

# Determinación de los tensores de deformación y esfuerzo en calizas mediante el estudio comparado de poblaciones de fallas y del maclado mecánico de la calcita

*Paleostrain and paleostress determinations in limestones from fault population analysis and mechanical twinning in calcite*

C. García Cuevas (\*), J.M. González Casado (\*\*), A. Muñoz Martín (\*) y 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 strain tensor in limestones has been calculated using the strain-gauge technique (Groshong, 1972). This method is based in the analysis of the mechanical twinning in calcite. In the same outcrops, these results have been compared with the data from the fracturation analysis. The calculated paleostrain and paleostress tensors have similar characteristics, and a good correlation could be established between these two procedures. The twin density has also been used for estimating the paleostress levels.*

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

*Geogaceta*, 18 (1995), 3-6  
ISSN: 0213683X

## Introducción y objetivos

En los últimos años se han desarrollado numerosos procedimientos para el estudio de poblaciones de fallas basados en la relación de Wallace-Bott (Wallace, 1951; Bott, 1959). Si en un conjunto de fallas es posible determinar la orientación del plano falla, la estría de deslizamiento, y el sentido de movimiento, los métodos de análisis poblacional de la fracturación permiten determinar el tensor de esfuerzos desviatorio bajo el cual las fallas fueron activas. En este sentido se han propuesto varios procedimientos, algunos de los cuales permiten no sólo determinar la orientación y la magnitud relativa de los esfuerzos principales existentes durante el episodio de fracturación, sino además, establecer los parámetros mecánicos de las fallas (cohesión -relativa- y coeficiente de fricción). Con estos datos se puede calcular un diagrama de Mohr adimensional, para el episodio de fracturación estudiado.

Uno de los problemas principales y relativamente poco abordados en este tipo de estudios es la determinación de la magnitud absoluta de los esfuerzos principales. Como generalmente uno de los ejes principales de esfuerzos suele disponerse vertical durante el episodio

de fracturación, el procedimiento más generalizado para establecer la magnitud de los esfuerzos principales, consiste en escalar el diagrama de Mohr mediante el cálculo de la presión litostática reinante durante el evento tectónico considerado. Este valor será equivalente a uno de los ejes principales de esfuerzo (Angelier, 1989). No obstante, también es posible utilizar otros procedimientos para escalar este diagrama, por ejemplo, a partir del cálculo de presión de fluidos (Caballero *et al.*, 1995), o del cálculo de los parámetros mecánicos de la fracturación (Berguerat *et al.*, 1985, Gil Peña y Simón Gómez, 1992).

Por otro lado, en las rocas carbonáticas que han sufrido una deformación moderada, existen varias técnicas basadas en el estudio del maclado mecánico de la calcita, que permiten determinar estadísticamente las orientaciones de los ejes de esfuerzos compresional y tensional que producen el mayor esfuerzo de cizalla positivo a lo largo de los planos de deslizamiento intra-cristalinos (Turner, 1953). También, existen otros métodos que, basados en los mismos principios, permiten determinar las características del tensor de deformación asociado con el maclado de los granos de calcita (p. ej. la "strain-gauge technique" de Groshong, 1972).

Además, la determinación de la densidad o intensidad del maclado (número de maclas por milímetro) puede utilizarse como un indicador de la intensidad de la deformación (Turner y Ch'ih, 1951). Recientemente, la densidad de maclas por milímetro se ha utilizado también como un criterio paleopiezométrico. En este sentido Rowe y Rutter (1990) establecen una relación entre el esfuerzo diferencial y la densidad de maclas.

En este trabajo comparamos, para una misma estación y un mismo evento tectónico, los tensores de esfuerzo obtenidos mediante los métodos de análisis poblacional de la fracturación, con los resultados del análisis del maclado mecánico de la calcita (tensor de deformación y análisis dinámico), lo que nos ha permitido valorar la calidad de los resultados. Además, se han utilizado los valores paleopiezométricos deducidos de la densidad del maclado para determinar la magnitud de los esfuerzos principales, escalando los diagramas de Mohr obtenidos mediante el análisis de la fracturación. Finalmente, se ha comparado el resultado obtenido con el realizado a partir de las presiones litostáticas. Para ello, se muestran los resultados de una estación de medida tipo, elegida entre el conjunto de las estacio-

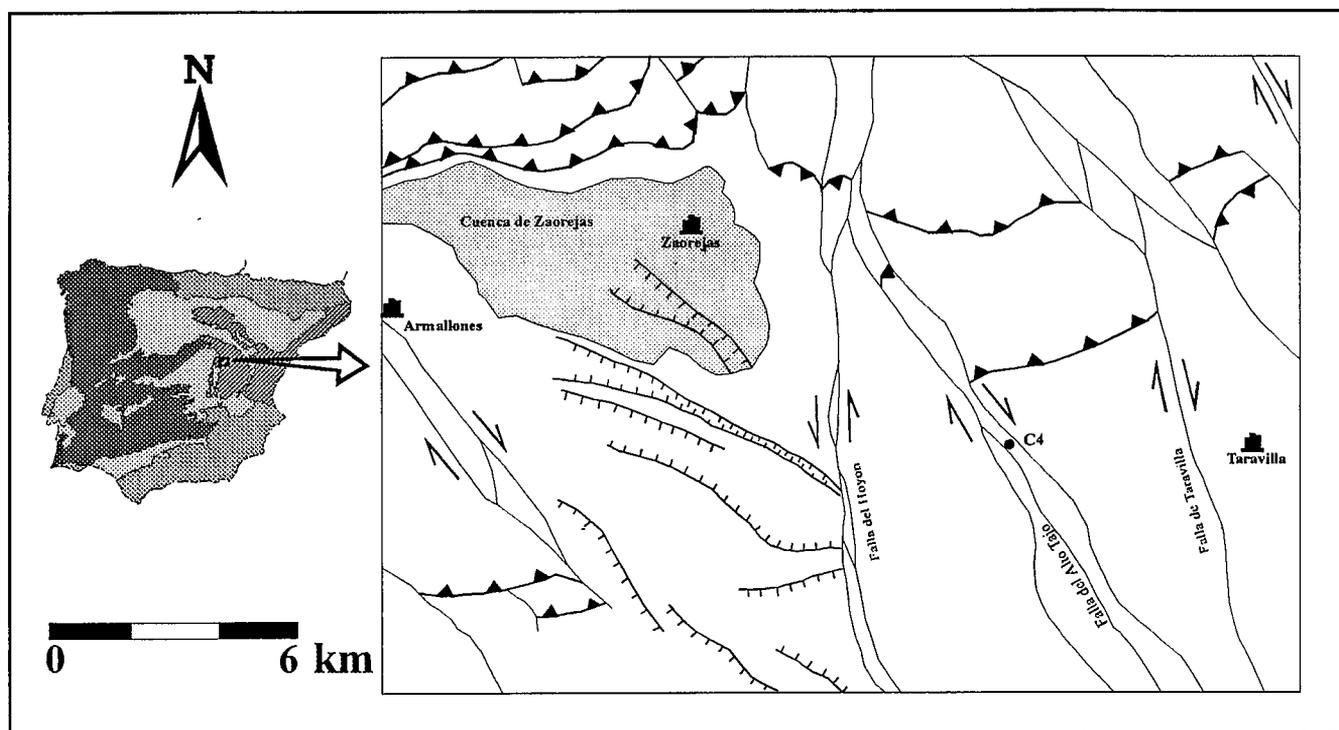


Fig.1.- Esquema geológico de la región de Zaorejas y situación de la estación de análisis C4. (Modificado de Rodríguez Pascua, 1993)

Fig.1.- Geological sketch of the Zaorejas region and C4 analysis site location. (Modified from Rodríguez Pascua, 1993)

nes de medida analizadas. Estas estaciones se encuentran situadas en los alrededores de la falla del alto Tajo en el entorno de la localidad de Zaorejas (Fig. 1). Según Rodríguez Pascua *et al.*, (1994), esta estructura es una falla direccional NNO-SSE que afecta a las series sedimentarias mesozoicas (Jurásicas y Cretácicas) de la región, generando numerosas estructuras secundarias, como pliegues, duplex direccionales, etc.. Esta falla tiene un movimiento dextral y un carácter transpresivo, estando su recorrido jalonado por numerosas rocas de falla que pueden alcanzar varios metros de espesor. Del análisis microestructural, basado en el estudio de la fracturación, estilolitos y venas de tensión, se puede concluir que los principales movimientos de la falla del Alto Tajo se producen bajo un campo de esfuerzos con una orientación de  $\sigma_1$  sub-horizontal según los N150E (deformación Guadarrama, Capote *et al.*, 1990).

#### Metodología

Como ya hemos indicado, para determinar el tensor de esfuerzo que origina el desplazamiento de un conjunto de fallas, se han propuesto numerosos procedimientos. En este trabajo se ha utilizado el método numérico de inver-

sión de esfuerzos de Reches (Reches, 1987 y Reches *et al.*, 1992). Este método permite discriminar dentro de una población de fallas, varias etapas de fracturación y calcular el tensor de esfuerzos desviatorio asociado a cada una. Para el análisis se parte de dos premisas: el tensor solución debe satisfacer el criterio de rotura de Mohr-Coulomb y el desplazamiento sobre el plano de falla es paralelo a la dirección del esfuerzo máximo de cizalla sobre dicho plano. Este método, proporciona la orientación de los ejes de esfuerzos ( $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  y  $\sigma_3$ ) y el valor medio de R ( $R=(\sigma_2-\sigma_3)/(\sigma_1-\sigma_3)$ ), junto con la cohesión y fricción existentes durante el deslizamiento. El programa proporciona una solución para cada coeficiente de fricción. Se elige la solución óptima a partir de dos criterios de selección: PMA (ángulo de dispersión de los ejes principales, entre el tensor ideal de cada falla y el calculado para el conjunto de la población) y SLIP (ángulo medio de deslizamiento entre la estría real y teórica). La solución seleccionada debe presentar, además una cohesión positiva y un coeficiente de fricción realista. El valor del coeficiente de fricción debe estar próximo a los que enuncia la Ley de Byerlee (1978) la cual, a partir de datos experimentales, demuestra que para fracturas en condiciones de presión

litostática entre 3 y 200 MPa,  $\tau \approx 0.8 \cdot \sigma_n$ . A menores presiones confinantes, puede haber una amplia dispersión en el valor de  $\mu$ .

En segundo lugar, se ha utilizado la técnica de análisis dinámico del maclado mecánico de la calcita desarrollada por Turner (1953). Este método parte de la medida, en una platina universal, de la orientación de los planos de macla y de los ejes ópticos de los cristales de calcita. Con estos datos se puede calcular para cada grano de calcita maclado la orientación, en proyección estereográfica, de los ejes de esfuerzo de compresión y tensión que originan el máximo esfuerzo de cizalla en el plano de macla. Las agrupaciones de estos ejes reflejan en cierta medida las posiciones de los ejes de esfuerzo principales. Transformando los ejes de cada sistema de maclas, a un sistema de referencia común, y calculando sus autovectores y autovalores (Spang 1971, Jamison y Spang 1976) se pueden determinar las posiciones y magnitudes de los esfuerzos principales. Por otra parte, se ha calculado el tensor de deformación, usando el método de Groshong (1972). En este caso se han determinado, además de la orientación de los ejes ópticos y de los planos de macla, el tipo de plano de macla, el número de maclas para

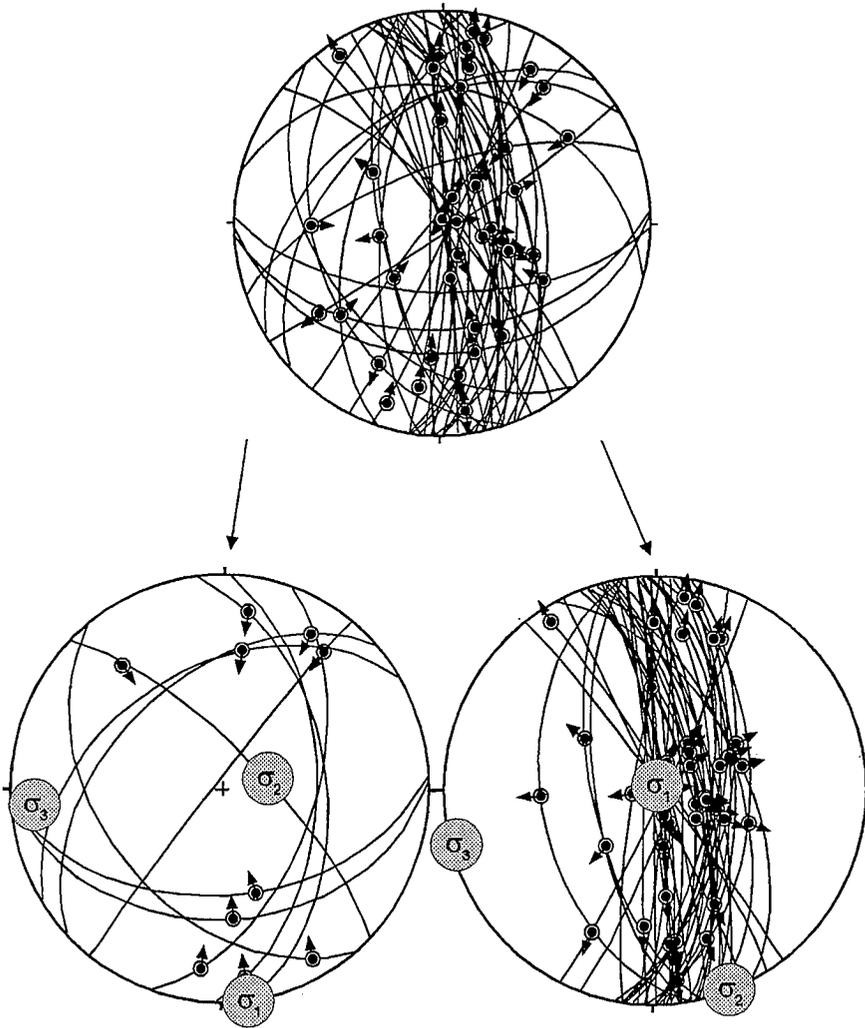


Fig. 2.- Proyección estereográfica (Red de Wulff, hemisferio inferior) de las fallas de la estación C4 y resultados del análisis de la fracturación para las dos subpoblaciones seleccionadas.

Fig. 2.- Sterographic projection (equal area, lower hemisphere) for fault systems in C4 site. Results of fracturation analysis of two selected samples.

T A B L A 1

	$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\sigma_3$	R	$\mu$	Nº fallas
conjunto direccional inverso	2/172	76/072	4/261	0.10	0.7	12 (12)
conjunto direccional normal	85/056	01/168	04/258	0.32	1.2	33 (44)

Tabla 1. Estados de esfuerzo deducidos del análisis de la fracturación (Método de Inversión de Esfuerzos, Reches et al., 1992).

Table 1. Stress state deduced from fracturation analysis (Inversion Stress Method, Reches et al., 1992).

T A B L A 2

	dirección	extensión
e1	04/250	0.001%
e2	76/140	0%
e3	12/341	- 0.001%

Tabla 2. Resultados del análisis del maclado a partir del método de Groshong (1972). K = 1.3. Nº de sistemas considerados 38/40.

Table 2. Results of twinning analysis according to "straing-gauge technique", Groshong, 1972. K = 1.3. Twin number considered 38/40.

cada sistema, la anchura de la macla y el tamaño del grano. Con estos datos, es posible determinar la orientación de los ejes principales del elipsoide de deformación, y su magnitud (sólo se puede determinar la parte desviatoria del elipsoide de deformación).

Por último, para el cálculo del esfuerzo diferencial a partir de la densidad de maclado (D) se ha utilizado la relación propuesta por Rowe y Rutter (1990):  $\sigma = -52.0 + 171.1 \times \log D$  MPa (error standard de  $\pm 43$  MPa).

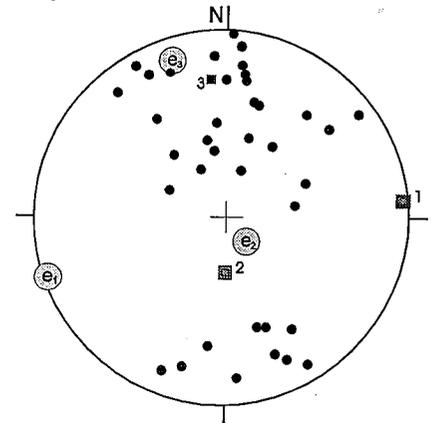


Fig. 3.- Proyección estereográfica de las deformaciones principales (e1, e2, e3) resultado del análisis del maclado según el método de Groshong (1972). Los círculos corresponden a la posición de los ejes de compresión. Los cuadrados son los resultados del análisis dinámico de Spang (1972).

Fig. 3.- Stereographic projection of principal strains (e1, e2, e3) resulted from twinning analysis according to "strain-gauge technique", Groshong, 1972. Rings: compression axes position. Squares: results from dynamic analysis of Spang (1972).

### Resultados

En la estación tipo elegida para este estudio se midieron 56 fallas (Fig. 2). De éstas un 22% tienen un carácter direccional inverso y el 78% restante, tienen carácter normal o direccional normal (21% D.N., 43% N.D., 14% N., 11% D.I. y 11% I.D.). Los criterios de campo (fallas superpuestas en el mismo plano y relaciones de corte) muestran inequívocamente que las del primer grupo son las mas antiguas.

Los tensores de esfuerzo determinados para cada uno de estos dos conjuntos de fallas mediante el método de Reches se resumen en la tabla 1.

El conjunto inverso tiene unas características acordes con las de la etapa de deformación principal establecida para esta zona, mientras que el conjunto normal indica una etapa posterior de extensión E-W, visible en varios puntos de esta región.

El análisis del maclado mecánico mediante el método de Groshong se ha realizado a partir de la medida de 50 sistemas de maclas, procedentes de dos láminas delgadas, cortadas perpendicularmente entre sí. De este conjunto se han eliminado los sistemas que excedían más de un 20% en el ajuste por mínimos cuadrados, que se realiza en este método. Los resultados (Fig. 3) se sintetizan en la tabla 2.

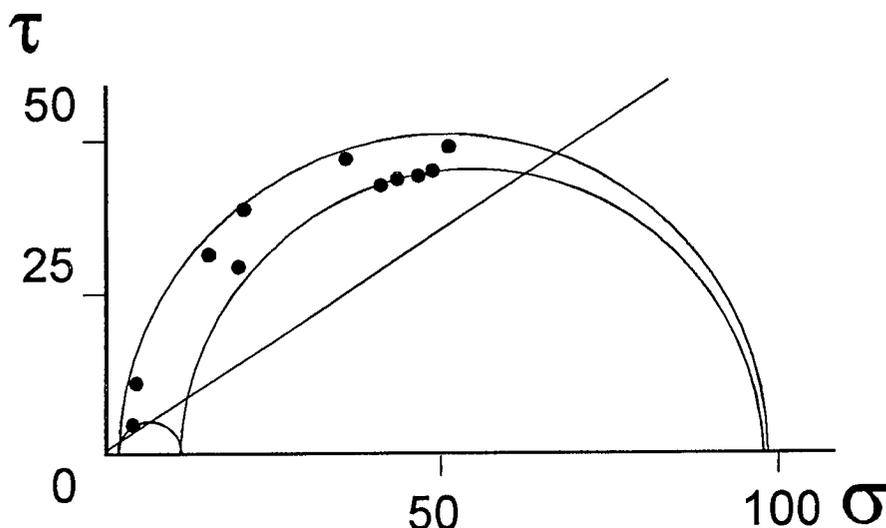


Fig. 4.- Diagrama de Mohr para el primer episodio de fracturación de la fig. 2.

Fig. 4.- Mohr diagram for first fracturing episode of fig. 2.

Estos valores, al igual que los resultados procedentes del análisis dinámico numérico de Spang (Fig. 3), evidencian claramente que el tensor de deformación calculado se corresponde con la primera etapa de fracturación, dada su simetría con el tensor de deformación determinado para esta etapa. Por tanto, se puede interpretar que mayoría de los sistemas de macla existentes y probablemente, la mayor parte de la deformación interna que tienen estas rocas, se originan durante la primera etapa de fracturación.

La densidad de maclas por milímetro (10,43 mac/mm), permiten determinar un valor para el esfuerzo diferencial de  $122,8 \pm 43$  MPa. Con este valor se ha escalado el diagrama de Mohr (Fig. 4), obteniéndose unos resultados de  $\sigma_1 = 153,5$  MPa,  $\sigma_2 = 43$  MPa,  $\sigma_3 = 30,7$  MPa. Como  $\sigma_2$  se encuentra en la vertical, para una corteza con densidad media de  $2,55 \text{ Mgr/m}^3$  este valor corresponde a una profundidad entorno a los 200 m. El espesor de sedimentos mesozoicos existentes en la actualidad por encima del punto de medida se sitúa alrededor de los 200–230 m, espesor que

coincide con la altura sobre el punto de medida al que se sitúan las cotas topográficas medias de la región. Como las cuencas cenozoicas de esta región, por ejemplo la de Zaorejas, (Fig. 1) tienen sus límites bastante alejados del punto de medida podemos considerar que este fue el espesor de sedimentos existente durante el episodio de fracturación, lo que implicaría unos valores de  $\sigma_2 = P \approx 50$  MPa. Este valor es ligeramente mayor que el deducido a partir de la densidad de maclas.

#### Discusión y conclusiones

En el caso estudiado, el análisis conjunto de la fracturación y el maclado mecánico de la calcita, permite determinar los tensores de esfuerzo y deformación para una etapa de deformación. El estudio del maclado en combinación con el estudio de la fracturación, puede también indicar, de algún modo, el orden en las etapas de fracturación.

Por último, el uso de la densidad de maclas como paleopiezómetro, puede dar resultados útiles, para aproximar las

magnitudes de los esfuerzos principales.

#### Agradecimientos

Este trabajo forma parte de la tesis de licenciatura de C. García Cuevas, y ha sido financiado con el proyecto de investigación PB-91/0397 de la D.G.I.C.Y.T.

#### Referencias

- Angelier, J. (1989) *Jour. Struct. Geol.*, 11: 37–50.
- Berguerat, F.; Berges, J. Geysant, J. (1985) *Geol. Rundschau.*, 74: 311–320.
- Bott, M.H.P. (1959). *Geol. Mag.*, 96: 109–117.
- Byerlee, J. (1978). *Pure Appl. Geophys.*, 116: 615–626.
- Caballero, J. M.; González Casado, J. M.; Casquet, C.; Galindo, C.; Tornos, F. (in press) *Cuad. Geol. Iber.*
- Capote, R., De Vicente, G., González Casado, J. M. (1990) *Geogaceta*, 7: 20–22.
- Gil Peña, I. y Simón Gómez, S. (1992). *Geogaceta*, 11: 31–34.
- Groshong, R. H., Jr. (1972). *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 83: 2025–2038.
- Jamison, W. R. y Spang, J. H. (1976). *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 87: 868–872.
- Rowe, K. J. y Rutter, E. H. (1990). *Jour. Struct. Geol.*, 12:1–17.
- Reches, Z. (1987) *Tectonics*, 6: 849–861.
- Reches, Z.; Baer, G. y Hatzor, Y. (1992) *Jour. Geophys. Res.*, 97 (B9): 12481–12493.
- Rodríguez Pascua, M., De Vicente, G., González Casado, J. M. (1994): *Cuad. Lab. Xeol. Laxe*, 19, 163–174pp.
- Spang, J. H. (1972). *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 83: 467–472.
- Turner, F. J. (1953). *Amer. Jour. Sci.*, 251: 276–298.
- Turner, F. J. y Ch'ih, C.S. (1951). *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 62: 883–934.
- Wallace, R.E. 1951. *Jour. Geol. Chicago*, 59: 118–130pp.