

# Meccanismi Deformativi

# Meccanismi deformativi

- L'insieme dei processi materiali attivi in una roccia che si deforma definiscono un meccanismo deformativo.
- funzione di alcuni parametri esterni (P, T, stress applicato, presenza e natura di fluidi, ecc.) e parametri propri della roccia (composizione mineralogica, dimensioni dei granuli, porosità, permeabilità, ecc.).
- Ogni meccanismo deformativo produce microstrutture caratteristiche nella roccia.

# Meccanismi deformativi

I meccanismi deformativi che possono operare in rocce sono:

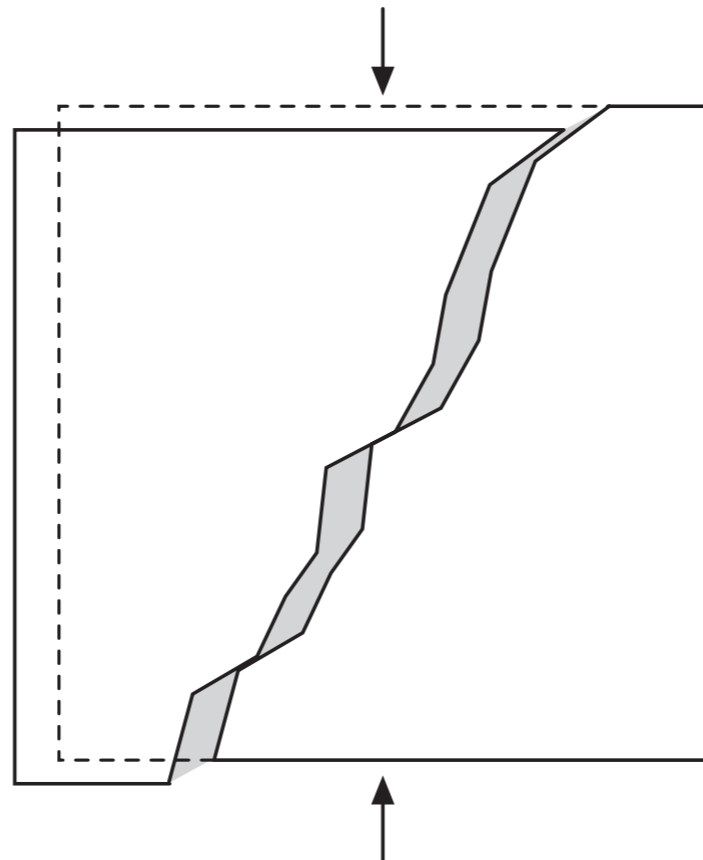
- **Cataclasi**, in cui si ha fratturazione, perdita di coesione e scivolamento tra i granuli;
- **Plasticità**, con deformazione intracristallina per movimento di dislocazioni o per geminazione;
- **Scivolamento viscoso**, in cui lo strain è accomodato da diffusione di materia;
- **Dissoluzione e riprecipitazione** (pressure solution), con diffusione e trasporto di materia assistito dalla presenza di fluidi intergranulari.

# Meccanismi deformativi

- Il meccanismo deformativo di cataclasi implica fratturazione e scivolamento dei grani ed è quindi un meccanismo fortemente dipendente dalla pressione;
- i meccanismi deformativi di plasticità, scivolamento viscoso e dissoluzione e riprecipitazione sono attivati soprattutto dalla temperatura e sono detti complessivamente meccanismi di tipo “viscoso”.

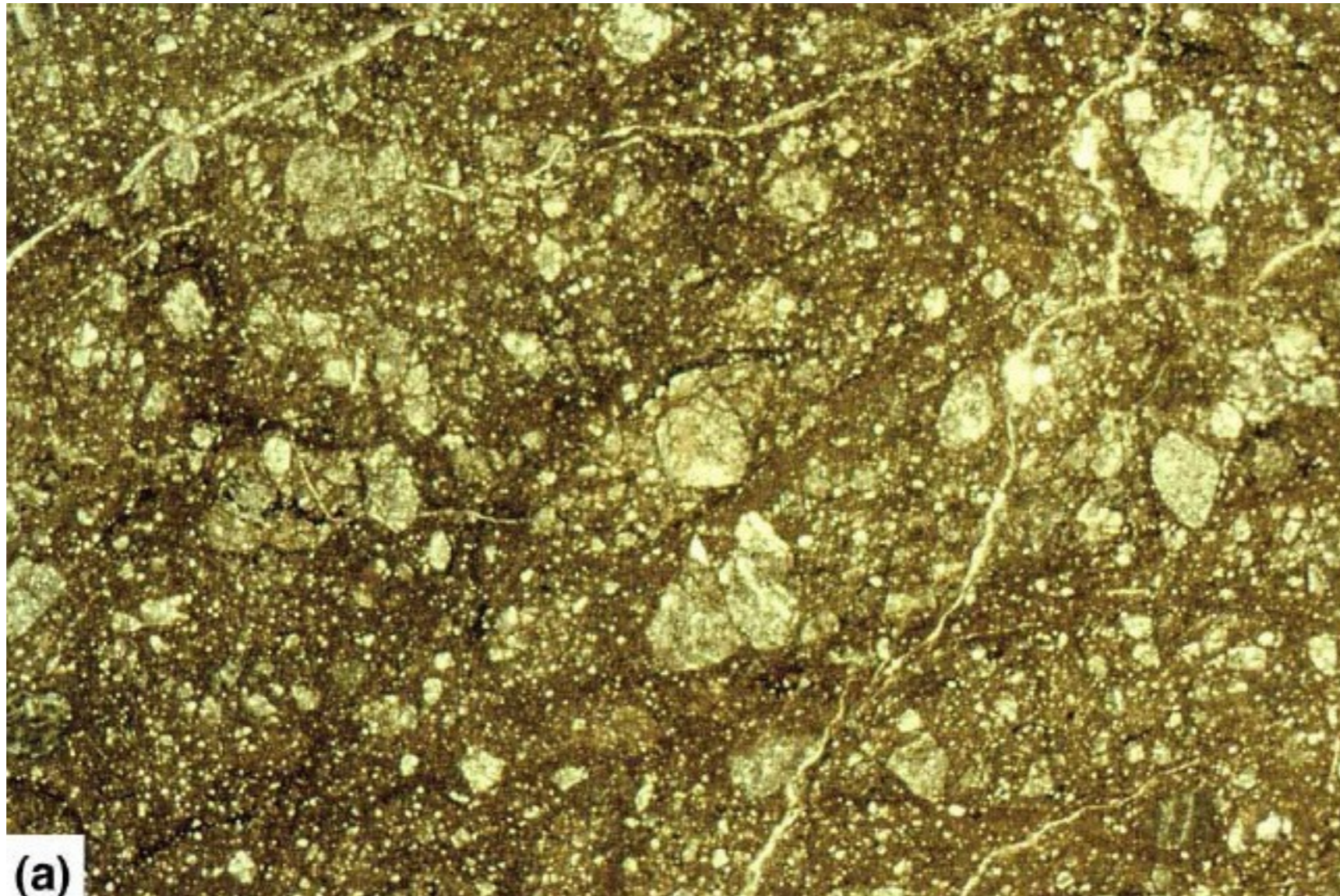
# Cataclasi

- Sviluppo di una deformazione fragile in una roccia, cioè associata alla formazione di fratture
- Rottura legami atomici, no climb dislocazioni, ecc.
- Aumento del volume totale della roccia (dilatanza).
- Fortemente influenzata dalla Pressione
- Comune a livelli strutturali superficiali, mentre diminuisce di importanza con la profondità.



# Cataclasi

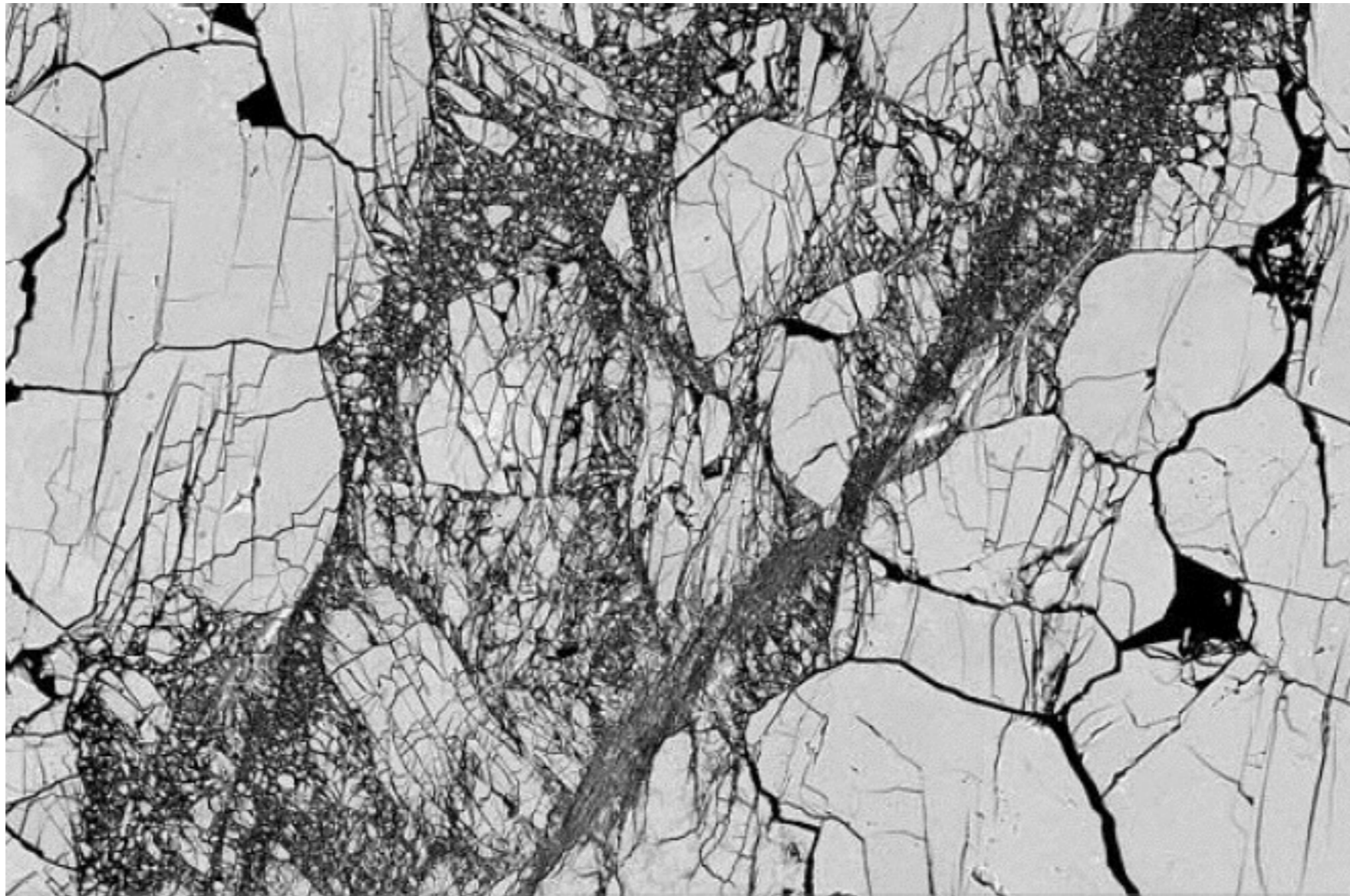
Le dimensioni dei grani diminuiscono a seguito dello sviluppo di fratture a tutte le scale di osservazione, sulle quali si ha scivolamento.



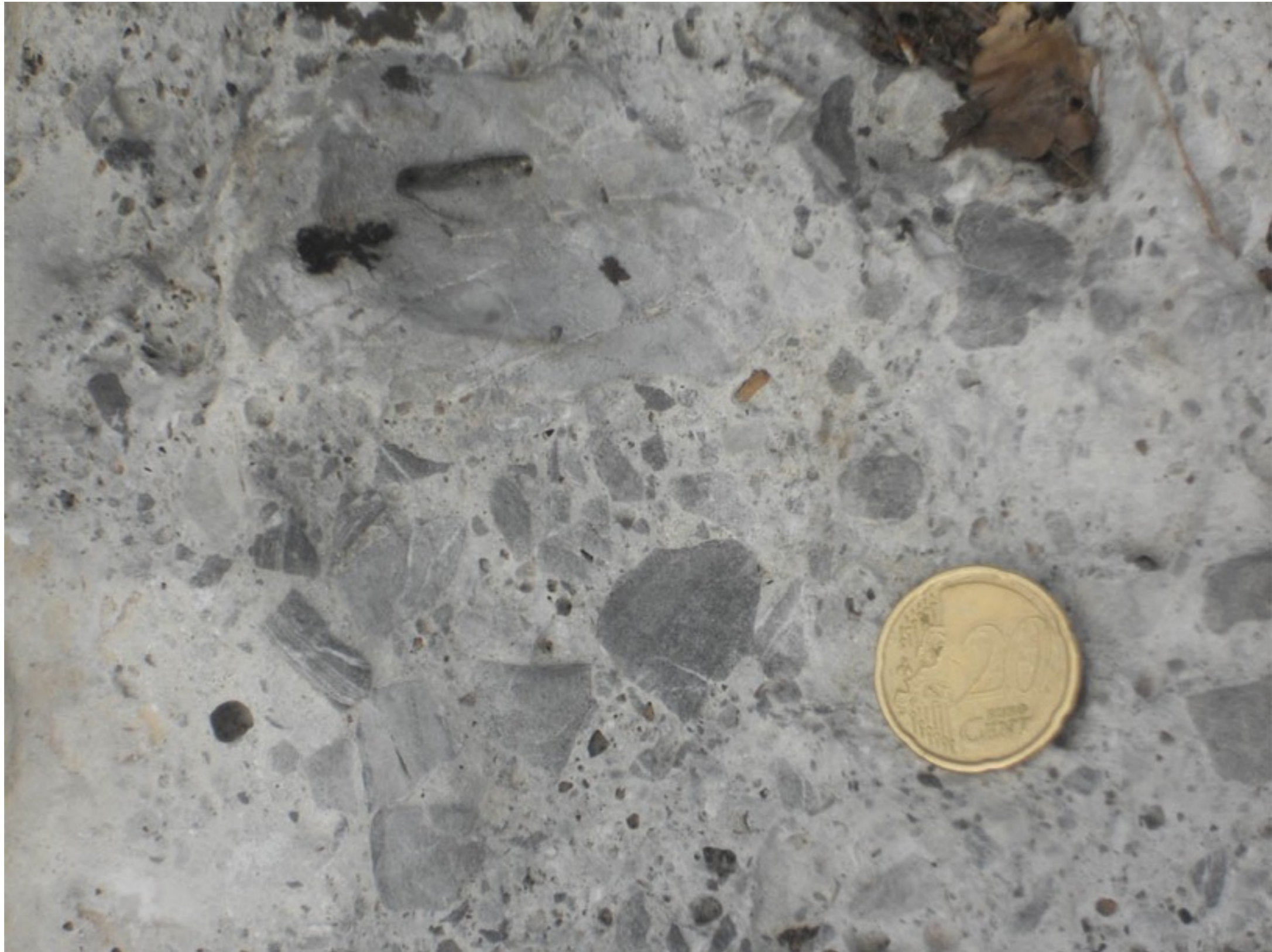
Cataclasite in calcare (sezione sottile)

# Cataclasi

Cataclasite in arenaria (larghezza foto 1 mm, BSE-SEM)



# Cataclasi





# Cataclasi



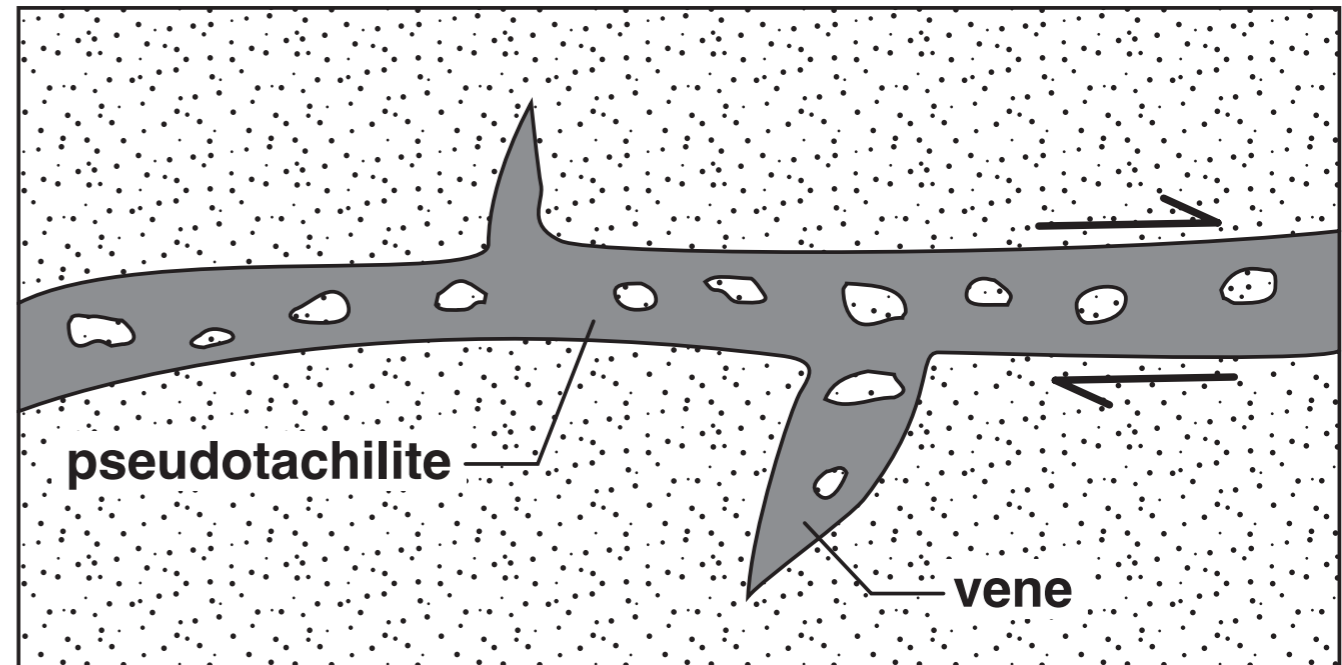
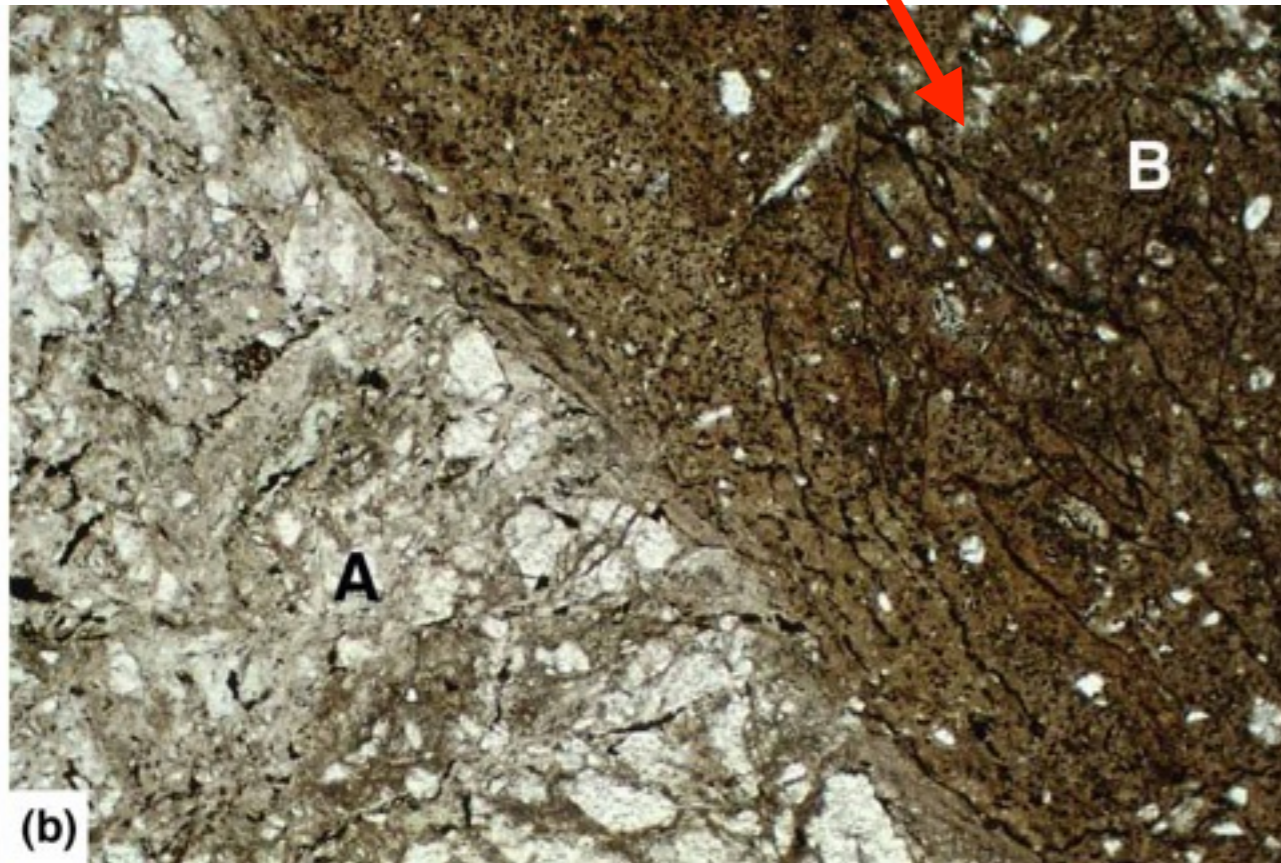
# Cataclasi

Meccanismo deformativo in cui:

- le dimensioni dei grani diminuiscono a seguito dello sviluppo di microfratture a tutte le scale,
- lungo le fratture si ha scivolamento relativo tra i grani;
- si ha aumento di volume (dilatanza);
- rotazione passiva tra i grani o i frammenti di grani;
- diminuzione della grana della roccia;
- la struttura cristallografica interna dei singoli grani non cambia;
- fortemente influenzato dallo sforzo normale applicato e dalla pressione;
- temperatura, velocità di deformazione e composizione della roccia sono di importanza subordinata.

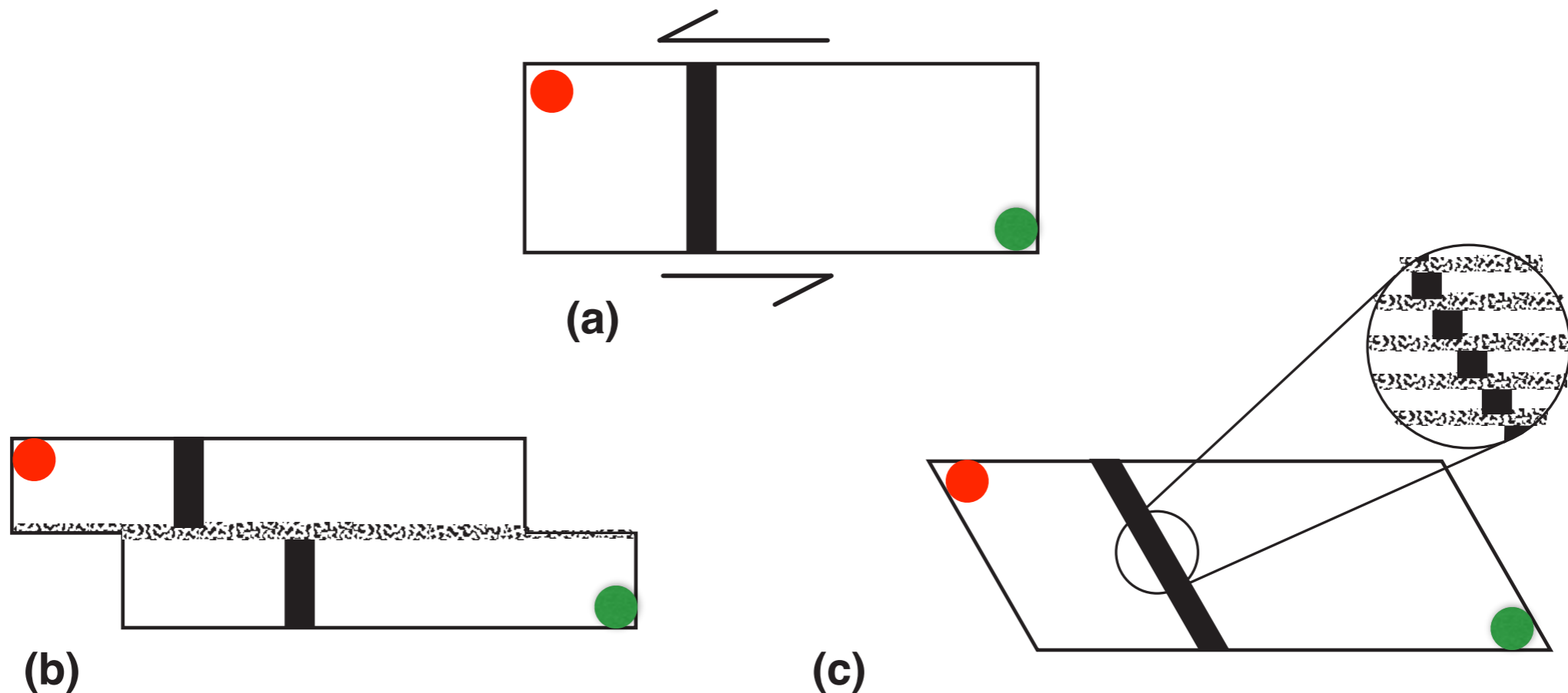
# Cataclasi - pseudotachiliti

- La temperatura diventa importante a seguito di deformazioni estremamente veloci;
- può aumentare molto, fino a produrre una parziale fusione della roccia formando pseudotachiliti.



# Cataclasi - Flusso cataclastico

- Il meccanismo deformativo di cataclasi può essere attivo in una deformazione localizzata (faglie, zone di taglio, ecc.)
- Cataclasi può operare anche in deformazioni non localizzate, con uno strain distribuito in un'ampia fascia, si parla di deformazione per flusso cataclastico.



# Cataclasi

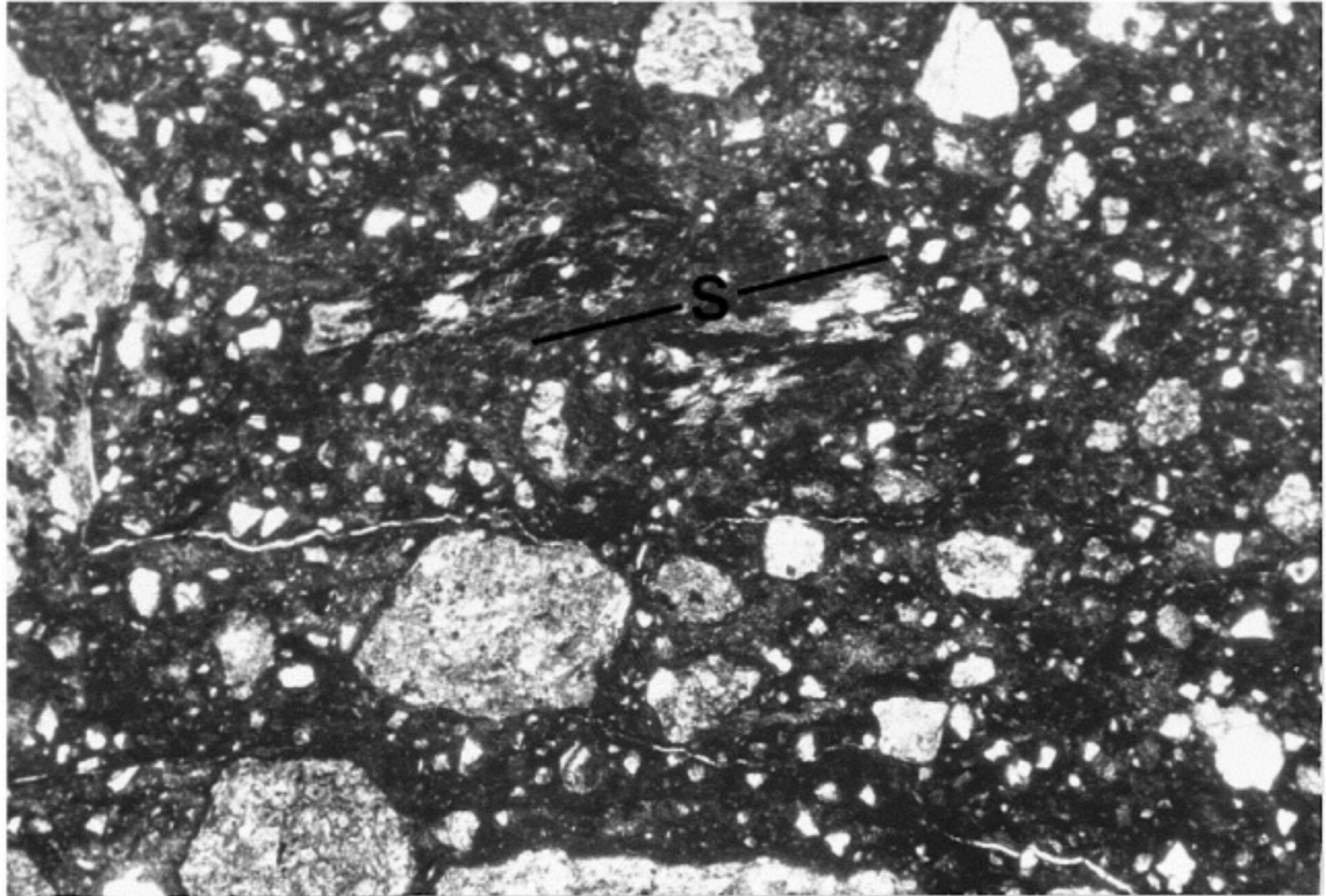
Deformazione cataclastica (video)

Octachloropropane



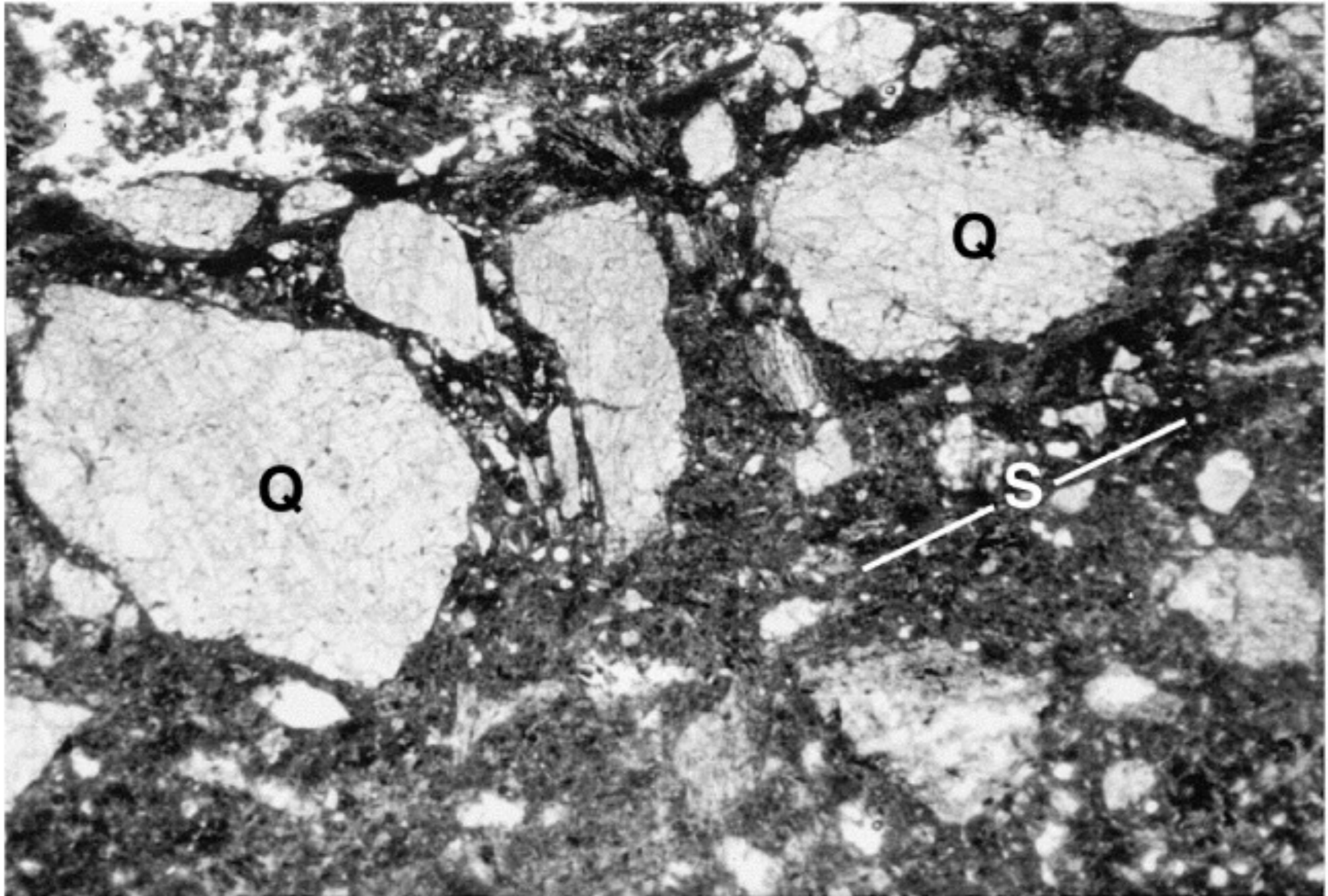
*Youngdo Park, Jin-Han Ree & Win Means*

# Flusso cataclastico

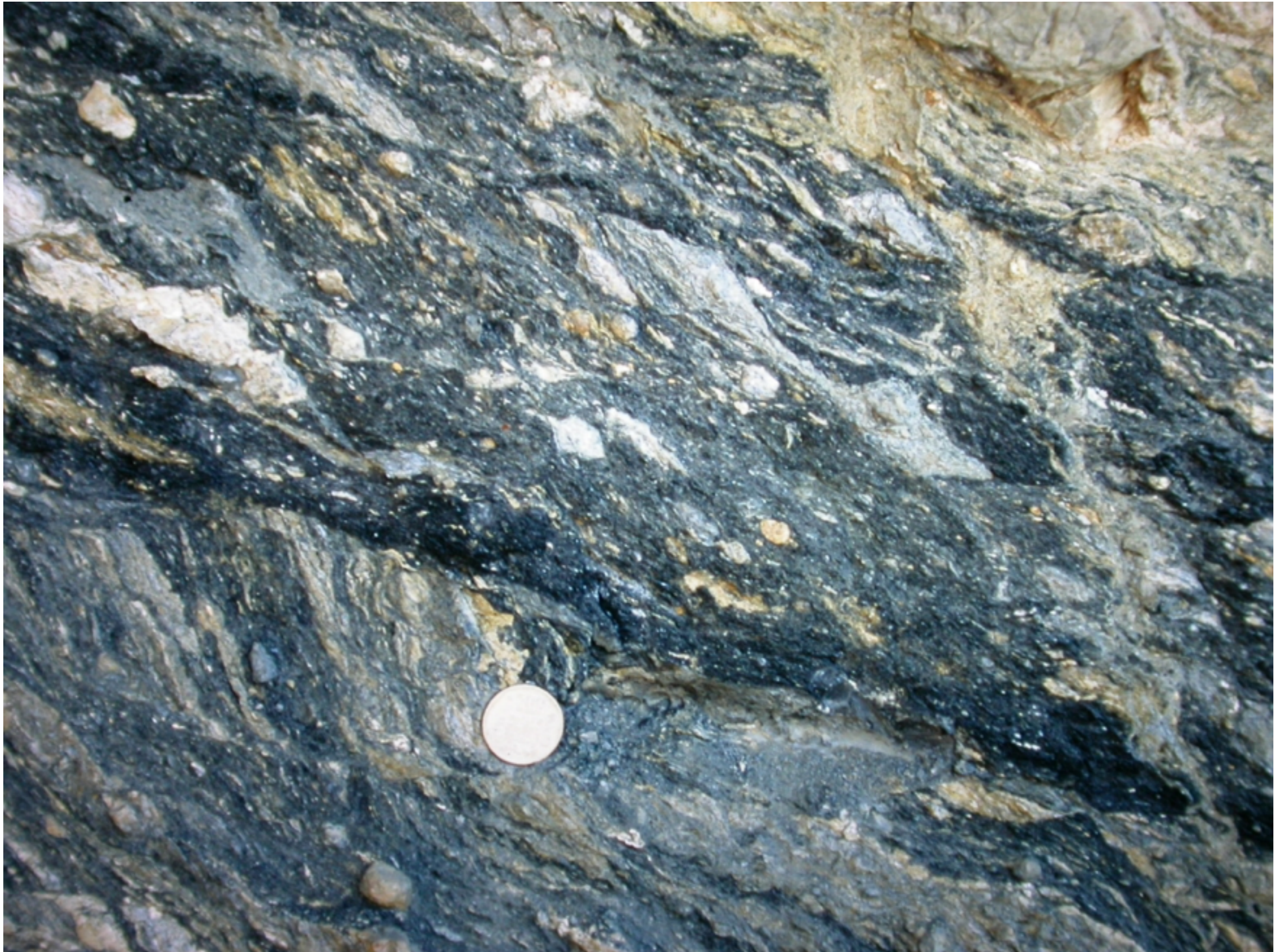


5

# Flusso cataclastico



# Flusso cataclastico





# Plasticità

- Plasticità è un termine che comprende meccanismi deformativi in cui la deformazione è intragranulare e legata al movimento di dislocazioni all'interno del cristallo.
- Plasticità può essere ulteriormente suddivisa in:
  - **dislocation glide**
  - **dislocation creep**

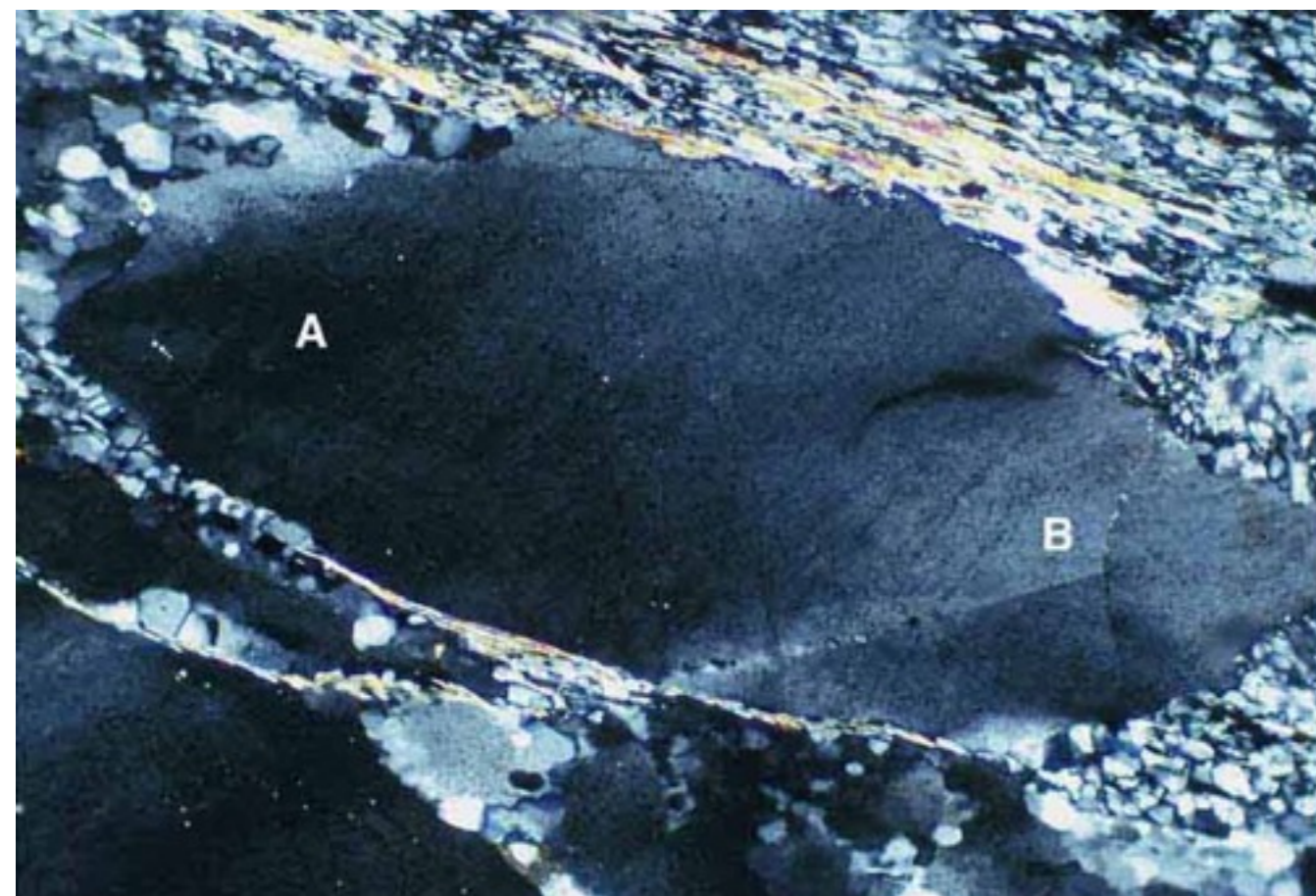
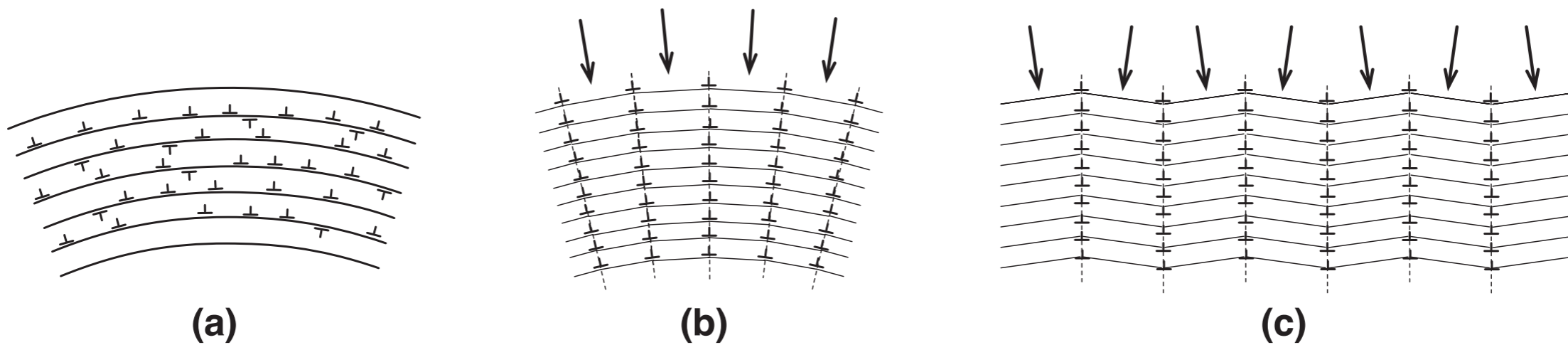
# Plasticità - Dislocation glide

Durante una deformazione plastica per dislocation glide si ha:

- formazione e movimento di dislocazioni sempre sui soliti piani reticolari (no climb e movimento verticale di dislocazioni);
- l'interazione tra dislocazioni sul solito piano reticolare rende difficoltoso il loro ulteriore movimento (strain hardening);
- dislocation glide porta a cataclasi se si ha aumento di stress;
- questo meccanismo è attivo a basso stress e basse temperature omologhe.

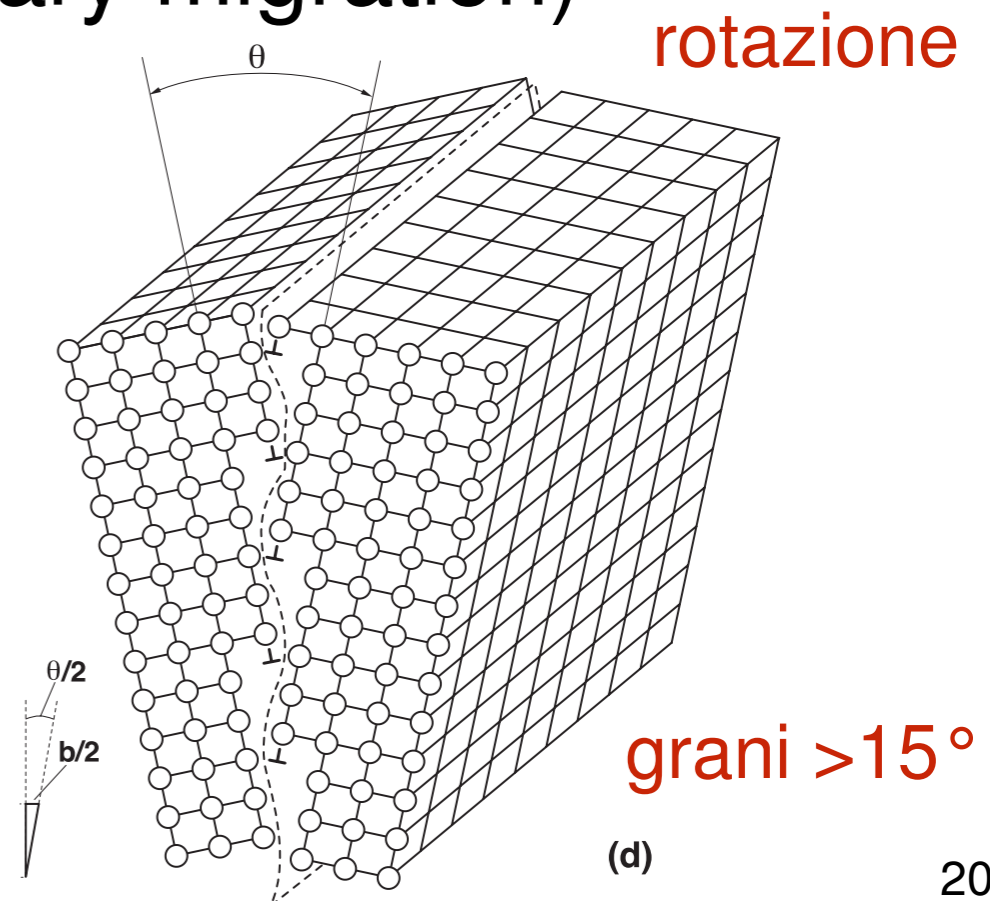
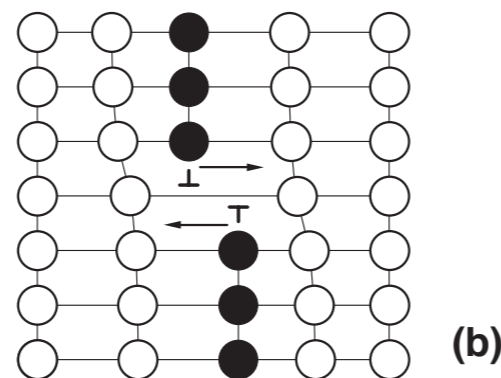
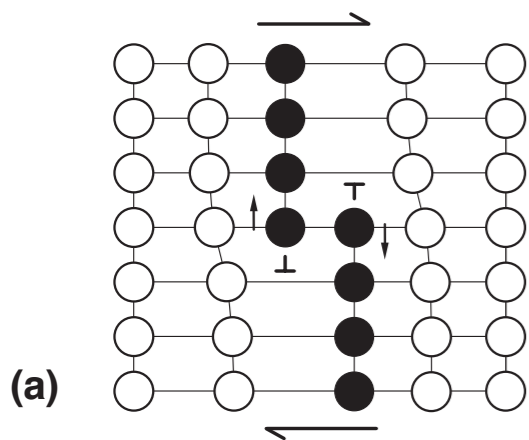
# Plasticità - Dislocation glide

Microstrutture tipiche da dislocation glide



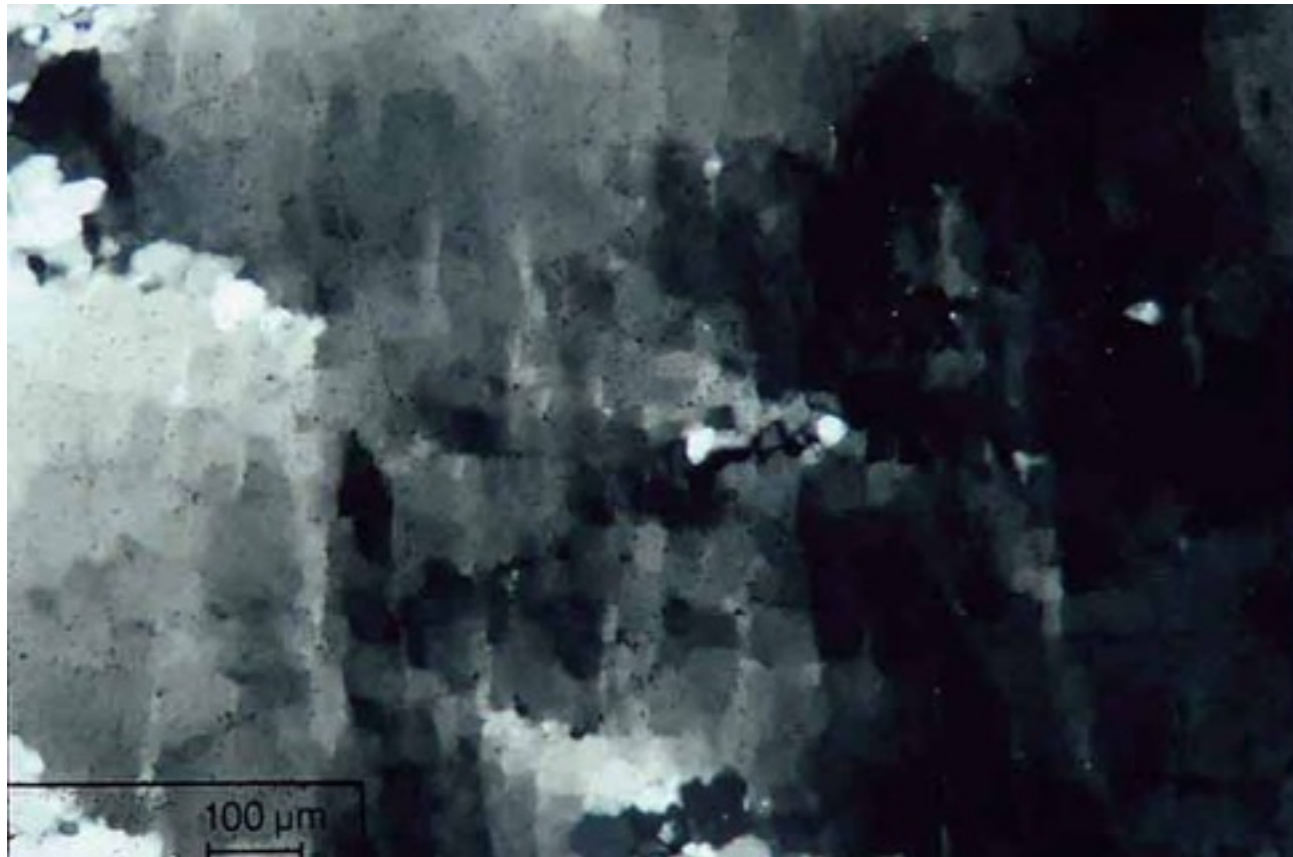
# Plasticità - Dislocation creep

- Si ha formazione e movimenti dislocazioni, ma possono spostarsi su piani reticolari differenti (climb)
- La continua eliminazione e riorganizzazione di dislocazioni su piani a bassa energia porta alla formazione di subgrani, di grani e alla migrazione dei limiti tra i grani (grain boundary migration)

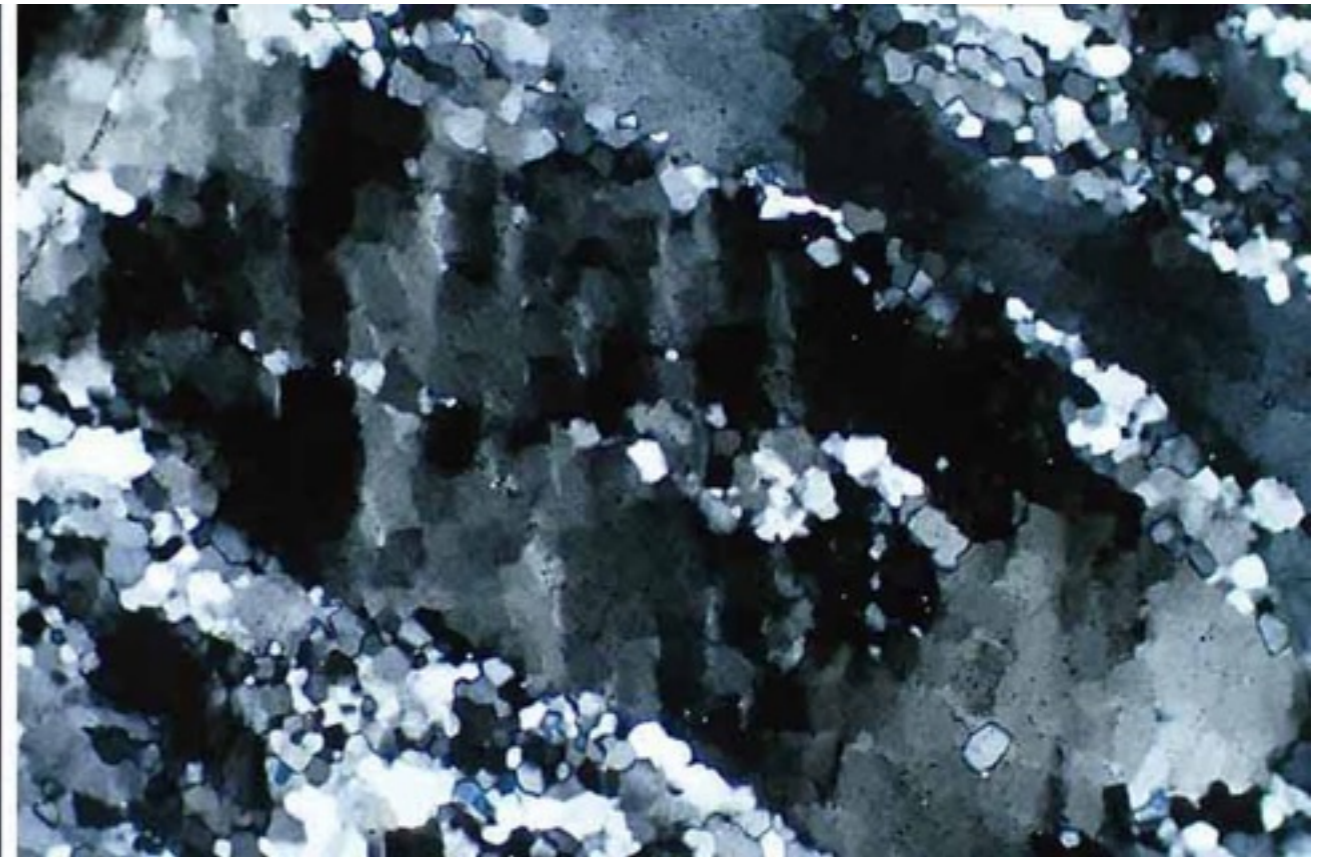


# Plasticità - Dislocation creep

## Microstrutture



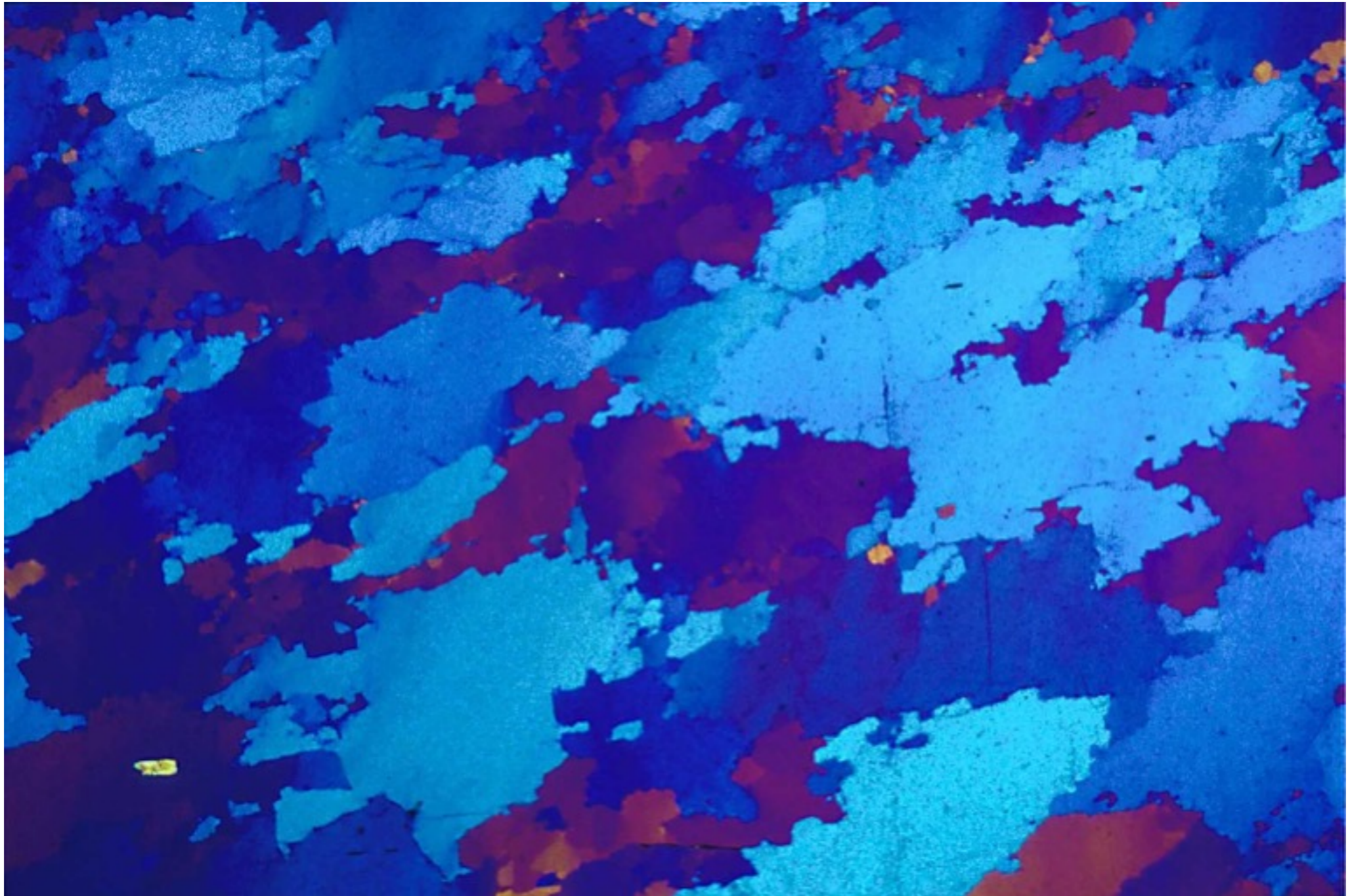
subgrani



nuovi grani

# Plasticità - Dislocation creep

Microstruttura



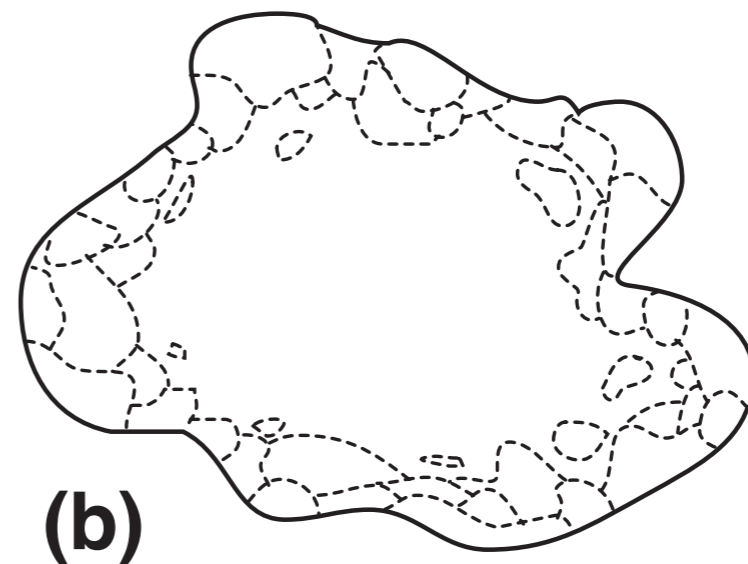
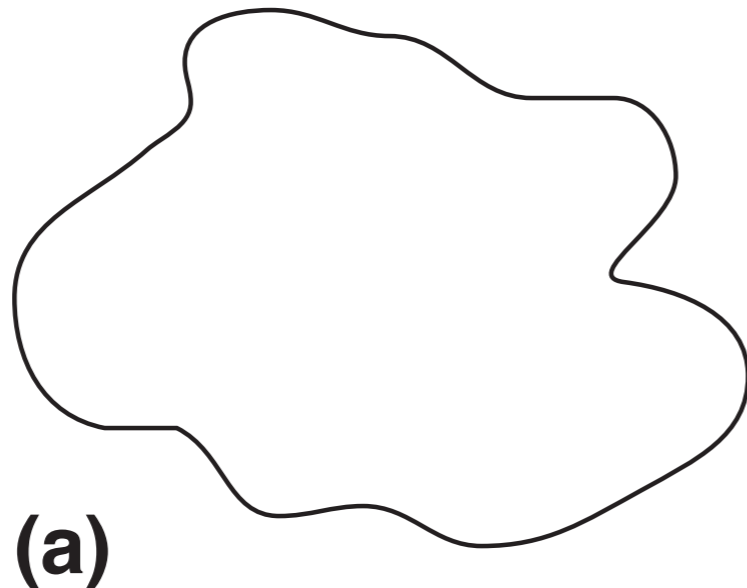
grain boundary migration

# Plasticità - Dislocation creep

- Eliminazione e riorganizzazione di dislocazioni rende possibile deformazioni con valori di strain molto elevati (strain softening).
- Dislocation creep è attivo a medie ed alte temperature (omologhe).
- La transizione dislocation glide-dislocation creep è fortemente influenzata dalla temperatura.
- La dimensione finale dei granuli dipende dalla granulometria iniziale e dallo stress applicato (e solo subordinatamente dalla temperatura e dalla velocità di deformazione).

# Plasticità - Dislocation creep

- La formazione di nuovi grani per rotazione durante dislocation creep avviene partendo dalle zone esterne del cristallo originario;
- in questo modo si possono osservare cristalli in cui il nucleo è preservato ed è circondato subgrani e da grani di dimensioni minori (strutture “core-mantle”).
- Se la ricristallizzazione procede nuovi subgrani si formeranno all’interno del grano, fino a portare alla sua completa obliterazione.

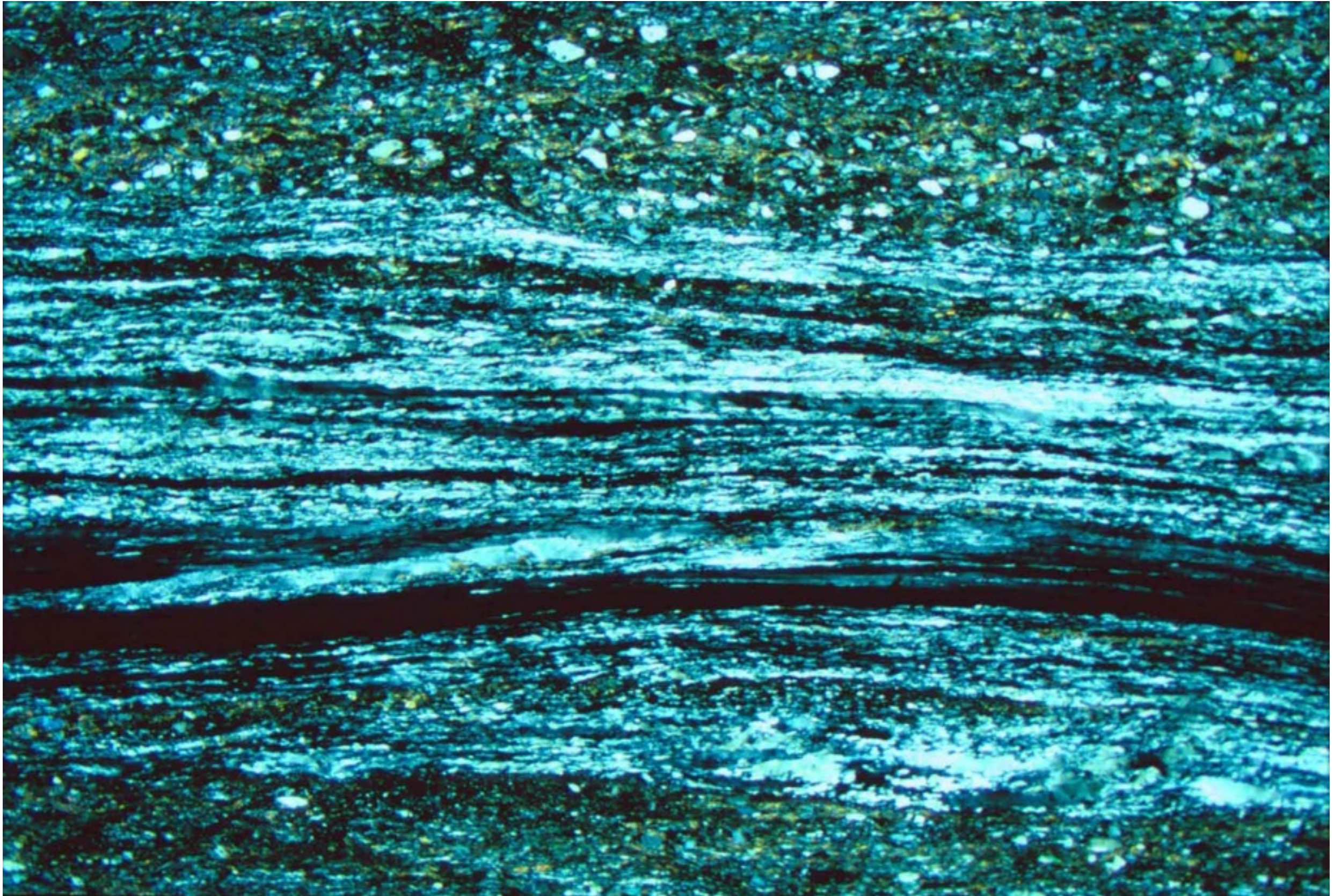




# Plasticità - Dislocation creep



# Plasticità - Dislocation creep



# Plasticità - Dislocation creep



# Plasticità - Ricristallizzazione dinamica

- Una deformazione con il meccanismo deformativo di plasticità porta a ricristallizzazione dinamica (o sintettonica).
- Riduzione dell'energia elastica presente nel cristallo legata alla presenza di dislocazioni.

La densità di dislocazioni viene diminuita e mantenuta a valori bassi da:

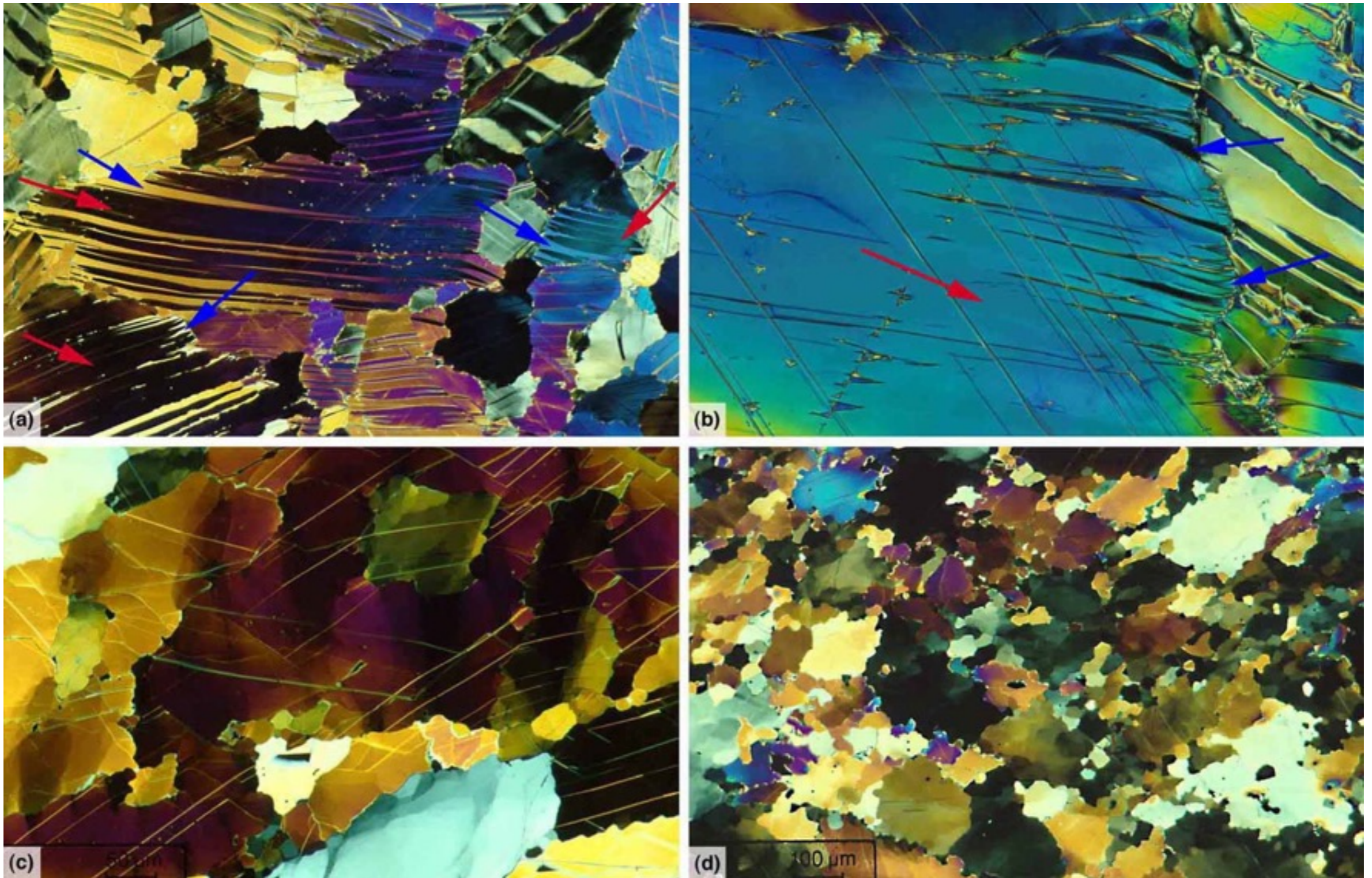
- movimento di dislocazioni, climb e loro riorganizzazione lungo i limiti tra subgrani e i limiti tra grani (ricristallizzazione per rotazione).
- migrazione dei limiti tra i grani da zone del cristallo a bassa densità di dislocazioni verso zone ad alta densità di dislocazioni (grain boundary migration).

# Plasticità - Ricristallizzazione dinamica

- La ricristallizzazione per rotazione avviene a temperature omologhe basse e porta ad una diminuzione della grana della roccia.
- La ricristallizzazione per grain boundary migration avviene a temperature omologhe medio-alte e porta ad una diminuzione o ad un aumento della grana della roccia, a seconda delle dimensioni iniziali dei grani e della temperatura.

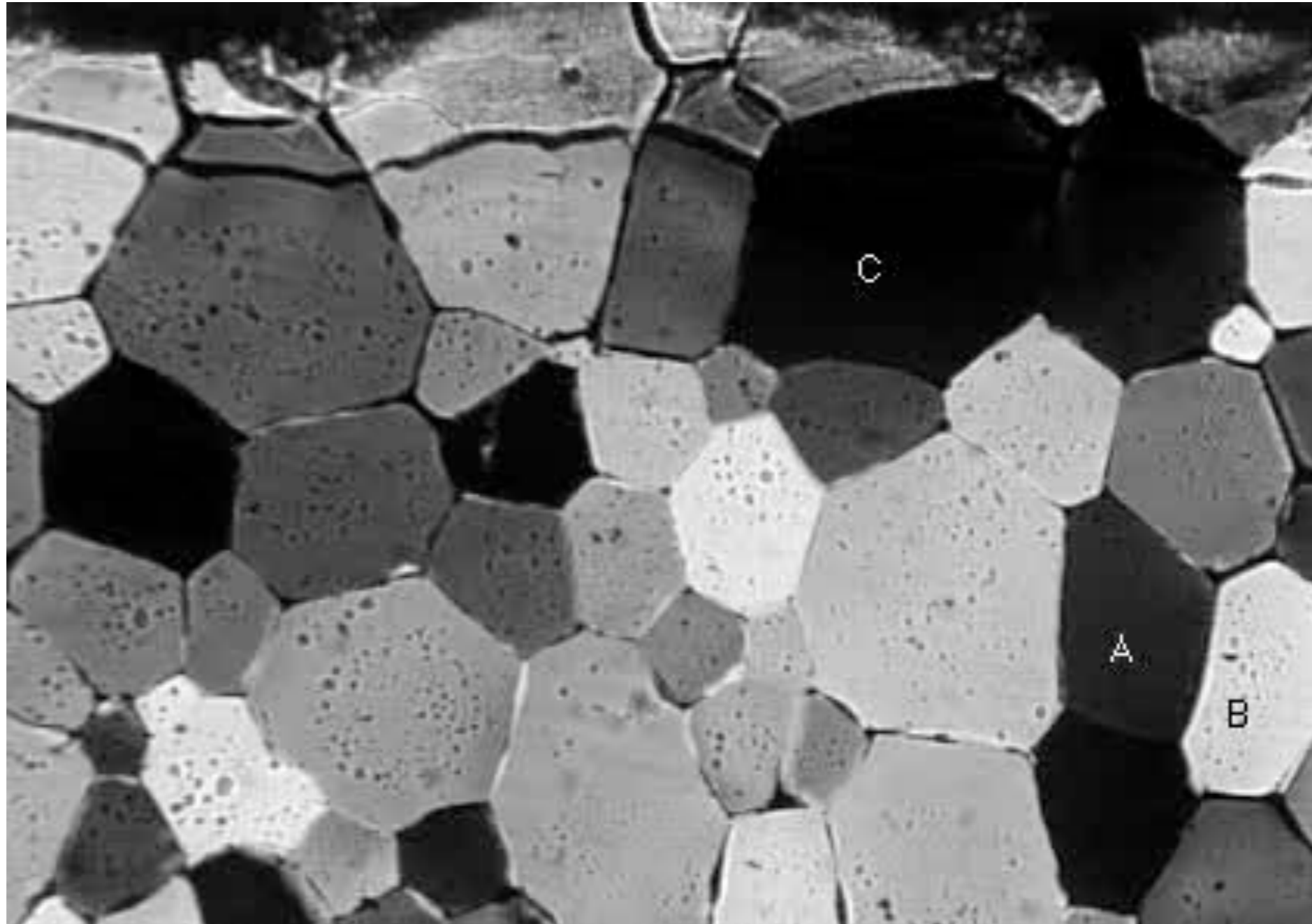
# Plasticità - Ricristallizzazione dinamica

Ricristallizzazione plastica sintettonica (marmo)



# Ricristallizzazione dinamica

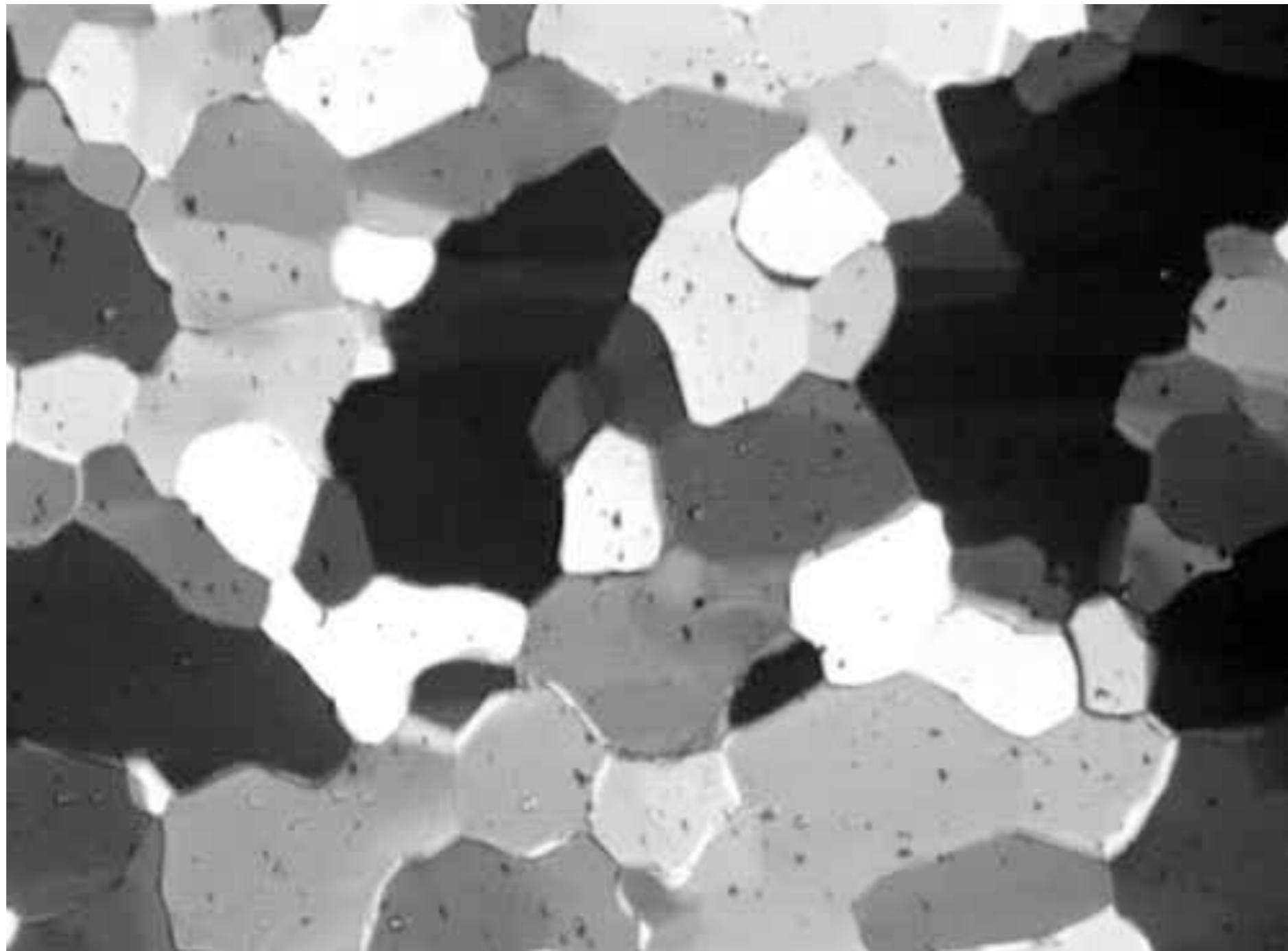
(video) formazione subgrani



*Youngdo Park, Jin-Han Ree & Win Means*

# Ricristallizzazione dinamica

(video) formazione subgrani - taglio puro

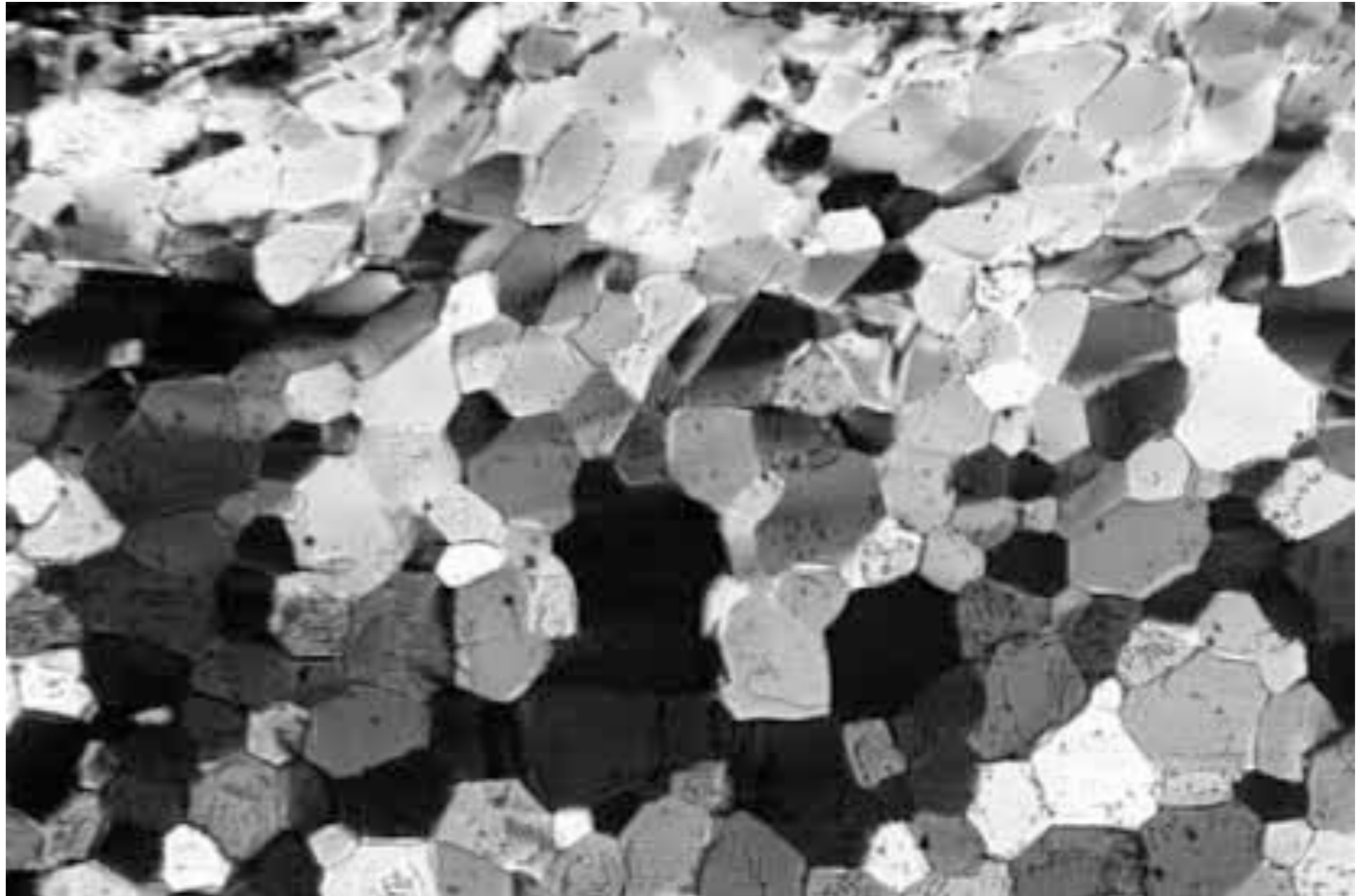


*Youngdo Park, Jin-Han Ree & Win Means*



# Ricristallizzazione dinamica

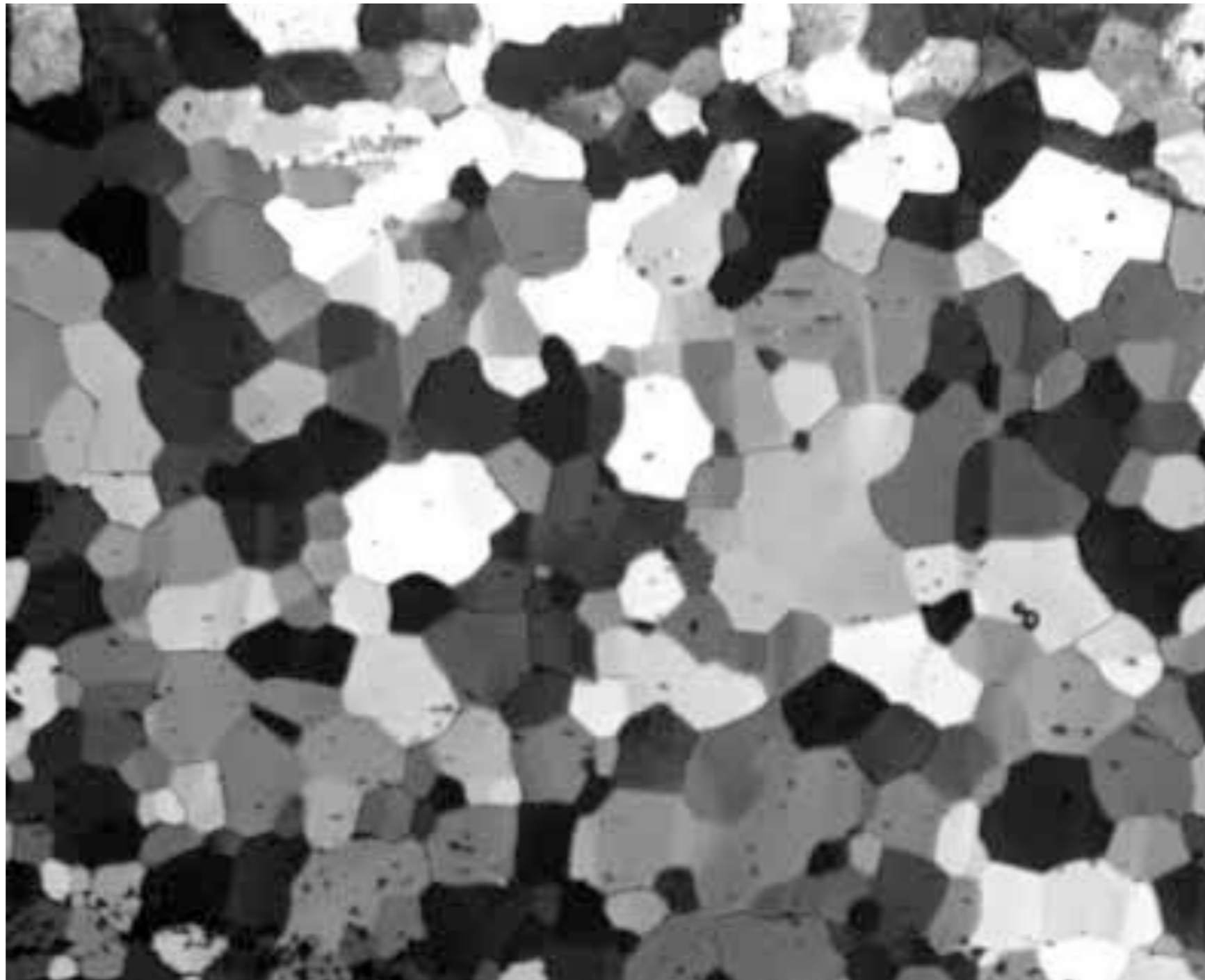
(video) localizzazione della deformazione



*Youngdo Park, Jin-Han Ree & Win Means*

# Ricristallizzazione dinamica

(video) grain boundary migration, aumento dimensioni grani



*Youngdo Park, Jin-Han Ree & Win Means*

# Plasticità - Ricristallizzazione dinamica

- Oltre alle microstrutture viste la ricristallizzazione dinamica conduce allo sviluppo di:
- foliazioni complesse;
- orientazioni cristallografiche preferenziali
- indicatori cinematici

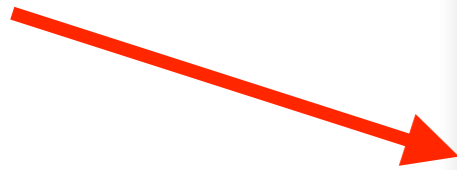
(vedremo in seguito)

# Scivolamento viscoso

## Meccanismi deformativi

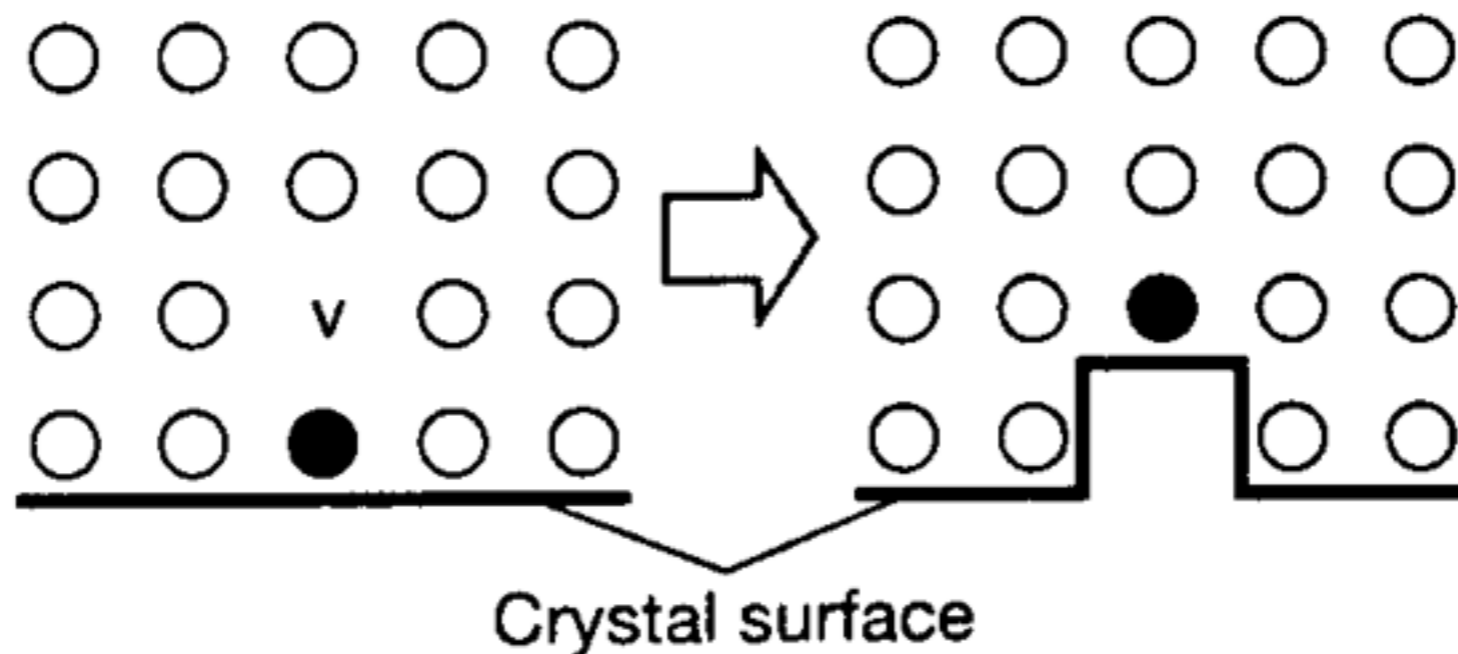
I meccanismi deformativi che possono operare in rocce sono:

- **Cataclasi**, in cui si ha fratturazione, perdita di coesione e scivolamento tra i granuli;
- **Plasticità**, con deformazione intracristallina per movimento di dislocazioni o per geminazione;
- **Scivolamento viscoso**, in cui lo strain è accomodato da diffusione di materia;
- **Dissoluzione e riprecipitazione** (pressure solution), con diffusione e trasporto di materia assistito dalla presenza di fluidi intergranulari.



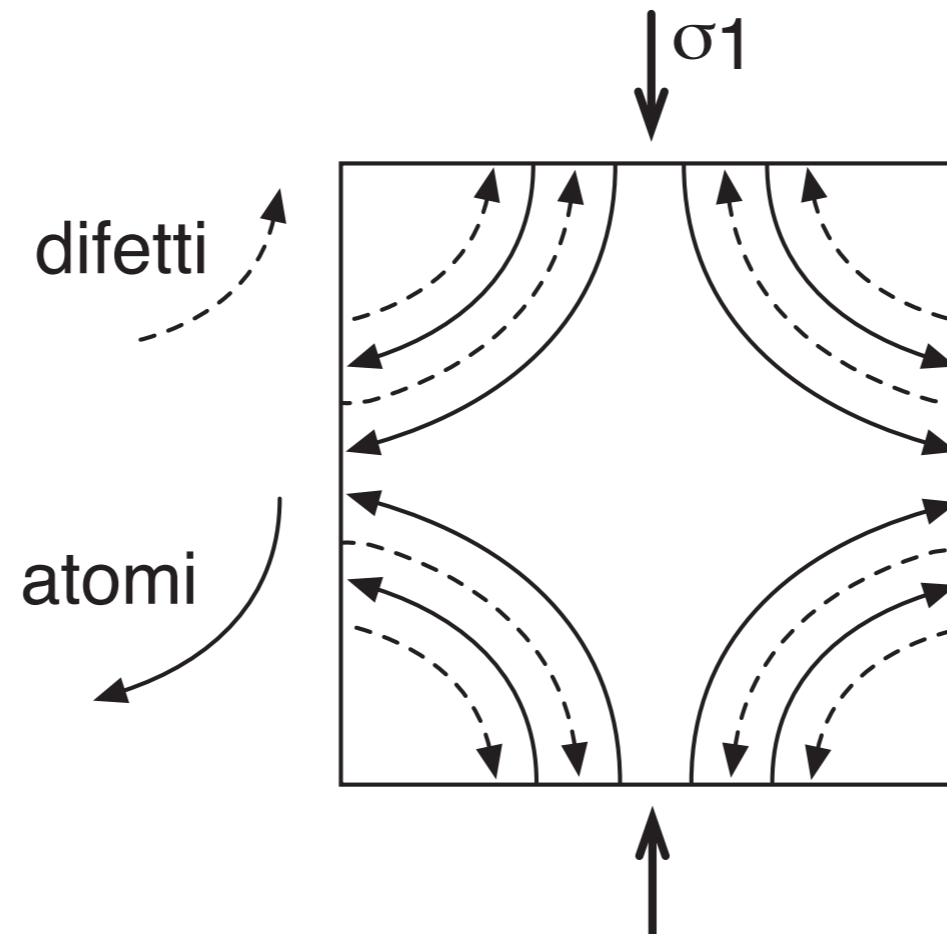
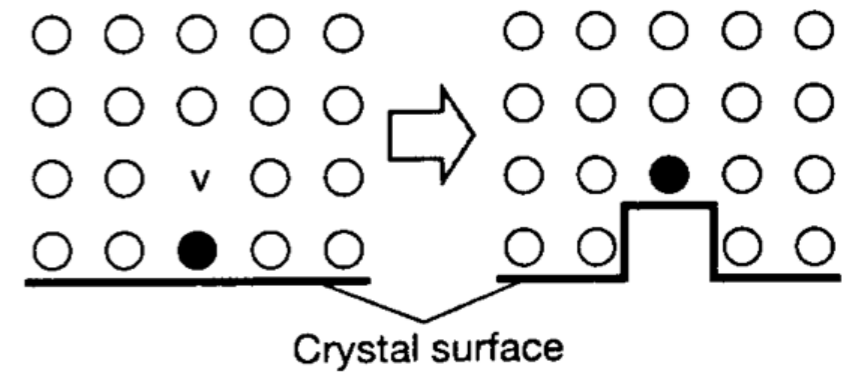
# Scivolamento viscoso

- Importante nella deformazione di una roccia se le dimensioni iniziali dei grani sono abbastanza piccole da permettere ai processi di diffusione di procedere, e perciò di accomodare strain, con una velocità maggiore rispetto alla velocità di movimento delle dislocazioni nel cristallo.



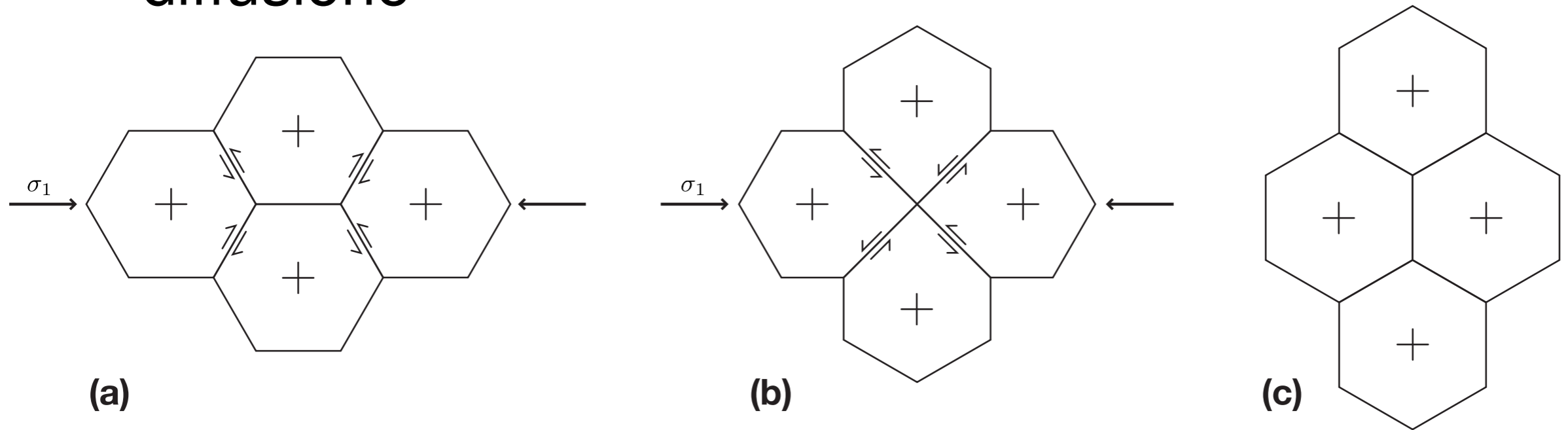
# Scivolamento viscoso

- Durante diffusione quindi il movimento di atomi in una direzione è bilanciato dal movimento di difetti nella direzione opposta



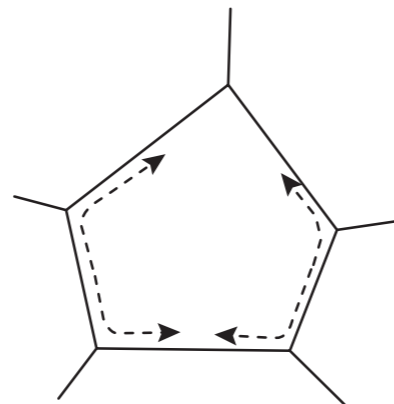
# Scivolamento viscoso

- Un aggregato di grani cambia di forma (deformazione)
- la posizione dei singoli grani cambia, con relativo scivolamento lungo i limiti, accomodato da diffusione

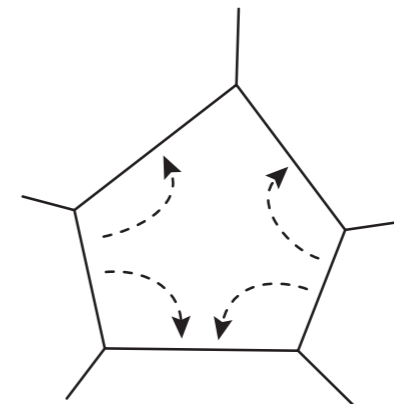


*Doble creep*

(d)



(e)

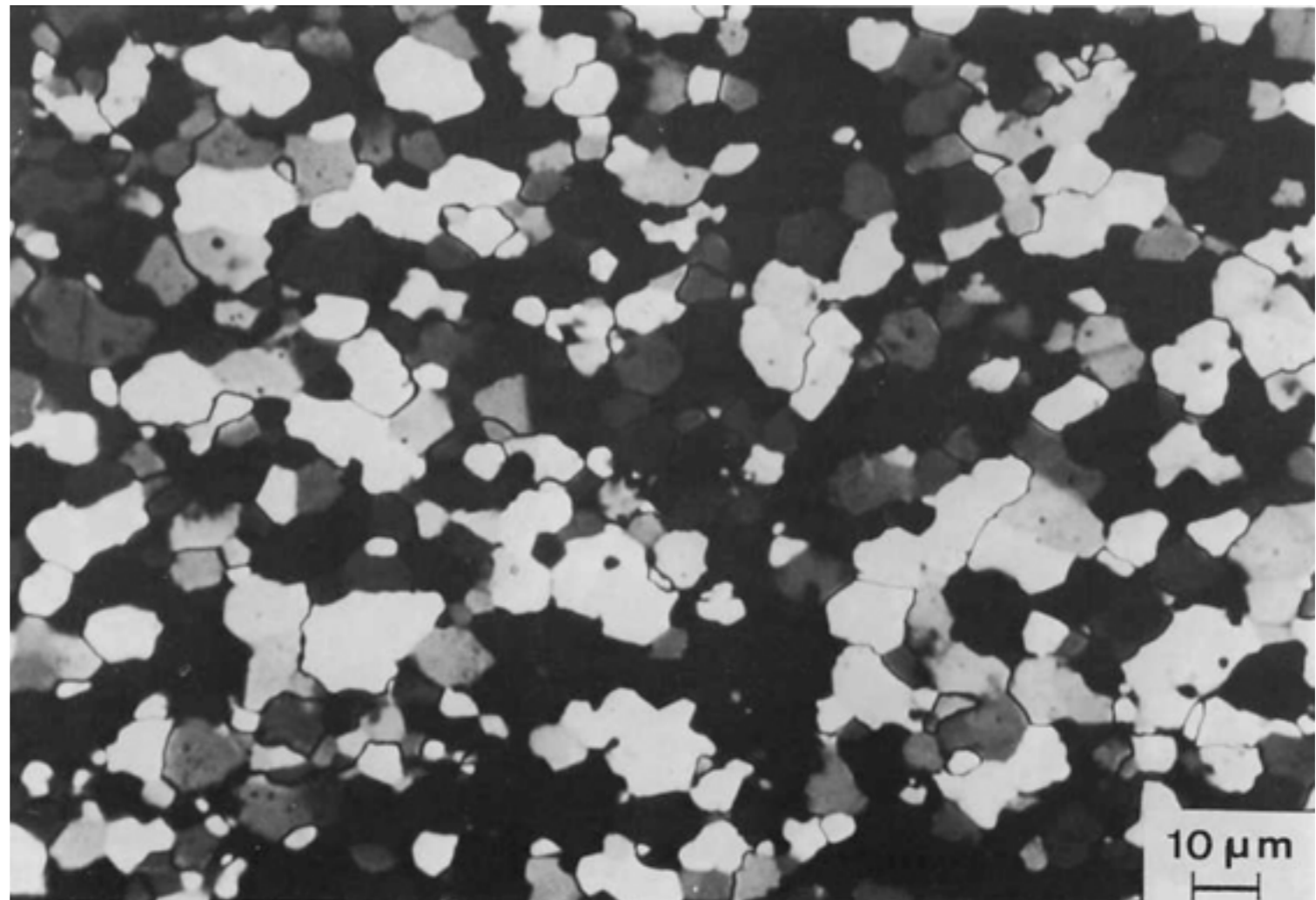


*Nabarro-Herring  
creep*

# Scivolamento viscoso

- Caratteri tipici di questo meccanismo deformativo sono:
- grana ridotta della roccia;
- debole orientazione preferenziale di forma e cristallografica dei cristalli (superplasticità).

calcare Solnhofen  
def. 900 °C



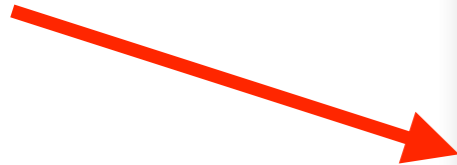


# Dissoluzione e riprecipitazione

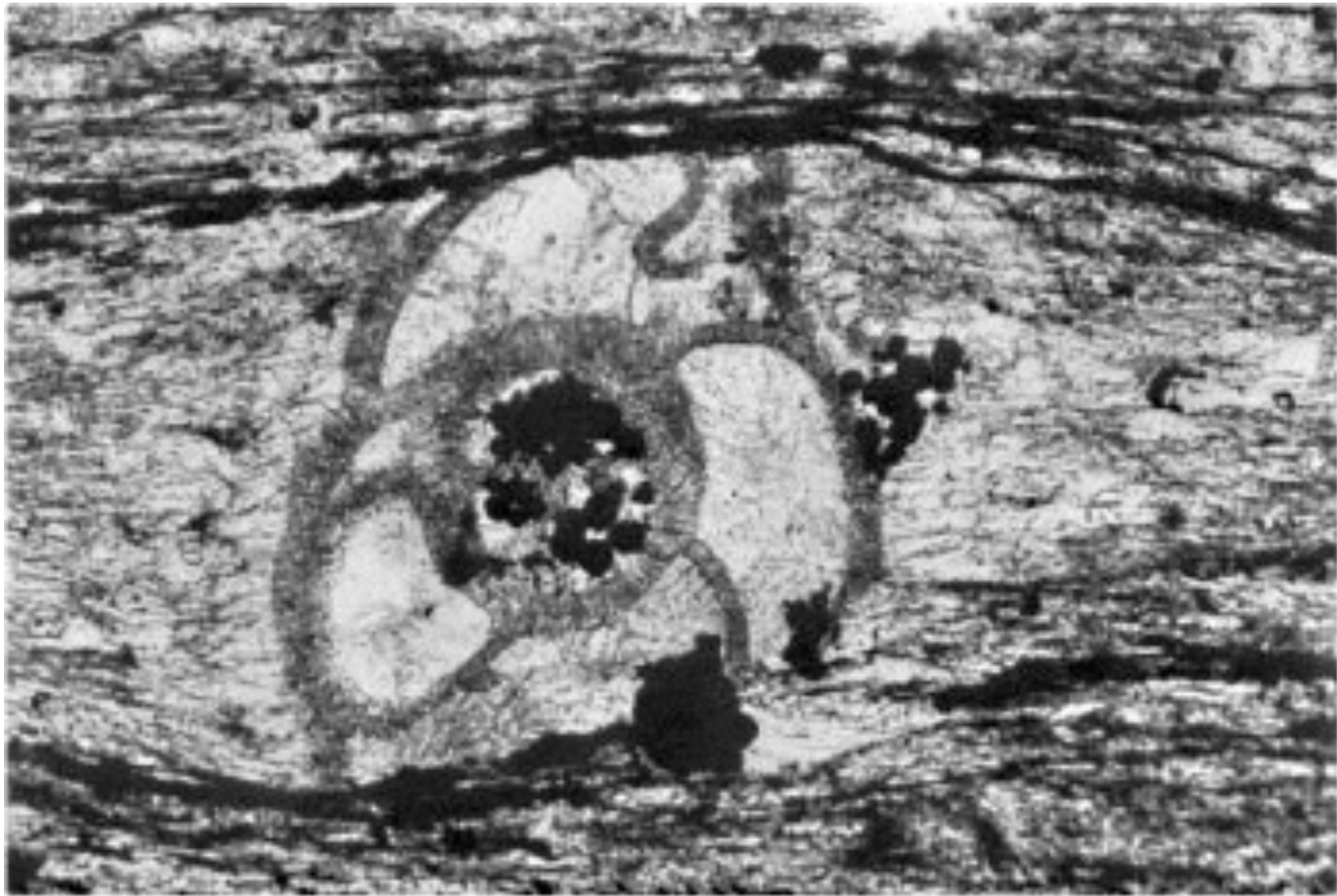
## Meccanismi deformativi

I meccanismi deformativi che possono operare in rocce sono:

- **Cataclasi**, in cui si ha fratturazione, perdita di coesione e scivolamento tra i granuli;
- **Plasticità**, con deformazione intracristallina per movimento di dislocazioni o per geminazione;
- **Scivolamento viscoso**, in cui lo strain è accomodato da diffusione di materia;
- **Dissoluzione e riprecipitazione** (pressure solution), con diffusione e trasporto di materia assistito dalla presenza di fluidi intergranulari.



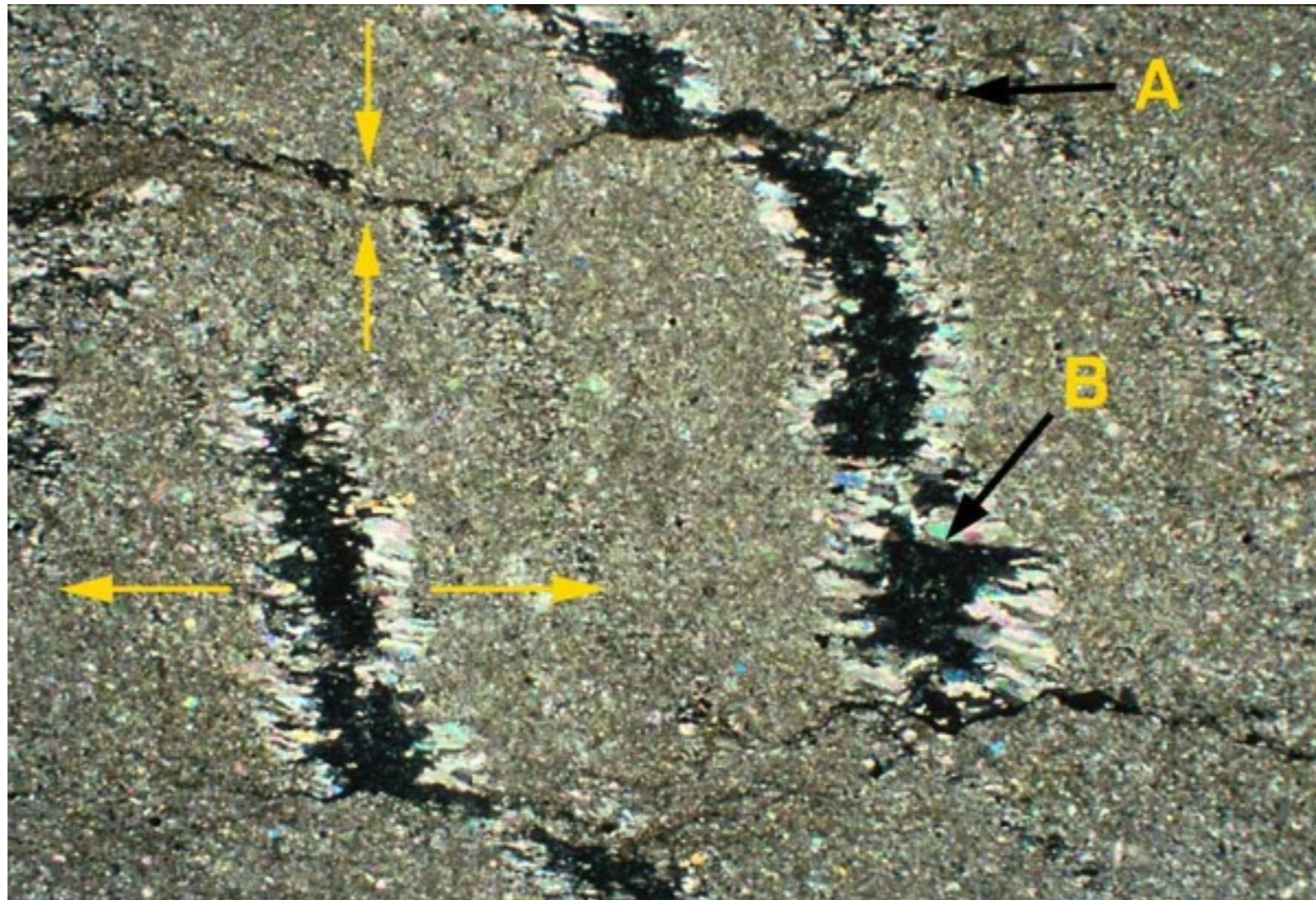
# Dissoluzione e riprecipitazione



0.1mm

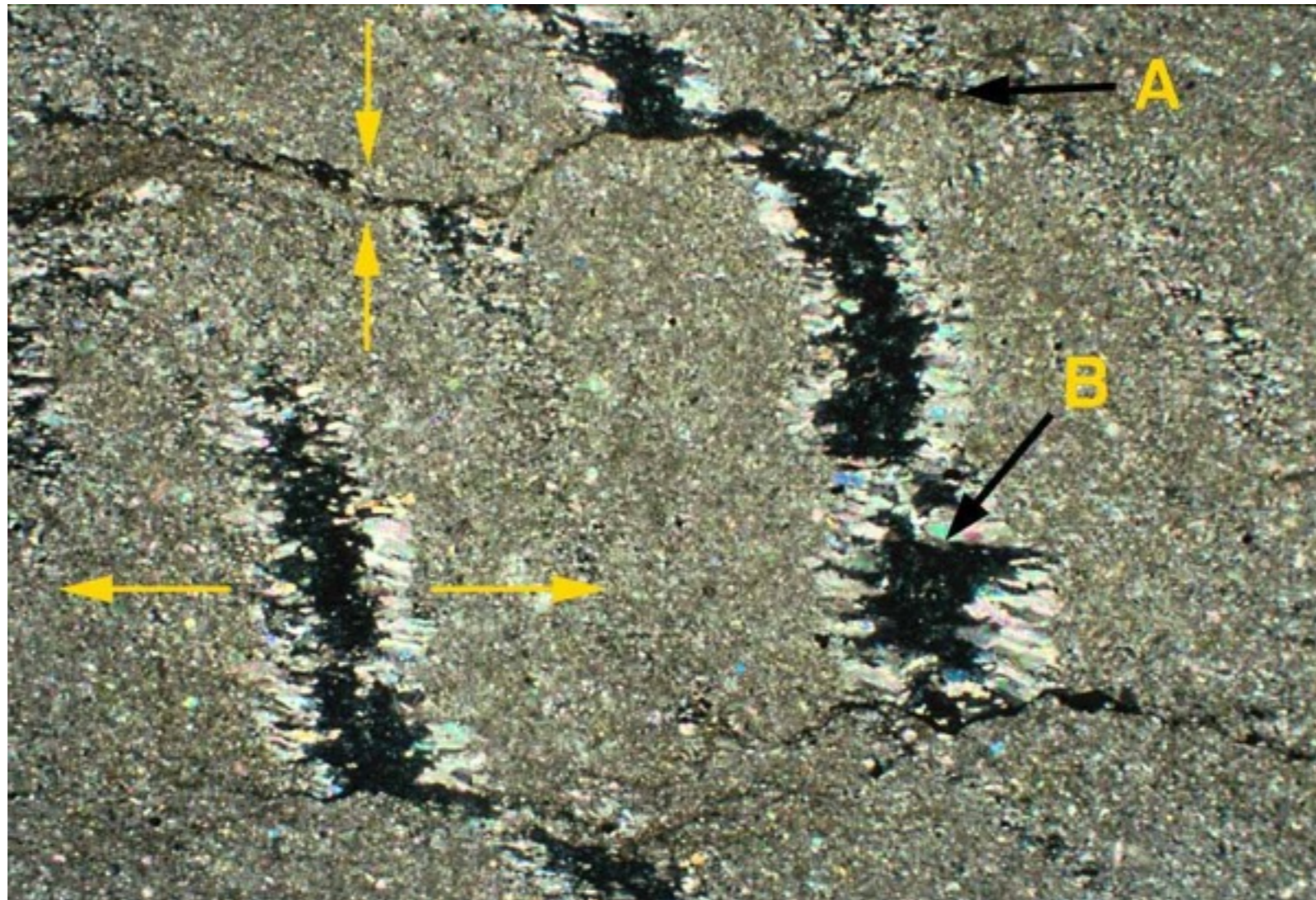
# Dissoluzione e riprecipitazione

- trasporto di materia mediante una fase fluida intragranulare
- un minerale può entrare in soluzione e successivamente può ricristallizzare



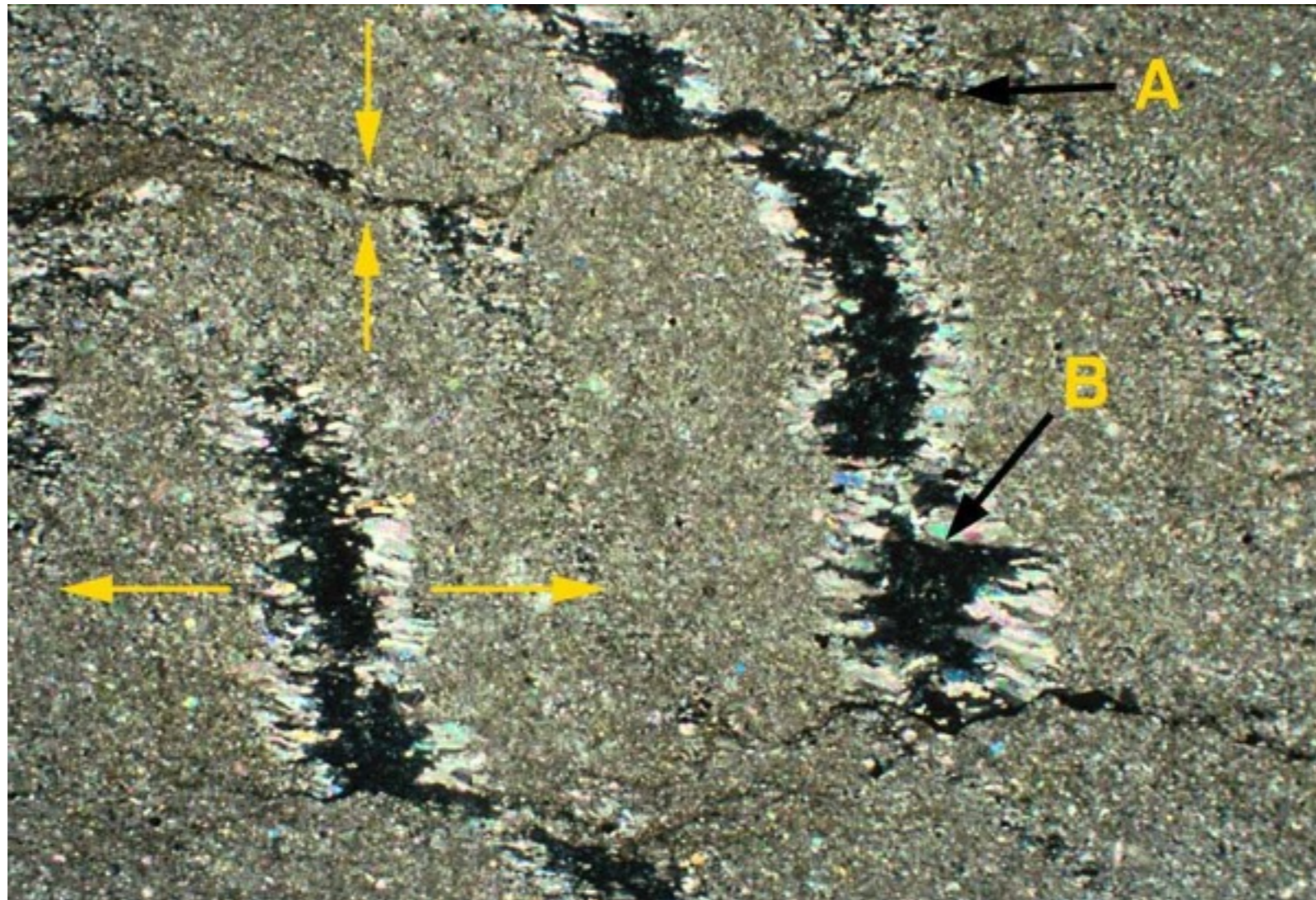
# Dissoluzione e riprecipitazione

- dissoluzione avviene in quella parte della superficie dei grani su cui agisce lo sforzo principale.
- Gli atomi si diffondono nella fase fluida, vengono trasportati lungo i limiti tra i grani e quindi riprecipitano in zone a basso stress.



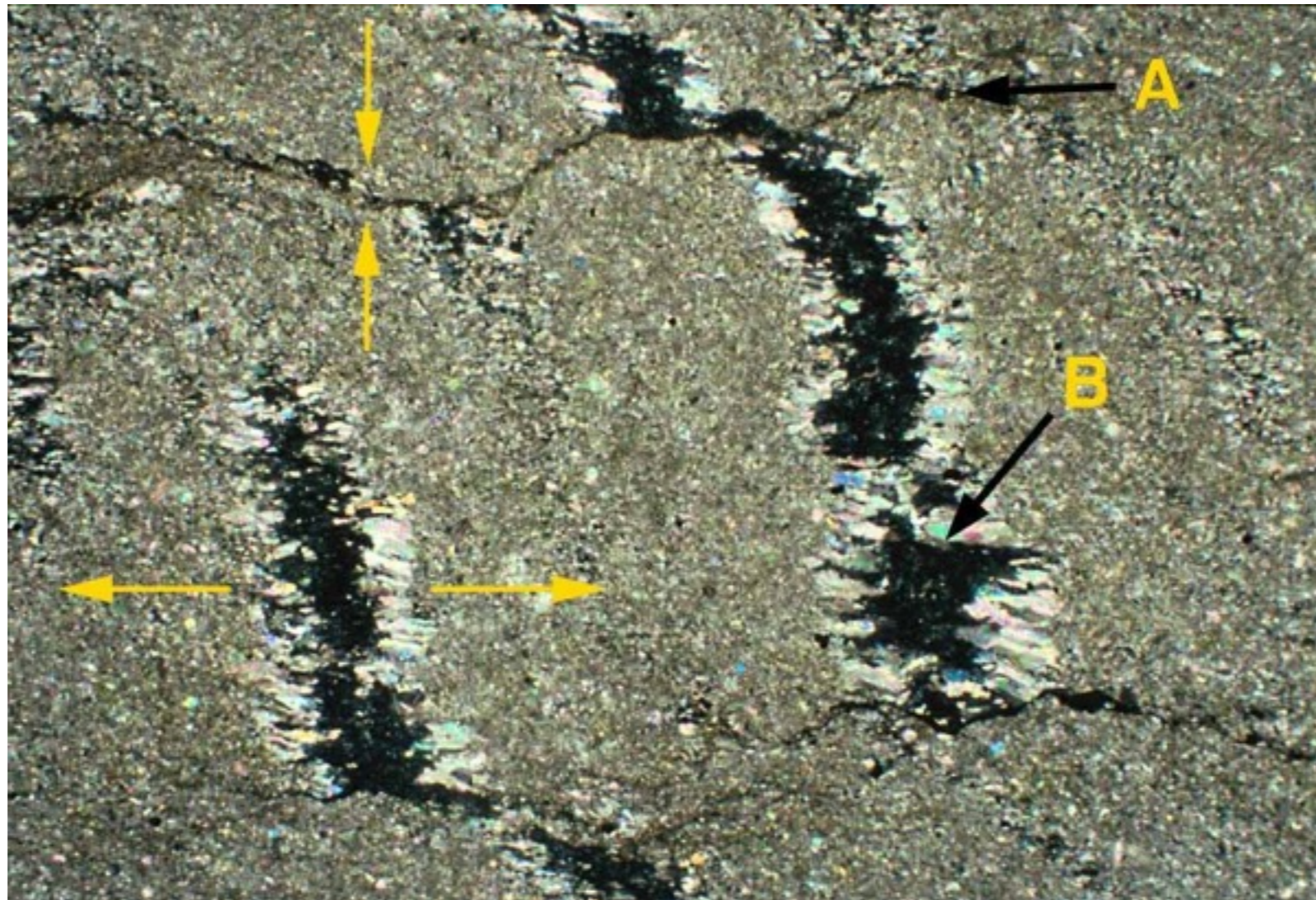
# Dissoluzione e riprecipitazione

- importante se la grana della roccia è piccola
- fortemente influenzata dalla presenza e composizione della fase fluida e dalla composizione e permeabilità della roccia.



# Dissoluzione e riprecipitazione

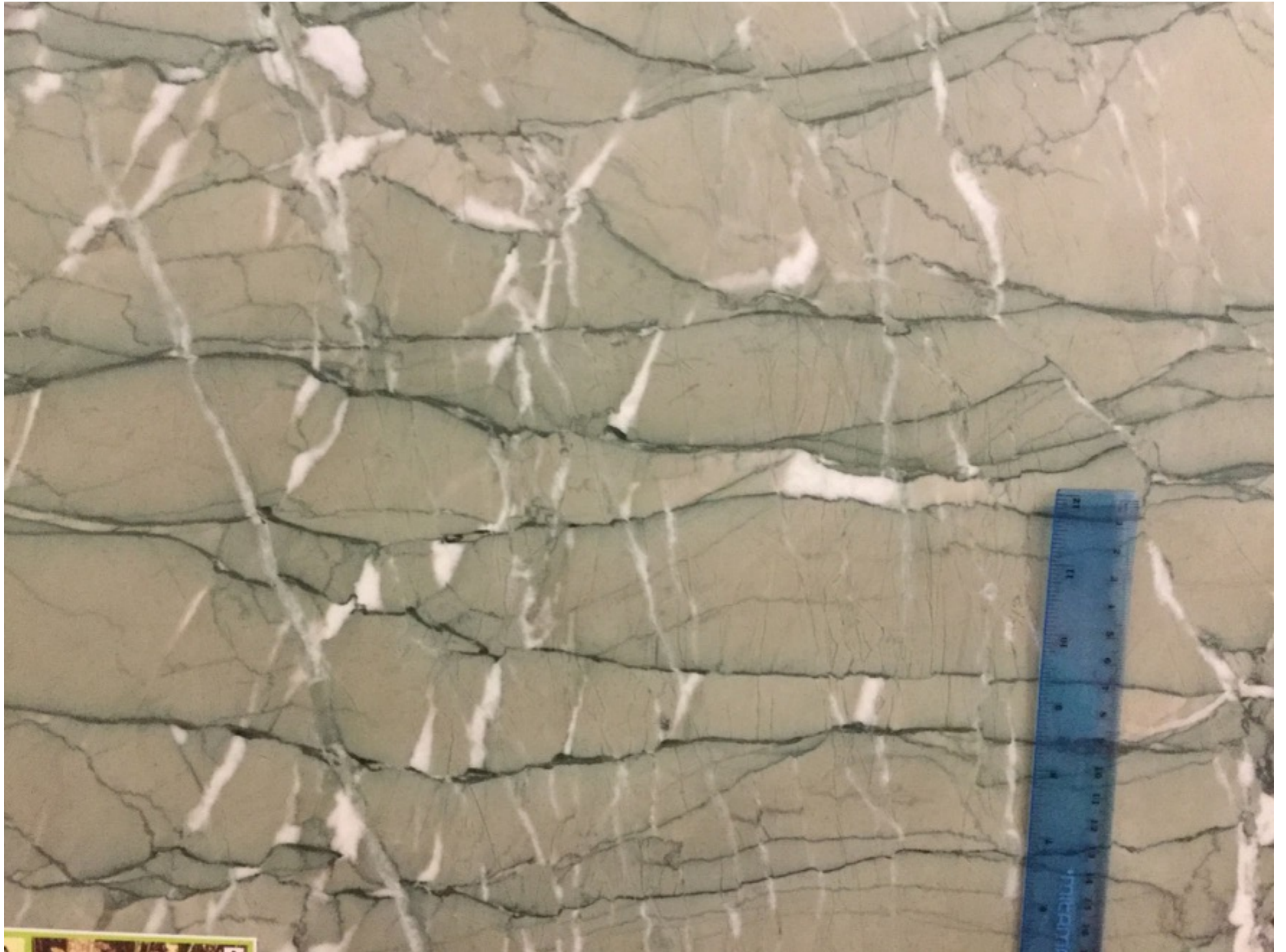
- è un meccanismo molto diffuso di deformazione in rocce in condizioni di bassa temperatura e pressione
- generalmente non può accomodare una grande quantità di strain, se paragonato agli altri meccanismi deformativi.



# Dissoluzione e riprecipitazione



# Dissoluzione e riprecipitazione





# Meccanismi deformativi

## Riconoscimento in sez. sottile

| Meccanismo deformativo          | Caratteri microstrutturali  |
|---------------------------------|---|
| Cataclasi                       | <ul style="list-style-type: none"><li>a) Grani, aggregati di grani e frammenti di grani fratturati e di forma angolosa e sub-angolosa.</li><li>b) Microfratture intergranulari, intragranulari e trasgranulari</li><li>c) Superfici di scivolamento parallele ed oblique rispetto alla superficie di taglio principale.</li><li>d) Allineamenti di grani e talvolta sviluppo di foliazione.</li><li>e) Vetro o massa di fondo ultrafine in pseudotachiliti.</li></ul> |
| Plasticità                      | <ul style="list-style-type: none"><li>a) Estinzione ondulata, bande di deformazione, lamelle di deformazione, geminati da deformazione.</li><li>b) Ricristallizzazione di subgrani e grani.</li><li>c) Limiti dei grani instabili (ondulati, arcuati, lobati, a cuspidi).</li><li>d) Foliazione, foliazioni complesse (strutture S-C) e orientazioni preferenziali di forma.</li><li>e) Orientazioni cristallografiche preferenziali.</li></ul>                       |
| Scivolamento viscoso            | <ul style="list-style-type: none"><li>a) Orientazioni preferenziali di forma deboli o assenti (grani equidimensionali).</li><li>b) Orientazioni cristallografiche preferenziali deboli o assenti.</li><li>c) Limiti dei grani rettilinei o debolmente arcuati.</li><li>d) Grana molto fine.</li></ul>   |
| Dissoluzione e riprecipitazione | <ul style="list-style-type: none"><li>a) Crescita di cristalli in vuoti e in ombre di pressione.</li><li>b) Contatti tra i granuli frastagliati e suturati.</li><li>c) Sviluppo di stiloliti e vene.</li></ul>  |