

# Estudio combinado del maclado de la calcita y de la fracturación para la determinación de paleo-tensores de deformación y esfuerzo

*Paleostrain and Paleostress tensors inferred from calcite twin and fault analysis*

C. García-Cuevas (\*), J.M. González-Casado (\*\*), G. De Vicente (\*)

(\*) Dpto. de Geodinámica, Fac. CC. Geológicas, U. Complutense de Madrid, 28040 Madrid.

(\*\*) Dpto. de Q.A., Geología y Geoquímica, Fac. Ciencias, U. Autónoma de Madrid, 28049 Madrid.

## ABSTRACT

*The twinned-calcite strain-gauge technique allows determination of main axis strain magnitudes and orientations in limestones rocks mildly deformed (Groshong, 1972), during Alpine orogeny in the Iberian Chain. This study combines calcite twin analysis with fault analysis. The calculated paleostrain and paleostress tensor have similar characteristics and a good correlation have been established between these two procedures.*

**Key words:** Iberian Chain, paleostrain analysis, paleostress analysis, calcite twinning, fault analysis.

*Geogaceta*, 20 (4) (1996), 770-773

ISSN: 0213683X

## Introducción

La calcita es uno de los minerales más utilizados para la realización de estudios dinámicos en rocas moderadamente deformadas. Cuando los cristales de calcita aparecen afectados por un proceso de maclado mecánico, resulta posible determinar las características de la deformación responsable de dicho maclado. El maclado mecánico en la calcita es el resultado de un proceso de deformación por cizalla simple, durante el cual se produce un deslizamiento intracristalino entre capas iónicas, las cuales se desplazan una cantidad fija. La cuantía de este desplazamiento está controlada por la cristalografía. De este modo, a partir del desplazamiento máximo resulta posible calcular la deformación por cizalla responsable del maclado.

Existen varios métodos de análisis fundamentados en el estudio microscópico de cristales de calcita maclados. Aunque todos los métodos parten del concepto fundamental de que es posible interpretar un grano de calcita maclado como un modelo de deformación interna, unos permiten determinar estadísticamente las orientaciones de los ejes principales de esfuerzo (Friedman y Conger, 1964; Friedman y Stearns, 1971; Tourneret y Laurent, 1990; etc.) otros, en cambio, permiten caracterizar el tensor de deformación responsable del maclado (Spang, 1971; Groshong, 1972).

En este trabajo se pretende demostrar la validez del estudio del maclado mecánico de la calcita como técnica de análisis dinámico de la deformación alpina en la Cordillera Ibérica. Las maclas siempre se midieron en materiales de relleno y superficies de falla. De este modo, la edad de la deformación analizada puede considerarse, en sentido amplio, como Terciaria. Para ello se comparan los resultados obtenidos mediante la aplicación de esta técnica de análisis con los obtenidos a partir del análisis poblacional de fallas («método de inversión de esfuerzos», Reches, 1987) ampliamente utilizados en esta cadena (Muñoz *et al.*, 1994). Se han estudiado un total de 26 estaciones de análisis distribuidas en un área de unos 470 Km<sup>2</sup>, entre las localidades de Poveda de la Sierra y Huertapelayo en el Parque Natural del Alto Tajo (Guadalajara). El área de trabajo se encuadra dentro de la Rama Castellana de la Cordillera Ibérica y se caracteriza por presentar un marcado predominio de materiales mesozoicos (Jurásicos y Cretácicos) suavemente plegados (Fig. 1). La estructura tectónica de la zona está fuertemente condicionada por la presencia de dos importantes fallas en dirección: la Falla del Hoyón de dirección N-S y movimiento sinestroso y la Falla del Alto Tajo de dirección NO-SE y un movimiento dextroso. Asociadas a estas fallas aparecen diversas estructuras como «duplex» direccionales y pliegues forzados, así como también varios gru-

pos de rocas de falla, algunos de los cuales llegan a alcanzar potencias de varias decenas de metros. Las estaciones de análisis se eligieron en función de: (1) las condiciones de afloramiento, (2) las características reológicas de las rocas (bajo grado de recristalización y de deformación) y (3) la moderada deformación interna de las rocas.

## Metodología

El estudio de la deformación a partir del análisis del maclado mecánico de la calcita permite la determinación del tensor de deformación (orientación y magnitud de los ejes principales de deformación).

Para poder aplicar esta técnica de análisis, se requiere medir al menos 50 sistemas de maclas por muestra, procedentes de dos láminas delgadas, cortadas perpendicularmente entre sí. Las medidas se realizan por medio de una platina universal, determinándose la orientación del eje cristalográfico *c* y la orientación de los planos de macla para cada grano. Conociendo estos parámetros se pueden determinar, en una proyección estereográfica, las posiciones de los ejes de acortamiento y estiramiento que originan el esfuerzo máximo de cizalla ( $e_1$ ,  $e_2$  y  $e_3$ ) (Turner, 1953). Transformando los ejes de cada sistema de maclas a un sistema de referencia común, y calculando los autovalores y autovectores de las orientaciones obtenidas, se pueden determinar las po-

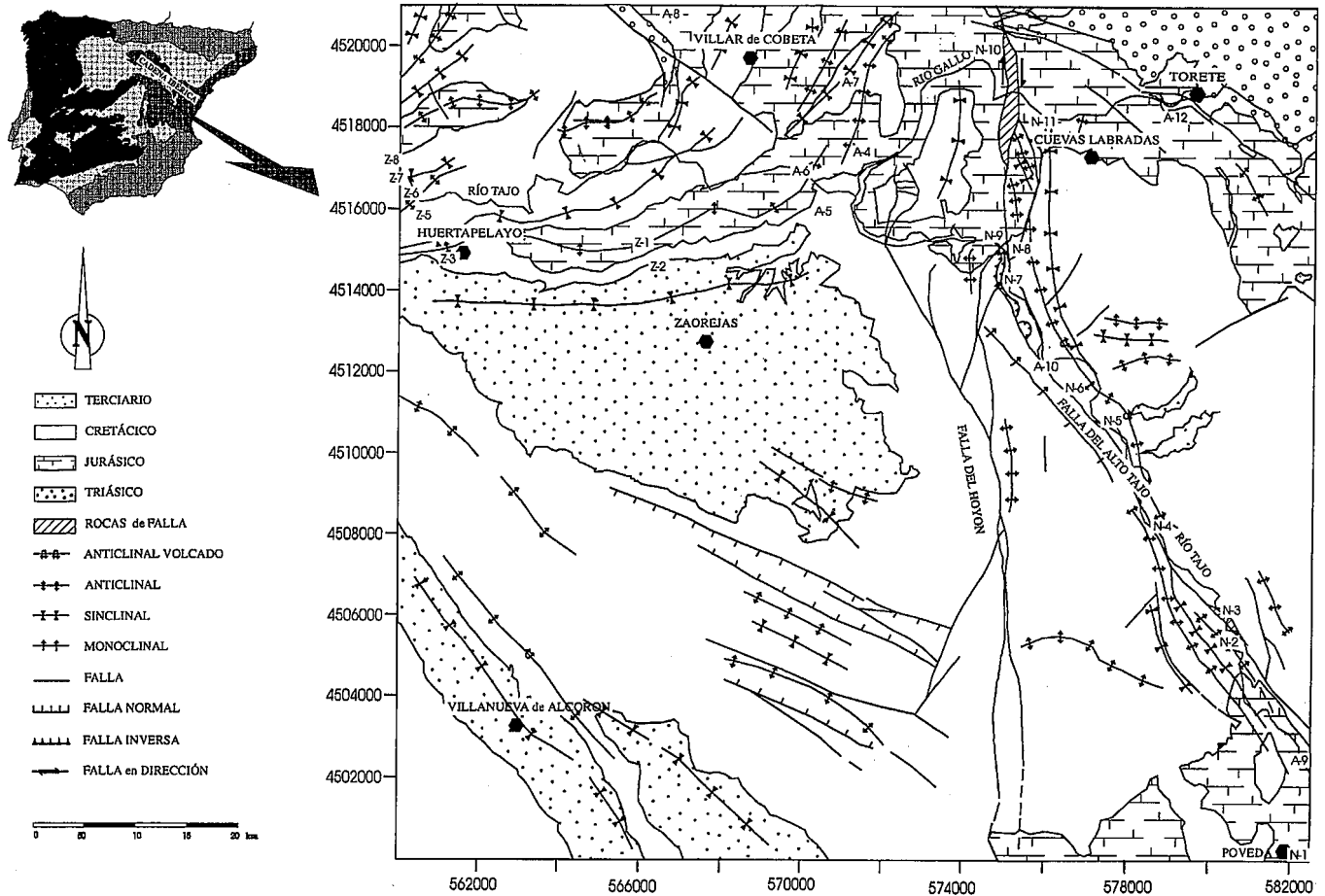


Fig. 1.- Situación geográfica y geológica de la zona del Alto Tajo. Las dos fallas principales de la zona corresponden a dos desgarres: la Falla del Alto Tajo (Rodríguez Pascua *et al.*, 1994) de carácter dextroso y la Falla del Hoyón, de carácter sinestroso.

Fig. 1.- Geographical and geological location of the Alto Tajo zone. Two main structures are two (strike-slip) fault. The Alto Tajo dextral fault and the Hoyón sinistral fault.

siones y magnitudes de los esfuerzos principales (Spang, 1971, Jamison y Spang, 1976). Si estos datos se complementan con la medida del número de maclas delgadas y gruesas, la determinación del espesor medio de las maclas delgadas, el espesor máximo y mínimo de las maclas gruesas, y el ancho del grano, resulta posible calcular la magnitud del tensor de deformación responsable del maclado (Groshong, 1972).

Por otro lado, los métodos de análisis poblacional de fallas permiten determinar la forma y orientación del elipsoide de esfuerzos. Entre los numerosos métodos disponibles hemos elegido el método de Inversión de Esfuerzos (Reches, 1987, Reches *et al.*, 1992), ya que este método tiene en cuenta los parámetros mecánicos de rotura, es decir, la fricción y la cohesión. Este método permite discriminar, para una misma población de fallas, varias etapas de fracturación y calcular el tensor esfuerzo asociado a cada una de ellas. La solución óptima se elige entre un conjunto de soluciones posibles obtenidas a partir de diferentes coeficientes de

fricción, teniendo en cuenta que el ángulo entre la estría real y la teórica sean mínimos. Además, el tensor solución debe satisfacer el criterio de rotura de Navier-Coulomb y el desplazamiento sobre el plano de falla debe ser paralelo a la dirección del esfuerzo máximo de cizalla sobre dicho plano. Por último, es necesario que la solución elegida presente un valor de cohesión positivo y un coeficiente de fricción realista ( $\mu$  próximo a 0.8, para presiones litostáticas entre 3 y 200 MPa (Byerlee, 1978)). La solución facilita la orientación de los ejes de esfuerzos principales ( $\sigma_1, \sigma_2$  y  $\sigma_3$ ) junto con la magnitud relativa de éstos (forma del tensor).

## Resultados

En el área de trabajo se establecieron un total de 26 estaciones de análisis de la fracturación y/o del maclado, localizadas en materiales de relleno y superficies de falla que afectan a las Formaciones Calizas y Dolomías de Cuevas Labradas, Alternancia de Margas y Calizas de Turmiel y Formación Carbonatada de Chelva (Jurásico) y Forma-

ciones Calizas y Dolomías del Pantano de la Tranquera y Formación Calizas de Hontoria del Pinar (Cretácico Superior). Sobre el total de las estaciones establecidas sólo fue posible realizar conjuntamente el análisis del maclado y el análisis de la fracturación en 14 ellas.

En el análisis del maclado de la calcita, a los resultados iniciales se les aplicó un proceso de optimización consistente en descartar el 20% de aquellos sistemas que presentaban las mayores desviaciones angulares con respecto a la media. Las distintas orientaciones de los ejes principales de deformación pueden diferenciar varios episodios tectónicos. Las elongaciones principales permiten calcular unas magnitudes para las extensiones principales, las cuales a su vez facilitan la estimación de los valores de los ejes principales del elipsoide de deformación y por tanto, la forma del elipsoide  $K = (a-1)/(b-1)$  que se ha representado en un diagrama de Flinn. Se puede observar como la mayoría de las estaciones tienden a ajustarse o están sobre la línea de deformación plana, línea donde  $k=1$  (Fig 2).

El análisis del maclado mecánico de la calcita y el análisis poblacional de fallas, permitieron diferenciar varios tensores de deformación y de esfuerzo respectivamente (Fig 3 a y b), bien de carácter compresivo, o bien con un marcado carácter extensional. Del análisis de los tensores compresivos parece deducirse un episodio con una dirección de acortamiento máximo horizontal NNO-SSE que queda reflejado, tanto en el maclado, como en el análisis de la fracturación. Esta etapa se ha considerado como el episodio tectónico más importante que ha afectado a la zona (Rodríguez Pascua *et al.*, 1994). Además fue posible diferenciar otros dos tipos de tensores de carácter compresivo: uno con una dirección E-O, determinado sólo a partir del análisis poblacional de fallas, y otro con una dirección NE-SO, determinado únicamente mediante el análisis del maclado. Este último tensor podría relacionarse con una etapa de deformación más antigua que afectó a la zona produciendo sólo microestructuras (Rodríguez Pascua *et al.*, 1994). En cuanto a los tensores extensionales, el análisis del maclado mecánico de la calcita diferencia dos: un episodio con una dirección de extensión máxima horizontal E-O y otro con una dirección NNO-SSE. En cambio, el análisis poblacional de fallas diferencia, además de estos dos tensores, otros dos: uno NE-SO y otro N-S.

En la figura 4 se proyectan las posiciones de los ejes principales de esfuerzo y de deformación obtenidos mediante el análisis poblacional de fallas y el análisis del maclado mecánico de la calcita respectivamente. Las distancias angulares entre las posiciones de los ejes principales de esfuerzo y de deformación se representan en unos histogramas. De este modo se observa como mayoritariamente las distancias angulares entre ambos tipos de ejes vienen representadas por el intervalo comprendido entre 13° y 26° (Fig 4). Esto nos permite considerar que existe una buena correlación entre ambas técnicas de análisis.

**Conclusiones**

Combinando los resultados obtenidos a partir del análisis poblacional de fallas y del análisis del maclado mecánico de la calcita se ha podido comprobar la utilidad del maclado mecánico de la calcita como técnica de análisis dinámico, observándose que en aquellas estaciones en las que se han aplicado conjuntamente ambas técnicas de análisis

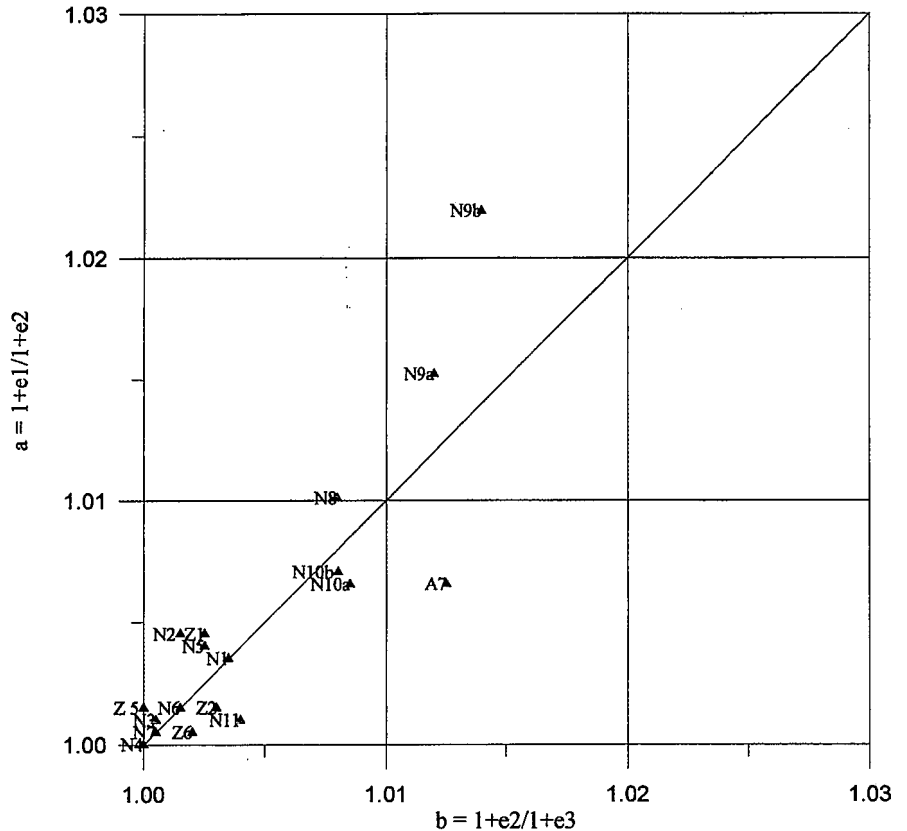


Fig. 2.- Diagrama de Flinn. Obsérvese como la mayoría de las estaciones tienden a situarse próximas o sobre la línea de deformación plana (K=1).

Fig. 2.- Flinn Diagram. Most of stations locate next to line K=1.

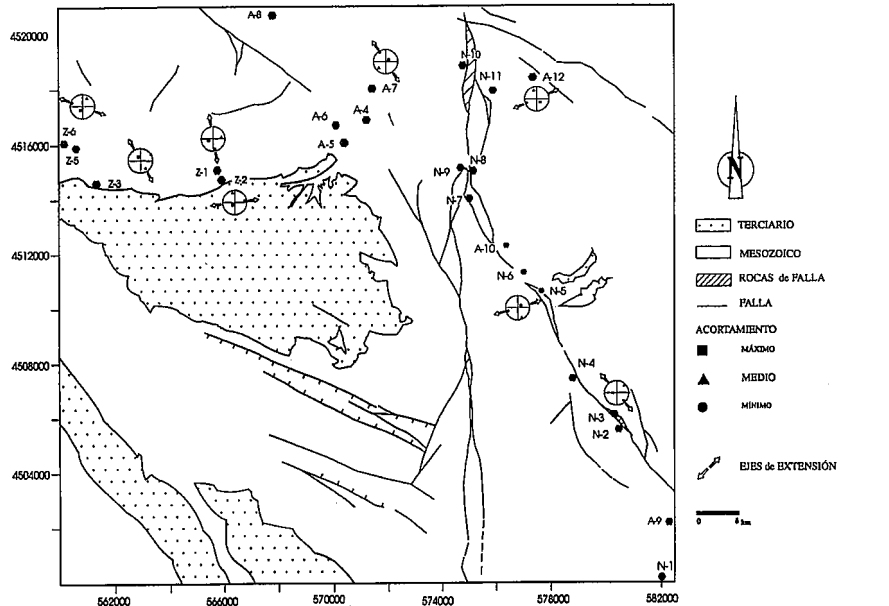


Fig. 3a.- Principales episodios de carácter extensivo diferenciados en la zona a partir del análisis del maclado de la calcita y del análisis de la fracturación.

Fig. 3a.- Extensive principal episodes differentiated by means of twin calcite analysis and fracturation analysis.

existe una equivalencia muy buena en cuanto a los resultados.

Además se ha comprobado la utilidad de la aplicación del maclado mecánico de la calcita como técnica de análisis que permite la diferenciación de tensores de deforma-

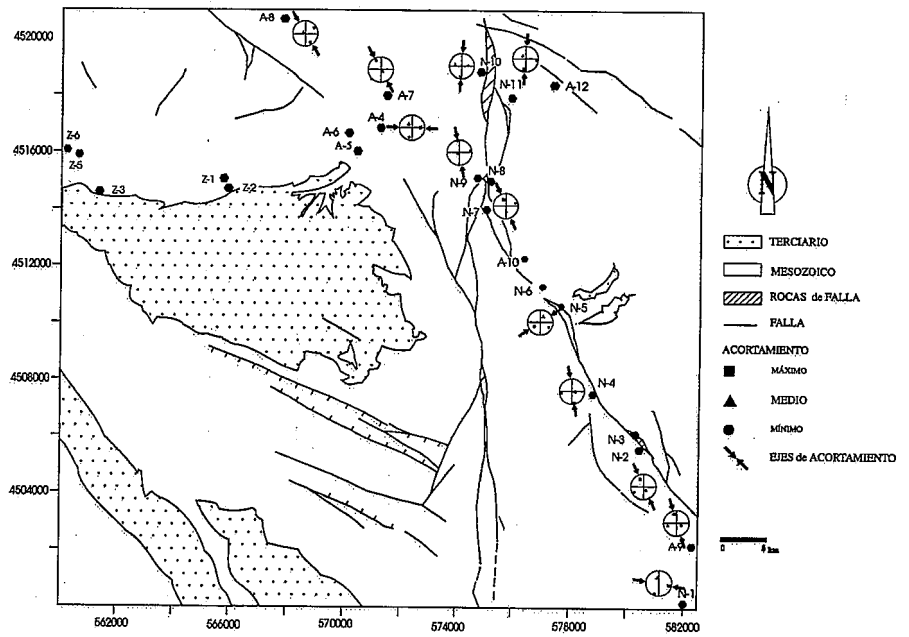
ción no determinados mediante el análisis poblacional de fallas, ya que con frecuencia, procesos de reactivación eliminan las evidencias (p. ej. estrías de fallas) de episodios de deformación que pudieron ser relativamente importantes.

**Agradecimientos**

Este trabajo ha sido financiado con el proyecto de investigación PB-94-0242 de la DGICYT y forma parte de la Tesis de Licenciatura de C. García Cuevas.

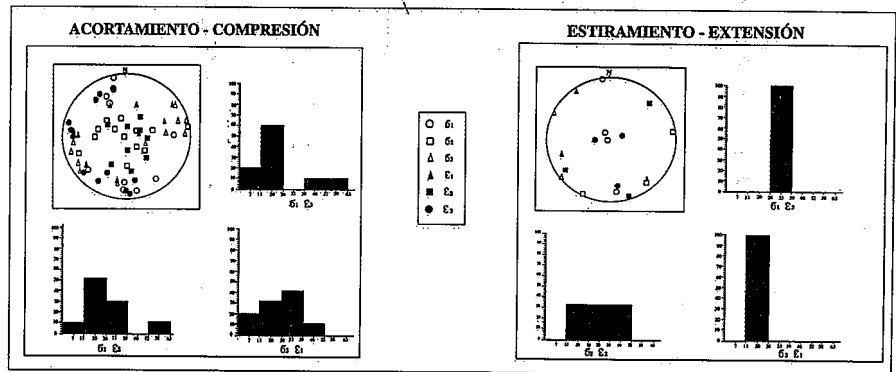
**Referencias**

Byerlee, J. (1978). *Pure and Appl. Geophysics*, 119: 5-626.  
 Friedman, M. y Conger, F.B. (1964). *Jour. Geology*, 72: 361-367.  
 Friedman, M. y Sterams, D.W. (1971). *Geol. Soc. America Bull.*, 82: 3151-3162.  
 Groshong, R.H. Jr. (1972). *Geol. Soc. America Bull.*, 83: 2025-2038.  
 Jamison, W.R. y Spang, J.H. (1976). *Geol. Soc. America Bull.*, 87: 868-872.  
 Muñoz, A., De Vicente, G., Gonzalez Casado, J.M. (1994). *Cuad. Lab. Xeol. de Laxe*, 19: 203-214.  
 Reches, Z. (1983). *Tectonophysics*, 95: 133-156.  
 Reches, Z. (1987). *Tectonics*, 7: 849-861.  
 Reches, Z., Baer, G. y Hatzor, Y. (1992). *Jour. of Geophysical Research*, 97, B9: 12.481-12.493.  
 Rodriguez Pascua, M.A., De Vicente, G. y Gonzalez Casado, J.M. (1994). *Cuad. Labor. Xeol. de Laxe*, 19: 163-174.  
 Spang, J.H. (1971). *Geol. Soc. America Bull.*, 83: 467-472.  
 Tourneret, C. y Laurent, P. (1990). *Tectonophysics*, 180: 287-302.  
 Turner, F. J. (1953). *America Journ. Sci.*, 251: 276-298.



**Fig. 3b.-** Principales episodios de carácter compresivo y diferenciados en la zona a partir del análisis del maclado de la calcita y del análisis de la fracturación.

*Fig. 3b.- Compressive principal episodes differentiated by means of twin calcite analysis and fracturation analysis.*



**Fig. 4.-** Proyección estereográfica (igual área, hemisferio inferior) de los ejes principales de esfuerzo y de deformación. Histogramas construidos a partir de las diferencias angulares estimadas entre los ejes principales de esfuerzo y de deformación.

*Fig. 4.- Stereographic projection (equal area, lower hemisphere) of stress and strain axes. Histograms elaborated from angular variations between stress and strain axes.*