

Influencia de la orientación de la anisotropía en el desarrollo de *shear bands*: estudio experimental

Influence of the anisotropy orientation on shear band development: an experimental approach

E. Gómez-Rivas, A. Grier, J. Carreras y E. Druguet

Departament de Geologia. Universitat Autònoma de Barcelona, 08193 Bellaterra (Barcelona). enrique.gomez@uab.es

ABSTRACT

Shear bands are geologic structures widely used as kinematic indicators. Despite the large amount of studies about these structures, their mechanical development is not yet well known. This work presents an experimental study of shear band localization and evolution under coaxial deformation. Particular attention is given to the influence of the obliquity of anisotropy planes on the orientation of shear bands. During deformation, two conjugate sets of shear bands develop symmetrically for models with layers parallel to the extension axis, while for oblique orientations one set dominates. Anisotropy planes have a strong influence on the local stress field around conjugate fracture systems, which deviates from the applied boundary conditions.

Key words: shear band; analogue modelling; anisotropy; fracture orientation; fracture rotation

Geogaceta, 40 (2006), 47-50
ISSN: 0213683X

Introducción

En un contexto general, los *shear bands* se pueden definir como estructuras resultantes de la localización de la deformación de cizalla. Están presentes en diferentes contextos, desde fractura frágil (ej. fallas normales, cizallas de tipo *Riedel*) hasta procesos más dúctiles (ej. zonas de cizalla).

Los *shear bands* dúctiles nuclean normalmente a partir de una anisotropía planar (ej. foliación milonítica), formando un ángulo mayor de 45° con respecto al *ISA* de acortamiento (*Shortening Instantaneous Stretching Axis*). Estas estructuras presentan una alta complejidad y se generan como resultado de la partición y la localización de la deformación en condiciones de extensión paralela a la anisotropía (Lister y Williams, 1983). Además, aparecen habitualmente asociadas al plegamiento de rocas anisótropas (ej. crenulaciones, *kink bands*) (Cobbold *et al.*, 1971; Cosgrove, 1976; Williams y Price, 1990). Los *shear bands* están relacionados con otras estructuras extensionales como el *boudinage* asimétrico (Swanson, 1992), el *pull-apart* asimétrico (Hanmer, 1986) o estructuras de tipo *pinch-and-swell* (Schwerdtner, 1970). Como se describe en Gómez-Rivas *et al.* (2004) la geometría de los

shear bands está controlada por factores reológicos y cinemáticos.

A pesar de la importante cantidad de estudios realizados sobre estas estructuras, aún se desconoce en gran parte su génesis desde el punto de vista mecánico. Este trabajo presenta una parte de los resultados de modelos analógicos en materiales anisótropos y para condiciones de deformación coaxial descritos en Gómez-Rivas (2005). El estudio se centra en la influencia de la oblicuidad de los planos de foliación con respecto a los ejes de deformación en la nucleación y evolución de pequeñas fracturas de cizalla.

Procedimiento experimental

Los modelos analógicos se elaboraron apilando capas de plastilina, mezclada con un 8% de vaselina para incrementar su ductilidad y un 12% de confeti. Este se dispuso estadísticamente orientado paralelo al bandeado de capas con el objetivo de incrementar el grado de anisotropía y simular el efecto de minerales planares en las rocas naturales (Fig. 1).

Para conocer las propiedades mecánicas de los materiales experimentales se llevaron a cabo una serie de test de compresión uniaxial a diferentes velocidades de deformación. Los resultados indican que se trata de un material elastoviscoso no-li-

neal cercano al flujo viscoso ideal (número de Deborah $De \sim 10^{-2}$). De los análisis se obtuvieron una densidad de 1,11 gr/cm³, una viscosidad efectiva de $7 \cdot 10^7$ Pa·s, y unos valores del módulo de cizalla elástico del orden de 10^5 Pa. Esta mezcla exhibe una tendencia clara al endurecimiento por deformación. Su comportamiento se ajusta aproximadamente a un material de tipo *Maxwell* para velocidades de deformación bajas, del orden de 10^{-5} s⁻¹.

Los modelos multicapa se construyeron con unas dimensiones iniciales de 30 x 15 x 10 cm., y se deformaron coaxialmente en la prensa experimental *BCN-stage*, un prototipo que permite de-

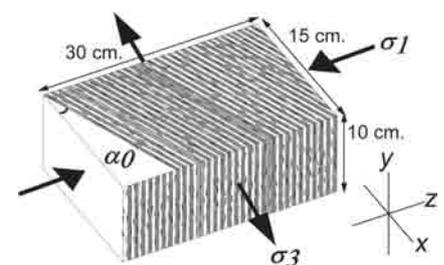


Fig. 1.- Esquema de un modelo multicapa. Las flechas indican la dirección de los esfuerzos principales (s_1, s_3).

Fig. 1.- Sketch showing a multilayer model. Arrows show the principal stresses direction (s_1, s_3).

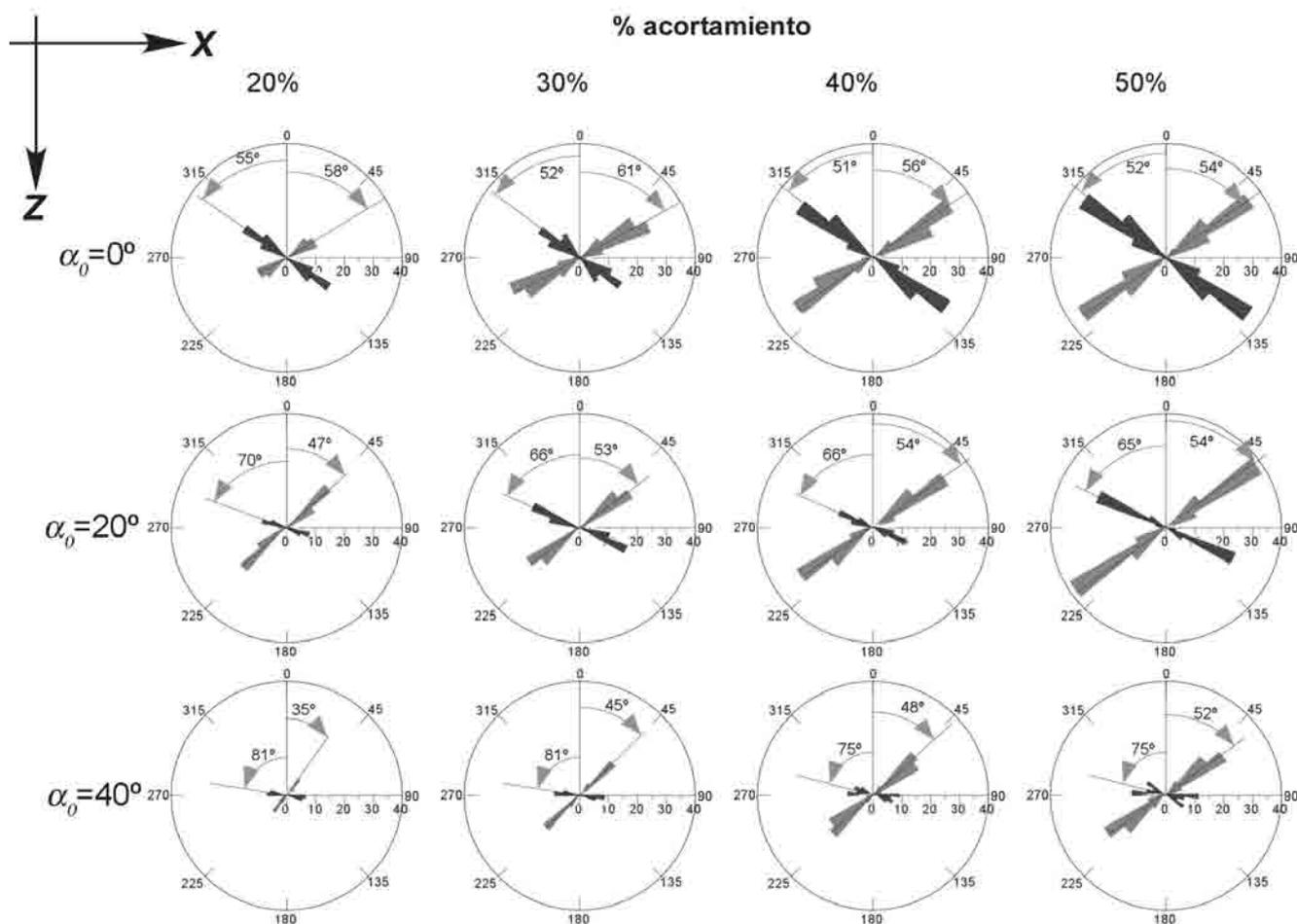


Fig. 2.- Diagramas con las orientaciones y número de fracturas para cada orientación en diferentes estadios de la deformación. En gris claro el set senestro y en oscuro el set dextro. Existe una gradación de la frecuencia de fracturación que depende de la orientación inicial de la anisotropía.

Fig. 2.- Diagrams showing the orientation and number of fractures for each orientation for different deformation stages. The sinistral set is coloured in light grey and the dextral one in dark grey. There is a gradation of fracture frequency depending on the initial orientation of anisotropy.

formaciones en el espectro continuo $0 < Wk < 1$, controlando la temperatura y la velocidad de deformación. Se puede consultar una descripción detallada de este aparato en Carreras y Ortuño (1990).

Se estudiaron cinco tipos de modelos, con diferentes ángulos iniciales α_0 entre los planos de anisotropía y el eje de máxima extensión x (0° , 10° , 20° , 30° y 40°). Los bloques se deformaron a una temperatura constante de 26°C y a una velocidad de deformación de $2,5 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ hasta un acortamiento máximo del 50%. Durante los experimentos se comprimieron los modelos en la dirección de z , se extendieron en x y quedaron confinados en la dirección de y (Fig. 1).

Resultados experimentales

Descripción general

Durante los primeros estadios de la experimentación la deformación se aco-

moda principalmente mediante aplastamiento homogéneo y rotación dextral de las capas hacia la dirección de extensión x para modelos con $\alpha_0 > 0^\circ$. Hacia un 15-18% de acortamiento comienzan a nuclear las primeras estructuras macroscópicas, consistentes en *pinch-and-swell*, *boudinage*, fracturas de tensión y fracturas de cizalla. La génesis de estas estructuras coincide con una estabilización de los esfuerzos.

Se generan dos sets de *shear bands* o fracturas de cizalla, simétricos e igualmente desarrollados en el caso de modelos cuyas capas son paralelas al eje de extensión ($\alpha_0 = 0^\circ$) y asimétricos para los modelos con capas inclinadas ($\alpha_0 > 0^\circ$), con dominio de la familia inclinada en el mismo sentido que las capas. En ningún caso aparecen grandes fracturas que controlen el sistema, de manera que la deformación se distribuye a lo largo de todo el modelo. Entre los *shear bands* quedan

zonas menos deformadas con morfologías poligonales características de tipo romboidal.

Análisis estadístico

Se han analizado sistemáticamente las orientaciones de las fracturas de cizalla utilizando métodos estadísticos, poniendo especial énfasis en los ángulos de nucleación de los *shear bands* y en su variación con el incremento de deformación. Para ello se eligió un área constante de muestreo de 100 cm^2 en el centro de los bloques con el objetivo de minimizar la influencia de la fricción de los elementos rígidos de la máquina en el contorno de los modelos.

Existe una gradación en la frecuencia de *shear bands* en función de la orientación inicial de los planos de anisotropía: cuanto mayor es α_0 menor es la frecuencia de fracturación y más se incrementa la asimetría entre los dos conjuntos de frac-

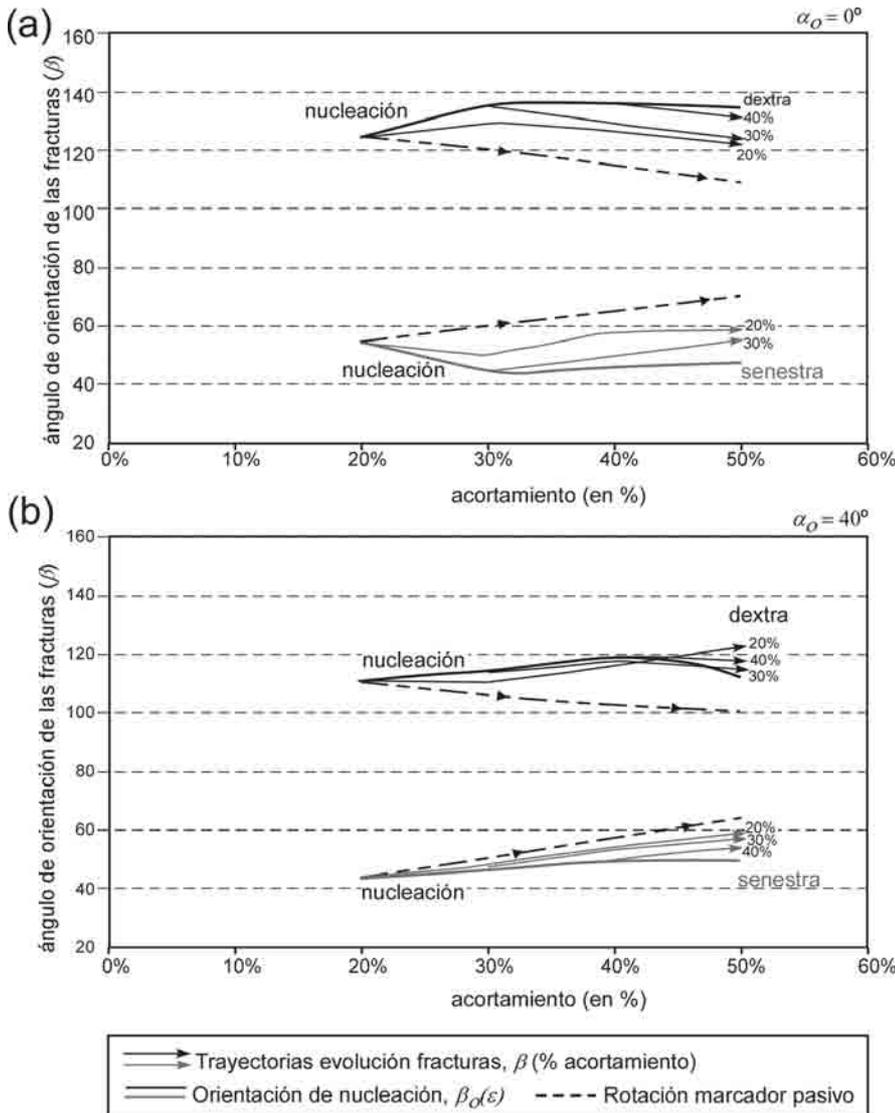


Fig. 3.- Gráficos que muestran la variación de orientación con respecto a la dirección de máxima compresión X de las nuevas fracturas generadas cada 10% de acortamiento (curvas gruesas) y su trayectoria de evolución (curvas con flechas). Las líneas discontinuas representan la evolución calculada de marcadores pasivos con una orientación inicial igual a la de las primeras fracturas generadas. (a) modelo de α₀=0° y (b) modelo de α₀=40°.

Fig. 3.- Graphs showing the variation in the orientation of new fractures generated each 10% of shortening (solid dark curves) and their evolution paths (curves with arrows). Dotted lines show the evolution of passive markers initially oriented similar to the first fractures. (a) α₀=0° model and (b) α₀=40° model.

turas con respecto a los ejes ISA de deformación. Este hecho se muestra en la figura 2, que presenta una serie de diagramas de distribución de las orientaciones y frecuencias de los dos sets de fracturas para los diferentes modelos analizados.

En la figura 3 se presentan dos gráficos que muestran la variación de la orientación β de las nuevas fracturas generadas durante la deformación con respecto al eje de compresión z, y su trayectoria de evolución hasta el final del experimento. Este gráfico permite comparar estas evoluciones con el comportamiento teórico

que tendrían los primeros shear bands generados si sus trayectorias fueran similares a las de un marcador pasivo.

En modelos con planos de anisotropía inicial paralelos al eje de extensión x, todos los shear bands rotan ligeramente hacia la dirección de extensión, con una velocidad ligeramente inferior a la calculada para un objeto pasivo (Fig. 3a). Sin embargo, para los modelos con α₀>>0° las fracturas de la familia menor, con un movimiento dextral, evolucionan rotando inversamente al sentido impuesto por el aplastamiento (Fig. 3b). Es decir, los dos

conjuntos de shear bands rotan solidariamente y en el mismo sentido que las capas.

Discusión y conclusiones

Nucleación de nuevas fracturas

Las primeras fracturas de cizalla, generadas alrededor de un 20% de acortamiento, se forman con un ángulo β₀ con respecto al eje de máximo acortamiento z que responde a la siguiente ecuación:

$$\beta_0 = -\left(45^\circ - \frac{\gamma}{2} - \frac{\alpha_0}{2}\right)$$

donde γ es el ángulo de compactación/dilatación (Vardoulakis, 1980), con un valor aproximado de -20° para el material analizado. El signo del sumando α₀ es similar al utilizado previamente para especificar las dos familias de fracturas, tomando valores positivos para el conjunto dextro o situado en sentido trigonométrico. Debido a la alta plasticidad del material analizado se ha asumido un ángulo de fricción interna ℱ de 0°. El grado de ajuste de esta ecuación con los datos experimentales obtenidos se puede considerar correcto, puesto que los coeficientes de correlación R² presentan unos valores de 0,90 para el set dextro y 0,93 para la familia con movimiento senestro.

Utilizando métodos de inversión de esfuerzos se han calculado los esfuerzos principales para los dos sistemas conjugados de shear bands. El esfuerzo principal de compresión, σ₁, bisecta al ángulo obtuso entre las dos familias de fracturas. Esta bisectriz forma un ángulo con los shear bands de aproximadamente 55° para las primeras fracturas (formadas antes del 20% de acortamiento), mientras que para las generadas posteriormente es ligeramente superior a 45°. Estos ángulos no responden ni al criterio de plasticidad de Von Mises ni al criterio clásico friccional de Mohr-Coulomb. En este trabajo se ha denominado a este tipo de fracturas como compactacionales, como proponen Borja (2004) y de Borja y Aydin (2004). En la literatura sobre experimentación con rocas naturales se han descrito anteriormente fracturas formadas con ángulos parecidos a las que presenta esta contribución (Issen y Rudnicki, 2000; Mair et al., 2000), que se atribuyen a la porosidad de las rocas y a procesos de compactación del material.

Influencia de la anisotropía

El principal efecto producido por la oblicuidad de una fuerte anisotropía consiste en una variación del campo local de esfuerzos alrededor de los conjun-

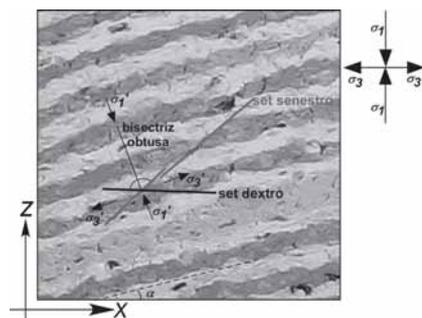


Fig. 4.- Fotografía que presenta la orientación de las dos familias de shear bands y la orientación de los esfuerzos principales: aplicados por la máquina (σ_1, σ_3) y los calculados a partir de las fracturas (σ_1', σ_3').

Fig. 4.- Picture displaying the orientation of both sets of shear bands and the orientation of the principal stresses: applied by the deforming apparatus (σ_1, σ_3) and calculated from fractures (σ_1', σ_3').

tos de fracturas conjugadas. Es decir, los esfuerzos principales que imprime el aparato de deformación (σ_1, σ_3) no coinciden con las orientaciones de los esfuerzos a nivel local (σ_1', σ_3'), que son los que parecen gobernar la génesis de los *shear bands* (Fig. 4). Este hecho se ilustra comparando la evolución de la orientación de la bisectriz obtusa entre las dos familias de fracturas (σ) con la orientación de la normal de las capas (n). Para todos los estadios de la deformación la bisectriz obtusa es aproximadamente paralela a la normal de las capas. Es decir, los planos de anisotropía originan una refracción en la disposición de los esfuerzos principales con respecto a la condición de contorno.

Evolución con el incremento de deformación

La variación en el campo de esfuerzos producida por la presencia de la anisotropía oblicua a los ejes de deformación queda ilustrada también en la figura 3b, donde se aprecia cómo la evolución de los *shear bands* con el incremento de deformación está claramente condicionada por la rotación de las capas hacia el eje de máxima extensión. Con el incremento del acortamiento, la normal de la capa n rota dextralmente a la misma velocidad que la bisectriz obtusa entre las dos familias de fracturas (Fig. 5). Por lo tanto, la evolución de los dos *sets* de *shear bands* está controlada por la rotación rígida dextral del material. Utilizando este mismo hecho, se puede explicar el mayor desarrollo del *set* de fracturas con movi-

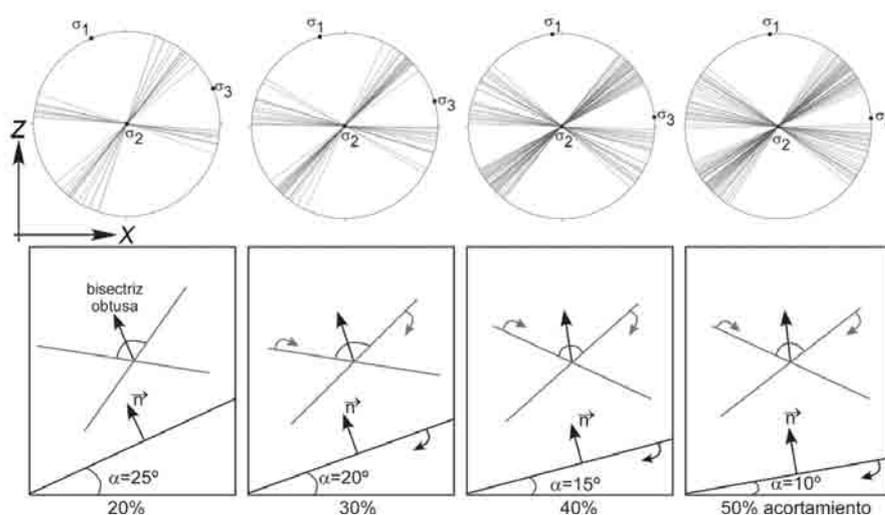


Fig. 5.- Esquema que ilustra cómo rotan dextralmente los dos *sets* de fracturas conjuntamente con los planos de anisotropía. n es la normal de las capas. (Gráficos calculados a partir de un modelo con $\alpha_0=40^\circ$).

Fig. 5.- Sketch showing how do rotate both fracture sets in dextral sense accordingly to anisotropic planes. n is the layer normal. (Graphs calculated for a $\alpha_0=40^\circ$ model)

miento senestro en modelos con orientación inicial oblicua de la anisotropía. El motivo por el que el *set* dextral está menos desarrollado se debe probablemente a que una parte considerable de la vorticidad dextral es asumida mediante la rotación de las capas. Es necesario mantener una vorticidad global $Wk=0$, definida por la coaxialidad de los esfuerzos aplicados por la máquina. En los diagramas de la figura 3 existe una gradación en la frecuencia de *shear bands* según el ángulo α_0 , de manera que cuanto mayor es la oblicuidad inicial de las capas más cantidad de deformación dextral es asumida mediante su rotación y, por lo tanto, se genera una menor cantidad de fracturas dextrales.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado con los proyectos de investigación BTE2001-2616 (MCYT) y CGL2004-03657 (MEC), y por la beca FPI BES-2003-0755 (MCYT) de E. Gómez-Rivas. Los autores agradecen el trabajo de L.M. Castaño durante la fase de experimentación, así como a M.A. Díez Balda y M.J. Huertas por las oportunas correcciones y comentarios al manuscrito.

Referencias

Borja, R. I. (2004). *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 193, 2699-2718.

Borja, R. I. y Aydin, A. (2004). *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 193, 2667-2698.
 Carreras, J. y Ortuño, F. (1990). *Acta Geológica Hispánica*, 17, 219-225.
 Cobbold, P. R., Cosgrove, J. W. y Summers, J. M. (1971). *Tectonophysics*, 12, 23-53.
 Cosgrove, J. W. (1976). *Journal of the Geological Society of London*, 132, 155-178.
 Gómez-Rivas, E., Druguet, E. y Carreras, J. (2004). *Geotemas*, 6, 57-60.
 Gómez-Rivas, E. (2005). *Shear bands en materiales anisotropos: modelización analógica en condiciones de deformación coaxial*. Treball de Recerca, Univ. Autònoma de Barcelona, 143 p.
 Hanmer, S. (1986). *Journal of Structural Geology*, 8, 111-115.
 Issen, K. A. y Rudnicki, J. W. (2000). *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*, 105, 21529-21536.
 Lister, G. S. y Williams, P. F. (1983). *Tectonophysics*, 92, 1-33.
 Mair, K., Main, I., y Elphick, S. (2000). *Journal of Structural Geology*, 22, 25-42.
 Schwerdtner, W. M. (1970). *Tectonophysics*, 9, 537-545.
 Swanson, M. T. (1992). *Journal of Structural Geology*, 14, 323-341.
 Vardoulakis, I. (1980). *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 4, 103-119.