

# Análisis microestructural de dos afloramientos en las calizas cretácicas del macizo de Garraf (prov. de Barcelona, España)

por P. F. SANTANACH PRAT

## RESUMEN

La aplicación del modelo de la "deformación discontinua" propuesto por F. ARTHAUD y M. MATTAUER al análisis de la tectónica frágil de dos canteras del macizo de Garraf (prov. de Barcelona, España), permite diferenciar las microestructuras pertenecientes a dos deformaciones distintas ("compresión" y "distensión") y caracterizar las direcciones principales de deformación para cada una de ellas.

## SUMMARY

The employment of the "discontinuous deformation" model suggested by F. ARTHAUD and M. MATTAUER for the analysis of the frail tectonic of two quarries of the Garraf Massif (prov. of Barcelona, Spain), makes it possible to differentiate the microstructures belonging to two different deformations ("compression and distension") and to establish the principal directions of deformation for each of them.

## INTRODUCCIÓN

La presente nota es el resultado del análisis microestructural de dos afloramientos en el macizo cretácico de Garraf: La cantera abandonada junto al Puerto del pueblo de Garraf y la cantera, también abandonada, situada cerca del coll de l'Ordal, al N de la C.N. II (fig. 1).

La tectónica del macizo de Garraf se caracteriza por la abundancia de fracturas de todas dimensiones (N. LLOPIS LLADÓ, 1947), mientras que los pliegues son muy suaves y tienen poca importancia en su estructura. En cualquier sector de las masas calizas cretácicas son perceptibles las abundantes microfallas y las grietas de tensión rellenadas por calcita. En menor cantidad se presentan las superficies estilolíticas.

Para analizar estas estructuras se ha supuesto que la fracturación de la roca era tal que podía considerarse deformada globalmente y por consiguiente que podían definirse en ella tres direcciones principales de formación ortogonales entre sí: Z, dirección principal de acortamiento; X, dirección principal de alargamiento e Y, dirección principal intermedia.

Las relaciones entre las diversas microestructuras, así como su orientación respecto X, Y y Z son conocidas en el caso en que la roca haya sufrido únicamente una sola deformación frágil: Así, las estilolitas son paralelas a Z y las grietas de tensión y diaclasas perpendiculares a X (G. H. WAGNER, 1958). Recientemente F. ARTHAUD (1969) ha presentado un método mediante el cual pueden deducirse los ejes X, Y y Z a partir del estudio de las microfallas. Este método ha sido empleado en el Languedoc (Francia) y las direcciones X y Z así obtenidas coinciden prácticamente con las que resultan del estudio estadístico de las estilolitas y grietas de tensión. F. ARTHAUD y M. MATTAUER (1969) han reunido todas estas observaciones y han propuesto un modelo

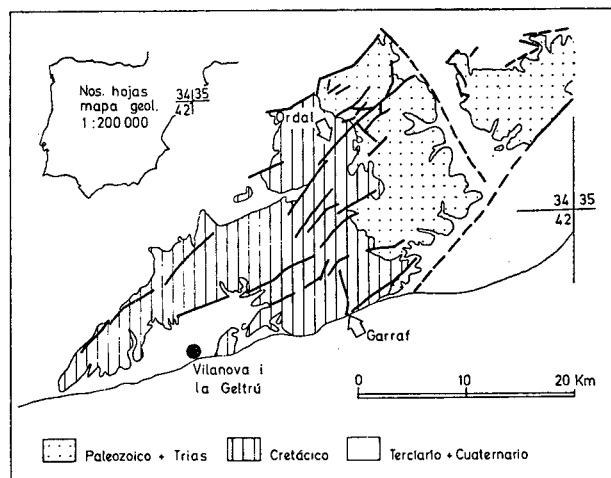


Fig. 1. — Situación de los dos afloramientos analizados.

para la "deformación discontinua" en el que cada estructura ocupa un lugar determinado en el espacio en relación con X, Y y Z.

Con el objeto de explorar el grado de complejidad de la tectónica frágil del macizo de Garraf se ha aplicado este modelo de deformación al análisis de

la estructura de las calizas de las dos canteras citadas. El hecho de que, como se verá, no se tratara de una deformación sencilla que se adapte fácilmente al modelo en cuestión y de que de estas observaciones hayan podido sacarse conclusiones que creemos de posible utilidad para ulteriores estudios estructurales en este macizo nos ha impelido a publicar los resultados de este pequeño análisis.

## DATOS

En la cantera de Garraf se han medido:

225 superficies estriadas, en el 66 % de las cuales ha podido determinarse con seguridad el sentido del desplazamiento relativo de los bloques separados por las fallas. 43,5 % corresponden a fallas normales y 56,5 % a fallas inversas y desgarres, de las cuales 71 % son desgarres y 29 % fallas inversas.

20 superficies con estilolitas, de las cuales 14 son horizontales (estilolitas verticales) y coinciden con la estratificación. Puesto que no se ha observado en ningún caso que estas estilolitas estuvieran relacionadas con la tectónica, no nos ocuparemos más de ellas. El resto (6), subverticales (estilolitas subhorizontales), alcanzan muy poco desarrollo (picos entre 1 y 2 mm de longitud) y su origen es claramente tectónico (pasan a superficies estriadas en desgarre).

100 grietas de tensión y diaclasas.

En la cantera del coll de l'Ordal:

187 microfallas, en el 96 % de las cuales ha podido determinarse con seguridad el sentido del desplazamiento relativo de los bloques separados por las dislocaciones. 45 % corresponden a fallas normales y 55 % a desgarres y fallas inversas, de las cuales 70 % son desgarres y 30 % fallas inversas.

60 superficies estilolíticas, de las cuales 24 tienen los picos subhorizontales y son de origen netamente tectónico.

100 grietas de tensión y diaclasas.

Además se ha observado la existencia frecuente de superficies que contienen más de un sistema de estrías. A veces todas las estrías son compatibles con una sola dirección de acortamiento, subhorizontal o vertical. Otras veces una misma superficie (o superficies de igual orientación) presentan estrías subhorizontales que indican un juego en desgarre y otras con fuerte ángulo de "pitch" que indican movimientos en falla normal. En este último caso, en algunas superficies, ha sido posible establecer que las estrías correspondientes a la falla normal son posteriores a las pertenecientes al desgarre. (La calcita de recristalización relacionada con la falla normal se ordena en las acanaladuras horizontales correspondientes al desgarre.)

## ANÁLISIS (fig. 2)

En el caso de una deformación discontinua única, teóricamente, los polos de los planos M (véase F. ARTHAUD, 1969) de las microfallas deberían agruparse, en proyección estereográfica, en guirnaldas siguiendo círculos mayores. En los diagramas 1 y 4, en los que se han representado los polos de los planos M de las fallas de las canteras de Garraf y del coll de l'Ordal respectivamente puede observarse que

éstos no presentan ninguna ordenación. Las estilolitas deberían agruparse en un máximo alrededor de Z. Se han representado en los diagramas 2 y 5 y más adelante volveremos sobre ellas. Las grietas de tensión cuyos polos se han representado en los diagramas 3 y 6 se ordenan en dos máximos netos en el coll de l'Ordal y en uno importante y otro de muy secundario en Garraf. Así pues, las grietas de tensión tampoco se disponen en un máximo (alrededor de X) como era de preveer para el caso de una deformación discontinua única.

El movimiento en falla normal de superficies que previamente habían actuado como desgarres hace suponer la existencia de al menos dos deformaciones distintas con los ejes de acortamiento, Z, aproximadamente perpendiculares entre sí: Primero una deformación con Z subhorizontal (deformación  $D_1$ , cuyos ejes principales denominaremos  $X_1$ ,  $Y_1$ ,  $Z_1$ ) que correspondería a la "compresión" y luego otra con Z subvertical (deformación  $D_2$ , de ejes principales  $X_2$ ,  $Y_2$ ,  $Z_2$ ) que correspondería a la "distensión".

Para analizar debidamente estos dos campos de deformación ( $D_1$  y  $D_2$ ) habrá de separar dentro de lo posible las estructuras correspondientes a cada deformación. Para ello, puesto que, como veremos, las deformaciones con ejes de acortamiento Z subhorizontal y subvertical presentan esencialmente fallas de distinto tipo, se analizarán previamente los polos de los planos M de las microfallas de  $D_1$  y  $D_2$  por separado y luego comparando las distintas direcciones de X, Y y Z así obtenidas con los diagramas construidos con las estilolitas y las grietas de tensión se intentará averiguar que parte de estas estructuras pertenece a cada deformación.

En una deformación con Z subvertical todas las superficies en las que el deslizamiento es posible actúan como fallas normales, mientras que en el caso en que Z es subhorizontal se obtienen principalmente desgarres y fallas inversas, aunque, de todas maneras, puedan aparecer algunas fallas normales en aquellas superficies de discontinuidad que contengan Z y cuyo buzamiento sea el adecuado para que se produzca el deslizamiento. (Véase F. ARTHAUD y M. MATTAUER, 1969, p. 742, fig. 4.)

Así pues, si por una parte estudiamos todas las fallas normales y por otro los desgarres y fallas inversas, obtendremos aproximadamente la separación deseada por lo que a las fallas se refiere. De todas maneras, en esta separación sale beneficiada la  $D_2$ , puesto que en el caso de que esta deformación no fuera tan sencilla y apareciesen fallas de segundo orden (H. E. MC. KINSTRK, 1953), éstas, para fallas normales de primer orden fuertemente buzantes, pueden ser inversas. Al eliminar todas las fallas inversas de  $D_2$ , eliminamos también en gran parte las eventuales fallas de segundo orden que pudieran aparecer, que, por otra parte, al ser estudiadas juntamente

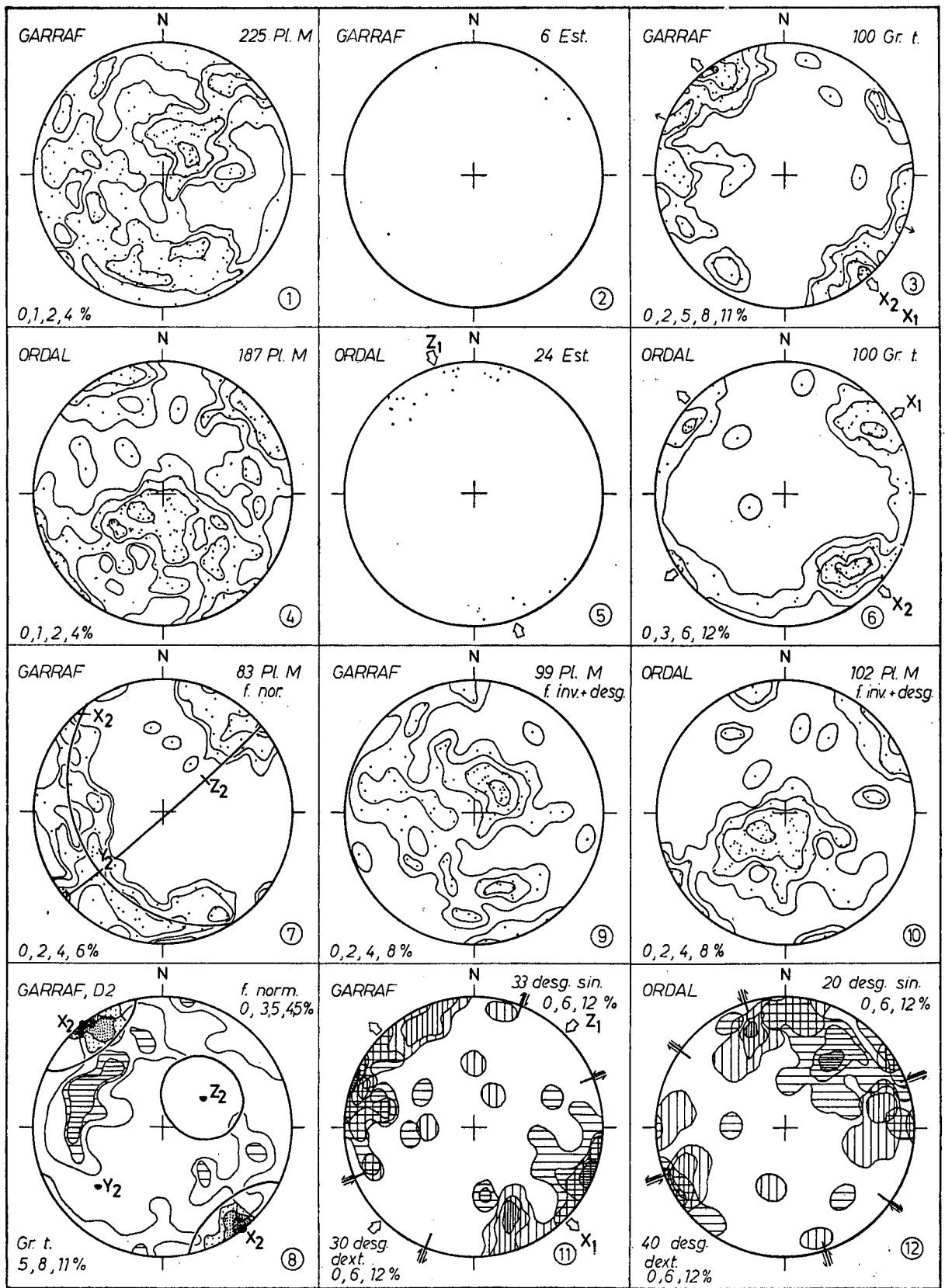


FIG. 2. — Representación estereográfica de las estructuras y elementos geométricos analizados (hemisferio inferior).

con las estructuras de  $D_1$  introducen un factor que perturba los resultados que puedan obtenerse con el estudio de las microfallas pertenecientes a  $D_1$ . Además hay que considerar que todas las posibles fallas normales que habrían actuado como tales durante  $D_1$  y que estudiaremos con las correspondientes a  $D_2$ , muy probablemente también habrán actuado de manera análoga durante  $D_2$ . Por lo tanto la distribución de los polos de los planos M de  $D_2$  no se verá muy afectada por esta introducción, mientras que su ausencia será un factor más a emborronar la distribución de los correspondientes a  $D_1$ .

Puesto que hay más posibilidades de obtener las direcciones de los ejes X, Y y Z correspondientes a  $D_2$  con mayor precisión que los de  $D_1$ , empezaremos por analizar las estructuras pertenecientes a la segunda deformación.

### Deformación 2

Analicemos pues los resultados obtenidos con el estudio de los planos M de todas las fallas normales.

Tanto en Garraf como en el coll de l'Ordal los polos de los planos M de las fallas normales se distribuyen según una guirnalda que puede asociar a un círculo máximo y además en ambos casos se insinúa una segunda guirnalda ortogonal a la primera. En el diagrama 7 puede verse el caso de la cantera de Garraf. Los resultados son para Garraf:  $Z_2(58,049)$ ,  $X_2(04,319)$ ,  $Y_2(33,228)$  y para el coll de l'Ordal:  $Z_2(80,049)$ ,  $X_2(01,134)$ ,  $Y_2(10,044)$ . Puede observarse, pues, una dirección principal de alargamiento,  $X_2$ , prácticamente coincidente para ambas canteras.

Si comparamos estos resultados con los diagramas obtenidos mediante la representación de los polos de las grietas de tensión (3 y 6) se observa que las direcciones de  $X_2$  obtenidas mediante el estudio de las microfallas coincide prácticamente con el máximo principal de los polos de las grietas de tensión de Garraf y con uno de los dos máximos obtenidos con los de las del coll de l'Ordal. Por ello consideramos que las grietas de tensión de estos dos máximos corresponden también a  $D_2$ . Así, mediante el estudio de las grietas de tensión se ha obtenido para Garraf:  $X_2(00,320)$  y para el coll de l'Ordal:  $X_2(20,133)$ .

A manera de síntesis, en el diagrama 8 se han representado estereográficamente los dominios de las distintas estructuras de la cantera de Garraf relacionadas con  $D_2$ : Perpendicularmente a  $X_2$  se encuentran las grietas de tensión (punteado en el diagrama; el pequeño círculo negro indica el valor de  $X_2$  obtenido con el estudio de las grietas de tensión; el semicírculo pequeño negro, el obtenido con el estudio de las fallas). En un cono cuyo eje es  $Z_2$  no se presenta ninguna estructura (caso de que se hubieran formado debería corresponder al dominio de las estilolitas) y el resto del diagrama está ocupado por fallas normales (rayado horizontal), cuya distribución presenta un máximo para planos de direcciones más

o menos perpendiculares a  $X_2$ , dirección *grosso modo* paralela a las grandes fallas normales que delimitan el bloque de Garraf tanto por el NW como por el SE.

### Deformación 1

Al representar en diagramas estereográficos los polos de los planos M de los desgarres y de las fallas inversas, tanto de Garraf como del coll de l'Ordal (diagr. 9 y 10) se observa un mayor ordenamiento que en los diagramas 1 y 4, pero a pesar de ello, no pueden trazarse guirnaldas coincidentes con círculos mayores, perpendiculares entre sí. No obstante en los dos diagramas se observa un máximo subvertical que debe corresponder a los planos M contruidos a partir de los desgarrres y que puede considerarse como indicador de la dirección de  $Y_1$ , puesto que se trata de una tectónica con acortamiento y alargamiento horizontales (gran predominio de los desgarrres sobre las fallas inversas). Además, caso de que la máxima extensión fuese vertical deberían encontrarse grietas de tensión subhorizontales, cosa que no acontece (diagr. 3 y 6). Por el contrario, todas las grietas de tensión observadas se disponen subverticalmente y, es más, en el coll de l'Ordal se distribuyen alrededor de dos máximos netos.

Si comparamos ahora la dirección del máximo de los polos de las grietas de tensión del coll de l'Ordal hasta ahora no considerado,  $X_1(16,055)$ , con la dirección de las estilolitas horizontales medidas en la misma cantera (diagr. 5) se constata que, dentro de los límites que permiten las pocas estilolitas observadas, son aproximadamente perpendiculares. Puesto que estas estilolitas son horizontales y por lo tanto pertenecen a la  $D_1$ , las grietas de tensión del máximo cuya dirección les es perpendicular, lógicamente, deben atribuirse a dicha deformación. Además el otro máximo,  $X_2(20,133)$ , no puede estar relacionado con  $D_1$  puesto que indica la misma dirección que las estilolitas horizontales y en una única deformación no pueden darse grietas de tensión y superficies estilolíticas cuyos planos sean paralelos.

Si para la cantera de Garraf comparamos también los diagramas contruidos con las estilolitas (que por ser horizontales deben pertenecer también a  $D_1$ ) y con los polos de las grietas de tensión (diagr. 2 y 3) se observa que la dirección aproximadamente perpendicular a las pocas estilolitas presentes coincide con la zona de máximo del diagrama 3. Así, pues, en Garraf las direcciones de máxima extensión tanto para  $D_1$  como para  $D_2$  coincidirían aproximadamente, lo que explicaría que en Garraf se obtuviese únicamente un máximo con los polos de las grietas de tensión. Por otra parte, al comparar los diagramas de Garraf (2 y 3) con los del coll de l'Ordal (5 y 6) se observan variaciones de las direcciones de  $X_1$  y  $Z_1$  del orden de  $90^\circ$ , mientras que  $Y_1$  (diagr. 9 y 10) permanece aproximadamente constante (subvertical).

Antes de finalizar este análisis, repasemos breve-

mente las posibles causas por las que no se obtienen las distribuciones previstas para los polos de los planos M de las fallas inversas y desgarres. Ya se ha adelantado la posible inclusión de fallas inversas de segundo orden correspondientes a  $D_2$  y la eliminación de algunas fallas normales pertenecientes a  $D_1$ , cuyos planos M, probablemente colaborarían a una mejor definición de las guirnaldas. También hay que considerar la posible rotación interna al avanzar la deformación. De todas maneras estas causas no son suficientes, puesto que ninguna de ellas permite explicar la superposición de los dominios de los desgarres sinistrorsums y dextrorsums en un mismo afloramiento (diagr. 11 y 12: Rayado horizontal, desgarres dextrorsums y rayado vertical, desgarres sinistrorsums). En la cantera de Garraf se presenta un máximo para cada tipo de desgarre. La bisectriz del ángulo agudo de estas dos direcciones más frecuentes nos da  $Z_1$  que coincide sensiblemente con la dirección de las pocas estilolitas presentes (diagr. 2) y la bisectriz del ángulo obtuso,  $X_1$ , coincide aproximadamente con el máximo del diagrama 3.

En el coll de l'Ordal la distribución de los dominios de los dos tipos de desgarres es más compleja: Un máximo importante para los desgarres dextrorsums y dos para los sinistrorsums. Además, al igual que en Garraf, se presentan abundantes superposiciones de los dominios de los dos tipos de desgarres (diagr. 11 y 12).

La poca precisión de los máximos de los diagramas 11 y 12 probablemente sea debida a la poca cantidad de datos, pero la innegable superposición de los dominios de ambos tipos de desgarres en los dos afloramientos estudiados no depende de ello y no pueda explicarse únicamente con las razones antes aducidas. Muy probablemente haya que considerar variaciones de la dirección de acortamiento  $Z_1$  durante la deformación, así como la presencia de fallas de segundo orden...

## CONCLUSIONES

1) Las microestructuras del macizo de Garraf están ligadas al menos a dos deformaciones distintas.

2) La aplicación, para su análisis, del modelo de la "deformación discontinua" propuesto por F. ARTHAUD y M. MATTAUER permite diferenciar las estructuras pertenecientes a cada deformación y definir los ejes principales, X, Y y Z de las mismas.

3) La primera deformación,  $D_1$  ("comprensión"), presenta el eje principal de acortamiento,  $Z_1$  subhorizontal de dirección variable en el espacio y probablemente en el tiempo; la dirección intermedia,  $Y_1$ , es subvertical (lo que implica un predominio de las fallas con movimiento horizontal sobre las inversas); y la dirección principal de alargamiento,  $X_1$ , subhorizontal, es perpendicular a las dos anteriores y por lo tanto de dirección también variable.

4) La segunda,  $D_2$  ("distensión"), presenta  $Z_2$  subvertical,  $X_2$ , subhorizontal de dirección NW-SE (aproximadamente perpendicular a las grandes fallas normales regionales) e  $Y_2$ , subhorizontal de dirección NE-SW en los dos afloramientos estudiados.

5) El estudio de las variaciones de las direcciones de  $Z_1$  en el espacio, su relación con las grandes fallas, así como sus posibles variaciones durante la deformación (motivo de próximos trabajos) requiere elevar el número de observaciones de cada tipo de desgarres para asegurarse de que los diagramas obtenidos son representativos. Para alcanzar, en esta región, de un determinado tipo de desgarres, un número de observaciones del orden del centenar hay que cuadruplicar el número de mediciones por afloramiento, lo que implica medir unas 800 fallas. Difícilmente se encuentran tantas superficies estriadas en un afloramiento reducido. Para obtener estos datos será necesario recurrir a zonas más amplias que previamente se deberá haber comprobado que son homogéneas desde el punto de vista de la deformación. Esta comprobación puede realizarse, por ejemplo, estudiando previamente la distribución en el espacio de las grietas de tensión, analizando diversos afloramientos dentro de la zona a investigar. Las grietas de tensión son especialmente abundantes y fácilmente pueden encontrarse un centenar de ellas en un afloramiento pequeño. Si para todas las estaciones de grietas de tensión se obtienen distribuciones análogas podremos considerar esta zona como homogénea y por consiguiente tratar conjuntamente todas las fallas en ella observadas.

## AGRADECIMIENTO

No sería justo cerrar esta nota sin expresar mi agradecimiento a F. ARTHAUD, de Montpellier, que me inició en el análisis microestructural, especialmente en el de la "deformación discontinua" y cuyas observaciones han sido de gran interés para la redacción de la presente nota.

## BIBLIOGRAFÍA

- ARTHAUD, F. (1969): Méthode de détermination graphique des directions d'allongement, de raccourcissement et intermédiaire d'une population de failles. *B.S.G.F.* (7), t. XI, pp. 729-737.
- ARTHAUD, F. y MATTAUER, M. (1969): Exemples de stylolites d'origine tectonique dans le Languedoc, leurs relations avec la tectonique cassante. *B.S.G.F.* (7), t. XI, pp. 738-744.
- LLOPIS LLADÓ, N. (1947): Contribución al conocimiento de la morfoestructura de los Catalánides. *C.S.I.C., Insto. "Lucas Mallada"*, 373 pp., Madrid.
- McKINSTRY, H. E. (1953): Shears of second-order. *Am. J. Sci.*, t. 251, pp. 401-414.
- WAGNER, G. H. (1958): Über Klüfte und horizontal Styloliten in Süddeutschland. *Zeitsch. deutsch. geol. Ges.*, t. 109, pp. 276-277.