



"...el enfoque más provechoso para el estudio cinemático tiene que ser el de futuros modelos basados en una sólida comprensión del comportamiento mecánico de las rocas y de la teoría del flujo"

Jiang & Williams (1999)

Diferentes estructuras en distintos afloramientos revelan diversos mecanismos de deformación



25/04/2016

3

Mecanismos de deformación y microestructuras

- **Deformación interna:**
 - Se acumula por procesos de deformación operantes en las escalas **microscópica y atómica**.
 - Llevan al cambio de forma o volumen de la **microestructura** en su conjunto, a partir de lo que ocurre dentro de las propias fases minerales.
- **Procesos de desarrollo de la microestructura:**
 - Varían desde frágiles a dúctiles.
- **Deformación plástica intracrystalina:**
 - Proceso más complejo que el deslizamiento friccional entre granos.

25/04/2016

Prof. Adj. Enrique Masquelin

4

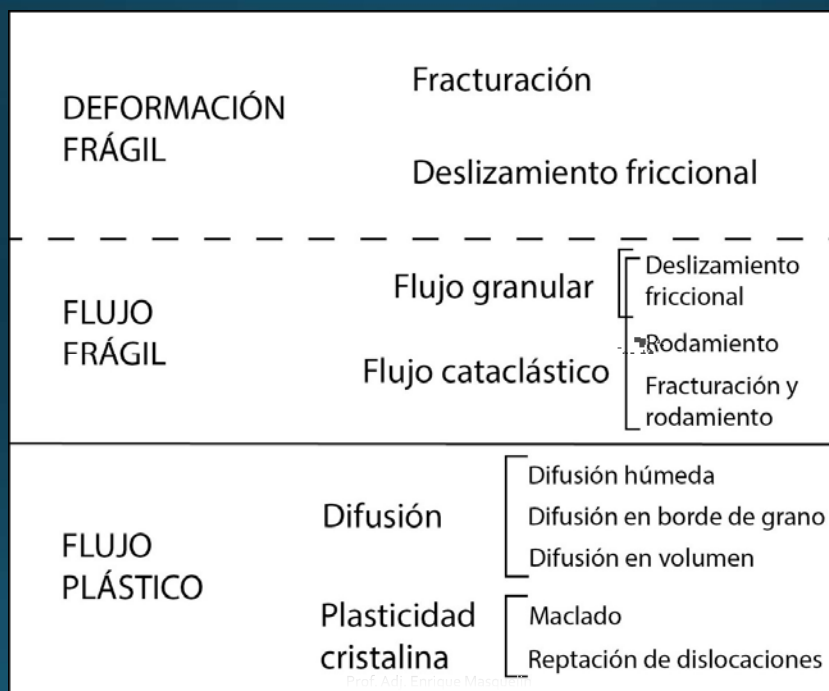
Mecanismos entre otros procesos

- **Mecanismos de deformación:**
 - Aquellos que producen el cambio de forma y volumen en los granos minerales.
 - Strain se acomoda por la activación de uno o más mecanismos a escala microscópica y submicroscópica.
- **Otros procesos competitivos:**
 - Procesos físico-químicos controlados por la *termodinámica* pero que no necesariamente cambian forma o volumen.

25/04/2016

Prof. Adj. Enrique Masquelin

5



25/04/2016

Prof. Adj. Enrique Masquelin

6

Deformación intracrystalina

- **Estructuras** revelan el **tipo de mecanismo** en escala microscópicas a submicroscópicas (atómica).
- **DEFORMACIÓN INTRACRISTALINA:**
 - Ocurre **dentro** de los granos.
 - Involucran el **retículo cristalino** de los minerales.
 - Algunas pueden ser observadas en **microscopio óptico** (fracturación, maclado, bandas), otras en **MEB**.

Deformación intercrystalina

- Mecanismos de deformación que afectan a **más de un** grano mineral.
 - Común en la deformación frágil.
- **Mecanismos** → controlados por esfuerzo diferencial.
- **Otros procesos** → controlados por difusión y cinética de crecimiento y reacción (procesos accesorios a la deformación).

Análisis cinemático global

- **Perspectiva tectonofísica de la deformación**
- **Procesos deformacionales**
 - *Mecanismos de flujo tectónico*
 - Conceptos de física (mecánica del continuo y metalurgia)
 - Conceptos de petrología estructural
 - Estudios experimentales
 - Modelado numérico

Mecanismos de deformación y microestructuras

- Cuando el *strain* se acumula:
 - Ciertos **mecanismos de deformación** ocurren a la escala microscópica.
- **Mecanismos:**
 - Le permiten a cada mineral **acomodar** el cambio de forma interna y/o volumen.
- **Microestructuras:**
 - Son aquellas que se desarrollan por deformación a **escala microscópica / submicroscópica**.

Definición de trama

- **Trama** [trad. *Fabric o Gefuge*] (Hobbs et al. 1976):
 - *arreglo tridimensional de todos los elementos espaciales, planares y lineares de una roca a escala microscópica*
- **Escala microscópica:**
 - Escala atómica (defectos de cristal)
 - Intracristalina (maclas)
 - Intercristalina (porfiroclastos)
 - Interfásica (*Bandas de cizalla*)

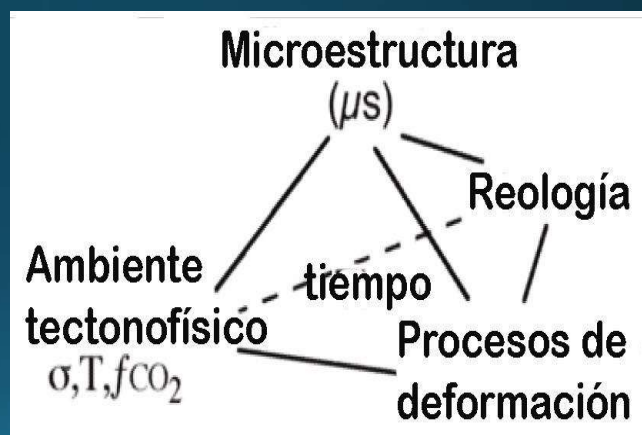
25/04/2016

Prof. Adj. Enrique Masquelin

11

Trama vs. Proceso

- **Registro geológico tridimensional:**
 - Proceso(s),
 - Ambiente tectonofísico,
 - Microestructura,
- **Correlación cinemática y mecánica de las tramas:**
 - Cambio de estado a través del tiempo → evolución.
 - Heterogeneidad espacial



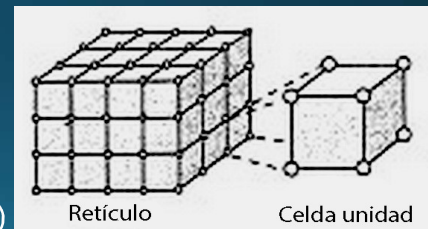
25/04/2016

Prof. Adj. Enrique Masquelin

12

Elementos de la trama

- **Propiedades vectoriales:**
 - forma de los granos o agregados mono o poliminerales.
- **Elementos cristalográficos:**
 - Planos y líneas del retículo (hábito planar y/o linear; e.g. Micas, turmalina).
- **Elementos no cristalográficos:**
 - discontinuidades estructurales
 - heterogeneidades del agregado
 - planares (bandeado, clivaje, esquistosidad)
 - lineares (ejes de pliegues, lineaciones minerales o de agregado).



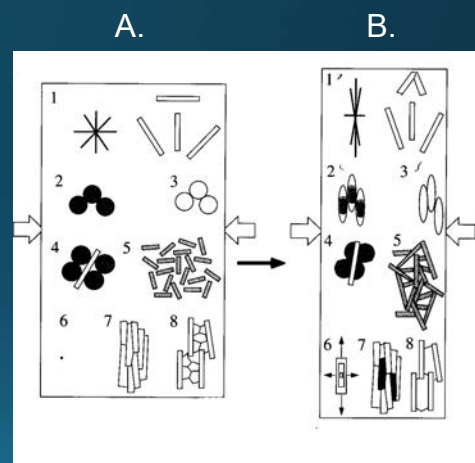
25/04/2016

Prof. Adj. Enrique Masquelin

13

Elementos de trama

- 1'. Cristales alargados con rotación pasiva.
- 2'. Elementos redondos afectados por disolución bajo presión.
- 3'. Elementos redondos afectados por plasticidad cristalina.
- 4'. Combinación 1' y 2'.
- 5'. Crecimiento orientado de filosilicatos que inducen aumento de la foliación.
- 6'. Neoblasto de crecimiento orientado.
- 7'. Crecimiento mimético.
- 8'. Crecimiento restringido.



- A. Antes de la deformación,
B. Después de la deformación

25/04/2016

Prof. Adj. Enrique Masquelin

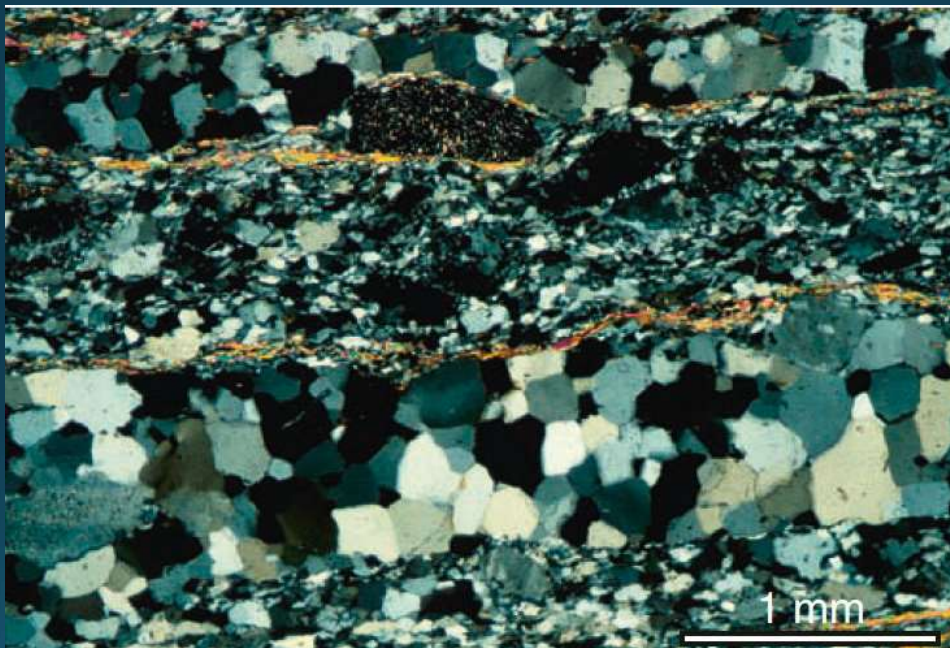
Trama microscópica

- **Orientación de forma o dimensional (OPD):**
 - Para un agregado policristalino mono o polimineral.
 - Independiente de la deformación intracristalina.
- **Orientación cristalográfica (OPR):**
 - Textura (relaciones de contacto entre minerales).
 - Equivale a "*Textura Metalúrgica*".
 - Cf. Hobbs *et al.* [1976], Nicolas y Poirier [1985], Schmid *et al.* [1979], Knipe [1989], Law [1990]).

25/04/2016

Prof. Adj. Enrique Masquelin

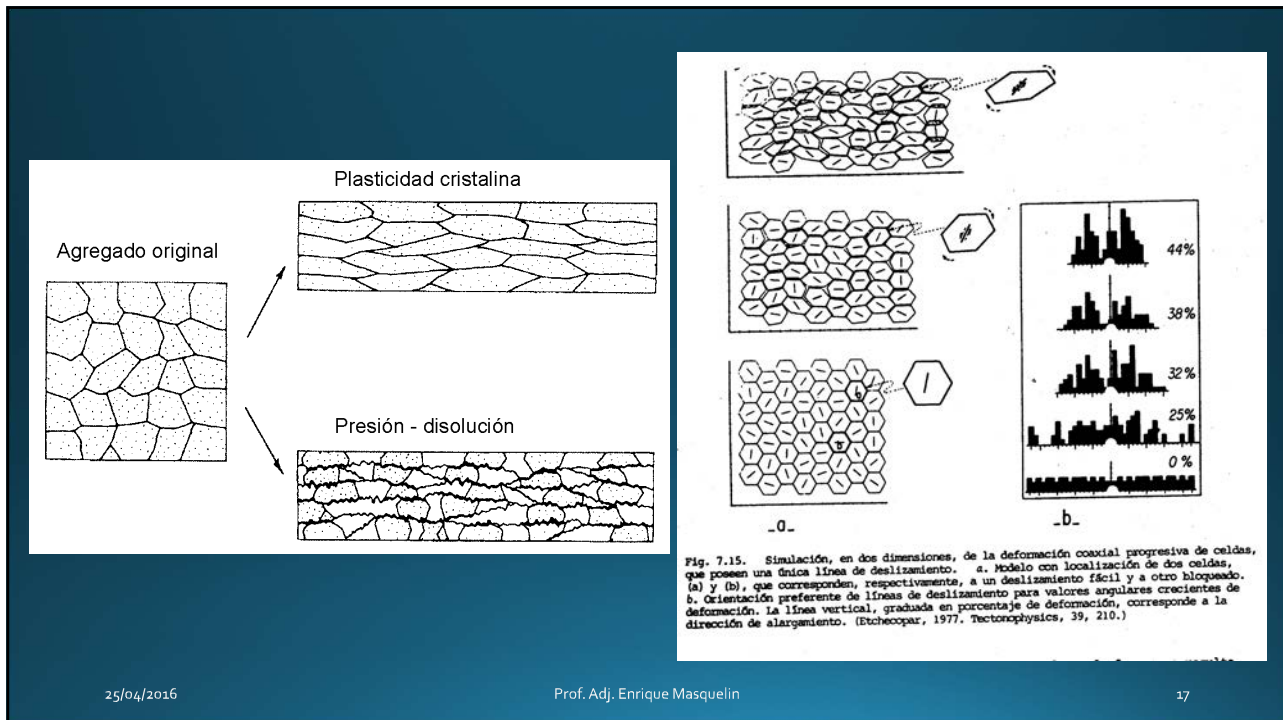
15



25/04/2016

Prof. Adj. Enrique Masquelin

16



25/04/2016

Prof. Adj. Enrique Masquelin

17

Objetivos de la Microtectónica

- Establecer la relación entre **trama** y **procesos mecánicos / termodinámicos** (durante deformación).
- Reconstruir **trayectoria de deformación** a partir de la correlación espacial del registro y **predecir la evolución** de la deformación.

25/04/2016

Prof. Adj. Enrique Masquelin

18

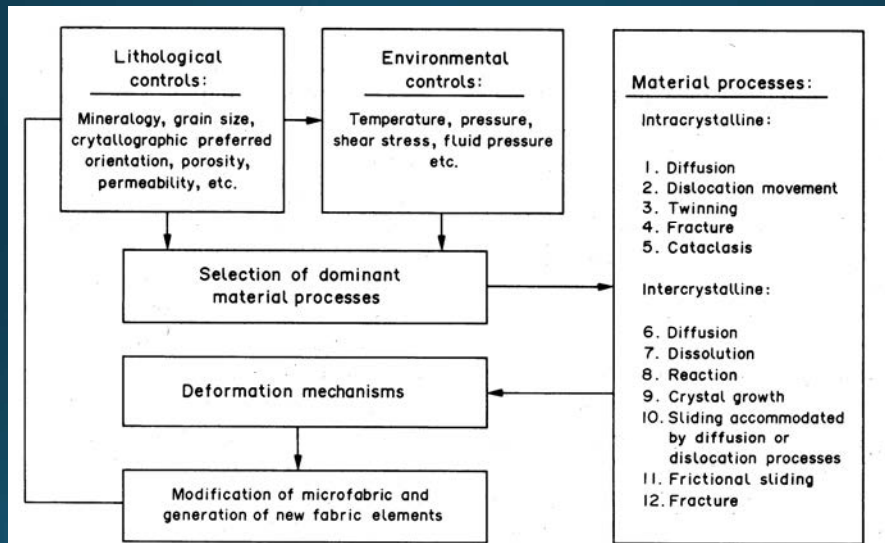
Variables litológicas

- Composición mineralógica
- % y distribución de fases minerales
- Anisotropía de forma (dimensional)
- Anisotropía cristalográfica
- Composición del fluido intergranular
- Tamaño de grano
- Porosidad
- Permeabilidad

Variables ambientales

- Temperatura
- Presión de confinamiento
- Esfuerzo diferencial
- Presión de fluidos
- Tasa de deformación (impuesta externamente)

Controles sobre la deformación de rocas



25/04/2016

Prof. Adj. Enrique Masquelin

(Knipe, 1989)

21

Tipos de mecanismos de deformación

- Deslizamiento friccional y flujo cataclástico.
- Plasticidad cristalina.
- Transferencia difusiva de masa.
- Superplasticidad.
- Procesos auxiliares:
 - Microfracturación asistida por fluidos.

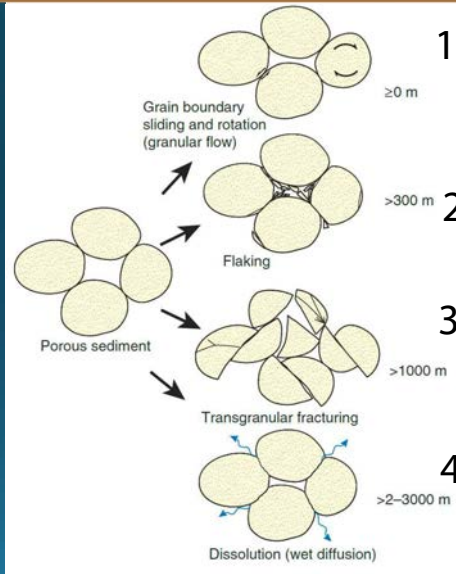
25/04/2016

Prof. Adj. Enrique Masquelin

22

Deslizamiento friccional

- 1) Deslizamiento intergranular.
- 2) Descamación.
- 3) Fracturación transgranular.
- 4) Disolución-re cristalización

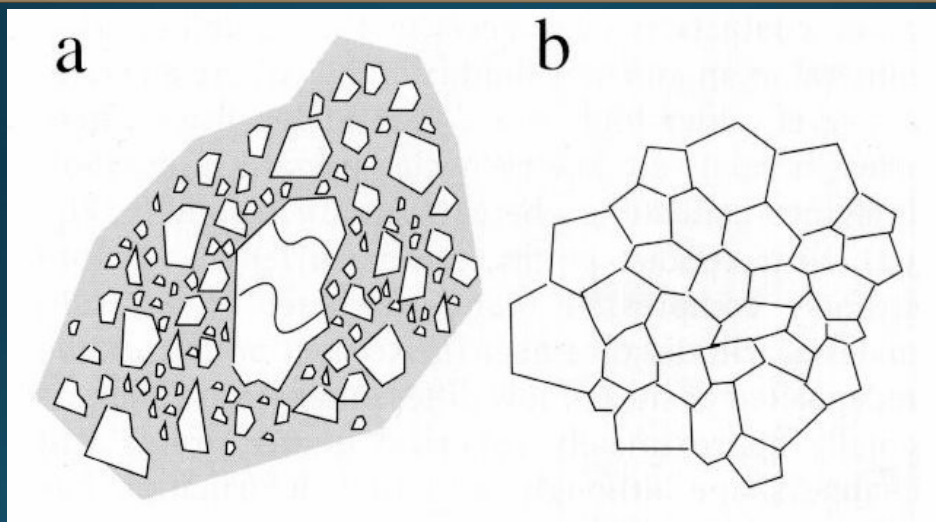


25/04/2016

Prof. Adj. Enrique Masquelin

23

Cataclasis vs. Procesos cristal-plásticos



25/04/2016

Prof. Adj. Enrique Masquelin

24

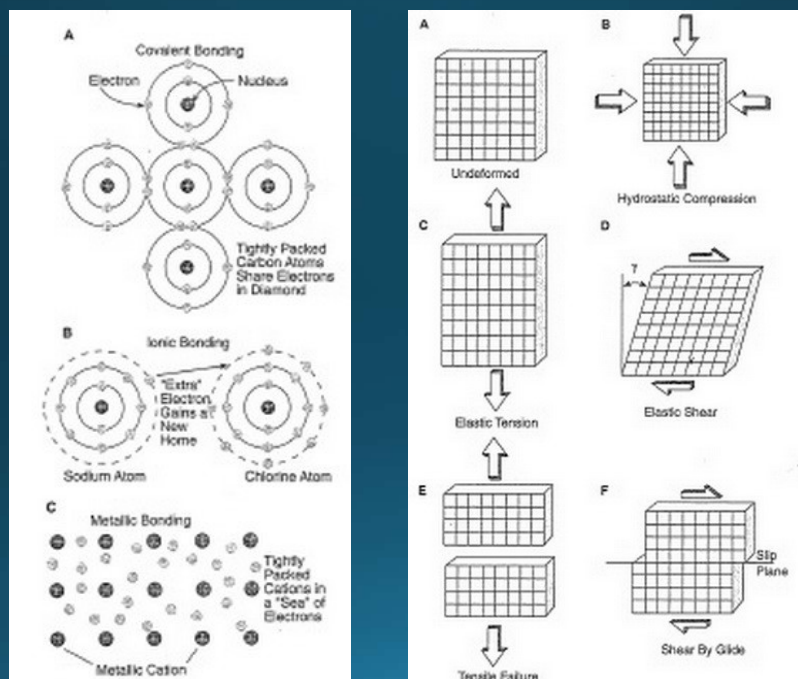
Propiedades

- **Mecanismo de deformación frágil:**
 - Fragmentación y deslizamiento friccional entre superficies (bordes de grano, fracturas).
- **Disminución del tamaño de los fragmentos:**
 - Angulosidad de fragmentos
 - Pérdida de cohesión de la roca
 - Enlaces del retículo cristalino rotos
- **Flujo cataclástico:**
 - Flujo aparente del material sin cohesión y de grano fino (comportamiento "triboplástico").

25/04/2016

Prof. Adj. Enrique Masquelin

25



25/04/2016

26

Defectos de red cristalográfica

• Puntuales

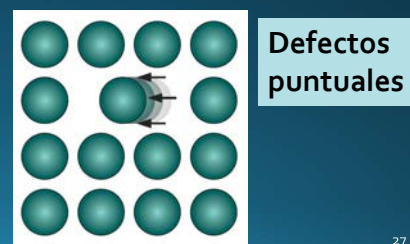
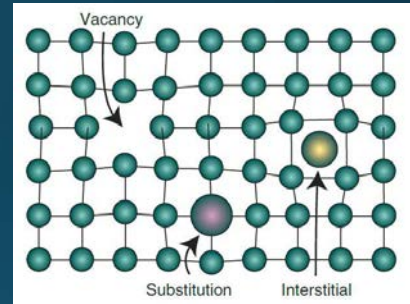
- Vacantes, átomos extraños, átomos intersticiales

• Lineales

- línea producida por un medio plano cristalográfico intersticial

• Planos

- Anillo de dislocación producido por anclaje alrededor de un obstáculo



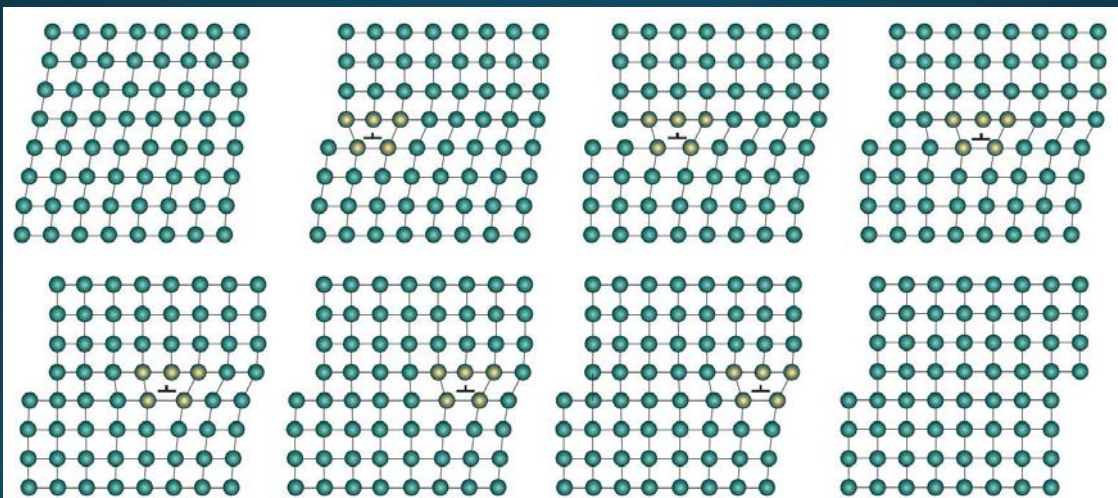
Defectos puntuales

25/04/2016

Prof. Adj. Enrique Masquelin

27

Desplazamiento de defectos de línea (dislocaciones)

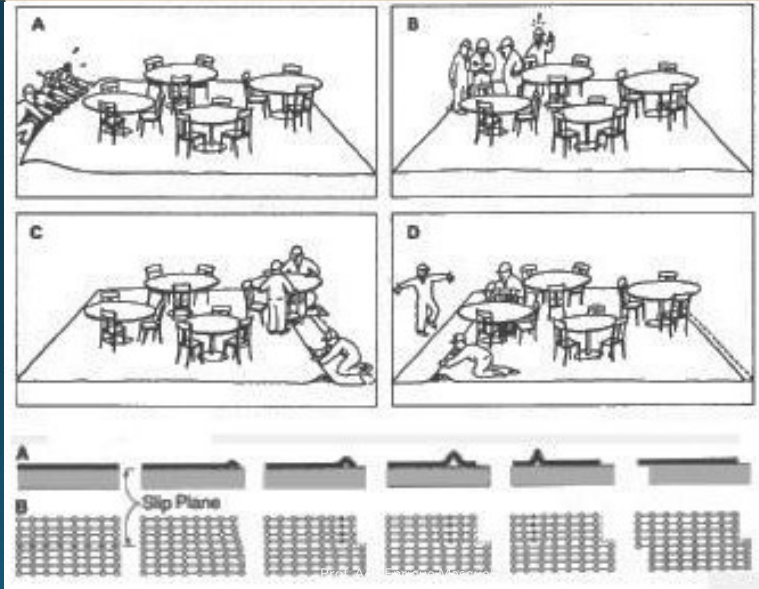


25/04/2016

Prof. Adj. Enrique Masquelin

28

Analogía de la alfombra



25/04/2016

29

Imagen en microscopio de barrido electrónico de defectos lineares

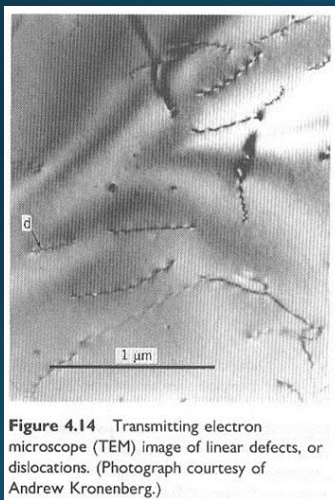


Figure 4.14 Transmitting electron microscope (TEM) image of linear defects, or dislocations. (Photograph courtesy of Andrew Kronenberg.)

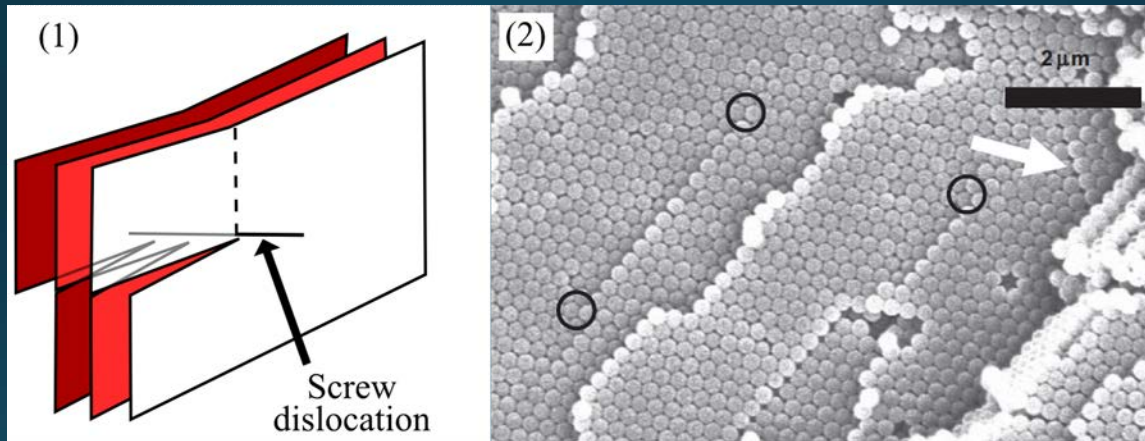


25/04/2016

Prof. Adj. Enrique Masquelin

30

Ejemplo de dislocación en el MEB



25/04/2016

Prof. Adj. Enrique Masquelin

31

Deformación plástica cristalina

• Defectos cristalinos

- Responsables de la nucleación del cambio de forma en planos del retículo cristalino.
- Deformación plástica procede cambiando la forma de los cristales a partir de micro-desplazamientos a escala molecular.
- Enlaces químicos solo rompen en la dislocación y se recomponen por lo cual los desplazamientos interatómicos ocurren sin pérdida de cohesión.

• Deslizamiento plástico

- reptación de defectos lineales (*dislocation creep*):
- no hay fractura de la red cristalina.
- intercambio de enlaces → **cambio de forma sin pérdida de cohesión**

25/04/2016

Prof. Adj. Enrique Masquelin

32

Deformación plástica sectorial: maclado

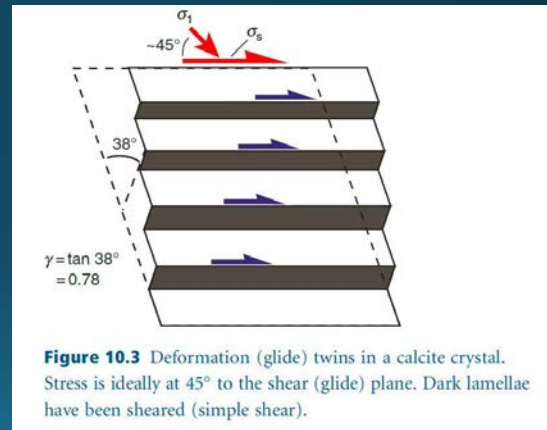
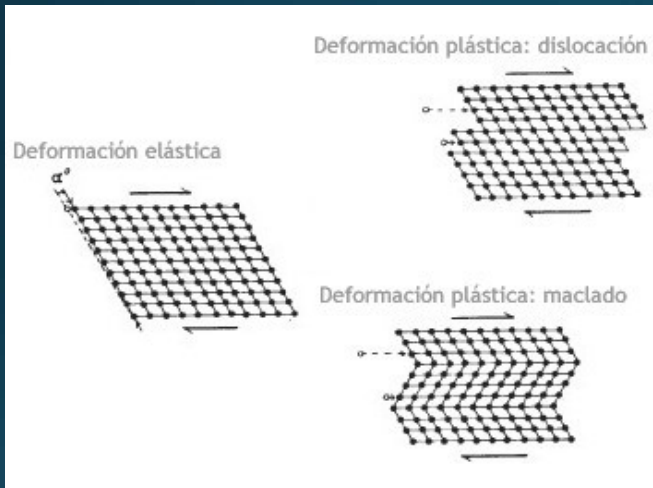


Figure 10.3 Deformation (glide) twins in a calcite crystal. Stress is ideally at 45° to the shear (glide) plane. Dark lamellae have been sheared (simple shear).

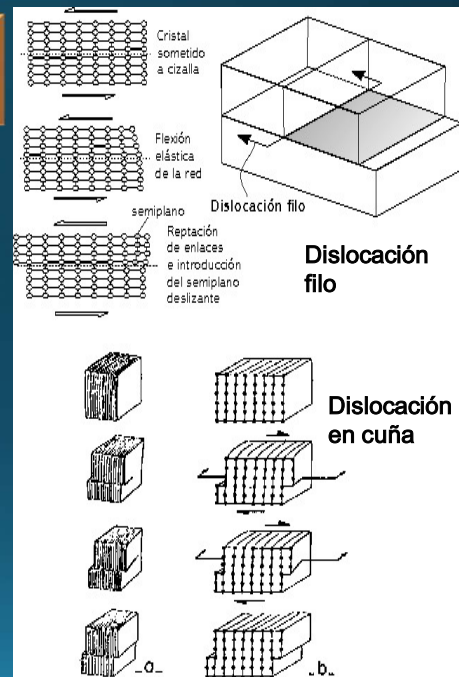
25/04/2016

Prof. Adj. Enrique Masquelin

33

Traslación de defectos lineares

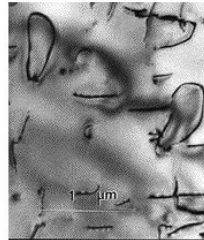
- **Dislocación filo:** línea de dislocación se desplaza en una dirección perpendicular al semiplano (fillo).
- **Dislocación cuña:** se desplaza en una dirección paralela al semiplano.



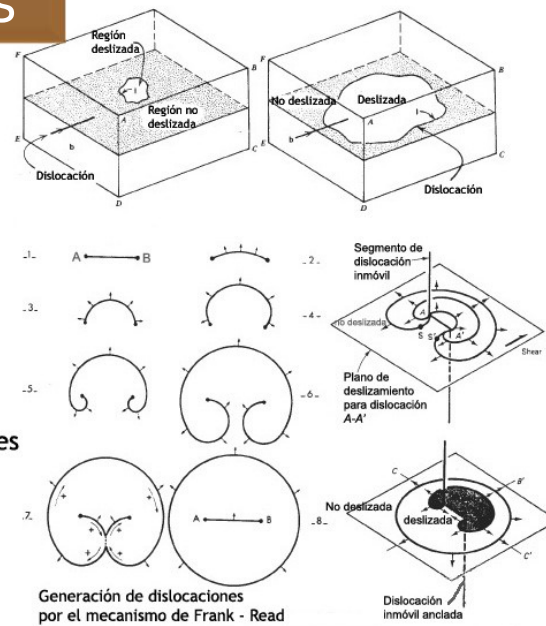
25/04/2016

Prof. Adj. Enrique Masquelin

Defectos planos



Anillo de dislocaciones ancladas (*loop*) en plagioclasa



25/04/2016

35

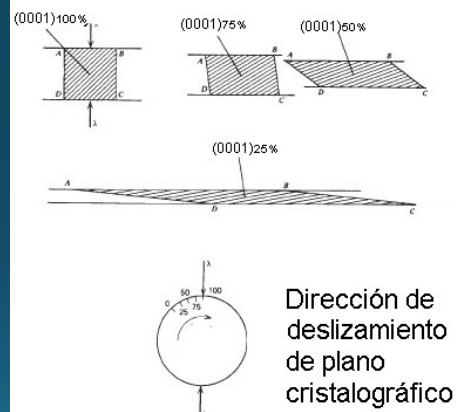
Sistemas de deslizamiento

• Dislocaciones:

- utilizan red cristalográfica para cambiar la forma y desplazar plásticamente (e.g. $\{0001\}$ $\langle 1120 \rangle$ en cuarzo).

• Unidad de flujo:

- desplazamiento unitario definido por Vector de Burgers (cf. Nicolas & Poirier 1976).



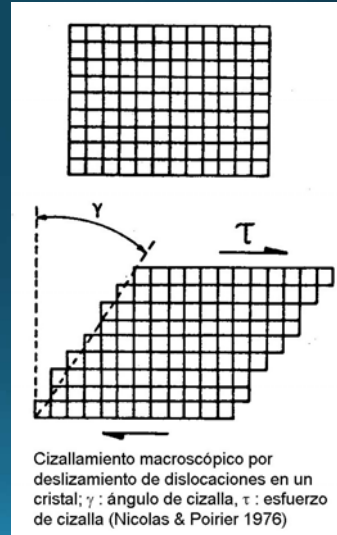
25/04/2016

Prof. Adj. Enrique Masquelin

36

Concepto de Plasticidad Cristalina

El comportamiento plástico en un grano es la reología por la cuál la red cristalina (enlaces) se deforma en su conjunto sin discontinuidades.



25/04/2016

Prof. Adj. Enrique Masquelin

37

Reptación de dislocaciones simple (*dislocation glide*)

- **Deslizamiento por reptación:**
 - intercambio de enlaces de los semiplanos cristalográficos.
- **Proceso de BT:**
 - Deformación cristalina heterogénea
- **Endurecimiento:**
 - aumento en la densidad de dislocaciones bloqueadas.

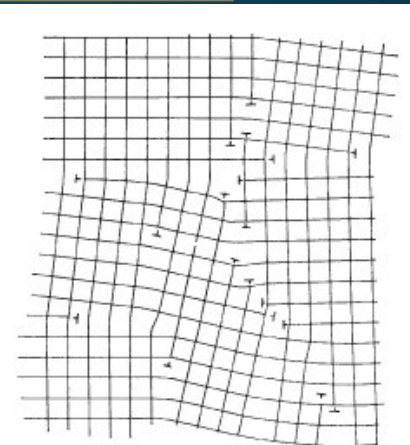
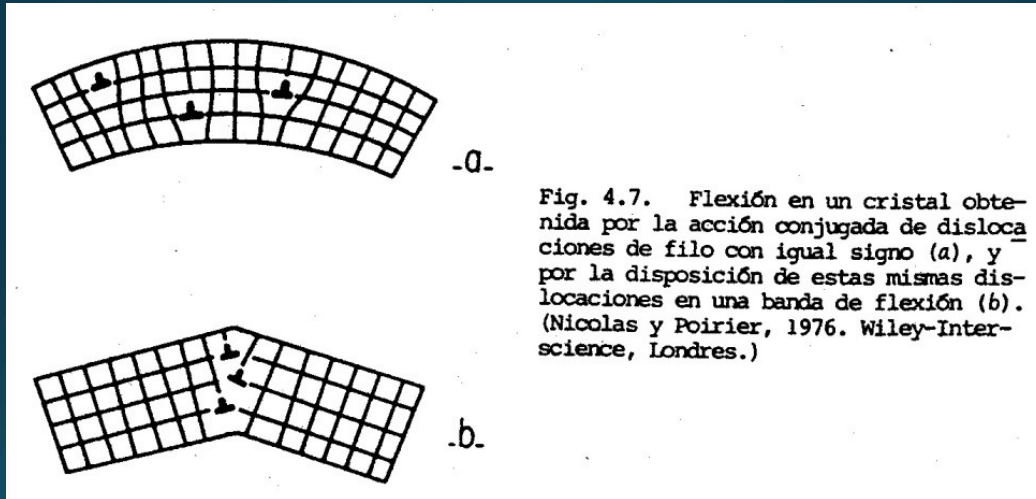


Figura 4-26- Endurecimiento por deformación debido al aumento de la densidad de dislocaciones.

25/04/2016

Prof. Adj. Enrique Masquelin

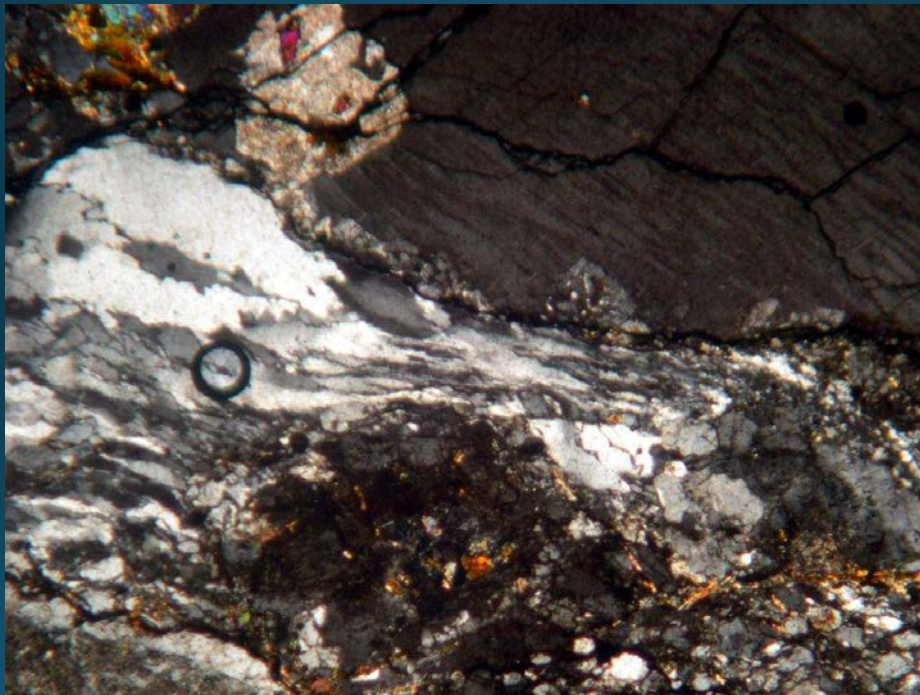
Flexión en un cristal



25/04/2016

Prof. Adj. Enrique Masquelin

39

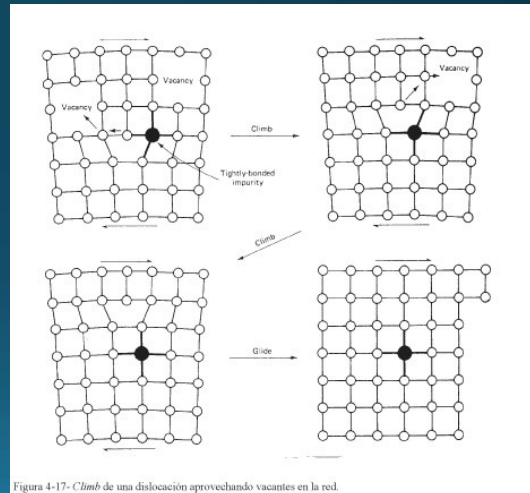


25/04/2016

40

Flujo de dislocaciones (*dislocation creep*)

- Deslizamiento (*glide*) y salto de dislocaciones (*climb*)
- Recuperación:
 - Aumenta probabilidad de anulación entre dislocaciones desplazándose con signo contrario (*crystal limpio*).
- Deformación facilitada:
 - Equilibrio entre endurecimiento y recuperación.
- Flujo estacionario de dislocaciones.



25/04/2016

Prof. Adj. Enrique Masquelin

41

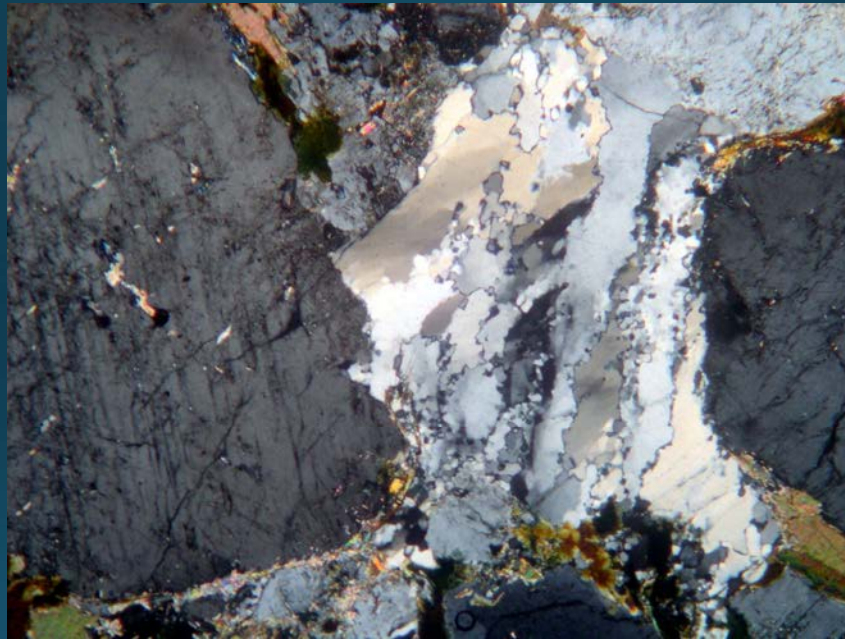
Recuperación

- En respuesta a la **recuperación**, las dislocaciones tienden a concentrarse en zonas planares del cristal.
- El cristal se compartimenta en zonas de extinción uniforme, llamadas **bandas de deformación**.
- Cuando las bandas se tornan más localizadas, entonces se trata de **límites de sub-grano**.

25/04/2016

Prof. Adj. Enrique Masquelin

42



25/04/2016

Prof. Adj. Enrique Masquelin

43

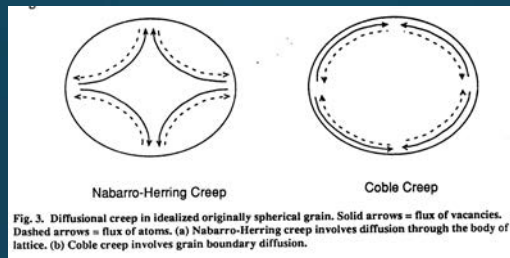
6. Difusión y Recristalización

25/04/2016

Prof. Adj. Enrique Masquelin

44

Difusión en alta temperatura

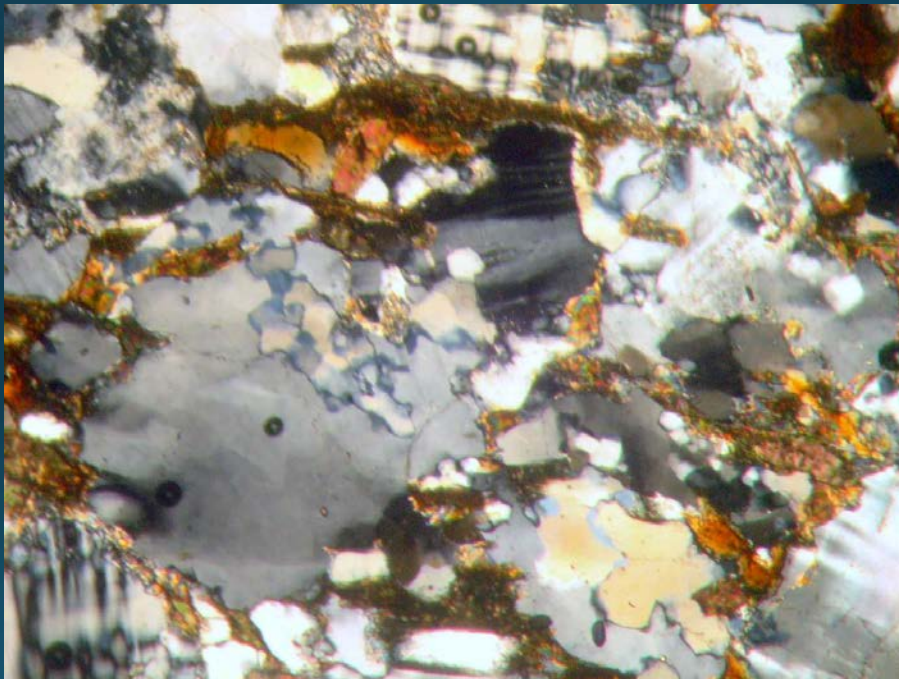


- Independiente del esfuerzo diferencial
- En alta temperatura:
 - Flujo-difusión en paredes entre subgranos.
 - Difusión lenta de vacantes a través de la red cristalina.
 - Vacantes migran para zonas de alto potencial químico (cf. McClay 1977).
- En baja temperatura:
 - disolución-recristalización

25/04/2016

Prof. Adj. Enrique Masquelin

45



25/04/2016

46

5. Transferencia difusiva de masa

Difusión de dislocaciones (diffusional creep)

- **Combinación de procesos**
- **Flujo de dislocaciones asistido por difusión de vacantes**
 - Alta temperatura y baja presión de fluidos
- **Difusión lenta**
 - pero suficiente para permitir la activación de nuevos sistemas de deslizamiento de dislocaciones.
- **Difusión de Volumen:**
 - Nabarro-Herring.
- **Difusión de Superficie:**
 - Coble (vinculado con deformación superplástica)

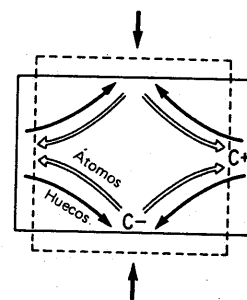


Fig. 4.14. Flujo Nabarro-Herring. Un cristal (contorno discontinuo) sometido a una compresión vertical desarrolla una concentración de huecos C^- menor a lo largo de las caras expuestas a la compresión y C^+ más fuerte a lo largo de sus caras perpendiculares. La difusión de átomos que corresponden a un flujo opuesto al de los huecos modifica progresivamente la forma del cristal (contorno continuo).

Transferencia difusiva de masa

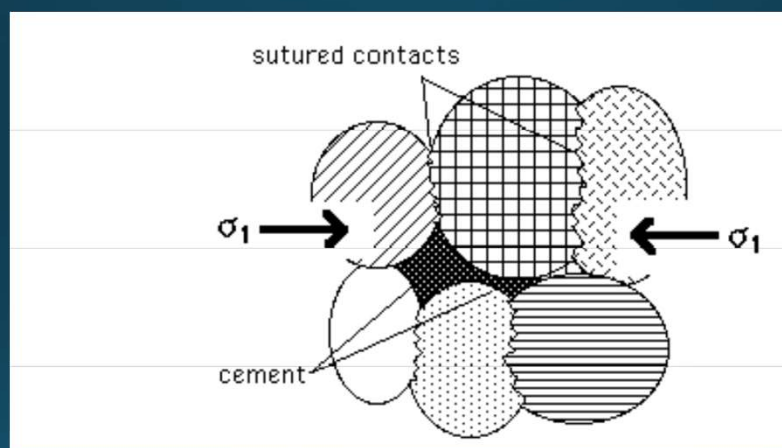
- **Transferencia de materia de un sitio a otro**
 - Sin pérdida de cohesión
 - Sin deformación plástica del retículo cristalino.
- **Tres acciones sucesivas (Vauchez 1987):**
 - Extracción del átomo / ión de su sitio inicial
 - Transporte para el nuevo sitio
 - Inserción en el nuevo sitio

25/04/2016

Prof. Adj. Enrique Masquelin

49

Presión - Disolución



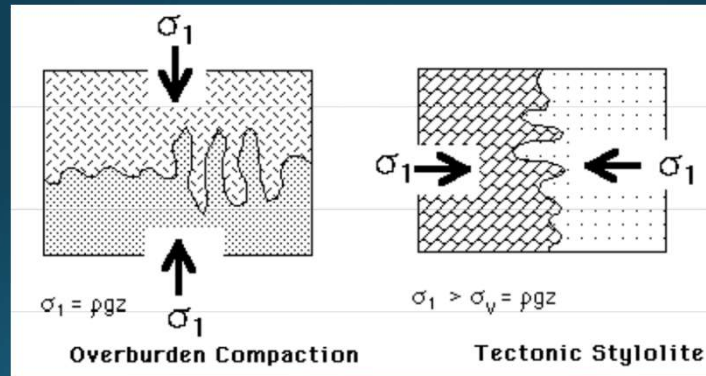
25/04/2016

Prof. Adj. Enrique Masquelin

50

Estilolitos

- La tasa máxima de disolución está en la dirección de σ_1



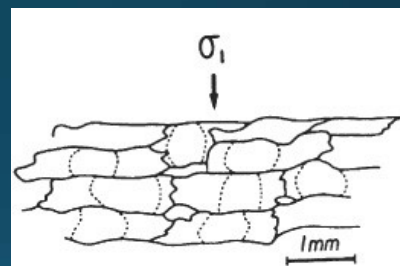
25/04/2016

Prof. Adj. Enrique Masquelin

51

Disolución bajo presión y recristalización

- Inducido por esfuerzo diferencial y alta presión de fluidos solventes (de allí el término sinónimo 'Presión-Disolución').
- Generalmente baja temperatura.
- Recristalización
 - *in situ*: en sombras de presión o en continuidad con cristal disuelto.
 - *ad situ*: Venas o sombras de presión en otros minerales.
- Requiere transporte fluido.



Granos de cuarzo deformados por disolución bajo presión y cristalización; contorno inicial señalado por una orla de impurezas.

25/04/2016

Prof. Adj. Enrique Masquelin

52

Fluidos y Deformación

- **Fluidos:**
 - ablandamiento de strain
- **Reacciones químicas:**
 - iniciadas en presencia de fluidos
- **Presión de fluidos:**
 - acelera proceso de transferencia difusiva
- **Si presión de poros alta:**
 - disminuye el esfuerzo efectivo
 - promueve deslizamiento friccional entre granos y fracturación
- **Si agua en retículo:**
 - ablandamiento de algunos minerales (cuarzo)

Recristalización y difusión

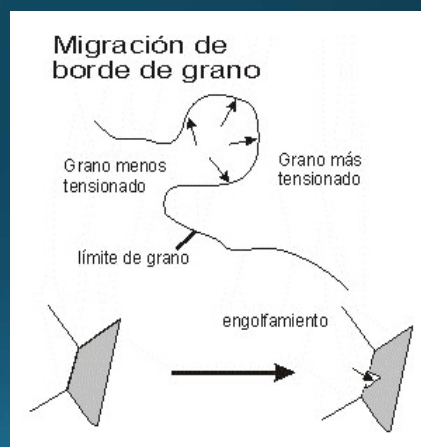
- **Tipos de difusión (McClay 1977) a través:**
 - del retículo (Nabarro-Herring creep)
 - de los contactos (Coble creep)
 - de paredes de subgranos
 - de película de fluido intergranular (transferencia de masa activada por esfuerzo diferencial).
 - de largas distancias, por infiltración del fluido solvente (solifluxión activada por exceso de presión de fluidos).
- **Discontinuidades cristalinas:**
 - caminos fáciles para la difusión (P. Ej. Pared de subgrano).
- **Nucleación de nuevos granos:**
 - preferente en zonas de acumulación de defectos.

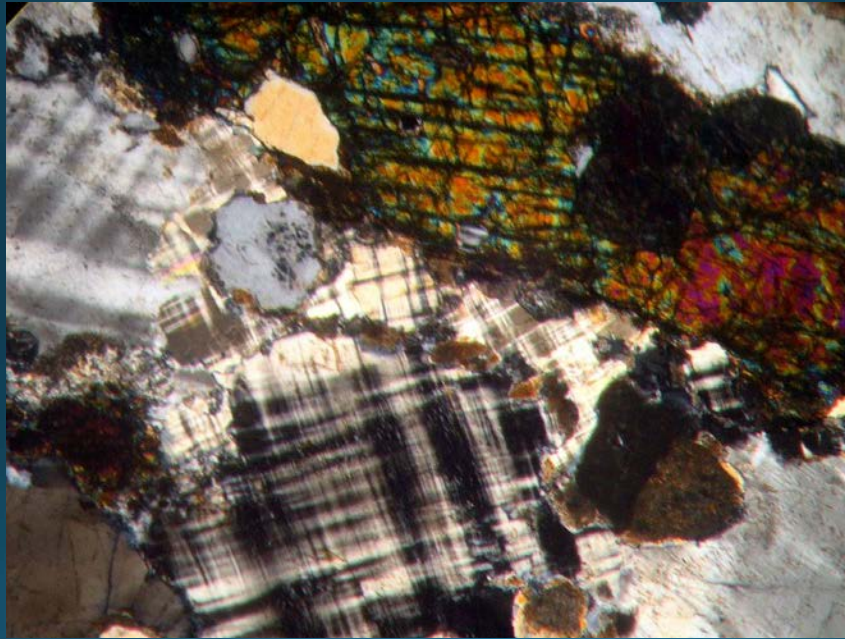
Efectos de la difusión sobre la trama

- Migración de borde de grano
- Rotación de subgranos

Recristalización por migración de borde de grano

- Recristalización asistida por reacción de intercambio químico (GBMR).
- Deslizamiento de borde de interfase (externo).
- Recristalización por reducción de área de grano: *annealing* (GBAR)



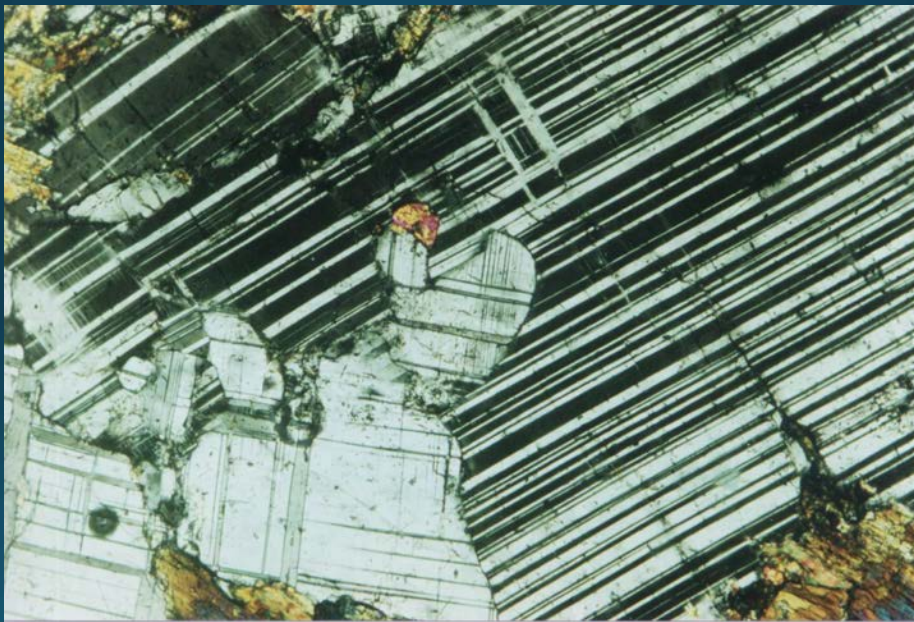


25/04/2016

Prof. Adj. Enrique Masquelin

57

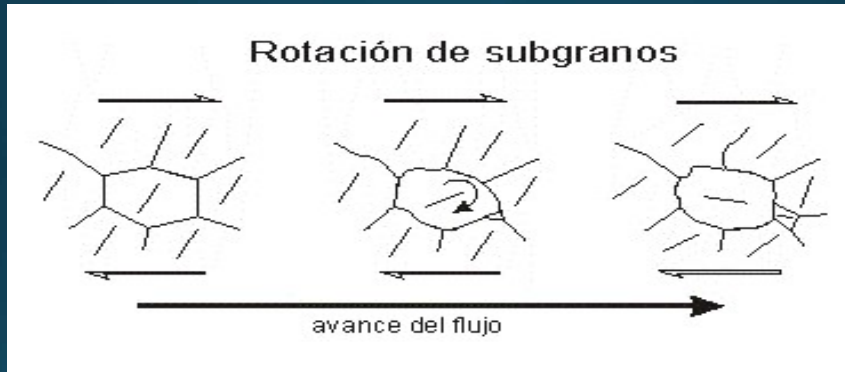
Migración de borde de grano



25/04/2016

58

Recristalización por rotación de subgranos



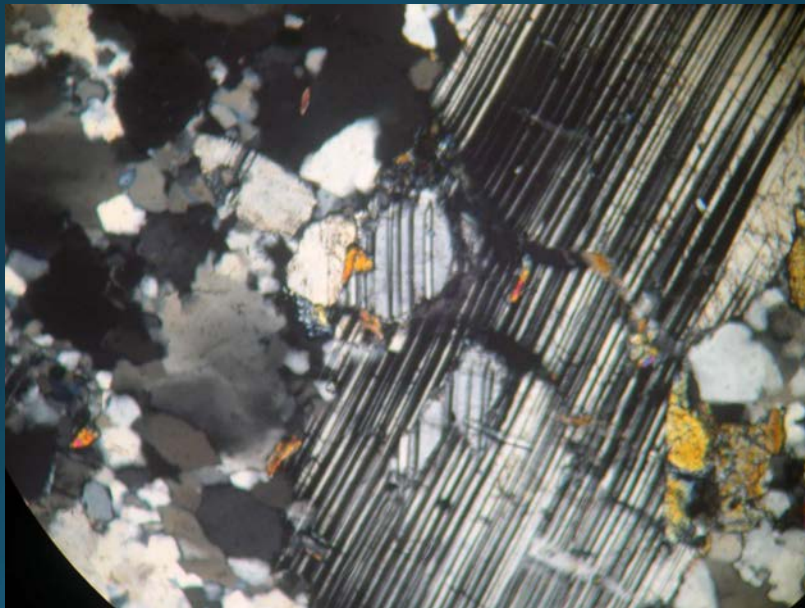
- Rotación en respuesta a la migración de dislocaciones en las paredes de sub-grano.
- Al aumentar el ángulo se producen límites de nuevos granos.

25/04/2016

Prof. Adj. Enrique Masquelin

59

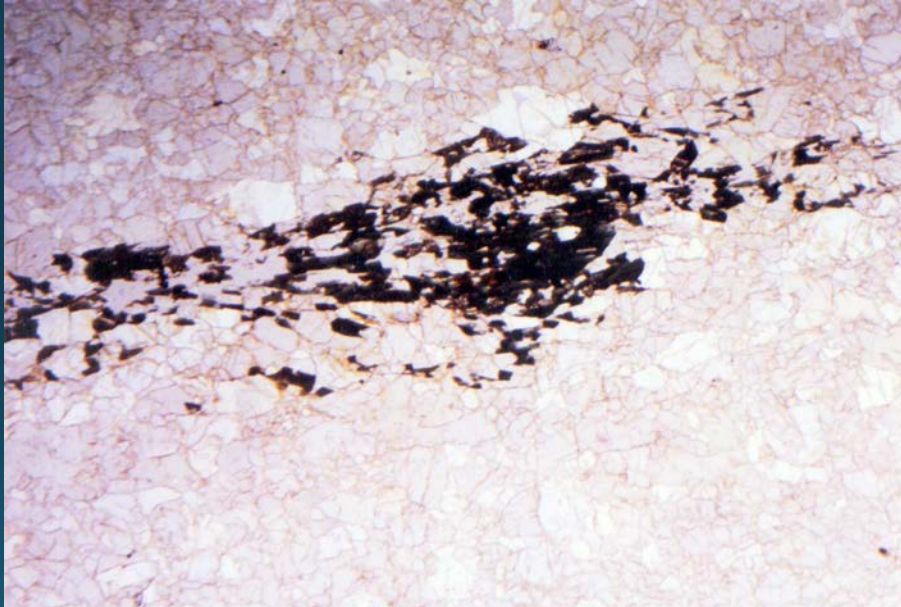
Rotación de subgranos



25/04/2016

60

Recristalización por rotación de subgranos



25/04/2016

61

Difusión en agregado

- En el volumen de los granos:
 - Nabarro-Herring Creep.
- En los contactos de los granos:
 - Coble Creep.
- Difusión de borde de grano.
- Vacantes se mueven hacia sitios de alta tensión.

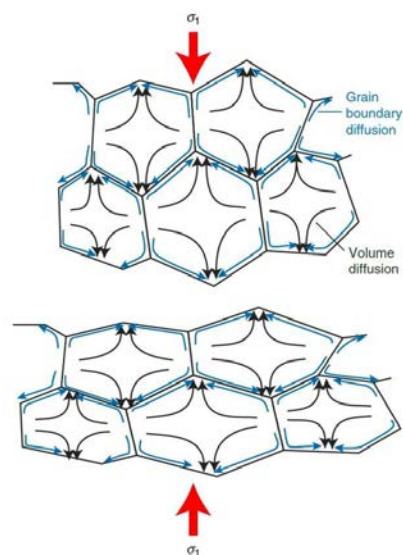


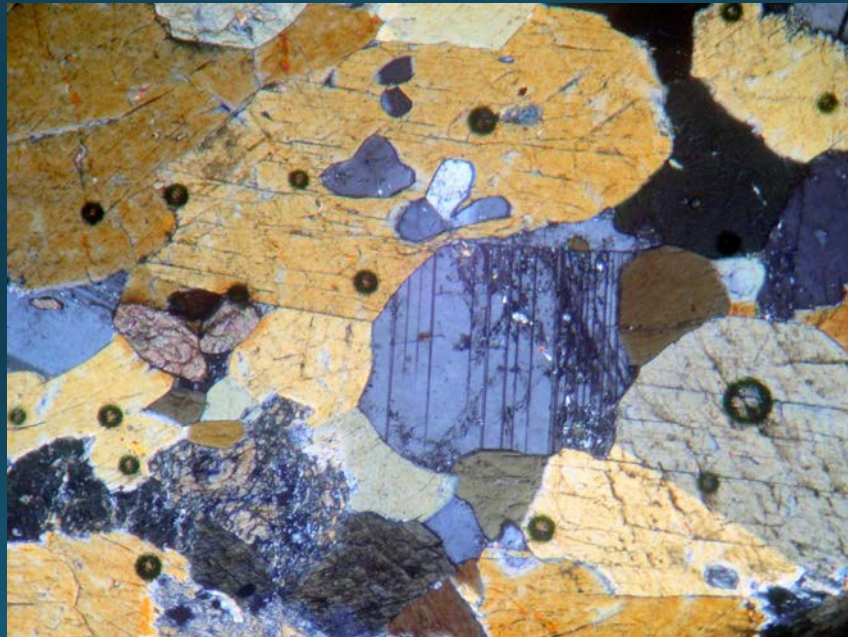
Figure 10.7 Diffusion in a mineral can occur within grains by means of volume diffusion, or along grain boundaries by means of grain boundary diffusion. In both cases vacancies move toward high-stress sites so that the minerals accumulate strain over time.

25/04/2016

Prof. Adj. Enrique Maza

62

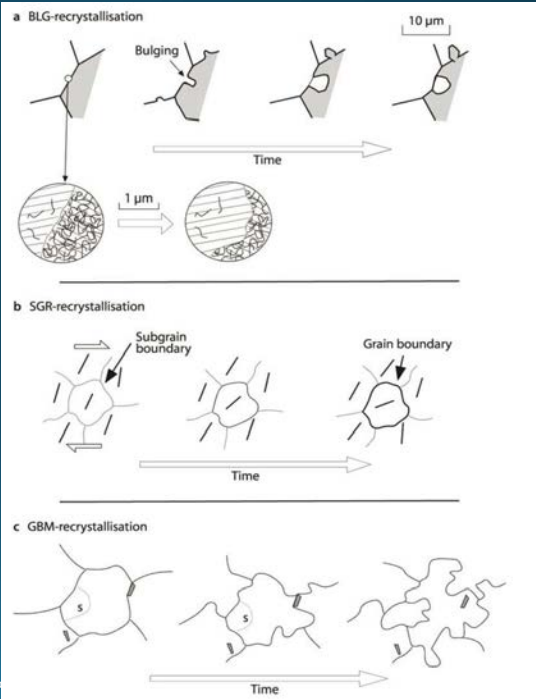
Recristalización estática (forja)



25/04/2016

63

3 tipos de
recristalización
dinámica

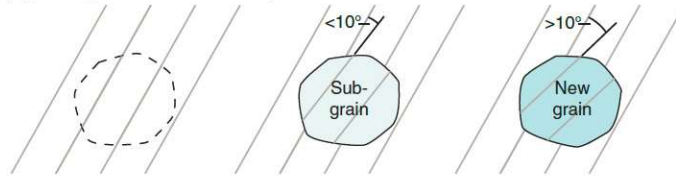


25/04/2016

Pr

64

(a) Subgrain rotation recrystallization



(b) Grain boundary migration (bulge nucleation) [Protuberancia]

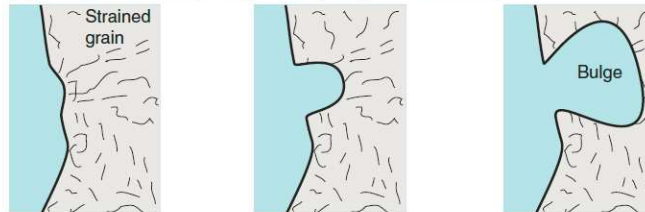
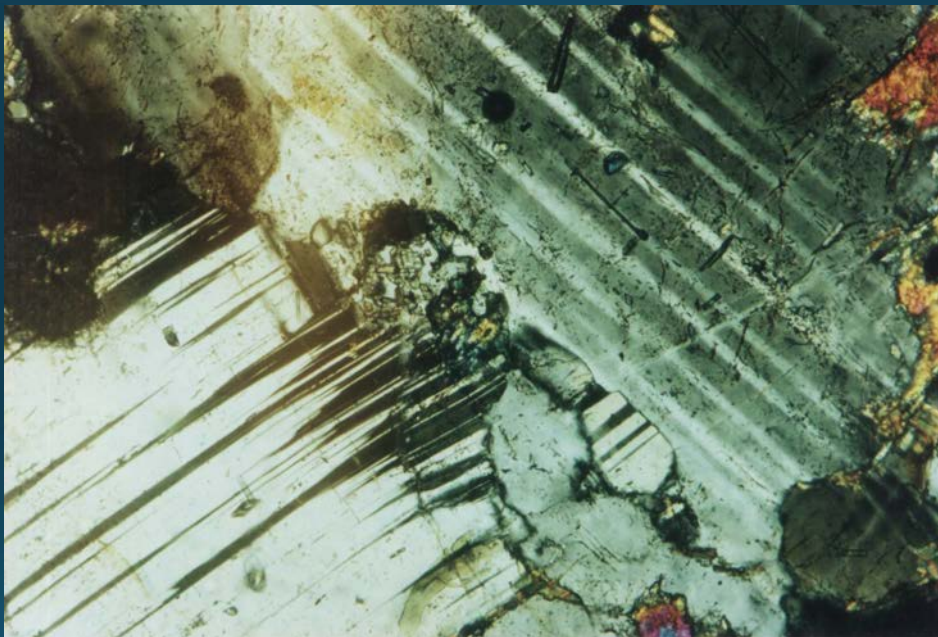


Figure 10.18 (a) Illustration of recrystallization by means of subgrain rotation. (b) Bulging, resulting from migration of a grain boundary into a more strained grain (with more dislocations).

25/04/2016

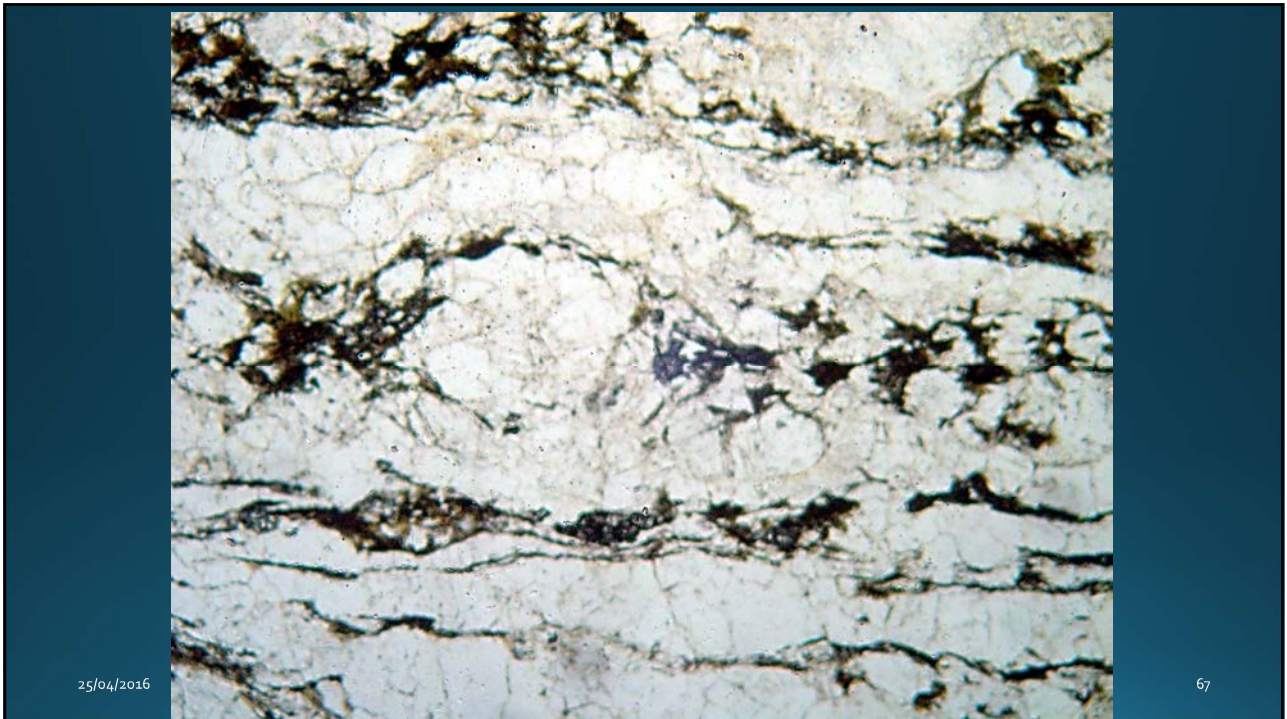
65



25/04/2016

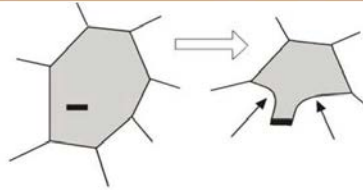
Prof. Adj. Enrique Masquelin

66

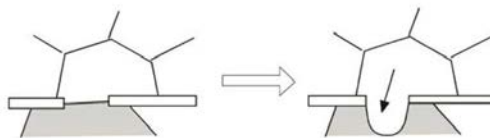


Estructuras residuales

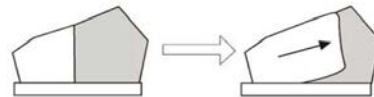
'Pinning' microstructure



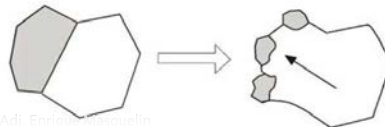
'Window'-
microstructure



'Dragging' microstructure



'Left-over grains'



Prof. Adj. Enrique Rodríguez

Microfracturación

- **Microfracturación asistida**
 - Minerales resistentes (Kfs y Pl) rodeados por matriz dúctil (cuarzo)
 - Sometidos a tensión local inducida por el flujo de la matriz
- **Mecanismos**
 - Apilamiento de dislocaciones
 - altos esfuerzos diferenciales locales disminuyen resistencia
 - Corrosión bajo tensión
 - Energía requerida para formar nueva superficie es producida por reacción química (eficaz en corteza superior)

25/04/2016

Prof. Adj. Enrique Masquelin

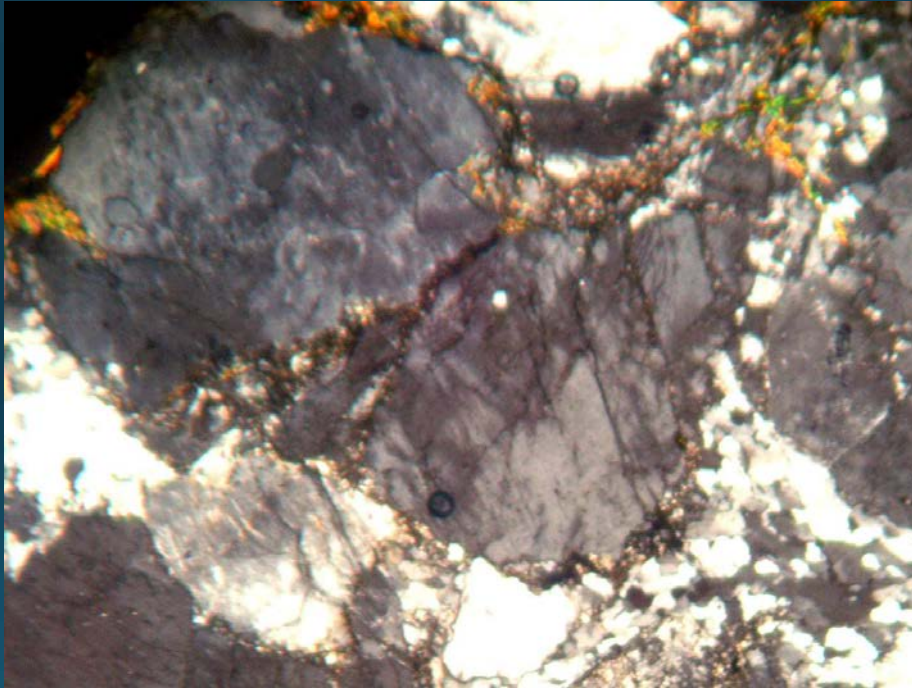
69



25/04/2016

Prof. Adj. Enrique Masquelin

70

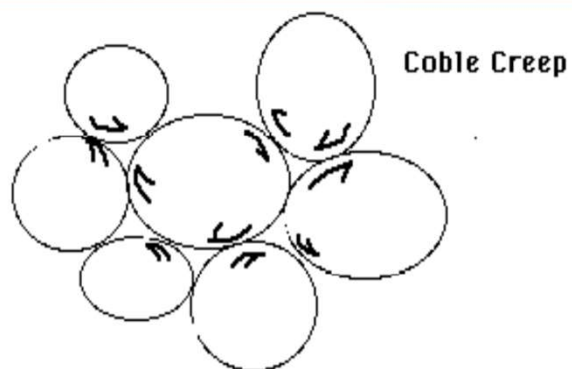


25/04/2016

71

Superplasticidad

- Fricción disminuida por película de fluido intergranular
- Deslizamiento semi-friccional en borde de grano ('coble creep')



25/04/2016

Prof. Adj. Enrique Masquelin

72

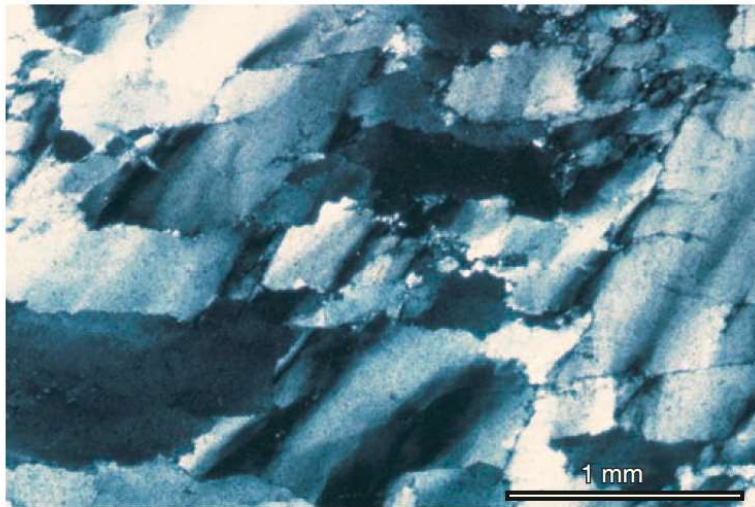


Figure 10.14 Deformation bands in quartz crystals, characterized by undulose extinction. Quartz pebble in the deformed conglomerate shown in Box 3.1.

25/04/2016

73

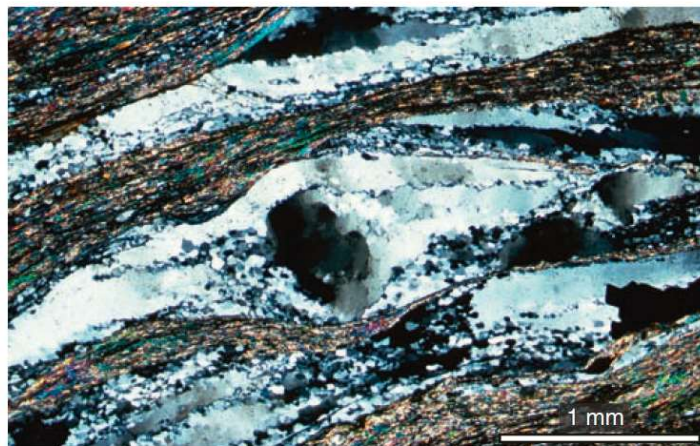


Figure 10.15 Subgrains and deformation bands in quartz. A large grain is breaking down, forming a core of relict quartz with a mantle of subgrains and new grains (core-mantle structure). Quartz band in sheared phyllite, Scandinavian Caledonides.

25/04/2016

74

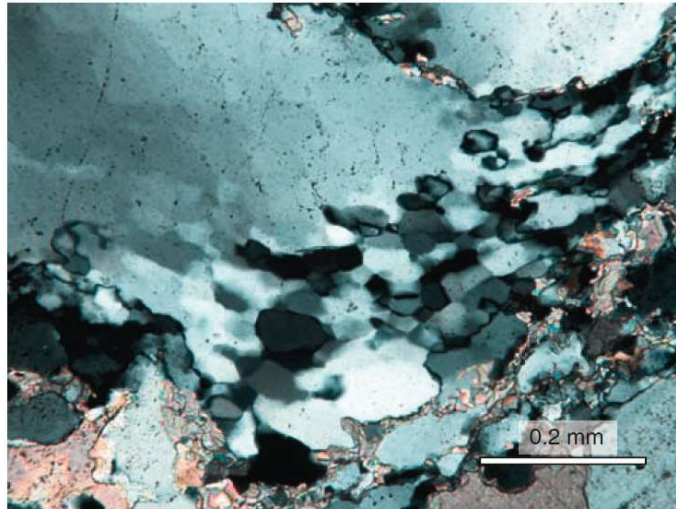


Figure 10.16 Gradual evolution of subgrains at the tail of a larger quartz grain. Note faint shadows of subgrains as they rotate out of alignment with the host grain. Heimefrontfjella, Antarctica.

25/04/2016

Prof. Adl. Enrique Masquelin

75

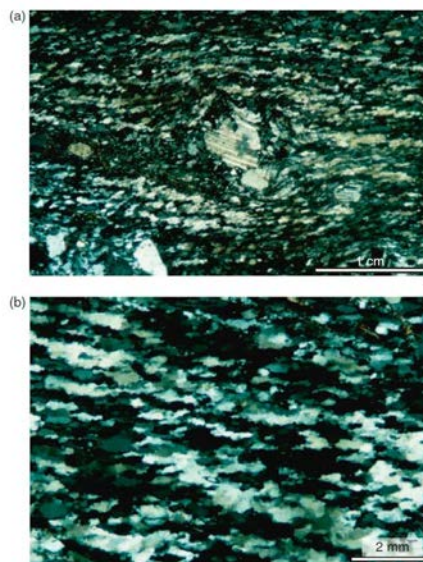


Figure 10.19 Dynamic recrystallization in a greenschist-facies shear zone. The new grains are oblique to the main foliation because they have only experienced the last part of the non-coaxial deformation. The middle grain in (a) is a feldspar porphyroblast. (b) is a close-up view of part of (a).

25/04/2016

76

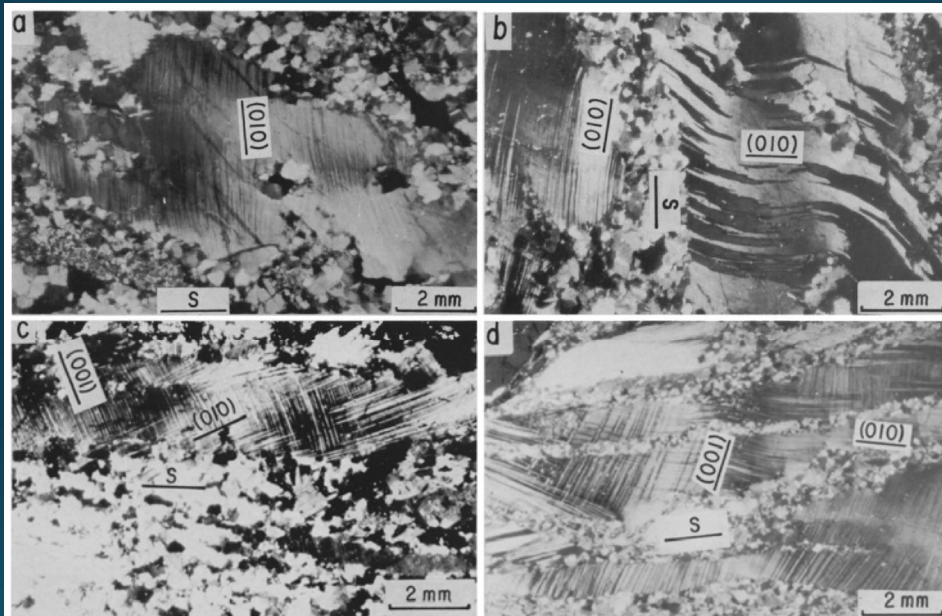


Fig. 3. Micrographs of plagioclase porphyroclasts from sample Z34A. XZ section is parallel to the plate and the foliation trace is marked by S. (a) and (b) Globular porphyroclasts whose (010) planes are at a high angle to the lineation. (c) and (d) Ribbon porphyroclasts whose (010) planes are at a small angle to the lineation.

25/04/2016

77



25/04/2016

Prof. Adj. Enrique Masquelin

78

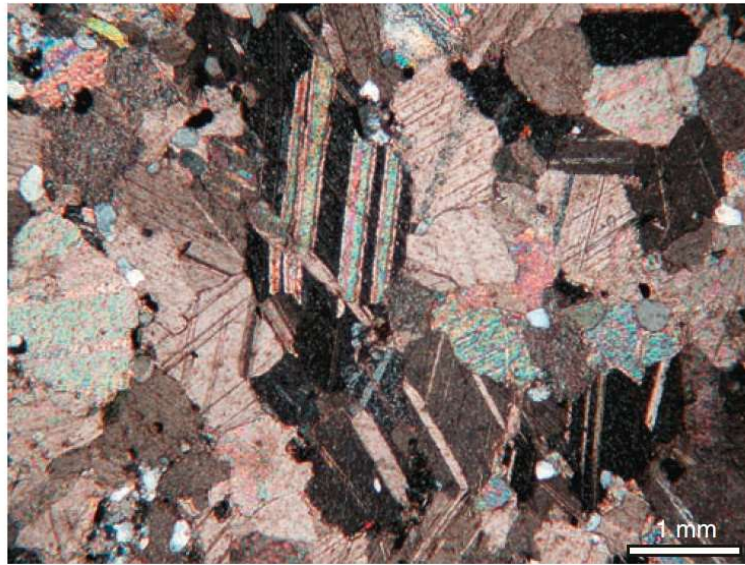


Figure 10.2 Deformation twins in an aggregate of calcite crystals.

25/04/2016

79

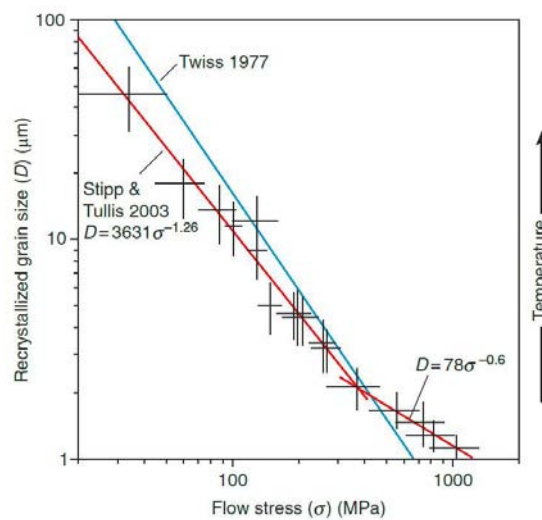


Figure 10.20 Grain size plotted against differential stress for quartz. Experimentally derived data by Stipp and Tullis (2003) are shown together with the two curves that best fit their data. A theoretically estimated curve (Twiss 1977) is shown for comparison.

25/04/2016

Prof. Adj. Enrique Masquelin

80

Mapas de deformación

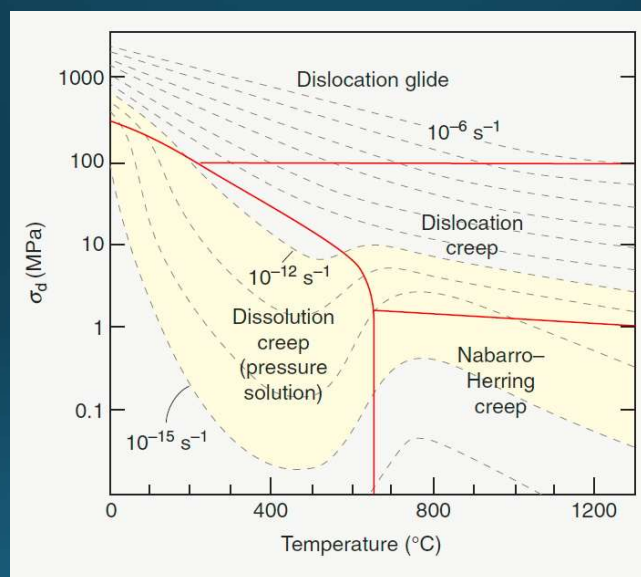
- **Deformación natural:**
 - Amplia gama de condiciones físicas
 - Mecanismos específicos para cada especie mineral
- **Mapas**
 - contruidos en base a cálculos de tasas de deformación usando leyes de flujo de estado estacionario
- **Evaluación rápida de los posibles mecanismos en diferentes condiciones (Langdon 1985)**

25/04/2016

Prof. Adj. Enrique Masquelin

81

Mapa de mecanismos



25/04/2016

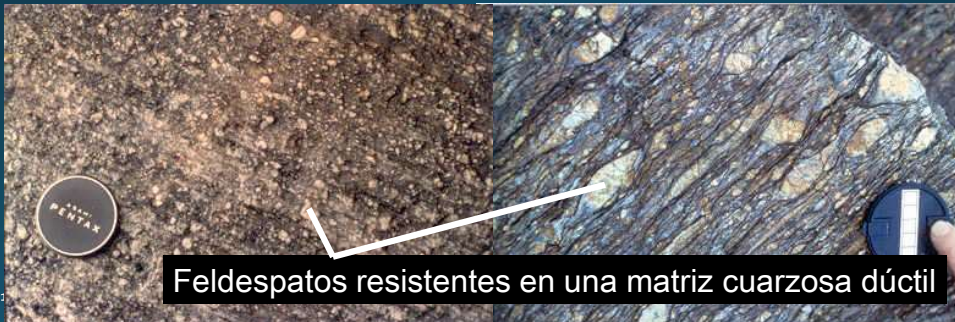
82

Milonitas

Gneises 'flaser'



Milonita de grano fino



Feldespatos resistentes en una matriz cuarzosa dúctil

25/04/2016

83

Resumen (1)

- Mecanismos de deformación frágil presentan como principal componente el deslizamiento friccional y fracturación de retículo cristalino, con ruptura de los enlaces atómicos.
- La deformación plástica recupera y produce reptación o fluencia intracristalina sin rotura de enlaces químicos.
- La deformación cristal-plástica puede ocurrir por maclado y diferentes tipos de reptación de dislocaciones asistida o no por difusión.

25/04/2016

Prof. Adj. Enrique Masquelin

84

Resumen (2)

- Los minerales pueden **recristalizar** durante la deformación (recristalización **sincinemática** o dinámica) o después de la deformación (recristalización post-cinemática o estática).
- La **recristalización dinámica** compete a la **migración de dislocaciones y strain** dentro de los granos.
- El **esfuerzo requerido para conducir el deslizamiento de dislocaciones decrece con el aumento de la temperatura.**

Resumen (3)

- El **tamaño de los granos recristalizados** se relaciona con el **esfuerzo diferencial**, y puede en cierta medida ser usado para evaluar el **paleo-esfuerzo**.
- La **recristalización** ocurre por **concentración de dislocaciones** a lo largo de **límites de granos nuevos**, a partir de la cual nuevos granos sin dislocaciones emergen (límpidos).
- La **extinción ondulosa** en el cuarzo indica la presencia de dislocaciones (strain).