

Respuesta mecánica de medios bifásicos. Influencia de la disposición espacial de sus constituyentes.

Rheological response to flow of a two-phase composite. Influence of the spatial distribution of the phases.

A. Griera, Y-T. Takeda E. Gómez-Rivas

Departament de Geologia, Universitat Autònoma de Barcelona, 08193 Bellaterra (Barcelona), España. albert.griera@uab.es

ABSTRACT

Numerical simulations were performed to investigate the strain-dependent behaviour of rheological response to flow of two-phase rocks. Two types of microstructures were considered: strong phase supported (SPS) and weak phase supported (WPS) structures. Additionally, the influence of the spatial distribution of the composite, with strain hardening preceding strain softening in both structures. Otherwise, an anisotropic dependence on viscous and elastic properties was observed in relation to the initial orientation of the inclusions. This behaviour is related with shape changes of phases, the development of internal instabilities and the deformation partitioning.

Key words: Flow strength, two-phase composites, effective viscosity numerical simulation.

Geogaceta, 41 (2007), 103-106
ISSN: 0213683X

Introducción

Es bien conocido que la resistencia de una roca polifásica puede ser muy diferente a la resistencia que pueden presentar las distintas fases que la componen (ej., Jordan, 1987). Abordar el problema de la respuesta mecánica de un agregado es importante si se pretende simular la dinámica de la Tierra, porque en general las rocas de la corteza y del manto están compuestas por diferentes fases. Con el objetivo de estimar la resistencia de un medio polifásico y/o policristalino se han propuesto diversos modelos empíricos (Handy, 1994; Ji y Zhao, 1994; Treagus, 2002; Lebensohn et al., 2003). Estos modelos se definen a partir de las propiedades mecánicas de sus fases integrantes y un conjunto de parámetros que describen la variación y distribución de las mismas en el medio. El grado de ajuste entre datos experimentales y simulaciones numéricas de la deformación de medios polifásicos es en general bajo y únicamente aplicable para condiciones de deformaciones infinitesimales (Takeda y Griera, 2006). Sin embargo, el progreso de la deformación también influye en las propiedades mecánicas de las rocas ya que originan un cambio de la forma de sus constituyentes y, por tanto, el desarrollo de una nueva microestructura en el medio. El objetivo del presente trabajo consiste en una primera investigación mediante simulaciones nu-

méricas sobre la variación de las propiedades mecánicas de un medio bifásico con el incremento de la deformación por cizalla simple. Los principales parámetros de estudio son la influencia de la microestructura y la disposición espacial de los componentes.

Modelización numérica

Las simulaciones numéricas se han realizado a partir del programa de diferencias finitas *FLAC2D* (Itasca, 1998). La reología del medio se ha simulado a partir

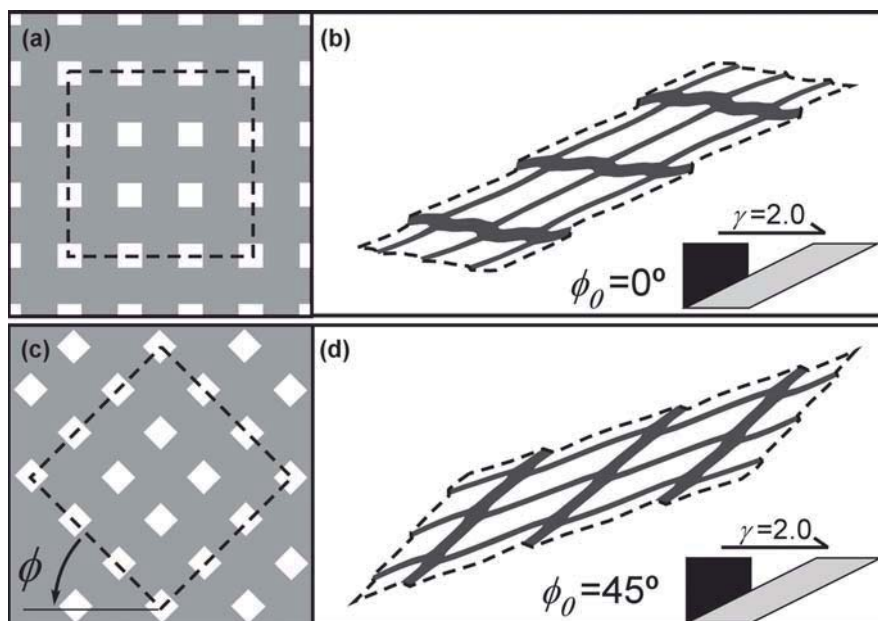


Fig. 1.- Esquema con la configuración inicial de los modelos y la geometría final para modelos con estructura SPS. (a, b) Para $\phi=0^\circ$ y (c, d) para $\phi=45^\circ$. Las áreas blancas y grises representan respectivamente las fases blandas y duras.

Fig. 1.- Sketch with initial geometry and after a shear strain of 2.0 for SPS structure models. (a, b) For $\phi=0^\circ$ and (c, d) for $\phi=45^\circ$. White and grey shaded areas represent the weak and the strong phase, respectively.

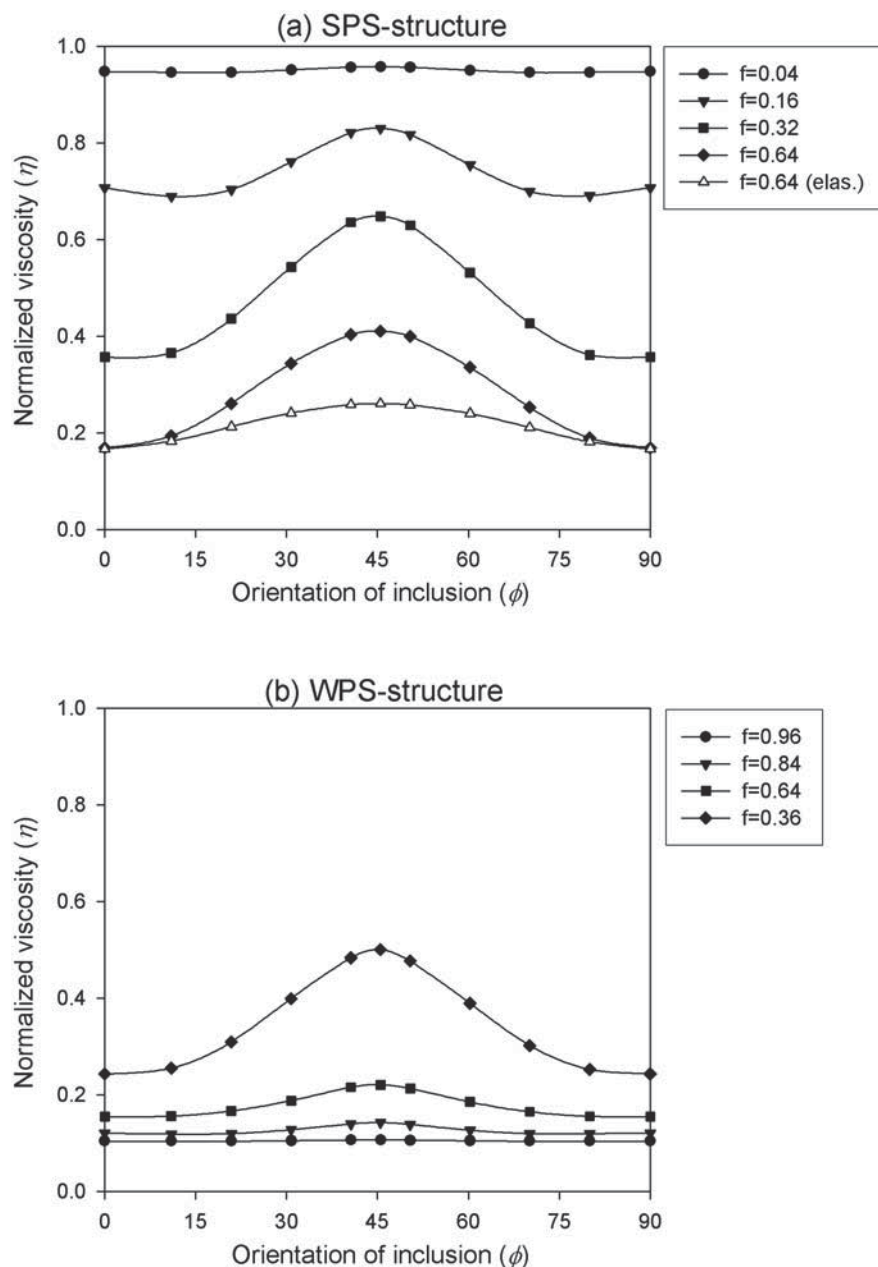


Fig. 2.- Variación de la viscosidad efectiva instantánea y del módulo de cizalla elástico con respecto al contenido de fase dúctil (f) y a la orientación de las inclusiones (\mathcal{E}). (a) Modelos con estructura SPS; (b) modelos WPS. Los valores se han normalizado con respecto a la fase más resistente.

Fig. 2.- Variation of the instantaneous effective viscosity and the elastic shear modulus regarding to the volume fraction of the weak phase (f) and the orientation of the inclusions (\mathcal{E}). (a) SPS structure models. (b) WPS structure models. Values have been normalized to the viscosity of the strong phase.

de un modelo lineal elastoviscoso (Maxwell). Las dos fases se comportan como un material elástico para deformaciones de periodo de tiempo corto y como un material viscoso para deformaciones de periodo de tiempo largo. Se ha supuesto que el contraste de propiedades elásticas y viscosidades entre las dos fases sea similar, con un valor de 10 para todos los modelos. El valor de referencia del módulo de cizalla elástico de la fase más dúctil es de 10^{10} Pa, mientras que para la visco-

sidad es de 10^{19} Pa·s. Estos valores están dentro del rango establecido para materiales de la corteza media e inferior (Turcotte y Schubert, 1982).

Geometría y condiciones de contorno.

Para los presentes modelos, se ha asumido una distribución geométrica simple basada en una estructura de inclusión y matriz, donde inclusiones discretas están rodeadas por una fase continua o matriz (Fig. 1). Se han considerado dos casos:

modelos con estructura sostenida por la fase más resistente (SPS) y modelos con estructura dúctil (WPS), donde la fase más blanda representa la matriz. Se ha escogido un volumen de referencia que sea independiente a la escala del modelo y una geometría inicial de las inclusiones con forma cuadrada. Se ha representado el contenido de las dos fases mediante la fracción en volumen de la fase dúctil (f). Valores de $f=1$ indican un modelo homogéneo compuesto únicamente por la fase más dúctil. La orientación de las inclusiones se ha definido a partir del ángulo \mathcal{E} entre las caras de las inclusiones y el plano de cizalla (Fig. 1c).

Se han impuesto condiciones de contorno por velocidades y deformación plana, simulando un flujo del tipo cizalla simple. El valor de *shear strain rate* utilizado es de $4 \cdot 10^{14} \text{ s}^{-1}$. Los modelos se han deformado hasta llegar al colapso numérico de la malla de deformación (Fig. 1b, d) ($\varnothing 3-3.5$ para modelos SPS y $\varnothing 1.5$ para los modelos WPS).

Para caracterizar la evolución mecánica del medio se ha calculado la variación de la viscosidad efectiva (η) con el progreso de la deformación, a partir de la relación entre la energía de disipación y la velocidad de deformación. Este valor se ha normalizado respecto a la viscosidad de la fase más resistente.

Resultados

En todos los modelos se observa una influencia de las propiedades del medio en función de la microestructura y el contenido de fase, pero también en función de la disposición de las inclusiones. En primer lugar se describen los resultados para deformaciones instantáneas y a continuación se presentan los resultados para deformaciones finitas.

Deformación instantánea

Los resultados obtenidos de la variación de la viscosidad efectiva con respecto al contenido en fase dúctil (f) y la orientación de las inclusiones (\mathcal{E}) se muestran en la Fig. 2 para modelos con estructuras SPS y WPS. Para un contenido de fase constante, se puede observar que la viscosidad normalizada varía en función de \mathcal{E} . Para situaciones con dominio de una de las dos fases, los valores tienden a ser constantes y la oscilación no es apreciable. En cambio para modelos con contenidos de fases intermedios, $f=0.32-0.64$, la oscilación es importante y se originan contrastes que pueden llegar a ser superiores a 2 unidades. Esta variación es significativa si tenemos en cuenta

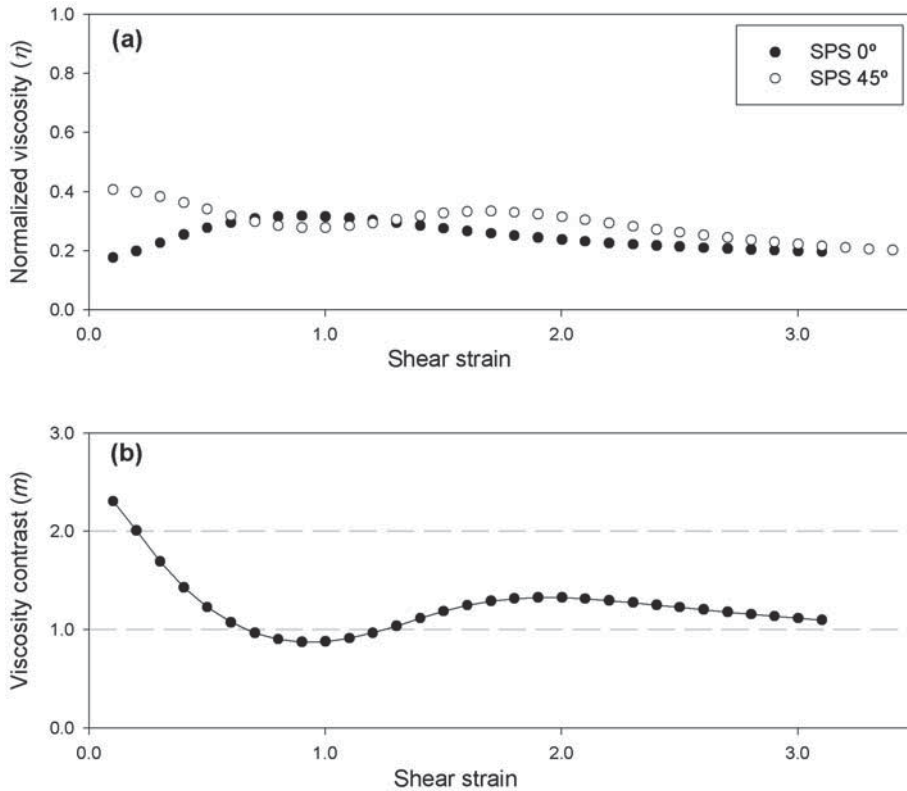


Fig. 3.- Modelos con estructura SPS. (a) Variación de la viscosidad normalizada con la deformación finita para una configuración $\xi=0^\circ$ (cuadrados negros) y $\xi=45^\circ$ (rombos blancos). (b) Variación del contraste de viscosidad entre la configuración $\xi=45^\circ$ y $\xi=0^\circ$. Observar la presencia de inversiones de competencia.

Fig. 3.- SPS structure models. (a) Variation of the normalized viscosity with shear strain for an initial configuration with $\xi=0^\circ$ (black squares) and $\xi=45^\circ$ (white rhombuses). (b) Variation of the viscosity contrast between $\xi=45^\circ$ and $\xi=0^\circ$ models. Note the existence of competence inversion with progression of the shear strain.

que el contraste de viscosidad entre las fases es solamente de 10. También se puede apreciar que para una misma fracción de fase (f =constante), la viscosidad efectiva varía en función de la microestructura. En general, una organización de tipo WPS siempre es menos resistente que su equivalente SPS (ej., comparar los resultados para $f=0.64$ de la Fig.

2). Esta oscilación, detectable en la respuesta del medio relacionada con la viscosidad también es observable a nivel de propiedades elásticas, aunque la amplitud de oscilación es mucho menor (Fig. 2a). Los resultados indican una respuesta *anisótropa* del medio con respecto a la orientación de los esfuerzos principales, siendo máxima la resistencia del material

cuando las caras de las inclusiones son perpendiculares al eje de máxima compresión.

Deformación finita de modelos SPS

La Fig. 1b y 1d muestra un ejemplo de la geometría final ($\gamma=2.0$) de dos modelos con mismo contenido en fases pero con diferente orientación inicial de las in-

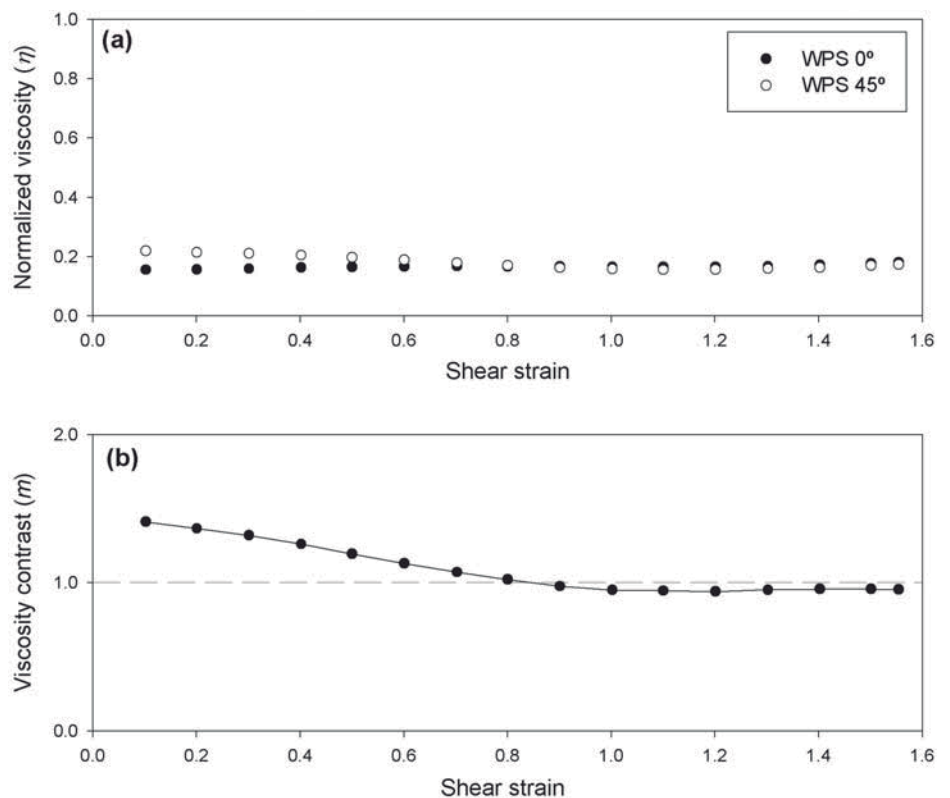


Fig. 4.- Modelos con estructura WPS. (a) Variación de la viscosidad efectiva con la deformación finita para una configuración $\xi=0^\circ$ (cuadrados negros) y $\xi=45^\circ$ (rombos blancos). (b) Variación del contraste de viscosidad entre la configuración $\xi=45^\circ$ y $\xi=0^\circ$.

Fig. 4.- WPS structure models. (a) Variation of the normalized viscosity with shear strain for an initial configuration with $\xi=0^\circ$ (black squares) and $\xi=45^\circ$ (white rhombuses). (b) Variation of the viscosity contrast between $\xi=45^\circ$ and $\xi=0^\circ$ models.

clusiones ($f=0^\circ$ y $f=45^\circ$). Ambos modelos presentan una variación no lineal de la viscosidad efectiva con el progreso de la deformación (Fig. 3a), aunque presentan tendencias diferentes. Para $f=0^\circ$, se produce inicialmente un endurecimiento con la deformación (i.e. incremento de la viscosidad efectiva), seguido de un estado donde domina un comportamiento de ablandamiento con la deformación. En cambio, para $f=45^\circ$ se observa un ciclo de ablandamiento y endurecimiento con la deformación que precede al comportamiento dominante de ablandamiento que se observa para elevadas deformaciones. Estas diferencias son más claras si se estima el contraste de viscosidad entre ambos modelos (Fig. 3b). En general la configuración $f=45^\circ$ es la más competente, pero se producen periodos de inversión de contraste de viscosidad con el progreso de la deformación.

Deformación finita de modelos con estructura WPS

La variación de la viscosidad efectiva para $f=0^\circ$ y $f=45^\circ$ se muestra en la figura 4a. Para un contenido de fase similar al caso anterior ($f=0.64$), la tendencia de la viscosidad efectiva es próxima a la esperable para un flujo estacionario. A nivel de detalle, se puede detectar una pequeña oscilación de los valores que origina una tendencia pulsante de la viscosidad. Esto causa la presencia de ligeros periodos de endurecimiento y ablandamiento con el progreso de la deformación. Los valores de la viscosidad normalizada son menores que en el caso de estructuras tipo SPS, y confirman las tendencias previstas a mediante la solución instantánea. Para elevadas deformaciones ($g>2.0$) se puede observar una convergencia de valores para ambos casos (Figs. 3a y 4a).

La Fig. 4b muestra la variación del contraste de viscosidad entre ambas configuraciones siendo máximo al inicio y disminuyendo con el progreso de la cizalla simple. Con la elongación/rotación de las inclusiones más competentes se produce una inversión relativa de la competencia entre ambas configuraciones.

Discusión y conclusiones

Los resultados del presente estudio ponen en evidencia la complejidad del

comportamiento mecánico de un agregado formado por dos fases, tanto en su evolución con la deformación como en la dependencia de la disposición espacial de sus constituyentes. A pesar de la simplicidad de los modelos, tanto a nivel de geometría como a nivel del número y la reología de las fases (lineales y con propiedades constantes), la respuesta mecánica del medio es no lineal con procesos de endurecimiento y ablandamiento con la deformación (Fig. 3a y 4a). Para incrementar aún más la complejidad, un cambio en la disposición de los elementos respecto a los ejes principales de esfuerzo también origina una variación tanto de la elasticidad como de la viscosidad efectiva del medio (Fig. 2).

Puesto que las propiedades mecánicas son constantes en todos los modelos, estas variaciones solo pueden ser interpretadas a partir de procesos de endurecimiento/ablandamiento geométrico, como pueden ser cambios en la geometría de las inclusiones, el desarrollo de inestabilidades internas (ej., pliegues) y/o partición de la cinemática entre las fases. Por consiguiente, el comportamiento mecánico a nivel de las fases individuales no está reflejado en la respuesta global del medio. Estas observaciones reflejan la dependencia geométrica del tensor de compilación entre esfuerzo y velocidad de deformación, y puede ser una de las causas que originan la desviación entre los modelos teóricos y las observaciones experimentales.

A pesar de las limitaciones de los presentes modelos a la hora de aplicarlos a condiciones naturales, los resultados constatan la dificultad de determinar y prever el comportamiento mecánico de zonas de baja/alta deformación. Los resultados obtenidos ponen también de manifiesto la importancia de la estructura y la disposición de los componentes en las propiedades mecánicas del medio. La evolución de estructuras de SPS a WPS, esperables en zonas de cizalla en materiales cuarzo-feldespáticos, genera un cambio en la resistencia del material que favorece a los procesos de localización.

El comportamiento mecánico de materiales con transiciones de fases puede ser diferente si se tienen también en cuenta los efectos microestructurales. Seguramente permiten una transición mecánica

más rápida que la esperable solamente por equilibrio petrológico (Ji *et al.*, 2004). Finalmente, se pueden abordar procesos de atenuación de las señales sísmicas ligados a la difusión y la viscosidad del medio a partir de la influencia de la estructura y disposición de sus elementos (ej., fases líquidas y/o gas en la porosidad de la roca).

En conclusión, en el presente trabajo se ha estimado la respuesta reológica al flujo de un medio definido por dos fases a partir de modelos numéricos. Estos ponen de manifiesto un comportamiento no lineal del medio, con la posibilidad de estados de endurecimiento y ablandamiento con la deformación. Este comportamiento no se puede describir mediante la variación mecánica del medio y está relacionado con procesos de cambio de la geometría de las fases, de desarrollo de inestabilidades y/o de partición de la deformación.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado con los proyectos de investigación BTE2001-2616 (MCYT) y CGL2004-03657 (MEC).

Referencias

- Handy, M.R. (1994). *Journal of Structural Geology*, 16, 287–301.
- Itasca (1998). *FLAC: Fast Lagrangian Analysis of Continua, Version 3.40*. Itasca Consulting Group, Inc., Minneapolis.
- Ji, S.C. y Zhao, P.L. (1994). *Journal of Structural Geology*, 16, 253–262.
- Ji, S.C., Wang, Q., Xia, B. y Marcotte, D. (2004). *Journal of Structural Geology*, 26, 1377–1390.
- Jordan, P. (1987). *Tectonophysics*, 135, 185–197.
- Lebensohn, R.A., Dawson, P.R., Kern, H.M. y Wenk, H-R. (2003). *Tectonophysics*, 370, 287–311.
- Takeda, Y-T. y Griera, A. (2006). *Tectonophysics*, 427, 95–113.
- Treagus, S.H. (2002). *Journal of Structural Geology*, 24, 57–76.
- Turcotte, D.L. y Schubert, G. (1982). *Geodynamics: Applications of Continuum Physics to Geological Problems*. John Wiley & Sons, 450p.