

Un Catálogo de Indicadores Cinemáticos en Rocas Cizalladas

Gustavo Tolson. Depto. de Paleomagnetismo, Instituto de Geofísica, U.N.A.M.

Introducción

Las rocas sometidas a un régimen de esfuerzos que excede su resistencia mecánica tienden a deformarse permanentemente a lo largo de zonas de deformación más o menos tabulares y con límites, ya sean abruptos o graduales, reconocibles y cartografiables. Dependiendo de la composición química, el contenido de agua, la temperatura, y la presión confinante, el mecanismo de deformación puede ser cristal-plástico, o bien puede ser quebradizo. También se puede dar el caso de que simultáneamente algunos minerales se deformen plásticamente, mientras otros se deformen por fractura. Aún cuando la deformación global tenga carácter coaxial o "irrotacional" pueden y suelen desarrollarse zonas de cizalla rotacional que se aproximan a un modelo de cizalla simple.

Para documentar el sentido de desplazamiento de bloques rocosos separados por zonas de cizalla, es necesario contar con herramientas de observación que nos permitan identificar el sentido de movimiento relativo de los bloques. En este trabajo se presenta un catálogo de dichas herramientas de observación en un formato uniforme que permiten la identificación del sentido de desplazamiento en zonas de cizalla simple. Este catálogo constituye una versión aumentada de una recopilación bibliográfica presentada por Hudleston y Teysier (1989) en un congreso sobre yacimientos auríferos en Minneapolis, Minnesota.

La Deformación por Cizalla Simple

Con el fin de establecer la terminología que manejaremos en esta nota, es conveniente presentar un bosquejo general sobre las características cinemáticas y geométricas de la deformación por cizalla simple.

Considerando por el momento solamente dos dimensiones, la cizalla simple la definiremos como la deformación entre dos límites rectilíneos, paralelos entre sí, cuando uno de los límites se desplaza paralelo a sí mismo con respecto al otro. La magnitud de la deformación por cizalla simple se puede cuantificar con el *ángulo de cizalla* (ψ) o más comúnmente con $\gamma = \tan(\psi)$; γ tiene un rango de $-\infty$ a ∞ . Todas las partículas del material deformante se desplazan sobre rectas paralelas a los bordes de la zona de cizalla y que definen la *dirección de la cizalla* (Fig. 1).

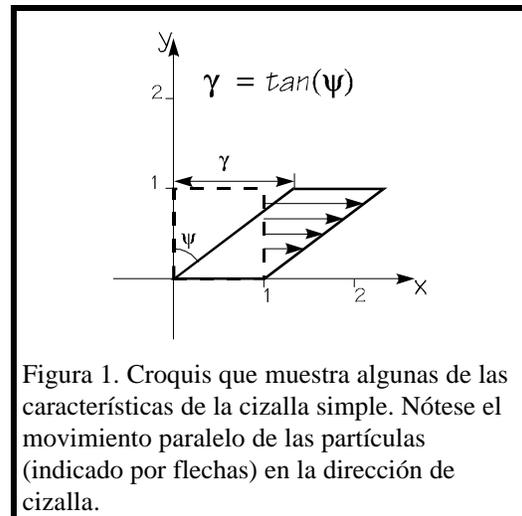


Figura 1. Croquis que muestra algunas de las características de la cizalla simple. Nótese el movimiento paralelo de las partículas (indicado por flechas) en la dirección de cizalla.

Cualquier deformación homogénea puede ser representada por una *elipse de deformación* la cual es la forma que adquiere un círculo unitario inicial durante

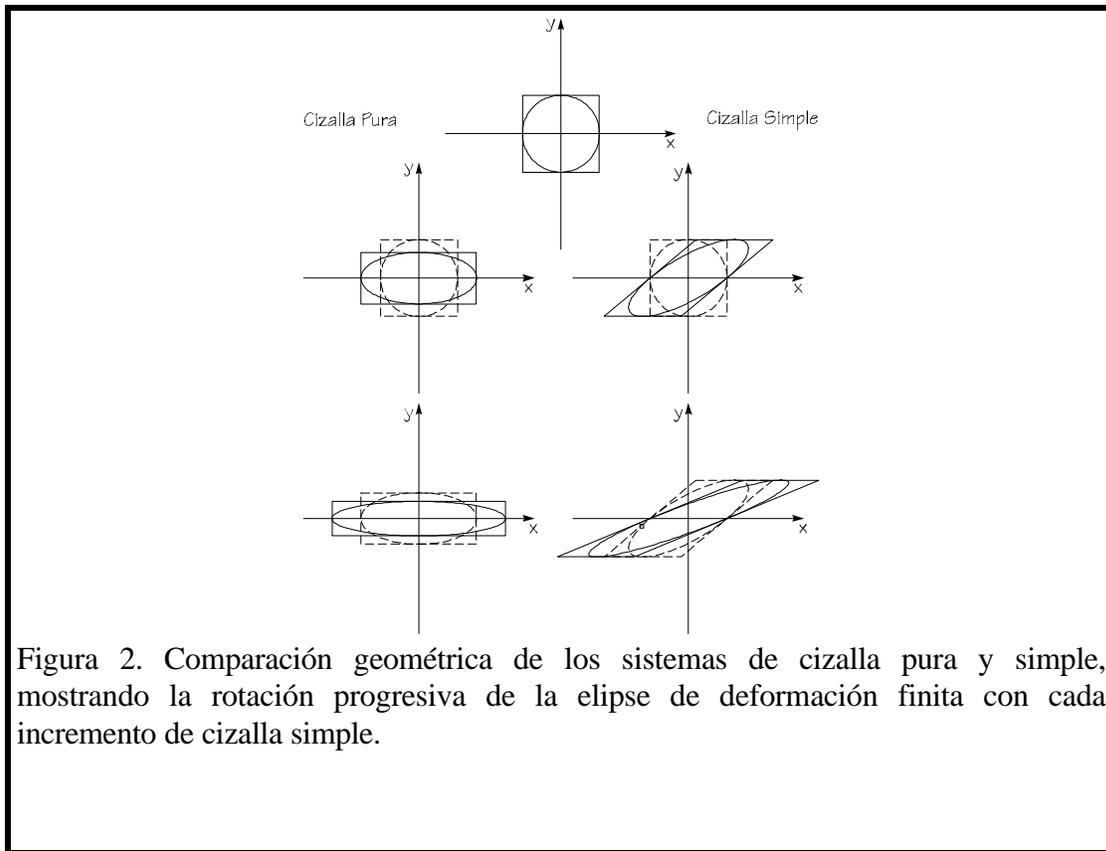


Figura 2. Comparación geométrica de los sistemas de cizalla pura y simple, mostrando la rotación progresiva de la elipse de deformación finita con cada incremento de cizalla simple.

una deformación. La elipse de deformación es definida por la longitud de sus ejes X y Y ($X > Y$) y la orientación de su eje mayor, quedando de esta manera definidos tanto la forma como la orientación de la elipse. Si visualizamos un evento deformacional como una película cinematográfica compuesta de una serie de cuadros individuales, cada cuadro representa el resultado de un *incremento de deformación*. Estos son aplicados progresivamente produciendo a cada paso una *deformación finita*. Si para un estado de deformación finita arbitrario, aumentamos el número de deformaciones incrementales infinitamente, cada incremento corresponde a una *deformación infinitesimal*. En el régimen deformacional de cizalla pura, la elipse de deformación finita guarda la misma orientación después de cada incremento de deformación, mientras que en la cizalla

simple, la elipse de deformación finita gira en el sentido de la cizalla con cada incremento de deformación (Fig. 2). Algunos autores (Sherbon Hills, 1962) utilizan el término "cizalla rotacional" como sinónimo de cizalla simple.

La componente rotacional de la cizalla simple es la responsable del desarrollo de estructuras asimétricas que nos permiten resolver el sentido de cizalla en una zona de deformación. Además, la relación entre las orientaciones de las elipses de deformación incremental y la de deformación finita contribuye al desarrollo de estructuras asimétricas. En la cizalla simple, la elipse de deformación infinitesimal está siempre orientada a 45° de la dirección de cizalla, mientras que la elipse de deformación finita rota en función de γ . Esto significa que en todos los incrementos de deformación, la dirección a 45° de la dirección de cizalla

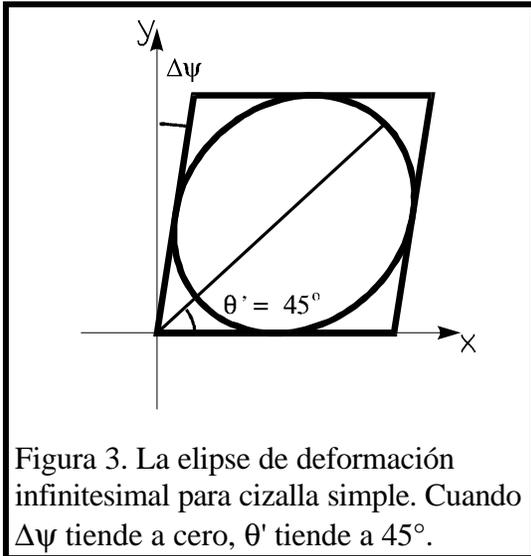


Figura 3. La elipse de deformación infinitesimal para cizalla simple. Cuando $\Delta\psi$ tiende a cero, θ' tiende a 45° .

es la de mayor elongación infinitesimal, lo cual quiere decir que es la dirección favorecida de crecimiento de minerales tabulares y prismáticos (Fig. 3). Una vez desarrollados los minerales en esta orientación, éstos tienden a rotar durante incrementos de deformación posteriores.

La extensión de los anteriores argumentos bidimensionales a tres dimensiones es sencilla, ya que la cizalla simple incluye en su definición la característica de ser una deformación en el plano. Esto significa que no hay movimiento de material fuera del plano que contiene la dirección de cizalla y que

deformación de una esfera unitaria inicial donde Y se mantiene constante (Fig. 4). La determinación del sentido de cizalla simple en rocas cizalladas siempre se hará en el plano XZ del elipsoide de deformación finita, o sea en un plano perpendicular a la foliación o los límites de la zona de cizalla y paralelo a la dirección de *máxima extensión finita* (X).

El Catálogo de Indicadores Cinemáticos

Lineación

Las rocas fuertemente cizalladas tienden a desarrollar una *lineación por extensión* con orientación **subparalela** a la dirección de cizalla. Esta estructura por sí sola no permite caracterizar el sentido de la cizalla pero sí su dirección. Además, es importante porque la determinación del sentido de cizalla siempre deberá hacerse en un plano paralelo a la lineación por extensión y perpendicular a la foliación. En rocas sometidas a menores grados de deformación es posible desarrollar una *lineación de intersección* de dos planos **perpendicular** a la dirección de cizalla.

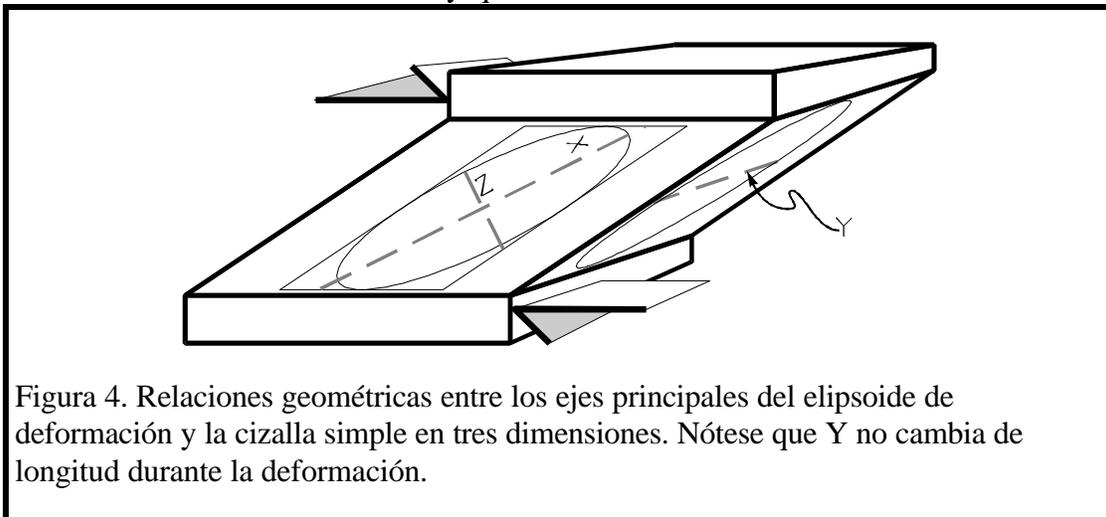


Figura 4. Relaciones geométricas entre los ejes principales del elipsoide de deformación y la cizalla simple en tres dimensiones. Nótese que Y no cambia de longitud durante la deformación.

es perpendicular a los bordes de la zona de cizalla. En tres dimensiones el elipsoide de deformación con ejes X, Y, y Z ($X > Y > Z$) es el resultado de la

Foliación Sigmoidal

La foliación sigmoidal se debe a la heterogeneidad en la deformación finita que existe en las zonas de cizalla naturales. Son representadas por una disminución progresiva hacia el centro de la zona de cizalla del ángulo (θ') entre el borde de la zona de cizalla y la foliación desarrollada dentro de ésta (Fig. 5). La intensidad de la foliación tiende a aumentar hacia el centro de la zona de cizalla, ya que aumenta también el grado de deformación. Estas estructuras se desarrollan comúnmente en rocas inicialmente isotrópicas como lo son el granito, gabro, y gneis de grano grueso.

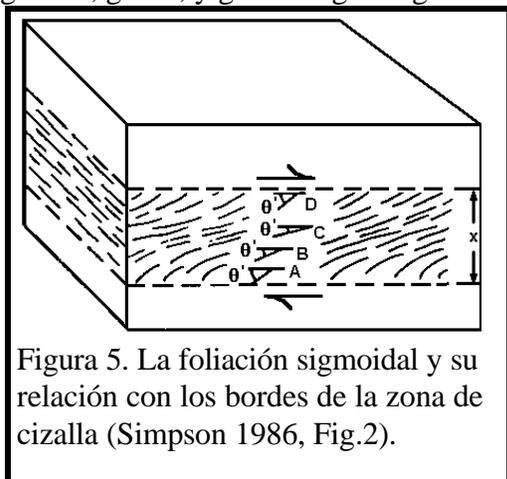


Figura 5. La foliación sigmoidal y su relación con los bordes de la zona de cizalla (Simpson 1986, Fig.2).

Estructuras S-C

Las estructuras S-C fueron descritas por primera vez por Berthé et al. (1979) y posteriormente tratadas en forma más extensa por Lister y Snoke (1984). Estas estructuras consisten de pequeños planos de cizalla separados por milímetros o centímetros entre sí y orientados subparalelos a los bordes de la zona de cizalla principal. El crecimiento de filosilicatos (micas) con el plano basal orientado paralelo a la dirección de máxima extensión, desarrolla un plano de esquistosidad que forma un ángulo agudo con la dirección de cizalla (Fig. 6). Los planos C frecuentemente muestran una

lineación **paralela** a la dirección de cizalla, pero los planos S y C definen una lineación de intersección **perpendicular** a la dirección de cizalla. Estas estructuras planares compuestas se desarrollan en las fases tempranas de una deformación,

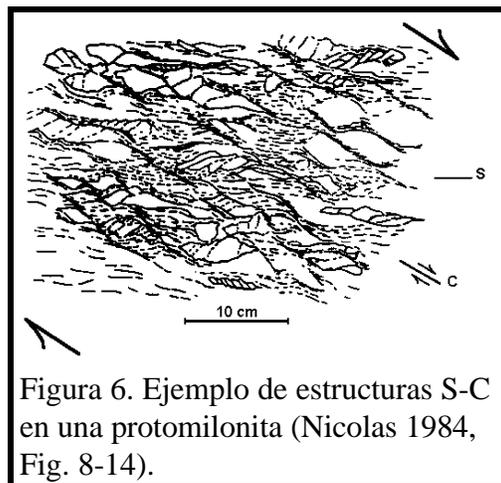


Figura 6. Ejemplo de estructuras S-C en una protomilonita (Nicolas 1984, Fig. 8-14).

particularmente en rocas graníticas.

Estructuras C'

En estadios avanzados de deformación, cuando la roca deformada ha adquirido una fuerte foliación paralela al plano de cizalla, se forman estructuras extensionales denominadas C' (Fig. 7). Estas estructuras acusan un sentido de rotación antitético (contrario) al sentido de rotación de la cizalla. Las rocas que exhiben estos planos de cizalla antitéticos suelen desarrollar fuertes lineaciones por

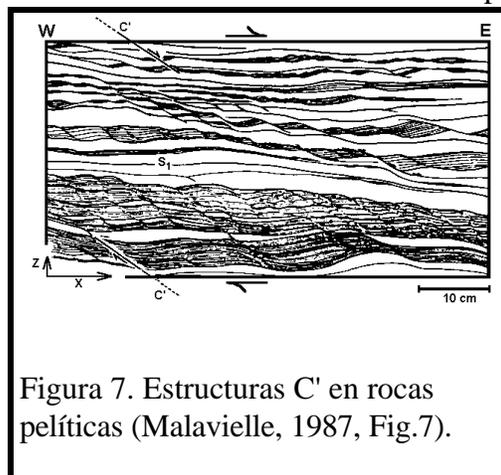


Figura 7. Estructuras C' en rocas pelíticas (Malavielle, 1987, Fig.7).

extensión **paralelas** a la dirección de cizalla y lineaciones de intersección **perpendiculares** a ésta.

Peces de Mica

Muy frecuentemente, asociados a las rocas que han desarrollado planos C', se encuentran estructuras formadas por porfidoblastos de micas que han sido desmembrados dejando como relictos micas asimétricamente dispuestas con respecto a la zona de cizalla. En planos paralelos a la dirección de máxima extensión y perpendiculares a la foliación, estos porfidoblastos de mica tienen forma de pez. En los planos de foliación, el paralelismo de las micas refleja el sol de manera muy característica (Fig.8).

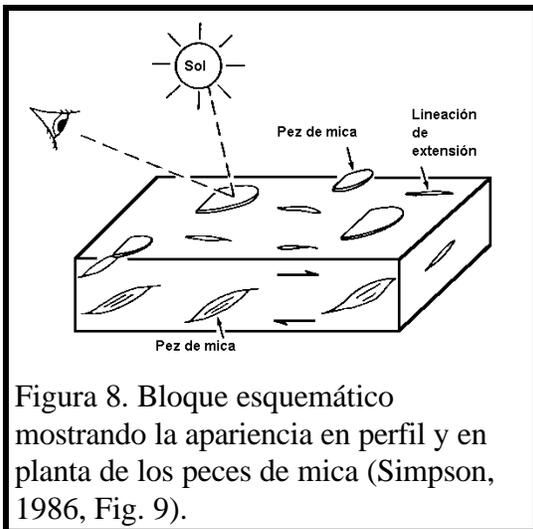


Figura 8. Bloque esquemático mostrando la apariencia en perfil y en planta de los peces de mica (Simpson, 1986, Fig. 9).

Pliegues

Los pliegues formados por capas inicialmente paralelas al plano de cizalla indican el sentido correcto de cizalla. Sin embargo, los pliegues formados en capas transversales a la zona de cizalla pueden mostrar tanto el sentido correcto como el sentido incorrecto del desplazamiento como lo muestra la Fig. 9. Este problema hace que los pliegues sean de los indicadores cinemáticos más ambiguos, y su uso requiere de extrema precaución

cuando no se puedan observar otras microestructuras que apoyen el sentido de cizalla inferido por pliegues.

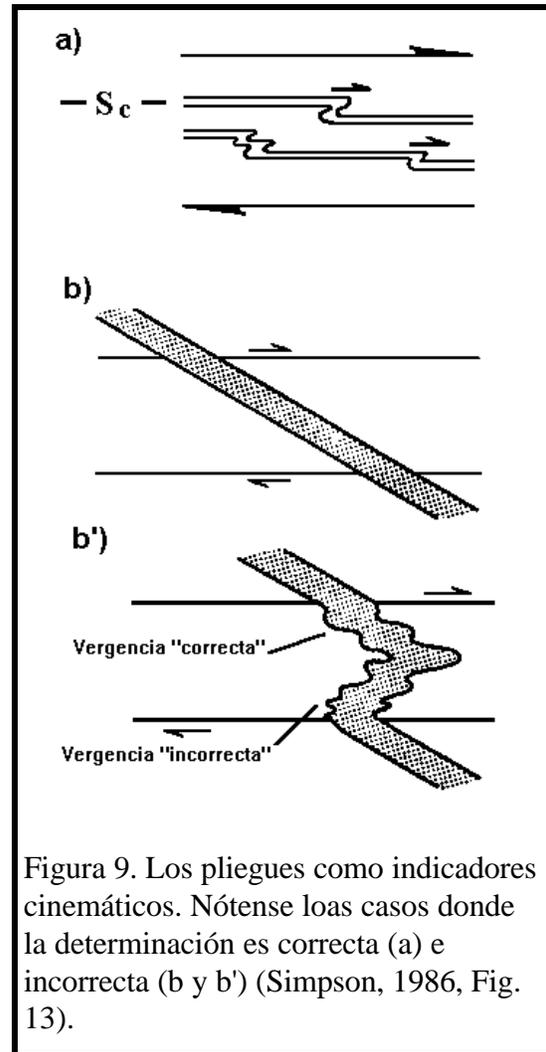


Figura 9. Los pliegues como indicadores cinemáticos. Nótese los casos donde la determinación es correcta (a) e incorrecta (b y b') (Simpson, 1986, Fig. 13).

Pliegues de Funda (Sheath Folds)

En zonas de cizalla simple con altos grados de deformación ($\gamma > 10$), los ejes de los pliegues tienden a ser rotados hacia la dirección de cizalla. El resultado son pliegues con forma de funda o de dedo de guante. La funda se cierra en dirección del desplazamiento con respecto a la porción plana de la misma capa como lo muestra la Fig. 10.

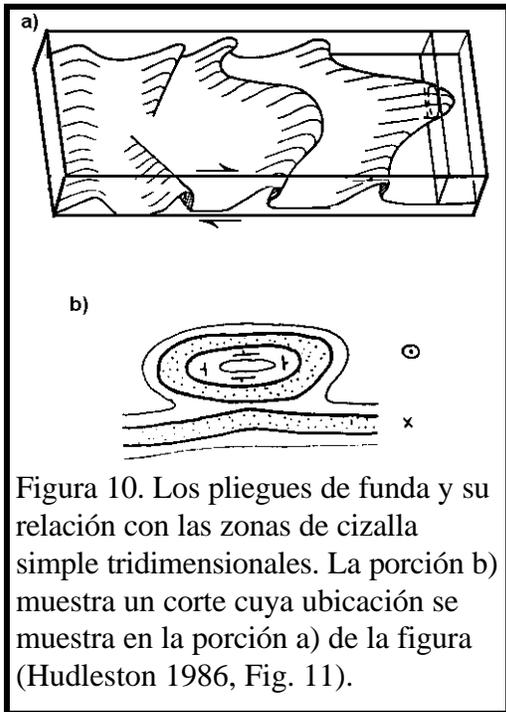


Figura 10. Los pliegues de funda y su relación con las zonas de cizalla simple tridimensionales. La porción b) muestra un corte cuya ubicación se muestra en la porción a) de la figura (Hudleston 1986, Fig. 11).

Porfidoclastos con Rabos Asimétricos

El proceso de milonitización incluye una componente de recristalización dinámica importante. Cuando un porfidoclasto se ve involucrado en dicha recristalización, ésta ocurre en sus bordes. El material recristalizado en el perímetro del cristal tiende a ser arrastrado tanto por el porfidoclasto al rotar como por la cizalla, lo cual resulta en "rabos" asimétricamente dispuestos alrededor del porfidoclasto. Se distinguen dos tipos de rabos asimétricos: sigma (σ) y delta (δ), así denominados por su forma idealizada (Fig. 11). El desarrollo de porfidoclastos σ o δ depende de la relación que exista entre la tasa de rotación y la tasa de recristalización (Simpson y Passchier, 1986) así como con la forma inicial del porfidoclasto. Los porfidoclastos δ sólo se encuentran en zonas de muy alta

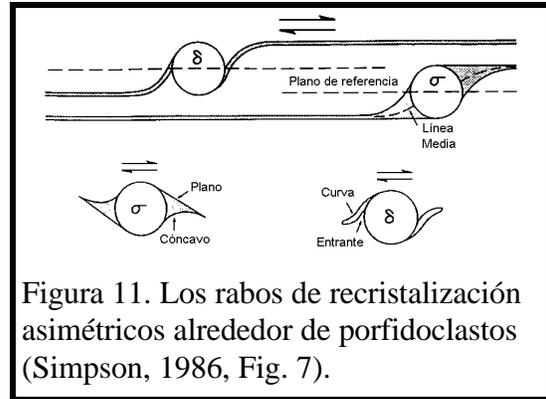


Figura 11. Los rabos de recristalización asimétricos alrededor de porfidoclastos (Simpson, 1986, Fig. 7).

deformación, pues requieren de una fuerte componente de rotación.

Las Sombras de Presión Asimétricas

En situaciones donde el campo de esfuerzos es no-hidroestático, tiende a desarrollarse una curvatura en las trayectorias de los ejes principales de esfuerzos en la cercanía de cuerpos más rígidos dentro de una matriz más dúctil de una roca. Esto conduce a la cristalización preferencial de minerales en posiciones y orientaciones específicas alrededor del objeto. Los minerales en solución (muy comunmente cuarzo o calcita) tienden a ser precipitados en las zonas de menor

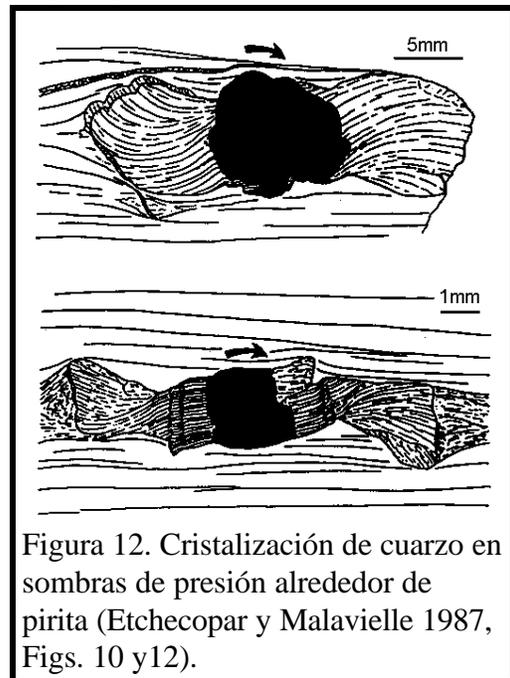


Figura 12. Cristalización de cuarzo en sombras de presión alrededor de pirita (Etchecopar y Malavielle 1987, Figs. 10 y12).

presión alrededor de los objetos. Cuando existe un componente de cizalla simple en la deformación, el objeto gira con respecto a los ejes principales de esfuerzos lo cual causa una rotación de la orientación cristalográfica de las fibras minerales precipitadas, como lo muestra la Fig. 12.

Libros rotados

Los porfidoclastos de materiales que no se pueden deformar plásticamente a las condiciones P y T vigentes durante la deformación tienden a desarrollar microfallas aprovechando los planos de cruce del mineral. El sentido de las microfallas es **antitético** al sentido de la cizalla (Fig. 13).

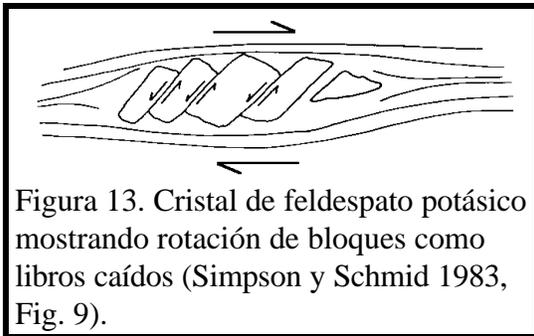


Figura 13. Cristal de feldespato potásico mostrando rotación de bloques como libros caídos (Simpson y Schmid 1983, Fig. 9).

Vetillas escalonadas

Las vetillas extensionales son muy comunes en las zonas de cizalla. Se encuentran típicamente rellenas de cuarzo y calcita y se forman a $\sim 45^\circ$ de la dirección de cizalla. Una vez cristalizadas pueden ser plegadas y rotadas, con lo cual adquieren una geometría sigmoidal. Así mismo pueden formarse nuevas generaciones de vetillas durante la deformación progresiva (Fig. 14).

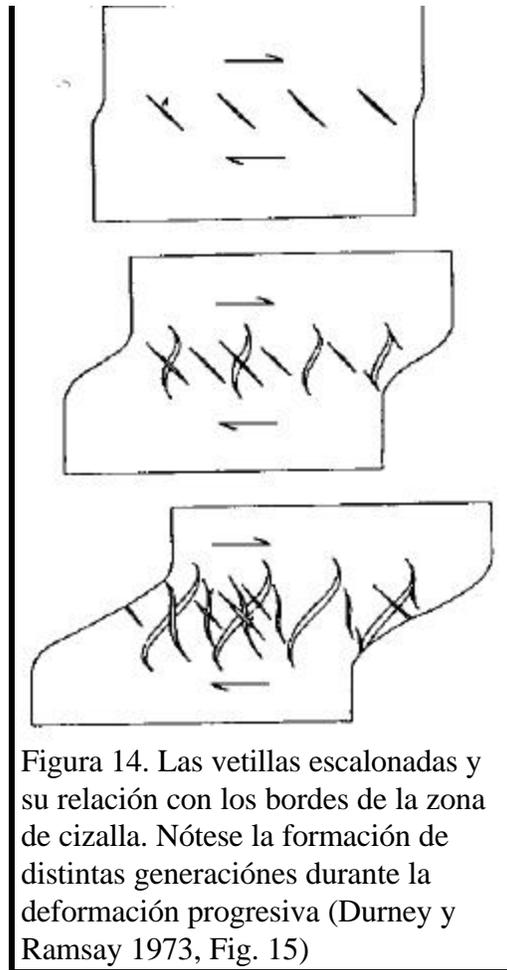


Figura 14. Las vetillas escalonadas y su relación con los bordes de la zona de cizalla. Nótese la formación de distintas generaciones durante la deformación progresiva (Durney y Ramsay 1973, Fig. 15)

Lineación de fibras minerales

Las fallas tienden a desarrollar fibras minerales que son precipitadas durante el desplazamiento (Fig. 15). La dirección de los escalones indica la dirección del desliz.

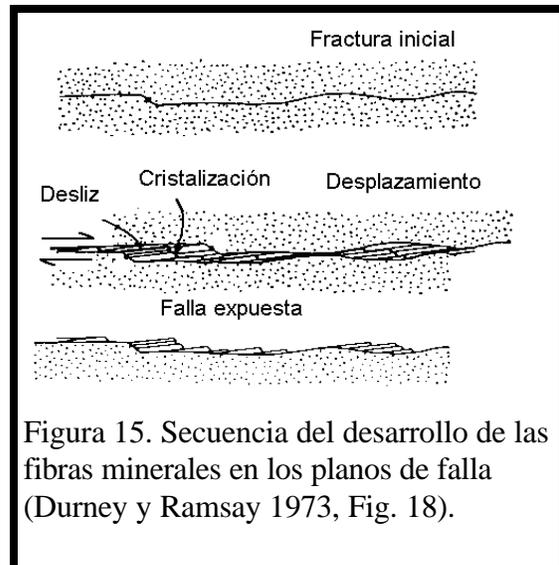
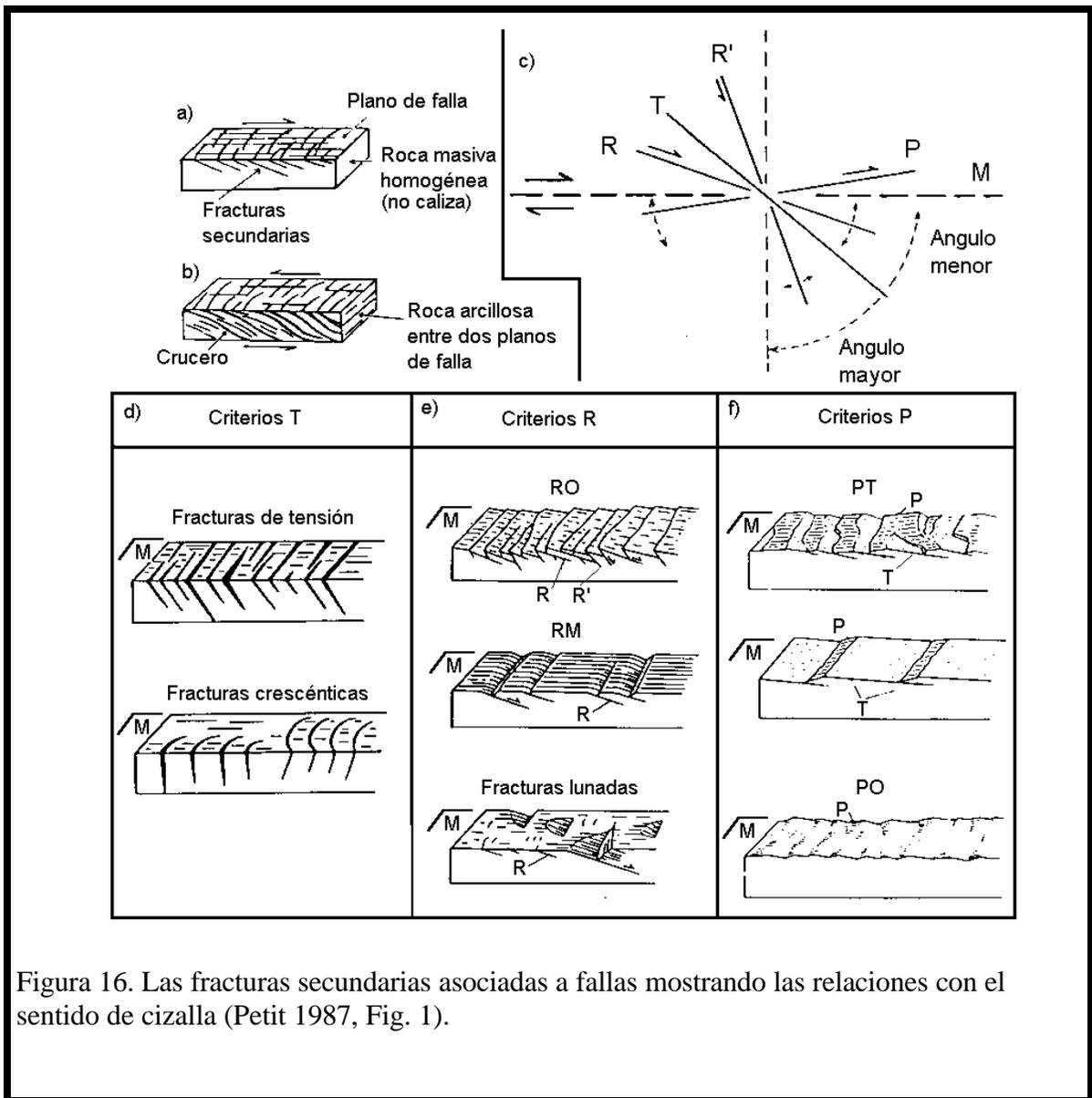


Figura 15. Secuencia del desarrollo de las fibras minerales en los planos de falla (Durney y Ramsay 1973, Fig. 18).



Fracturas secundarias asociadas a fallas

Las fallas desarrollan una serie de fracturas secundarias cuya orientación y cinemática acusan el sentido de desplazamiento sobre la falla. Las fracturas secundarias pueden ser de cizalla (R y R' así como P) o extensionales (T). Si R y P se confunden, la interpretación del sentido de cizalla es incorrecta. Las fracturas crescénticas con el lado cóncavo hacia la dirección de

desplazamiento del bloque alto son muy confiables (Fig. 16).

Bibliografía citada

Berthè, D., Choukroune, P., y Jegouzo, P., 1979. Orthogneiss, mylonite, and non-coaxial deformation of granites: the example of the South Armorican Shear

- Zone. *Journal of Structural Geology*, v. 1, pp. 31-42.
- Durney, D.W. y Ramsay, J.G., 1973. Incremental strains measured by syntectonic crystal growths. En DeJong K.A. and Scholten, R. (editores), *Gravity and Tectonics*, Wiley, pp. 67-96.
- Etchecopar, A. y Malavielle, J., 1987. Computer models of pressure shadows: a method of strain measurement and shear-sense determination. *Journal of Structural Geology*, v. 9, pp. 667-677.
- Hudleston, P.J., 1986. Extracting information from folds in rocks. *Journal of Geological Education*, v. 34, pp. 237-245.
- Hudleston y Teysier, 1989. Recognition and interpretation of shear zone structures. Technical methods workshop, Workshop on Mineral Deposit Models Applicable to Minnesota. 3 a 6 de abril, Minneapolis Minnesota.
- Hudleston, P.J., Schultz-Ela, D., y Southwick, D.L., 1988. Transpression in an Archean Greenstone belt, northern Minnesota. *Canadian Journal of Earth Sciences*, v. 25, pp. 1060-1068.
- Lister, G.S. y Snoke, A.W., 1984. S-C mylonites. *Journal of Structural Geology*, v. 6, pp. 616-638.
- Malavielle, J., 1987. Kinematics of compressional and extensional ductile shearing in a metamorphic core complex of the northeastern Basin and Range. *Journal of Structural Geology*, v. 9, pp. 541-551.
- Nicolas, A., 1984. *Principles of Rock Deformation*, Reidel, 208 pp.
- Petit, J.P., 1987. Criteria for sense of movement on fault surfaces in brittle rocks. *Journal of Structural Geology*, v. 9, pp. 577-608.
- Simpson, C., 1986. Determination of movement sense in mylonites. *Journal of Geological Education*, v. 34, pp. 246-261.
- Simpson, C. y Schmid, S., 1983. An evaluation of criteria to deduce sense of movement in sheared rocks. *Bulletin of the Geological Society of America*, v. 94, pp. 1281-1288.