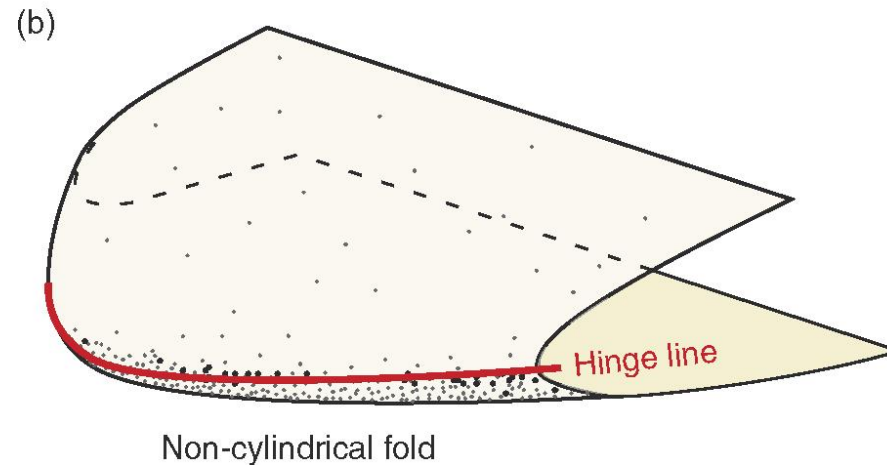
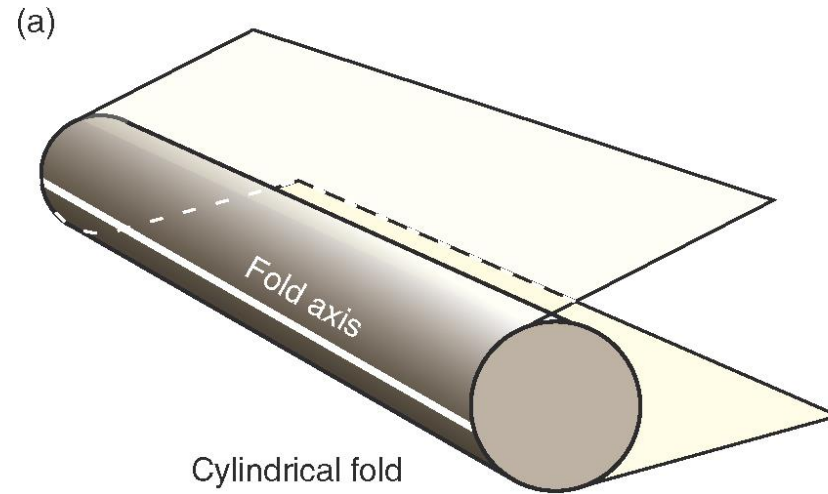
- **la cerniera** (hinge zone), ossia la parte di massima curvatura;
- **i fianchi** (limbs) sono le superfici laterali della piega;
- **il piano assiale** (axial surface), ossia il piano sul quale giacciono tutti i punti di massima curvatura di tutte le superfici piegate;
- **il nucleo**, ossia la parte più interna, lungo la quale passa il piano assiale della piega;
- **l'asse della piega** (fold axe), ossia l'intersezione del piano assiale con una delle infinite superfici deformate della piega stessa.



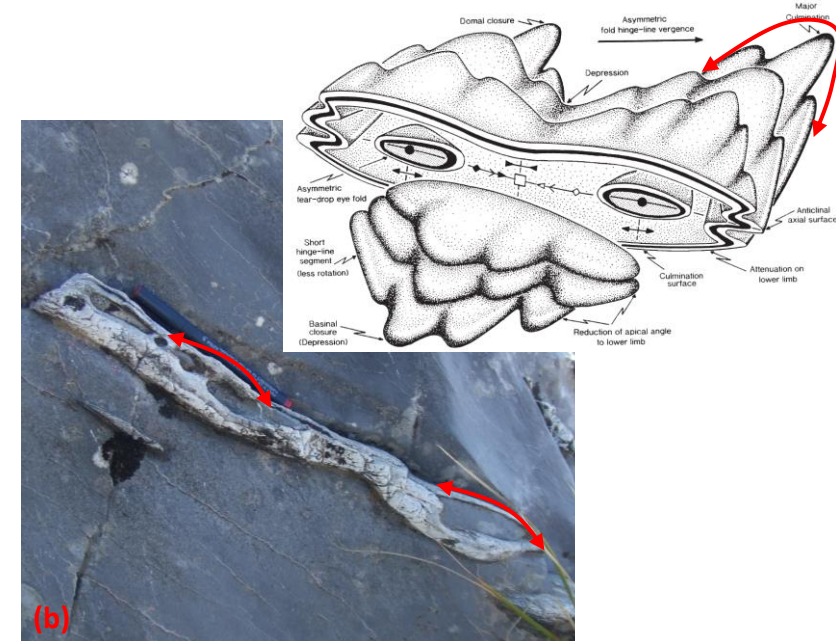
La classificazione delle pieghe

Le pieghe possono essere ulteriormente suddivise in:

- **cilindriche** (cylindrical fold) quando l'asse della piega rimane rettilineo;
- **non cilindriche** (non cylindrical fold) o pieghe guaina (sheath fold) quando l'asse è incurvato.



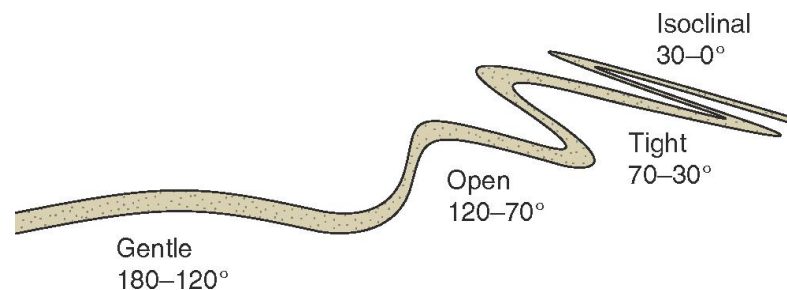
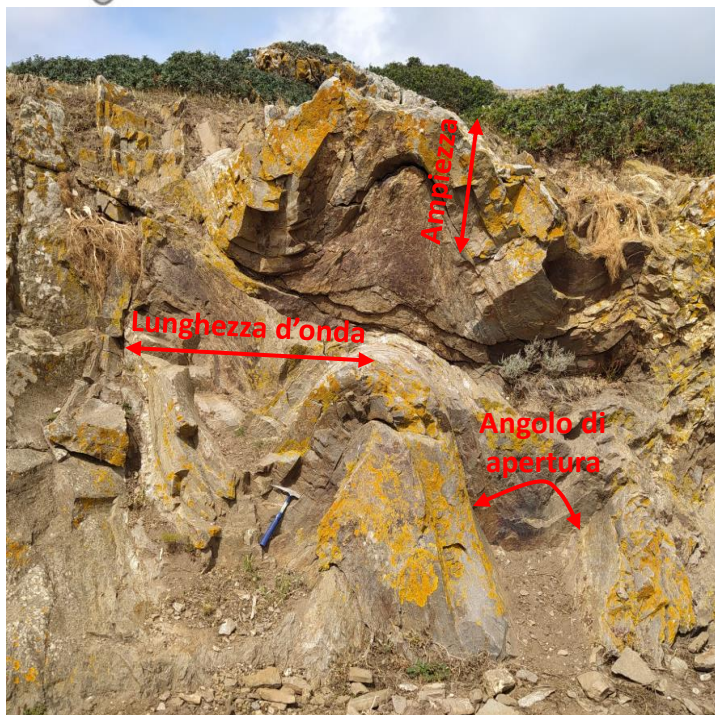
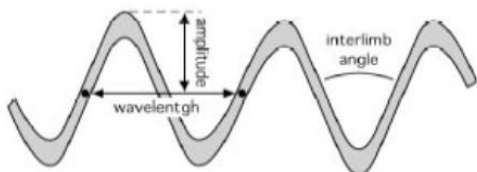
(a) Piegatura cilindrica (cylindrical fold) (b) Piegatura non cilindrica (non-cylindrical fold) (da Fossen, 2016)



(a) Piegatura cilindrica (Isola Asinara) (b) Piegatura non cilindrica (Alpi Apuane)

La classificazione delle pieghe

Le pieghe possono essere classificate in base ad ampiezza (amplitude), lunghezza d'onda (wavelength), e angolo di apertura (interlimb angle).



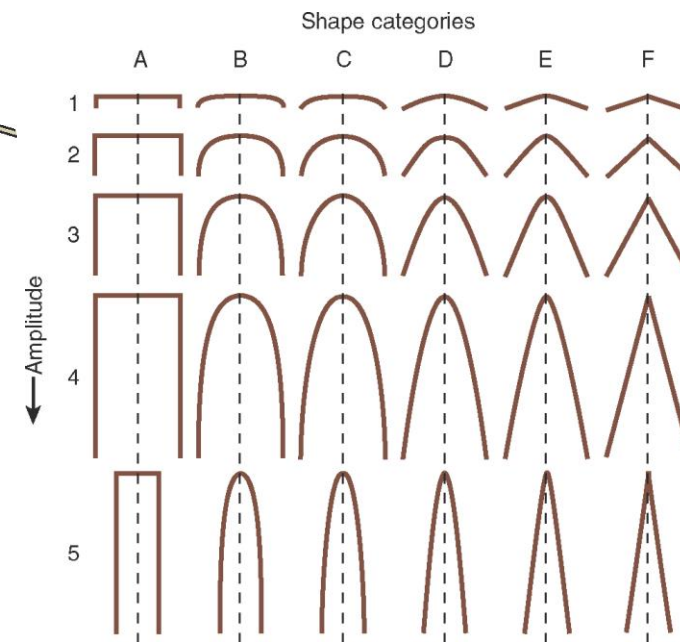
Classificazione basata sull'angolo di apertura (da Fossen, 2016)

Angolo di apertura (θ)

Le pieghe possono essere classificate sulla base del loro angolo di apertura:

- pieghe blande ($120^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$);
- pieghe aperte ($70^\circ \leq \theta \leq 120^\circ$);
- pieghe serrate ($70^\circ \leq \theta \leq 30^\circ$);
- pieghe isoclinali ($0^\circ \leq \theta \leq 30^\circ$).

L'angolo di apertura di una piega è determinato dall'entità della deformazione (strain) che le rocce hanno subito durante i vari eventi compressivi. Pieghe aperte indicano bassa deformazione, mentre pieghe isoclinali indicano invece un'intensa deformazione.



Classificazione basata sull'ampiezza e sulla forma (da Hudleston, 1973)

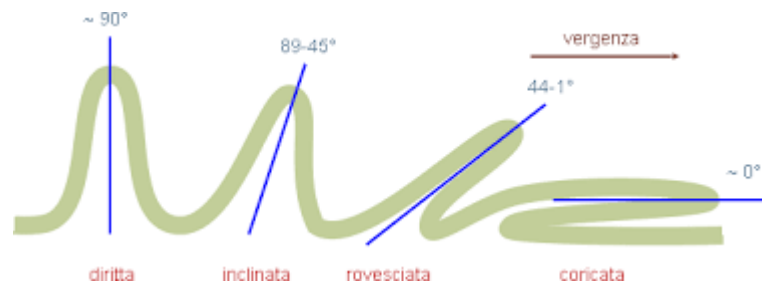
Ampiezza e forma della cerniera

L'analisi armonica (trasformazione di Fourier) può essere applicata nella descrizione della forma della piega.

$$f(x) = b_1 \sin x + b_3 \sin 3x + b_5 \sin 5x \dots$$

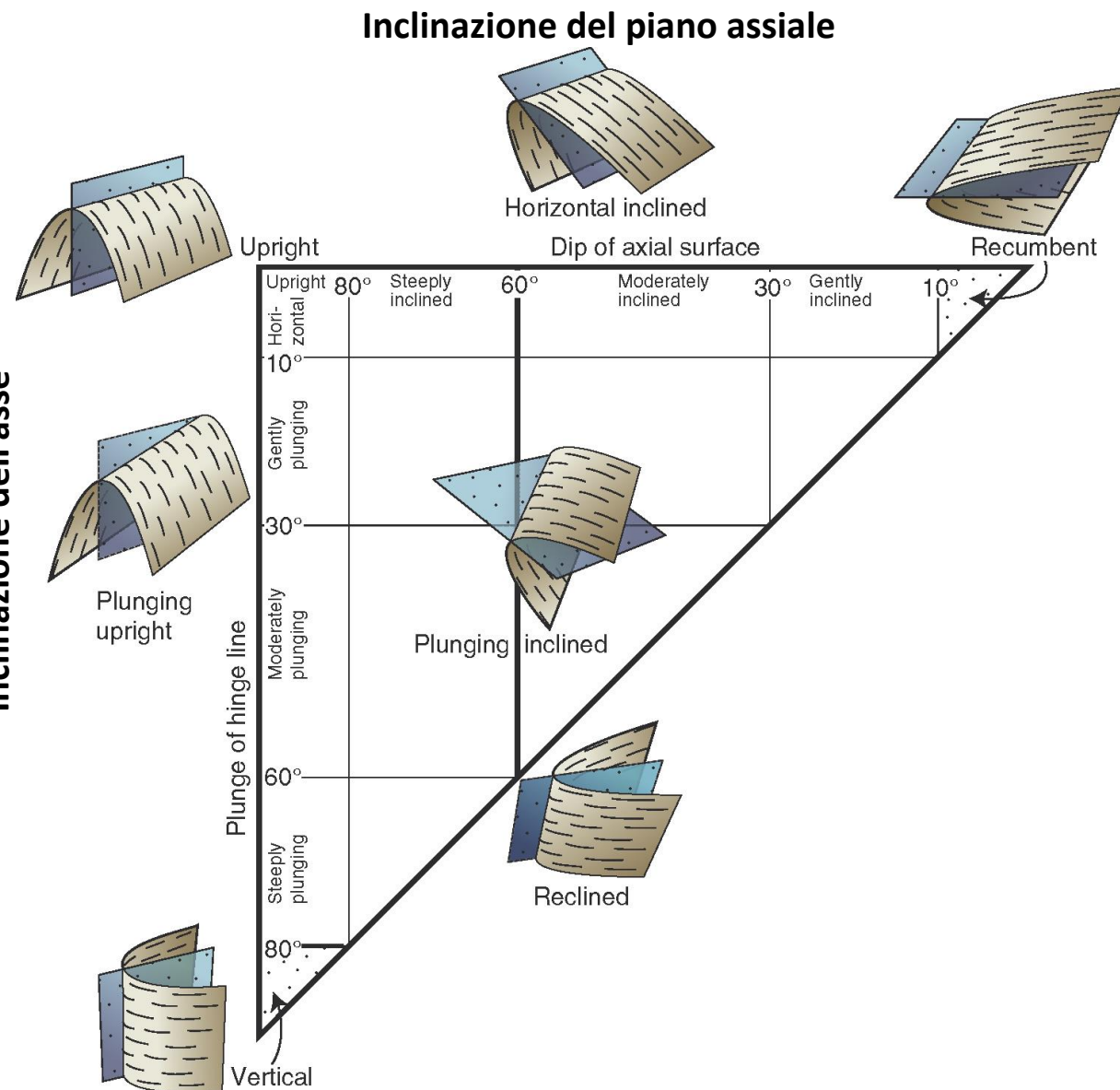
La classificazione delle pieghe

Le pieghe possono essere classificate in base alla giacitura del loro piano assiale e l'inclinazione del loro asse.



(a) Piega aperta rovesciata e (b) piega isoclinal coricata in micascisti e quarziti (Isola Asinara, NW Sardegna)

Inclinazione dell'asse



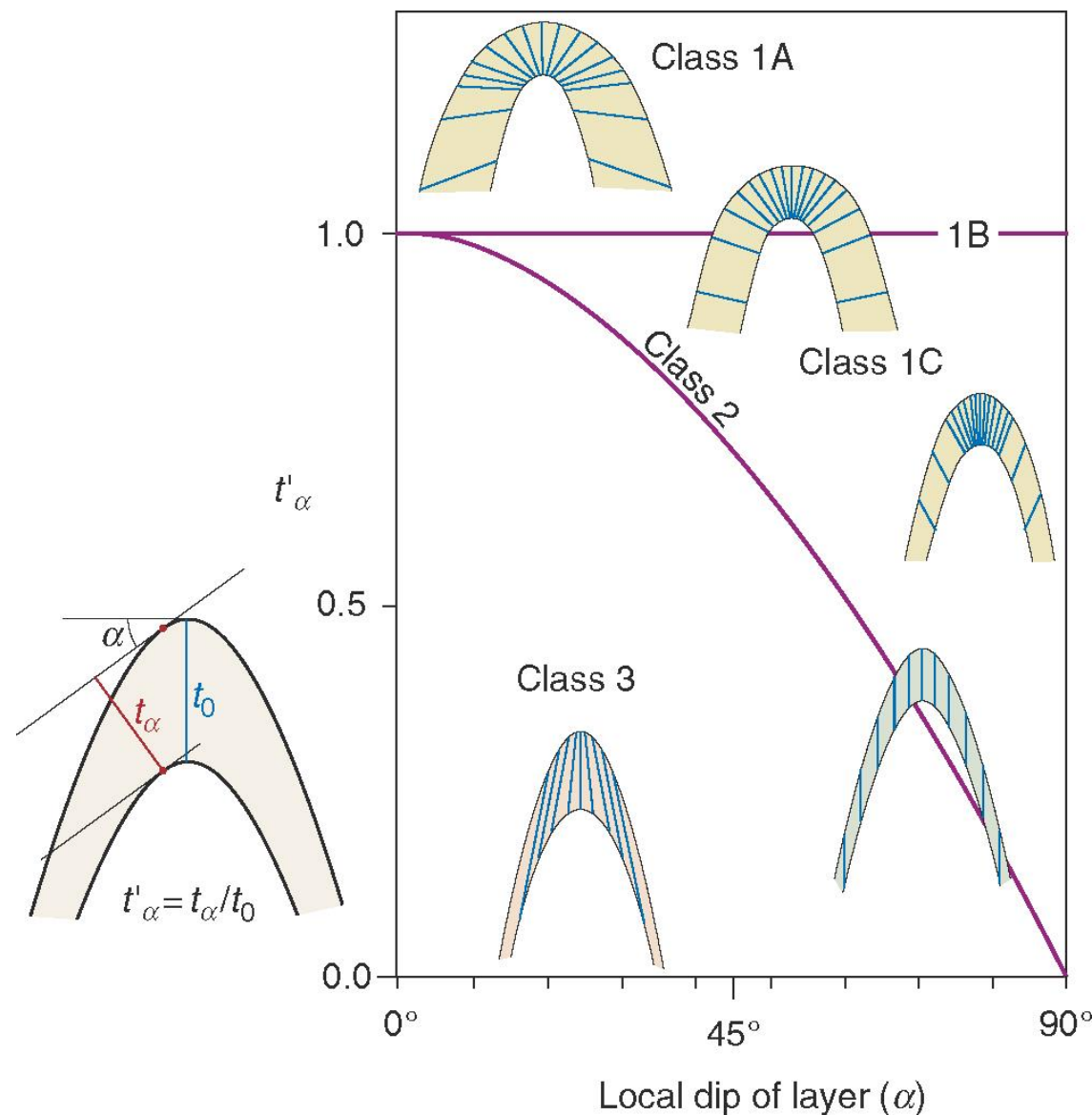
Classificazione delle pieghe basata sull'orientazione degli assi e dei piani assiali (da Fleuty, 1964)

La classificazione delle pieghe

Classificazione in base alle isogone

Le linee isogone sono segmenti che uniscono punti delle due superfici piegate nei quali esse hanno uguale inclinazione rispetto all'orizzontale.

- Questi punti si individuano tracciando una linea retta tangente alla curva esterna, e poi un'altra linea parallela alla precedente ma stavolta tangente alla curva interna;
- l'angolo α è l'angolo tra queste tangenti e la normale alla traccia del piano assiale della piega;
- lunghezza t_α è la misura della distanza tra le due tangenti suddette e nel caso generale non coincide con lo spessore dello strato;
- lunghezza t_0 è la misura del segmento tra le medesime tangenti ma parallelo alla traccia del piano assiale;
- tra le due lunghezze c'è questa relazione: $t_\alpha = t_0 \cos \alpha$.



Classificazione delle pieghe basata sul metodo delle isogone (da Ramsay, 1967)

Le pieghe

Le pieghe possono essere classificate in base alla geometria e alla posizione stratigrafica delle rocce coinvolte nel piegamento.

Una piega con fianchi convergenti verso l'alto è chiamata **antiforme**, mentre una coi fianchi che convergono verso il basso è una **sinforme** (non c'è informazione stratigrafica ma solo geometrica).

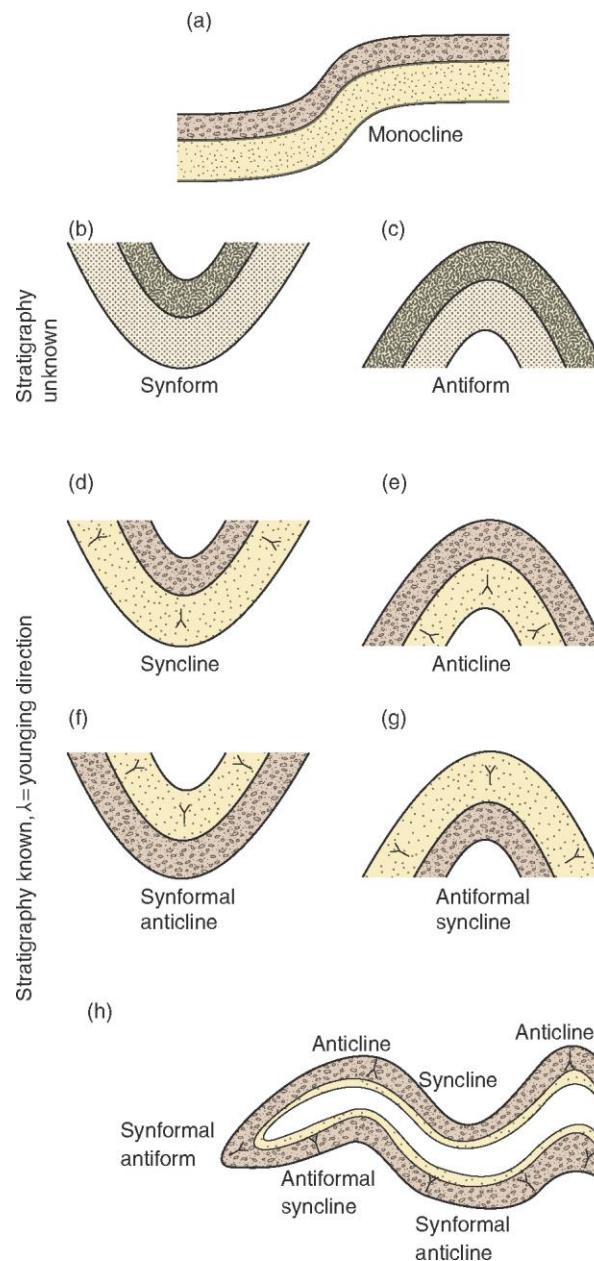
Anticlinale e **sinclinale** sono termini che contengono anche un'annotazione stratigrafica: si riferiscono a pieghe in cui il nucleo è formato da strati della successione deformata rispettivamente più antichi (old = O) e più giovani (young = Y).

Anticlinale è una piega con fianchi convergenti verso l'alto con al nucleo le rocce più antiche.

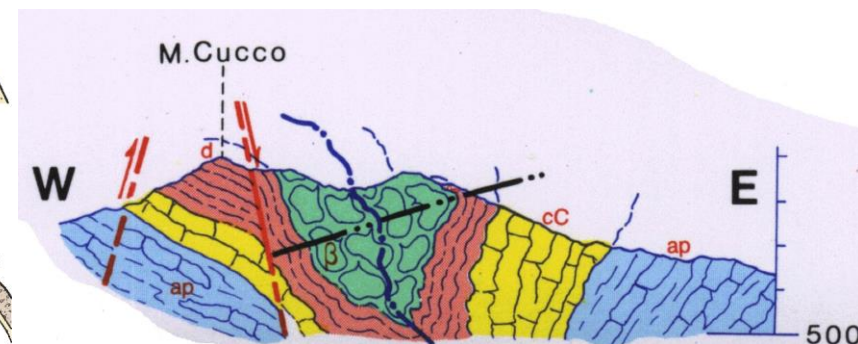
Sinclinale è una piega coi fianchi che convergono verso il basso con al nucleo le rocce più giovani.

Antiforme sinclinale è una piega con fianchi convergenti verso l'alto con al nucleo le rocce più giovani.

Sinforme anticlinale è una piega coi fianchi che convergono verso il basso con al nucleo le rocce più antiche.



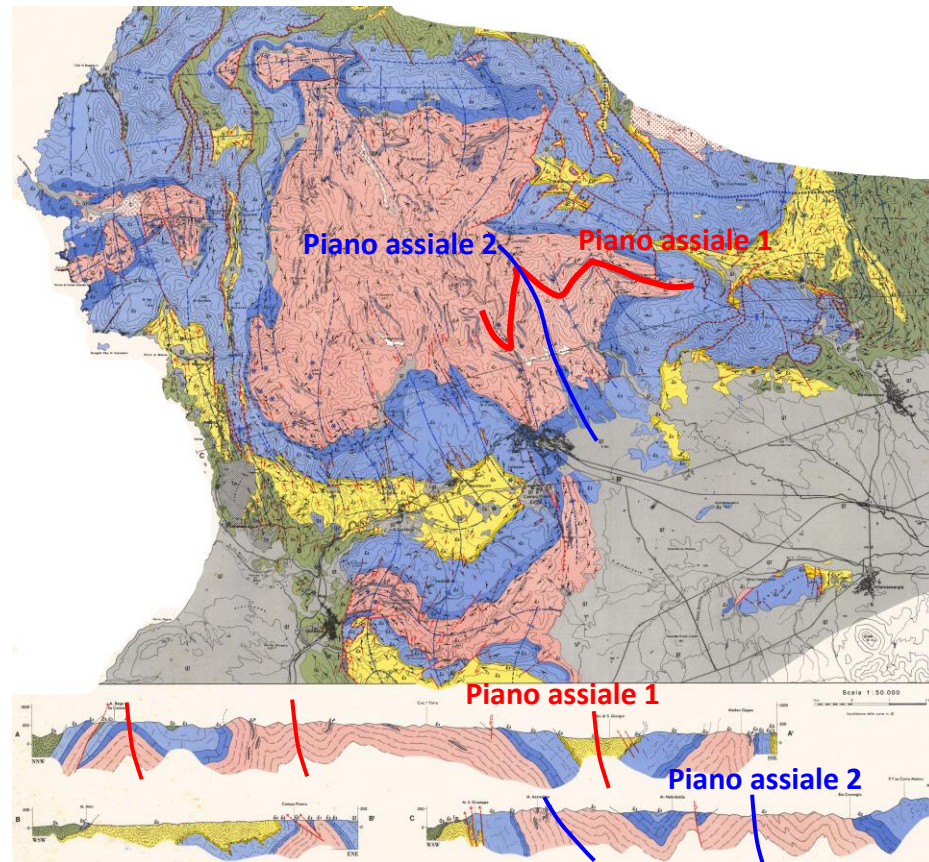
Sinforme e antiforme in quarziti (Isola Asinara, NW, Sardegna)



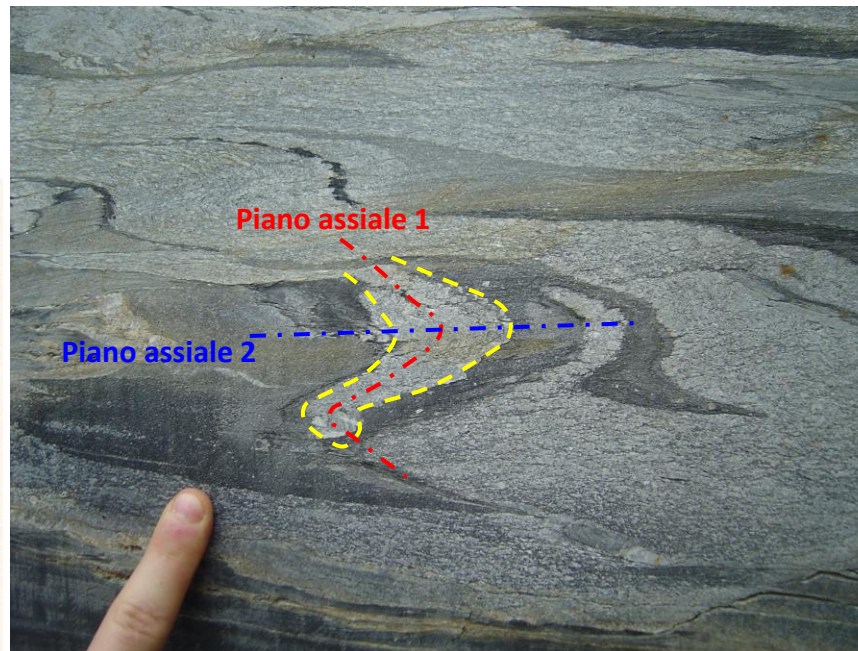
Sinforme anticlinale del M. Cucco (Val di Vara) (da Marroni & Meccheri, 1990)

Interferenze tra pieghe

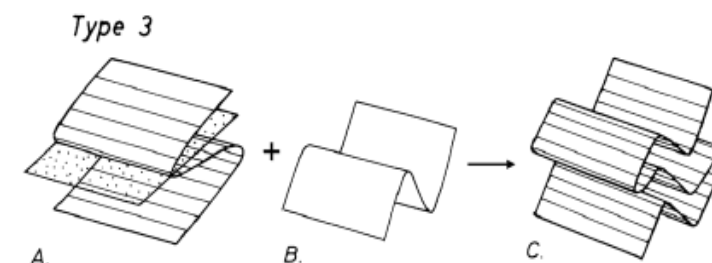
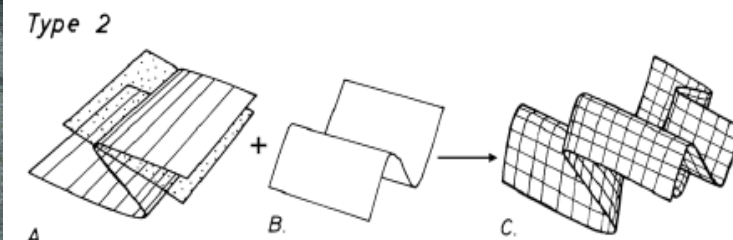
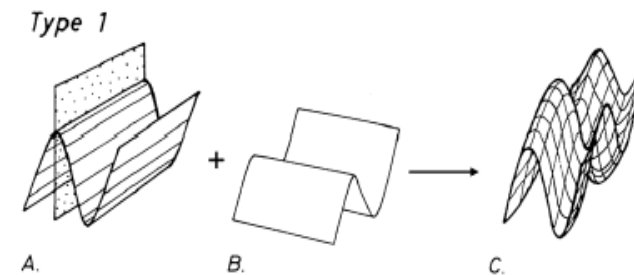
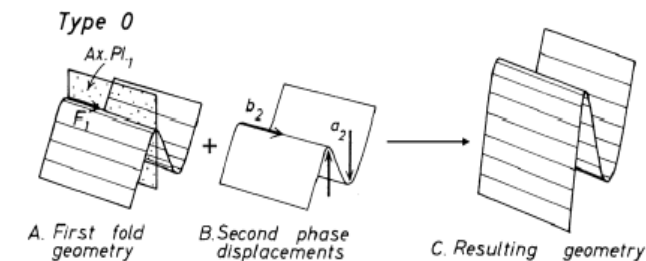
In 3D pieghe con geometria complessa con culminazioni e depressioni assiali sono spesso il risultato di **piegamenti sovrapposti**: sistemi di pieghe che generano pieghe con geometria complicata dove la sovrapposizione è determinata da eventi tettonici che si sono succeduti nel tempo, ognuno con direzioni di raccorciamento differente.



Interferenza tipo 1, a «duomi e bacini» (da Crmignani et al., 1983)



Interferenza tipo 3, a «zig zag», in pseudomacigno (Cardoso, Alpi Apuane)

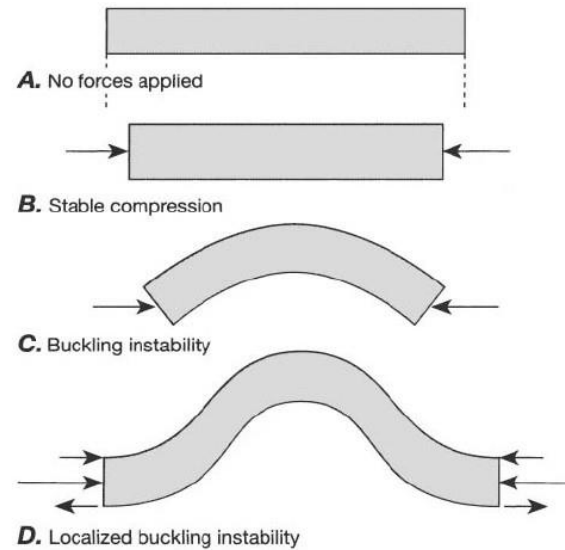


Classificazione delle interferenze tra pieghe (da Ramsay, 1967)

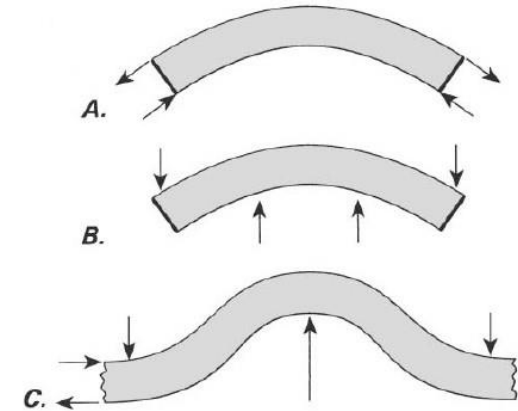
Meccanismi di piegamento

Esistono tre meccanismi principali responsabili dello sviluppo di pieghe:

- **Buckling**: compressione parallela allo strato;
- **Bending**: compressione ortogonale allo strato;
- **Amplificazione passiva**: se una superficie curva pre-esiste in una roccia può crescere per amplificazione passiva solo come risultato del flusso omogeneo della roccia. In questo caso gli strati piegati sono solo dei markers geometrici. Si formano quando il materiale di uno strato può «fluire» e deformarsi duttilmente. Come risultato possiamo avere notevoli variazioni di spessore dello strato piegato.

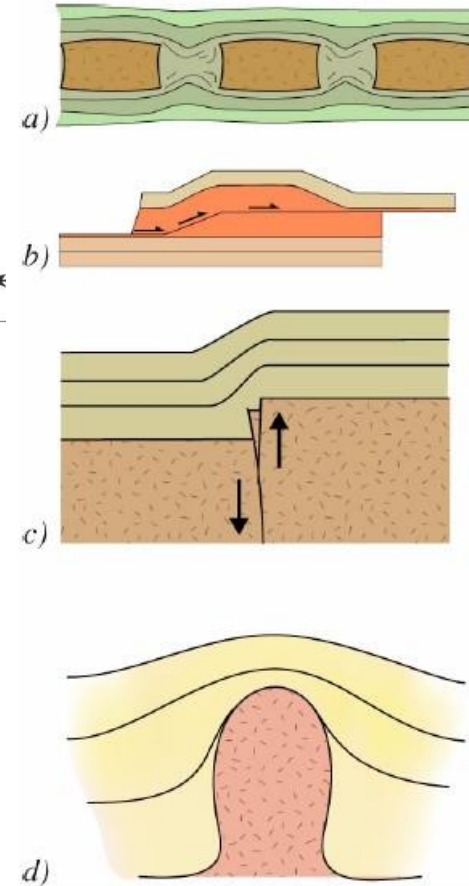


Buckling



Bending

Amplificazione passiva



Piegamento passivo della foliazione in un boudin (da Fossen, 2016)

La foliazione

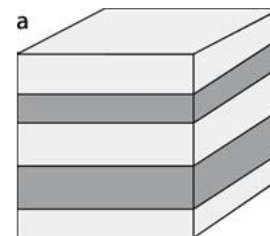
Il termine **foliazione** in senso generale indica una superficie planare presente nella roccia.

Può essere riferito ad una alternanza ritmica composizionale in rocce sedimentarie, ad una variazione composizionale in rocce magmatiche o ad una superficie tettonica in rocce metamorfiche.

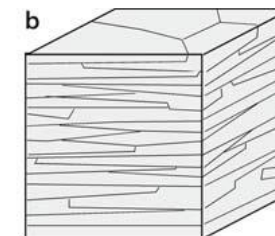
Per questo motivo si distinguono:

- ❖ **foliazioni primarie** (bending magmatico, stratificazione);
- ❖ **foliazioni diagenetiche** (compattazione diagenetica);
- ❖ **foliazioni secondarie** (dovute alla deformazione).

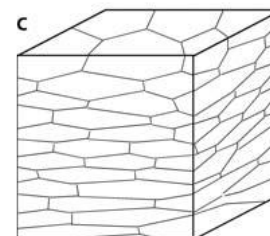
Layering
composizionale
(es. Alternanza
calcare argilla)



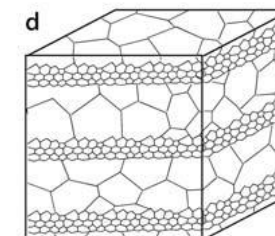
Orientazione
preferenziale di
minerali piatti



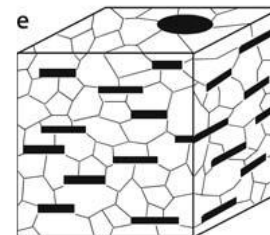
Orientazione
preferenziale di
minerali
ricristallizzati



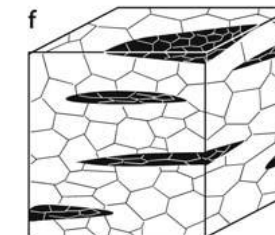
Variazione
granulometrica



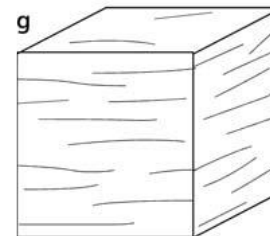
Orientazione
preferenziale di
minerali piatti
in una matrice
omogenea



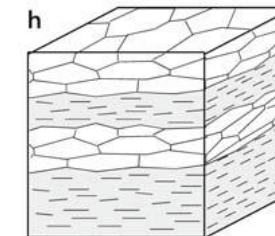
Orientazione
preferenziale di
aggregati mineralogici
lenticolari



Orientazione
preferenziale
di fratture o
microfaglie



Combinazione
di elementi del
fabric



(da Passchier & Trouw, 2005)

Meccanismi di formazione delle foliazioni

Rotazione meccanica dei minerali:

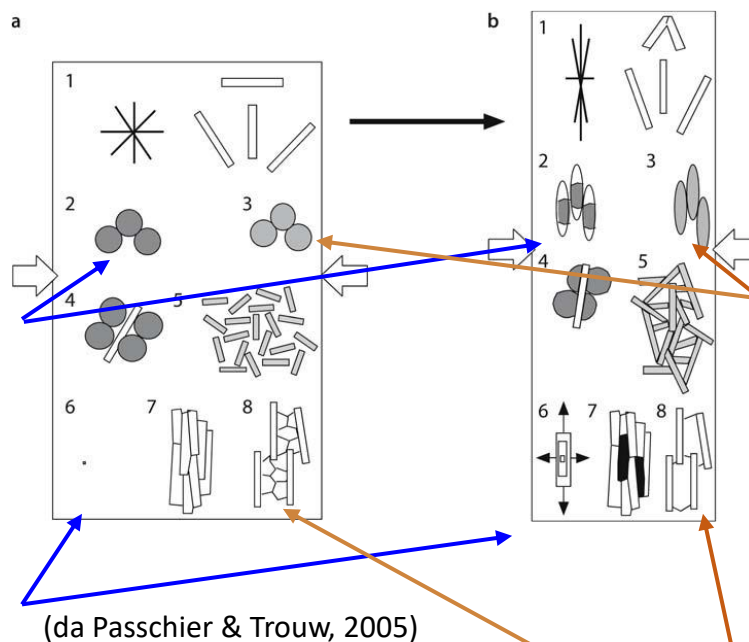
durante la deformazione duttile minerali disorientati^a planari tenderanno a ruotare, disponendosi ortogonalmente all'asse di massima deformazione.

Solution transfer:

favorisce la riorientazione meccanica dei minerali per dissoluzione selettiva e rideposizione di materiale.

Ricristallizzazione dinamica:

La ricristallizzazione dinamica è un processo guidato dalla tendenza a diminuire l'energia accumulata dai cristalli. I minerali che si formano riflettono le condizioni P-T



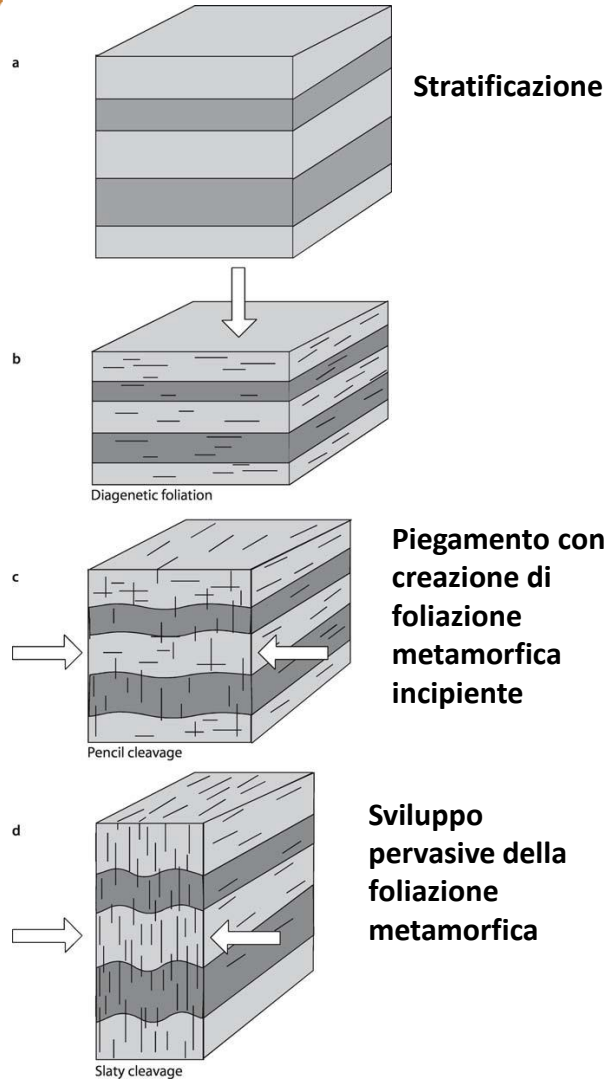
Deformazione cristalloplastica:

i minerali che si deformano possono assumere forme allungate o appiattite ortogonalmente all'asse di massima deformazione.

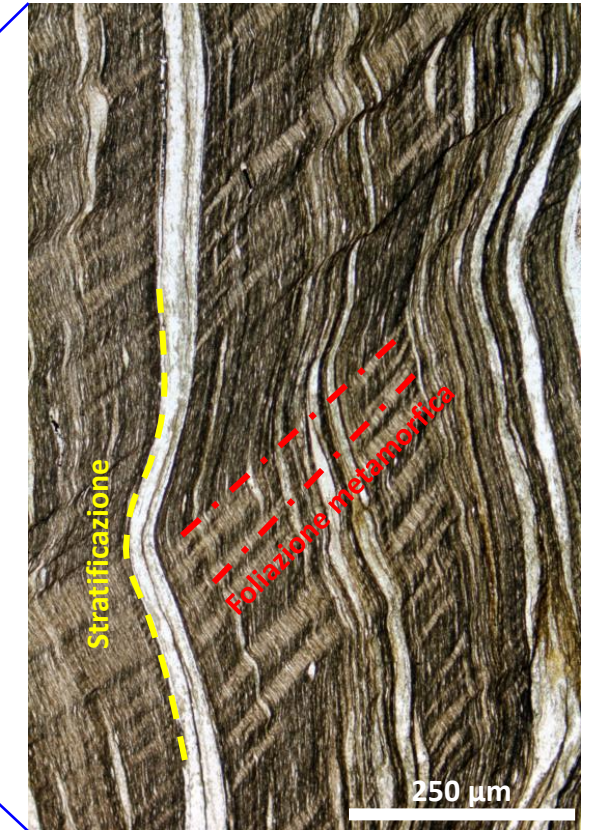
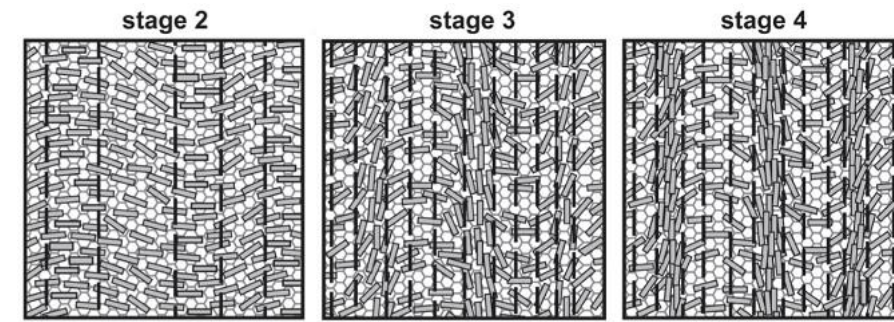
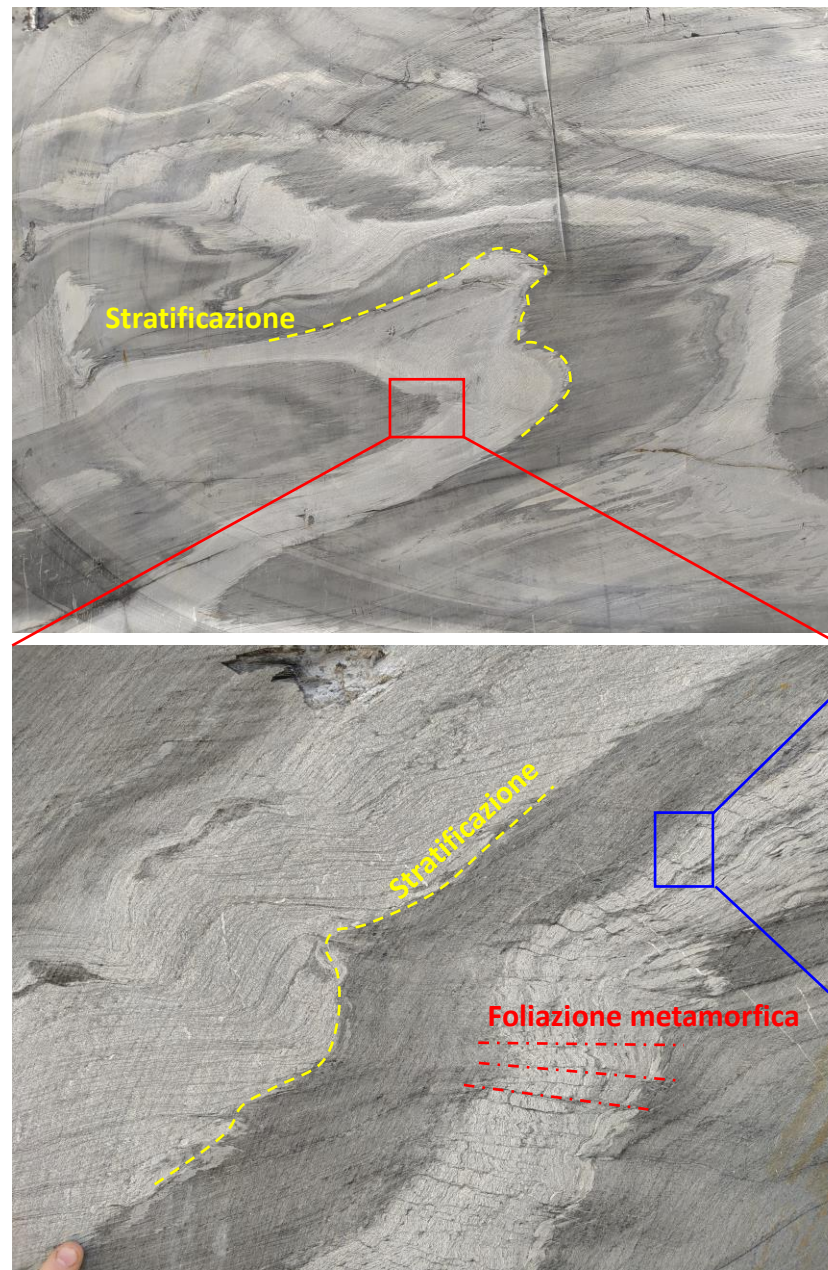
Ricristallizzazione statica e mimetica:

i minerali di neoformazione assumono una disposizione casuale nella roccia (**statica**), oppure possono ricristallizzare su X minerali preesistenti con la stessa geometria (**mimetica**).

La foliazione



(da Passchier & Trouw, 2005)

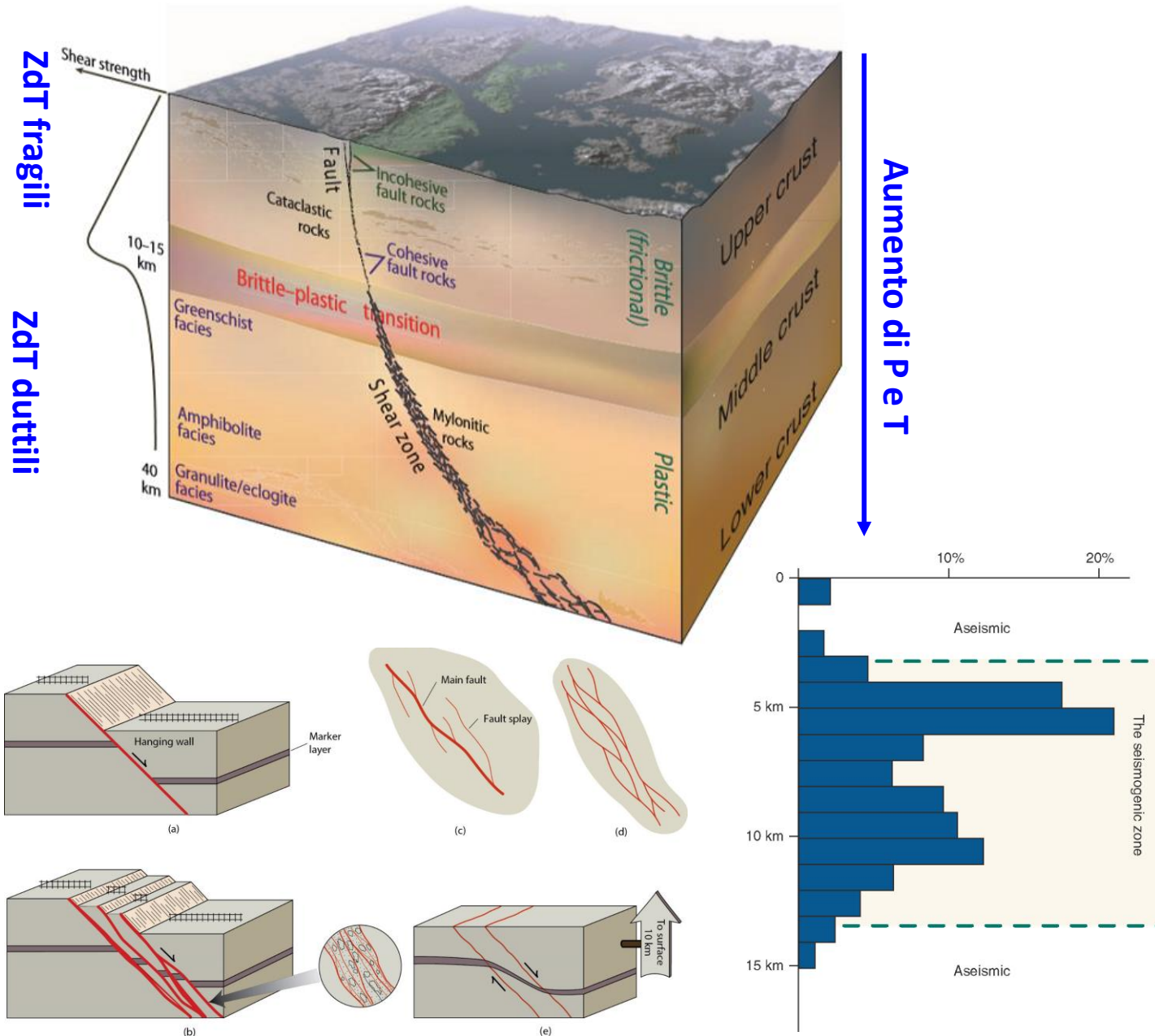


Le zone di taglio

Le **zone di taglio** o fasce di taglio (shear zones) sono volumi rocciosi sottili con forma planare o (debolmente) curvilinearare, di spessore molto minore rispetto alle altre due dimensioni (larghezza e lunghezza: il rapporto tra lunghezza e spessore è maggiore di 5), confinanti con volumi rocciosi che mostrano deformazione (molto) minore.

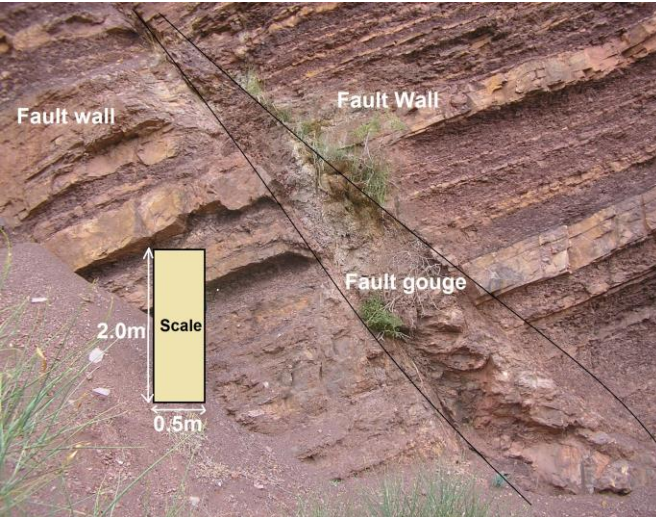
Si distinguono in:

- zone di taglio fragili o **faglie**, nelle quali i blocchi sono separati da una fascia più o meno stretta costituita da un set più o meno complicato di discontinuità;
- **zone di taglio duttili** caratterizzate da stati di deformazione finita che variano in modo graduale (anche se su spessori più o meno ristretti) da un lato all'altro attraverso la fascia sottoposta a taglio;
- vi sono anche numerosi casi intermedi genericamente indicati come **zone di taglio fragili-duttili**.



Le rocce delle zone di taglio

Le rocce delle zone di taglio si suddividono in coesive e incoesive e a loro volta suddivise in base alla percentuale di frammenti (clasti) di roccia visibile o alla matrice.



Roccia di faglia incoerente «fault gouge» (da <https://iesog.com/discover-petroleum-geoscience/fault-zone-illustrated-in-a-geologic-section>)



Roccia di faglia coerente «cataclasite» in metadolomie triassiche (Alpi Apuane)

Incohesive	Non-foliated		Foliated	
	Fault breccia (>30% visible fragments)			
	Fault gouge (<30% visible fragments)		Foliated gouge	
Cohesive	Pseudotachylyte			
	Crush breccia (fragments > 5 mm)			
	Fine crush breccia (fragments 1-5 mm)			
	Crush microbreccia (fragments < 1 mm)			
	Cataclasites Grain size reduction by cataclastic mechanisms	Protocataclasite	Mylonite series Grain size reduction by plastic def. mechanisms	Protomylonite
		Cataclasite		Mylonite
		Ultracataclasite		Ultramylonite
			Grain size increase by recrystalliz.	Blastomylonite
				% Matrix
				<10%
				10–50%
				50–90%
				>90%

Classificazione delle rocce delle zone di taglio (da Fossen, 2016)

Le rocce di faglia fragili

Le rocce di faglia fragili si suddividono in rocce COESIVE e INCOESIVE.

Le **rocce di faglia incoesive** in genere si trovano in zona di faglia che sono state attive ad alti livelli strutturali (nei primi 2-3 km di crosta). Possono essere ulteriormente suddivise in:

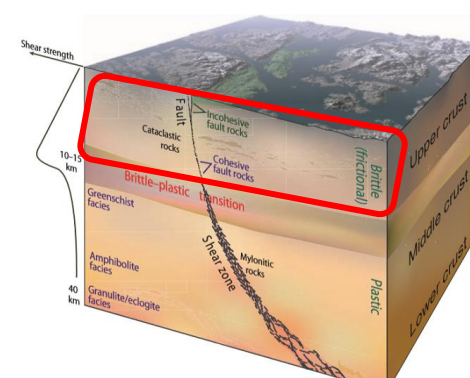
- **Fault breccia:** >30% di frammenti di roccia visibile (poca matrice);
- **Fault gouge:** <30% di frammenti di roccia visibile (molta matrice);

Le **rocce di faglia coesive** in genere si trovano in zona di faglia che sono state attive ad alti livelli strutturali (tra 3-10 km di crosta). Possono essere ulteriormente suddivise in:

- **Brecce**: frammenti di dimensione da millimetrica a plurimillimetrica;
- **Cataclasiti**: forte riduzione di grani con dimensioni generalmente sotto il millimetro;
- **Pseudotachiliti**: rocce vetrose dovute al rapido raffreddamento di rocce fuse per attrito.

Incohesive	Non-foliated		Foliated			
	Fault breccia (>30% visible fragments)		Foliated gouge (<30% visible fragments)			
Cohesive	Pseudotachylyte					
	Crush breccia (fragments > 5 mm)					
	Fine crush breccia (fragments 1-5 mm)					
	Crush microbreccia (fragments < 1 mm)				<10%	
	Cataclasites	Grain size reduction by cataclastic mechanisms	Protocataclasite		Protomylonite	10–50%
			Cataclasite		Mylonite	50–90%
			Ultracataclasite		Ultramylonite	>90%
				Blastomylonite		
		Grain size increase by recrystalliz.				

Classificazione delle rocce di faglia (da Fossen, 2016)



Fault gouge (Alpi Apuane)



(a) Pseudotachiliti (Alpi Orobie); (b) Crush breccia in marmo (Alpi Apuane); Cataclasite vista al microscopio (Isola Asinara)

Le rocce di faglia duttili

Le rocce di faglia duttili si formano in una zona di faglia che è stata attiva a livelli strutturali profondi (>10-13Km di profondità), dove le condizioni di alta P e T favoriscono un comportamento plastico della roccia e consentono una ricristallizzazione dei minerali costituenti.

Vengono classificate in base alla percentuale di matrice visibile, e sono suddivise in:

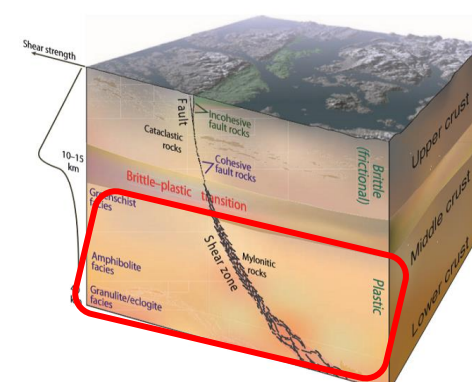
- **Protomilonite**: 10-50% di matrice;
- **Milonite**: 50-90% di matrice;
- **Ultramiloniti**: >90% di matrice.

IMPORTANTE

Milonite = termine strutturale, si riferisce al fabric della roccia e non al litotipo!!

	Non-foliated		Foliated	
	Incohesive			
	Fault breccia (>30% visible fragments)			
	Fault gouge (<30% visible fragments)		Foliated gouge	
Cohesive	Pseudotachylite			
	Crush breccia (fragments > 5 mm)			
	Fine crush breccia (fragments 1-5 mm)			
	Crush microbreccia (fragments < 1 mm)			<10%
	Cataclasites Grain size reduction by cataclastic mechanisms			
	Protocataclasite			
Mylonite series		Grain size reduction by plastic def. mechanisms	Protomylonite	10-50%
			Mylonite	50-90%
			Ultramylonite	>90%
		Grain size increase by recrystalliz.	Blastomylonite	

Classificazione delle rocce di faglia (da Fossen, 2016)



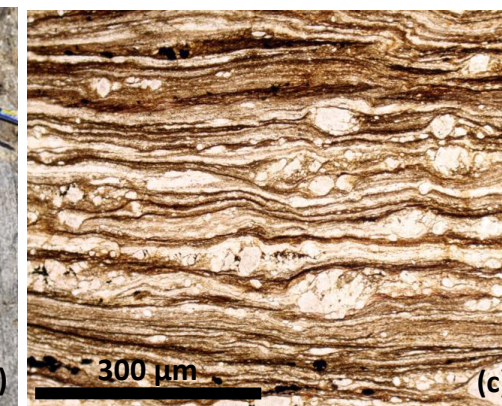
Ortogneiss non deformato per taglio (isola Asinara)



(a)



(b)



(c)

(a) Protomilonite (Isola Asinara); (b) Milonite (Isola Asinara); (c) Ultramilonite (M. Grighini; da <https://www.alexstrekeisen.it/meta/ultramilonite.php>)

Tipologie di faglie

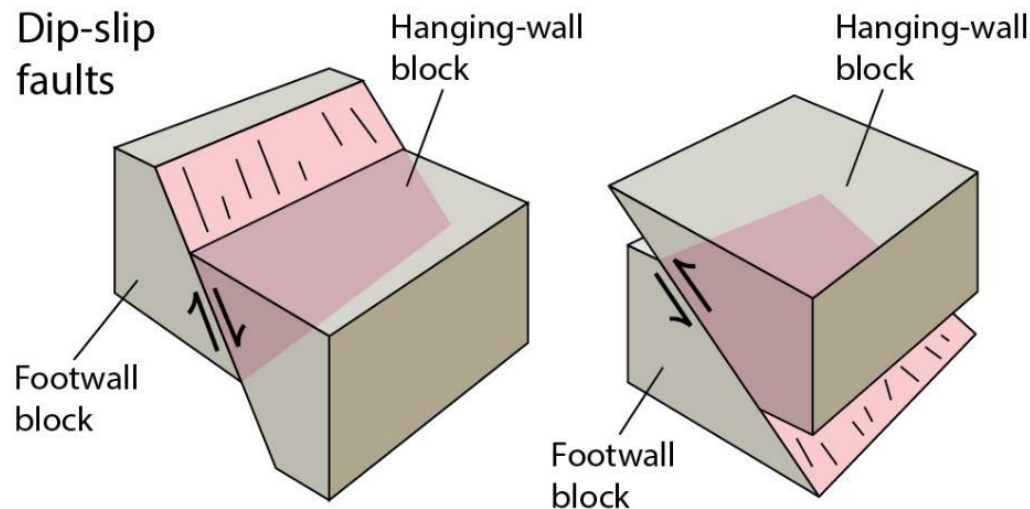
Esistono differenti tipologie di faglie classificate in base al senso di movimento, principalmente suddivise in:

1. **Dip-slip** (scorrimento lungo la massima pendenza), che possono essere ulteriormente suddivise in :

- ❖ **Faglie normali:** il blocco di tetto (hanging-wall) si abbassa rispetto al blocco di letto (foot-wall);
- ❖ **Faglie inverse:** il blocco di tetto (hanging-wall) si alza rispetto al blocco di letto (foot-wall).

2. **Strike-slip** (scorrimento laterale o trascorrenti), che possono essere ulteriormente suddivise in :

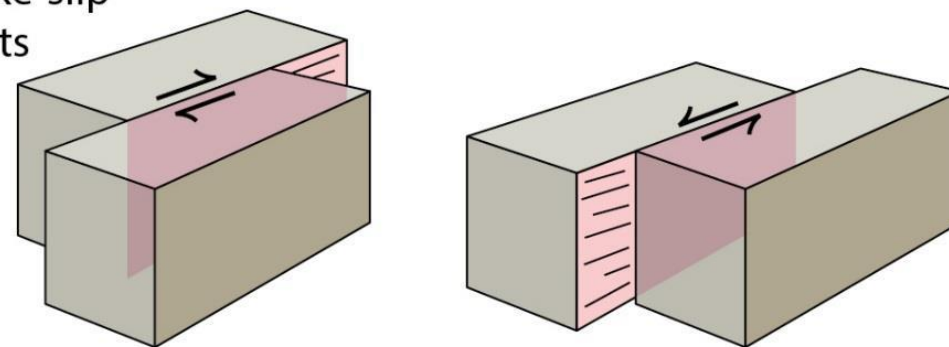
- ❖ **Faglie trascorrenti destre:** il blocco di fronte all'osservatore si sposta verso destra;
- ❖ **Faglie trascorrenti sinistre:** il blocco di fronte all'osservatore si sposta verso sinistra.



(a) Normal

(b) Reverse

Strike-slip faults



(c) Right-lateral (or dextral)

(d) Left-lateral (or sinistral)

Classificazione in base al senso di movimento delle faglie (da Van der Pluijm, 2016)

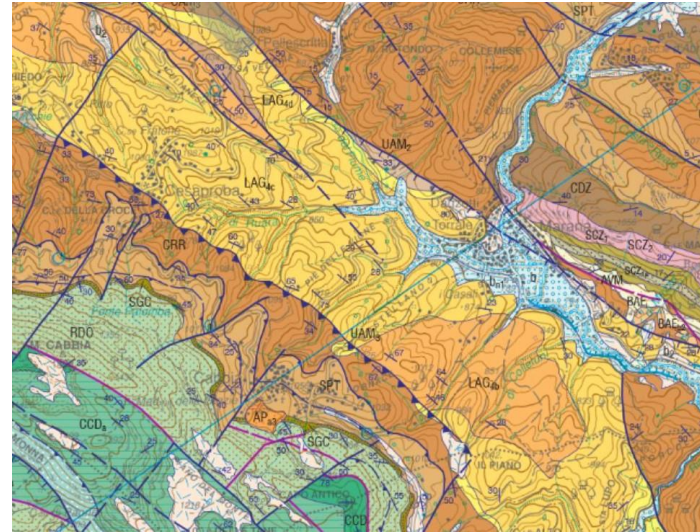
Tipologie di faglie



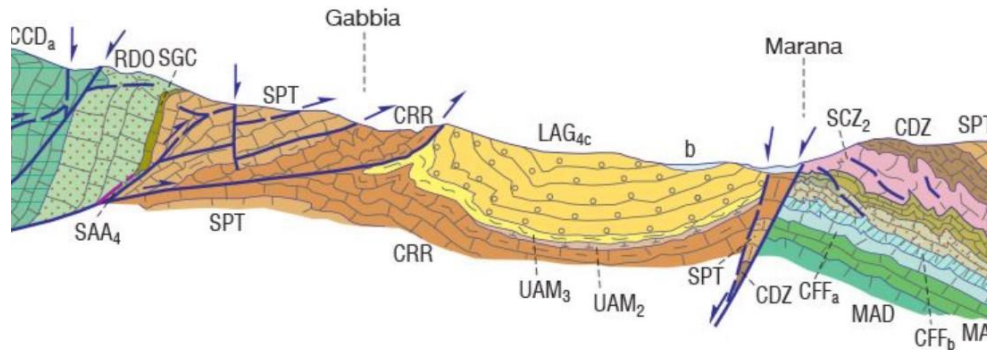
Faglie normali (monti di Oltreserchio, Pisa)



Glarus thrust (Svizzera, da https://en.wikipedia.org/wiki/Glarus_thrust)



Carta geologica e sezione in cui sono riportatele differenti tipologie di faglie (Antrodoco, da https://www.isprambiente.gov.it/Media/carg/348_ANTRODOCO/Fogli_o.html)



Faglia trascorrente destra (California, da https://it.wikipedia.org/wiki/Faglia_di_Sant%27Andrea)



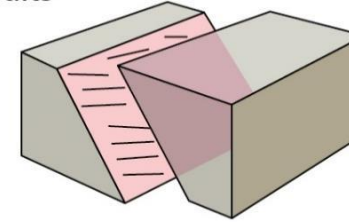
Faglia trascorrente sinistra (Isola Asinara)

Tipologie di faglie

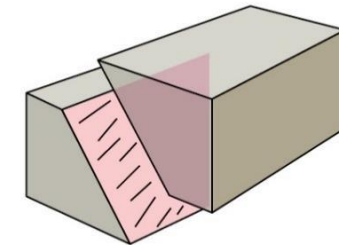
Se combiniamo alle precedenti tipologie di movimenti anche una componente di movimento obliquo si possono ottenere le seguenti combinazioni:

- ❖ **Faglie normali trascorrenti sinistre (trastensive sinistre)**: il blocco di tetto (hanging-wall) si abbassa rispetto al blocco di letto (foot-wall) e contemporaneamente si sposta verso sinistra;
- ❖ **Faglie normali trascorrenti destre (trastensive destre)**: il blocco di tetto (hanging-wall) si abbassa rispetto al blocco di letto (foot-wall) e contemporaneamente si sposta verso destra;
- ❖ **Faglie inverse trascorrenti sinistre (traspressive sinistre)**: il blocco di tetto (hanging-wall) si alza rispetto al blocco di letto (foot-wall) e contemporaneamente si sposta verso sinistra;
- ❖ **Faglie inverse trascorrenti destre (traspressive destre)**: il blocco di tetto (hanging-wall) si alza rispetto al blocco di letto (foot-wall) e contemporaneamente si sposta verso destra.

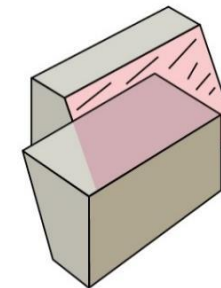
Oblique-slip faults



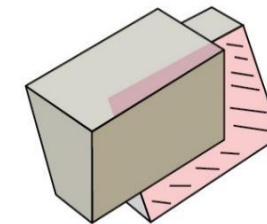
(e) Left-lateral/normal



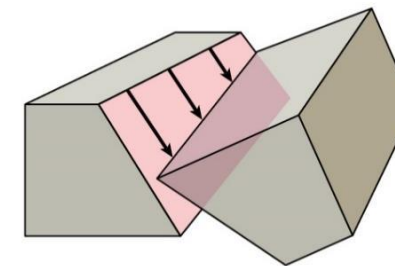
(f) Left-lateral/reverse



(g) Right-lateral/normal



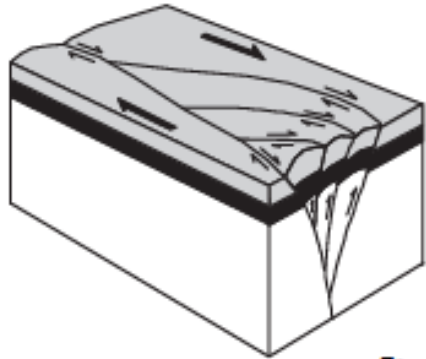
(h) Right-lateral/reverse



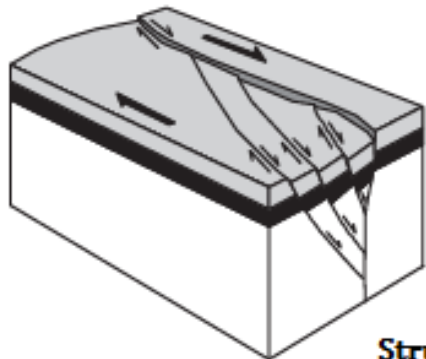
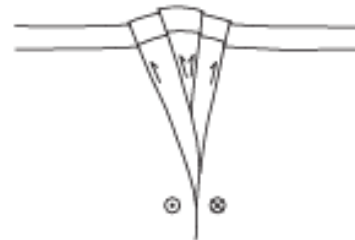
(i) Scissor

Classificazione in base al senso di movimento delle faglie (da Van der Pluijm, 2016)

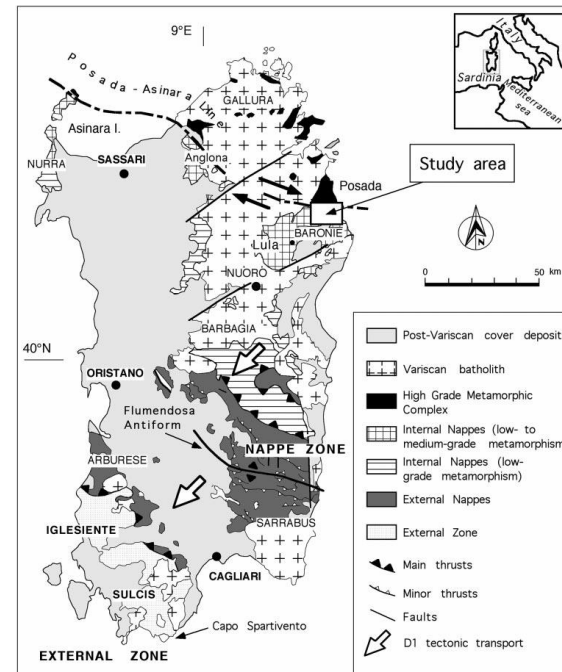
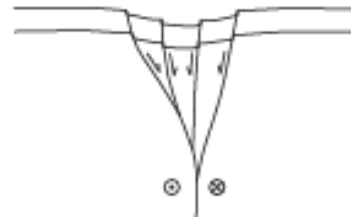
Tipologie di faglie



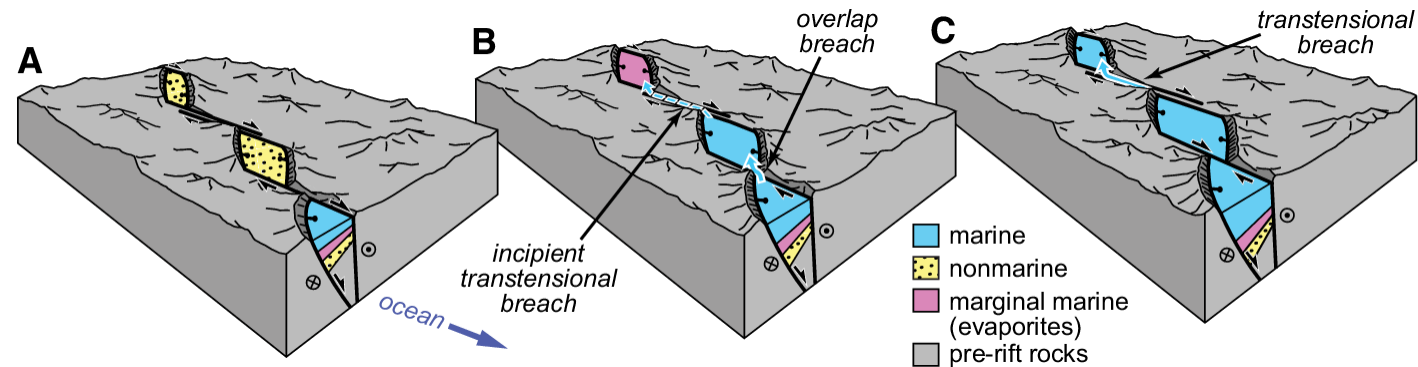
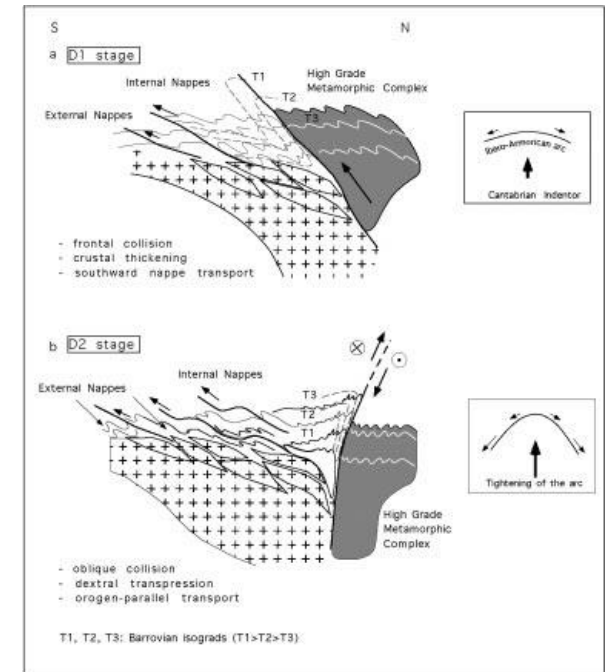
Strutture a fiore positive



Strutture a fiore negative



Schema della zona di taglio transpressiva destra Posada-Asinara (da Carosi & Palmeri, 2002)

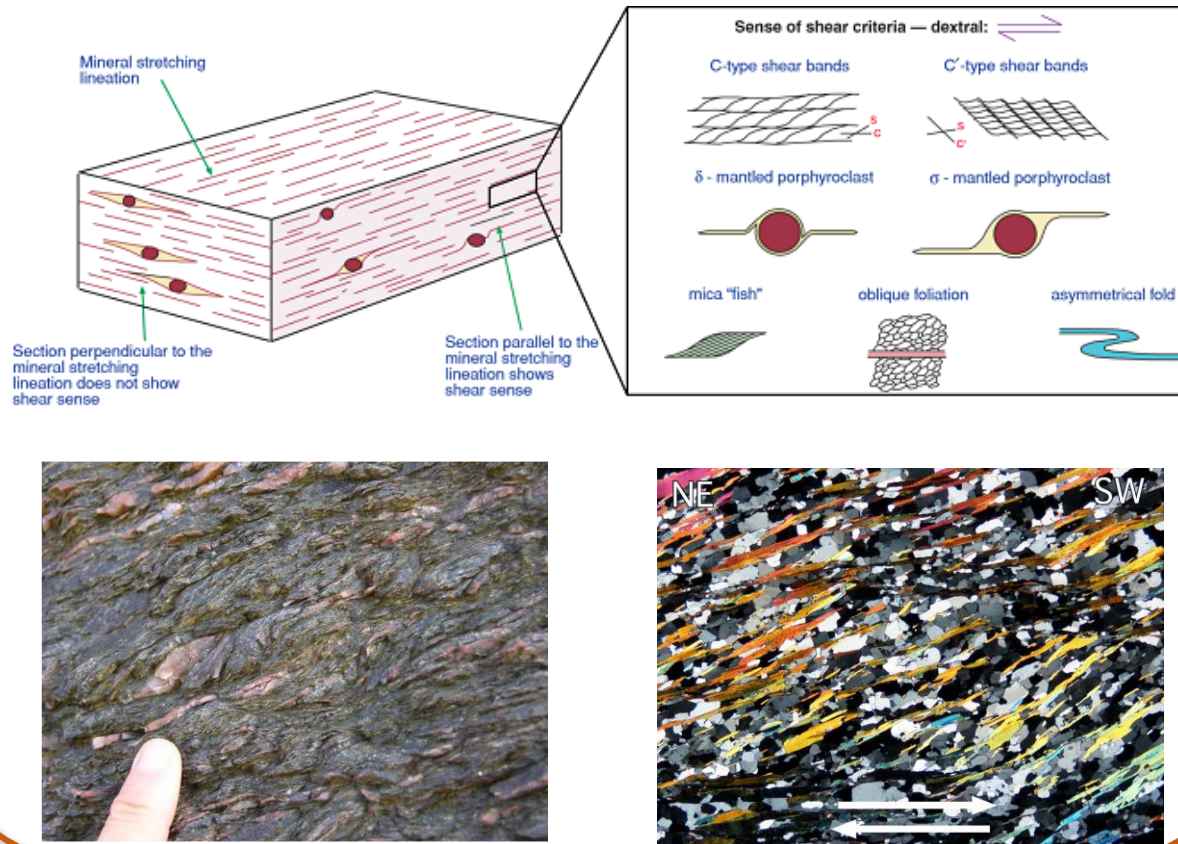


Formazione di bacini in faglie tanstensive destre (California; da Umhoefer et al., 2018)

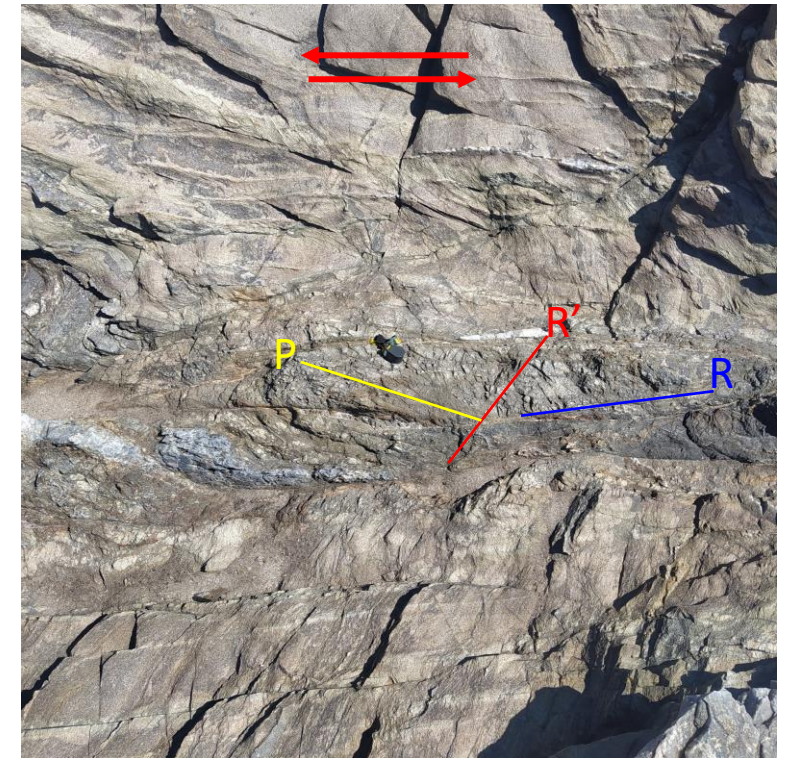
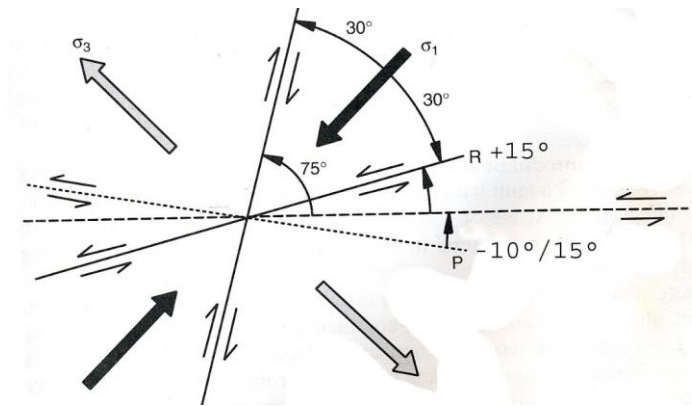
Come si riconosce il senso di taglio?

Analizzando una sezione della zona di taglio è possibile riconoscere appositi **indicatori cinematici** che variano da semplici fratture (zone di taglio fragili) a strutture legate ad una deformazione plastica o ad una ricristallizzazione dinamica (zone di taglio duttile).

Indicatori «duttili»



Indicatori «fragili»



*Grazie per
l'attenzione!!*