

## EL ANÁLISIS DE PALEOESFUERZOS A PARTIR DE CANTOS ESTRIADOS: PRECISIONES METODOLÓGICAS

J.L. Simón Gómez

*Departamento de Geología, Universidad de Zaragoza, Pedro Cerbuna 12, 50009 Zaragoza. jsimon@unizar.es*

**Resumen:** Distintos enfoques del análisis de estriaciones en cantos son discutidos teniendo en cuenta sus fundamentos teóricos y algunos resultados empíricos. Sólo las estriaciones uniformes en orientación y sentido sobre toda una cara, producidas por deslizamiento friccional entre cantos, pueden ser analizadas en términos de esfuerzos utilizando métodos basados en el principio de Bott. Este principio no es aplicable a las *lineaciones de disolución* que forman un continuo morfológico (transición gradual entre estilolitos ortogonales, estilolitos y estrías) y genético (todas estas estructuras son resultado de la indentación de granos insolubles de la matriz). La distribución de *ángulos de incidencia* ( $\epsilon$ ) de dichos granos (ángulos entre lineación y superficie del canto) sugiere que las lineaciones reflejan en general las trayectorias de flujo de la matriz, que no sufren desviaciones notables en el contacto con los cantos si éstos son muy solubles y la tasa de deformación es baja. En consecuencia, el proceso debe ser considerado en términos cinemáticos, si bien cabe una aproximación dinámica sencilla consistente en utilizar sólo la orientación de los picos estilolíticos ortogonales y considerar éstos estadísticamente paralelos al eje  $\sigma_1$ . Con carácter particular, si la deformación se produce con notable reducción de volumen, el análisis se simplifica ya que las trayectorias de los granos de la matriz tienden a hacerse paralelas entre sí en todo el entorno del canto.

**Palabras clave:** Presión-disolución, lineación, análisis poblacional, conglomerado.

**Abstract:** Diverse methodological approaches proposed for the kinematic and dynamic analysis of striated pebbles are now discussed, both considering their theoretical support and supplying empirical results based on observations in individual pebbles. It is demonstrated that only the striations showing uniform orientation and sense on a pebble facet, that can therefore be interpreted as a product of frictional sliding between pebbles, can be analysed in terms of stress using methods based upon Bott's principle. On the contrary, this principle should not be applied to *solution lineations* that make up a morphological and genetic *continuum* over the curved surface of the pebble, showing a gradual transition between orthogonal stylolites, slickolites and striations. This ensemble of structures is the result of indentation of non-soluble grains of the matrix into the surface of soluble pebbles. The distribution of *incidence angles* ( $\epsilon$ ) of such grains (angles between lineation and pebble surface) suggests that, as a general rule, the lineations reflect matrix flow trajectories, which do not undergo substantial deflection close to highly soluble pebbles under low deformation rates. The whole process should be therefore considered in kinematic terms, though a simplified dynamical approach is feasible using the orientations of orthogonal stylolithic peaks as the only relevant data, considering them as statistically parallel to the  $\sigma_1$  axis. In particular, if deformation occurs under strong volume reduction, matrix trajectories tend to become parallel to each other all around the pebble, so that any lineation, independently on its location and angle with respect to the pebble surface, can be taken into account.

**Key words:** Striated pebble, paleostress, lineation, pressure-solution.

Simón Gómez, J.L. (2006): El análisis de paleoesfuerzos a partir de cantos estriados: precisiones metodológicas. *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 19 (1-2): 153-162

Las marcas de deformación que aparecen en superficies de cantos de gravas y conglomerados no constituyen un conjunto uniforme. Desde el punto de vista morfológico, hay una diferencia básica entre las marcas de tamaño relativamente grande formadas en los contactos entre cantos y las hendiduras estrechas provocadas por los granos de la matriz. Dentro de estas últimas, cabe distinguir entre los picos estilolíticos, que forman un ángulo más o menos grande con la superficie del canto, y las estrías subparalelas a la misma. No obstante, estos últimos tipos son los extremos de una

gama continua de morfologías (estilolitos ortogonales, estilolitos oblicuos, estilolitos, estrías s.s.) entre las que resulta casi imposible establecer límites claros. Desde el punto de vista genético, se admite en general que la presión-disolución es el mecanismo fundamental responsable de la mayoría de estas marcas. No obstante, tampoco puede excluirse la abrasión mecánica como responsable de estriaciones producidas en el contexto de un deslizamiento friccional. En paralelo, surge el dilema de aplicar a la deformación resultante un modelo cinemático de deformación dúctil o bien considerarla

como la suma de un número de desplazamientos discretos sobre las superficies de discontinuidad que constituyen las caras de los clastos. Finalmente, desde el punto de vista de su análisis, se han formulado aproximaciones distintas, unas en el ámbito cinemático (análisis de la deformación) y otras en el dinámico (análisis de esfuerzos). Según los modelos que se utilicen y en qué condiciones se apliquen, ambas pueden dar lugar o no a resultados compatibles entre sí.

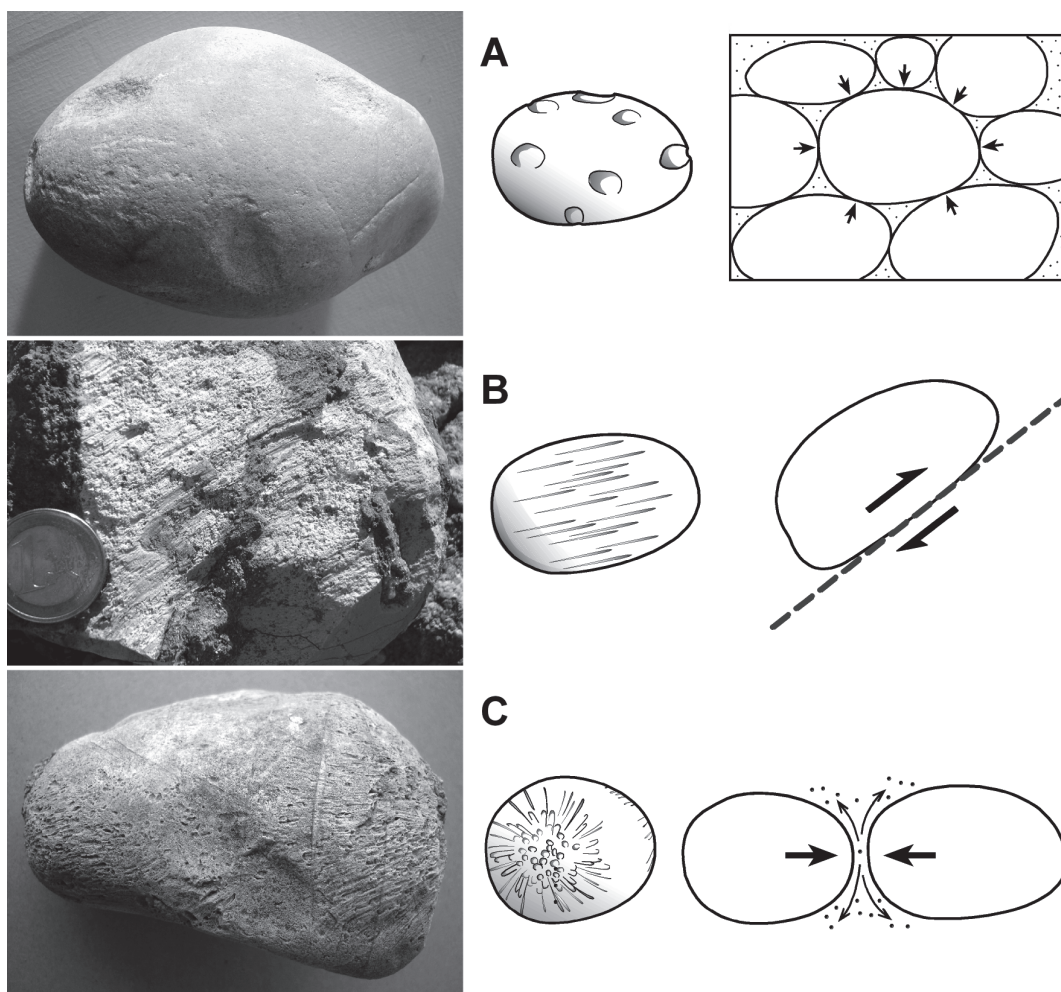
Toda esta variedad de enfoques analíticos está representada en los estudios de cantos estriados que se han realizado en conglomerados (fundamentalmente terciarios) en diversas regiones de la Península Ibérica. Tras los trabajos pioneros de Estévez y Sanz de Galdeano (1980, 1983) y Sanz de Galdeano y Estévez (1981) en las cuencas de Granada y Guadix-Baza, cabe destacar los de Rodríguez-Pascua y De Vicente (1998) en la cuenca de Zaorejas (Guadalajara) y de Ruano y Galindo-Zaldívar (2004) en la transversal central de las Cordilleras Béticas. Todos ellos han contribuido de forma destacada al conocimiento de la evolución

tectónica regional y contienen asimismo interesantes aportaciones metodológicas.

El objetivo de este trabajo es identificar y valorar las posibles ventajas, problemas o contradicciones inherentes a las distintas aproximaciones metodológicas que se han propuesto para el análisis cinemático y dinámico de cantos estriados. Entenderemos como tales aquellos cantos que presentan marcas lineales con orientaciones preferentes, que pueden ser producto bien de abrasión mecánica o de disolución bajo presión. Para ello nos apoyaremos en observaciones, conceptos y argumentos publicados por numerosos autores, así como también en un estudio empírico propio basado en observaciones de cantos individuales de diversas procedencias.

### Comportamiento reológico y cinemática de la deformación

El comportamiento reológico de los conglomerados determina el carácter activo o no de los distintos



**Figura 1.-** Patrones de distribución y mecanismos genéticos de las marcas de deformación en cantos: **A)** Impresiones ovaladas o circulares en toda la superficie, producidas por la presión localizada en los contactos entre cantos; ejemplo procedente del Cretácico inferior de Montorio (Burgos). **B)** Patrón de estriación unidireccional, producido por deslizamiento friccional en una cara (Hippolyte, 2001); ejemplo procedente del Oligoceno de Aliaga (Teruel). **C)** Patrón 'centrífugo' de estirilotos y estrias a partir de dos polos opuestos de disolución, originado por la indentación de granos insolubles de la matriz (patrón de estriación radial de Hippolyte, 2001); ejemplo procedente del Mioceno superior de Elche (Alicante).

elementos texturales y de sus interfaces, haciendo que la deformación pueda seguir diferentes modelos cinemáticos:

(a) En conglomerados de textura granosostenida, siempre que los procesos de presión-disolución sean suficientemente activos para acomodar la deformación, ésta puede consistir esencialmente en la interpenetración de los cantos en los puntos de contacto, indentándose siempre los menos solubles y de mayor curvatura en los más solubles y de menor convexidad (Trurnit, 1968). Cada canto individual es entonces una unidad de flujo. El resultado son los *cantos impresos*, que muestran impresiones cóncavas, de planta circular u ovalada, repartidas con frecuencia por toda su superficie (Fig. 1A).

(b) La deformación puede también canalizarse en forma de cizalla sobre las superficies de discontinuidad que constituyen las caras de los cantos. Las unidades de flujo pueden ser cantos individuales, volúmenes de matriz o volúmenes de cantos+matriz, y el movimiento relativo entre ellas sería equivalente al de una «microfalla» a escala de canto (Combes, 1984). En tal caso, las caras de cantos muestran estriaciones paralelas y de sentido uniforme dentro de una cara, que desaparecen o cambian de pauta de orientación al pasar a otra cara contigua, pero se mantienen paralelas sobre caras opuestas (*patrón de estriación unidireccional* de Hippolyte, 2001; Fig. 1B).

(c) Si la matriz fluye alrededor del canto y sus elementos insolubles se indentan en la superficie (cada grano sería en este caso una unidad de flujo), se desarrolla un patrón de marcas «centrífugo» que irradia de dos polos opuestos de disolución, formado por picos e incisiones lineales de anchura milimétrica o submilimétrica (Estévez y Sanz de Galdeano, 1980; Sanz de Galdeano y Estévez, 1981; Combes, 1984; *patrón de estriación radial* de Hippolyte, 2001). Dicho patrón presenta con frecuencia una marcada zonación concéntrica: picos de disolución ortogonales o de gran ángulo en los polos de disolución preferente; picos oblicuos (estirilolíticos) pasando a estrías subparalelas en sendas orlas a su alrededor; ausencia de marcas en una banda ecuatorial (Figs. 1C y 3B).

La forma de los cantos, su solubilidad relativa respecto a los granos de la matriz, la abundancia de ésta y su grado de cementación, así como la tasa de deformación y las características del elipsoide, entre otros factores, determinan cuál de estos modelos cinemáticos domina en cada caso. En conglomerados de textura granosostenida, con clastos bien seleccionados y de forma subsférica, el esqueleto tiende a adquirir un empaquetamiento tetragonal regular. En tal situación, bajo un esfuerzo medio grande y un esfuerzo diferencial pequeño, el valor de la compresión normal en todos los puntos de contacto es similar y puede producir disolución a una tasa significativa; en presencia de agua abundante, podría hacerlo incluso bajo un estado de esfuerzos cuasi-isótropo (Rossi *et al.*, 2005). Esto puede explicar la

distribución uniforme de impresiones en toda su superficie (Fig. 1A). Si la deformación avanza y los procesos de presión-disolución son suficientemente activos para acomodarla, los cantos tenderán a empotrarse unos en otros de acuerdo con la jerarquía que determinan sus solubilidades y curvaturas relativas (Trurnit, 1968). Si los cantos son rígidos y poco solubles, los esfuerzos que se transmiten desde los contactos al interior pueden crecer hasta superar su límite de rotura y producir fracturas (Gallagher *et al.*, 1974; McEwen, 1981; Eidelman y Reches, 1992). La deformación se canaliza en forma de cizalla sobre las superficies de discontinuidad que constituyen las caras de los cantos cuando la matriz del conglomerado tiene un comportamiento relativamente competente pero la cohesión en la interfaz con los cantos es baja (McEwen, 1981). También en conglomerados con matriz escasa donde muchos cantos se ponen en contacto directo a través de caras más o menos planas (circunstancia que se ve facilitada si su morfología es angulosa o subangulosa). En cambio, el flujo «envolvente» de la matriz en torno al canto requiere un comportamiento relativamente dúctil de la matriz: ésta debe ser abundante y tener cierta «movilidad», mientras que el cemento debe ser escaso (Estévez y Sanz de Galdeano, 1980; Hippolyte, 2001).

Un aspecto muy relevante que debe tenerse en cuenta en el caso del patrón radial o «centrífugo» es la transición gradual, sin solución de continuidad, que se produce entre los picos estilolíticos ortogonales a la superficie del canto, los estilolitos de bajo ángulo y las estrías subparalelas. Resulta imposible establecer una diferencia cualitativa entre unas y otras puesto que todas se deben a la indentación de granos insolubles de la matriz en el canto (Fig. 2). Todo ello permite formular un *principio de unidad o continuidad genética* de todas estas marcas de disolución (Combes, 1984) y, al mismo tiempo, aconseja agrupar todas ellas bajo una denominación común: *lineaciones de disolución*.

### **Criterios y procedimientos de análisis: una breve revisión**

Las impresiones circulares u ovaladas no suelen analizarse por sí mismas. Con frecuencia se reparten por el canto de una manera uniforme y su morfología no presenta elementos direccionales que sirvan como marcadores cinemáticos, salvo casos aislados en que las marcas muestran transiciones a formas estilolíticas (Ruano, 2003) o contienen en su interior microestirilolitos de escala submilimétrica (Benito y Casas, 1987). Si la interpenetración de los cantos da lugar a una fábrica anisótropa de la roca, ésta puede servir de referencia, en todo caso, para reconstruir el elipsoide de deformación, utilizando por ejemplo el método de Fry (1979). Los objetivos de este trabajo no requieren dedicar mayor atención a este tipo de marcas.

Las estriaciones unidireccionales formadas por deslizamiento entre cantos o en la interfaz canto-matriz

pueden cumplir las condiciones para ser analizadas en términos de esfuerzos. La cinemática de la deformación y las condiciones reológicas que se infieren de ella sugieren un movimiento de carácter friccional, sujeto a la condición de que se supere la resistencia de cizalla en las superficies de discontinuidad. El conjunto de movimientos de cizalla puede considerarse relacionado con un sistema de esfuerzos que trasciende los estados puntuales en los contactos entre clastos. En tal situación, puede admitirse que el deslizamiento sigue la dirección y sentido de la componente de cizalla, determinada por el estado medio de esfuerzos en su entorno y por la orientación del plano de discontinuidad (principio de Bott, 1959). Desde esta perspectiva, un conglomerado es un medio idealmente prefracturado en el que la reactivación de planos de orientación variada permite la aplicación de los métodos convencionales de análisis poblacional de fallas (Combes, 1984; Petit *et al.*, 1985), pudiendo obtener así la orientación de los ejes principales de esfuerzos y la relación de esfuerzos  $R = (\sigma_2 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3)$ . Su aplicación en cantos tiene incluso algunas ventajas sobre las fallas: (a) la superficie lisa de los cantos permite reconocer cualquier estriación por tenue que sea; (b) el coeficiente de rozamiento menor permite la reactivación de planos con una variedad mayor de orientaciones (Hippolyte, 2001).

Con respecto a los patrones de estriación radial, han sido varios los procedimientos de análisis propuestos:

(a) El más sencillo consiste en identificar los picos de disolución perpendiculares, a partir de los cuales irradian los estrilolitos y estrías (Fig. 3B). Como en el caso de los estrilolitos convencionales, la orientación media de dichos picos se toma como indicador del eje de esfuerzos  $\sigma_1$ . Este criterio puede considerarse suficientemente contrastado a partir de numerosos estudios de campo y de laboratorio (Blake y Roy, 1949; Arthaud y Mattauer, 1969; Gratier *et al.*, 2005).

(b) Un procedimiento alternativo consiste en localizar los polos opuestos con marcas de disolución simétricas e identificar el patrón completo de estrías radiales en su entorno. El diámetro que une los dos polos de disolución pasando por el centro de gravedad del canto se toma como orientación óptima de  $s_1$  (Estévez y Sanz de Galdeano, 1980, 1983; Sanz de Galdeano y Estévez, 1981).

(c) A partir de la distribución completa de estrías en un canto, y considerando que éstas representan las trayectorias de granos de la matriz que exclusivamente deslizan sobre su superficie, puede abordarse un análisis basado en los modelos teóricos propuestos por Schrader (1988) y Taboada (1993). En el primer caso, se trata de identificar los denominados *ejes y planos de convergencia y divergencia* de estrías y, a partir de ellos, deducir los ejes de deformación y la forma aproximada del elipsoide. De acuerdo con el segundo modelo, la simetría general de la distribución permite inferir asimismo la orientación de los ejes de esfuerzos. Posteriormente, utilizando el punto de inflexión de la

trayectoria curva de las estrías, existe un procedimiento gráfico en proyección estereográfica que permite calcular la relación de esfuerzos  $R_c = (\sigma_2 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3)$ .

(d) Finalmente, otro enfoque adoptado por algunos investigadores consiste en discretizar la superficie estriada total de un canto, midiendo un número finito de orientaciones de planos y estrías en distintas porciones del mismo, y asumir su equivalencia total con una población completa de microfallas (Combes, 1984). Desde esta hipótesis, la muestra de datos resultante puede ser sometida a un análisis de inversión de esfuerzos convencional igual que se hace con las estriaciones unidireccionales (Combes, 1984; Rodríguez-Pascua y De Vicente, 1998; Ruano, 2003; Ruano y Galindo-Zaldívar, 2004).

En principio, los procedimientos de análisis descritos para los cantos impresos y los patrones unidireccionales no presentan, a mi juicio, ningún inconveniente ni contradicción desde el punto de vista conceptual. Los enfoques analíticos de que han sido objeto las lineaciones con patrón radial, mucho más diversos, sí deben ser sometidos a una discusión más detenida.

#### **El significado cinemático/dinámico de los patrones de lineaciones radiales: discusión y contrastación empírica**

El enfoque que considero más controvertido es la aplicación del análisis poblacional de planos estriados a porciones discretas de un mismo canto (epígrafe d en el apartado anterior). El principio *friccional* en que se basa dicho análisis no parece compatible con el proceso físico de presión-disolución: (1) La disolución bajo presión es un mecanismo de deformación viscoso, que no requiere que se supere un umbral de esfuerzo diferencial ni un valor crítico del cociente  $\tau/\sigma$ . (2) Las lineaciones presentan una componente de penetración consustancial a las mismas, lo que indica que la componente  $\sigma$  no es completamente anulada por la reacción de la superficie del canto; no puede invocarse, por tanto, una supuesta descomposición del vector esfuerzo y no hay base para considerar que el principio de Bott (trayectoria de movimiento paralela a la componente  $\tau$ ) sea aplicable.

Planteémoslo de otro modo. Si los picos de disolución subperpendiculares a la superficie son estadísticamente paralelos a  $\sigma_1$  y las estrías *s.s.* lo son a la componente de esfuerzo  $\tau$  sobre el plano, habremos de admitir un cambio cualitativo entre unos otros, que se contradice con el que he denominado *principio de continuidad genética* de las lineaciones de disolución. El estudio de las formas de transición (estrilolitos) parece clave para dilucidar si las lineaciones de disolución pueden interpretarse en términos de esfuerzos y dividirse, por tanto, en dos categorías (unas paralelas al eje  $\sigma_1$  y otras a la componente  $\tau$ ) o, por el contrario, forman un verdadero *continuum* genético para el que debe buscarse otro modelo (Fig. 2). Dicho



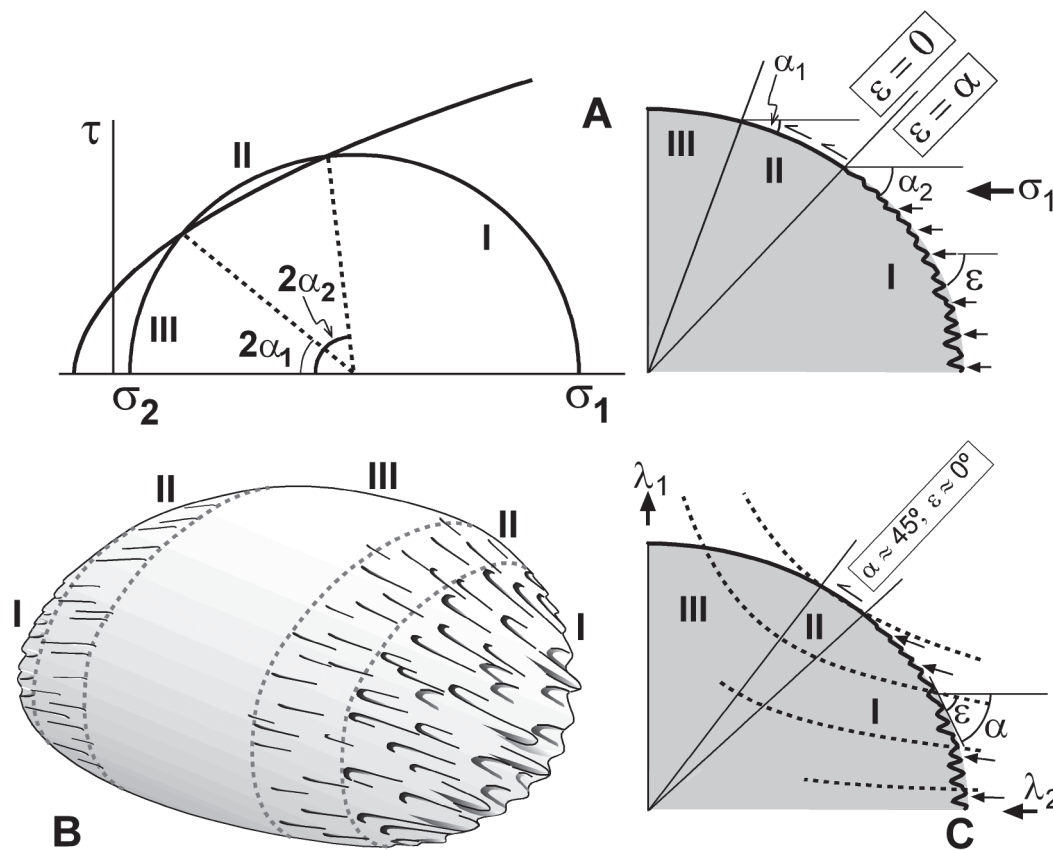
**Figura 2.-** Detalle de la transición entre estilolitos, estrilolitos y estrías en un canto carbonatado procedente del Terciario de la cuenca de Zaorejas. Los criterios de análisis que convencionalmente se aplican a los picos de disolución (estadísticamente paralelos al eje principal de esfuerzos  $\sigma_1$ , parte izquierda) y a las estrías (paralelas a la componente de esfuerzo tangencial  $\tau$ , parte derecha) chocan con la apariencia de continuidad morfológica y genética de todas las lineaciones de disolución.

estudio debe tomar en consideración un parámetro geométrico fundamental al que hasta ahora no se ha prestado probablemente la atención debida: el ángulo entre la lineación de disolución y la superficie en la que ésta se observa. Es el que denominaremos *ángulo de incidencia*  $\epsilon$ .

Para simplificar el problema realizaremos la siguiente aproximación bidimensional. Consideremos un cuadrante de la sección circular de un canto esférico (Fig. 3A y C), sobre un sistema de ejes de referencia formado por los ejes principales de esfuerzo/

deformación. Consideremos una deformación infinitesimal, excluyendo cualquier componente rotacional de la deformación y admitiendo, por tanto, una coincidencia entre los ejes de esfuerzo y deformación ( $\sigma_1//Z$ ;  $\sigma_3//X$ ). La orientación de cada porción del canto puede definirse con relación a dichos ejes mediante el ángulo  $\alpha$  entre el plano y  $\sigma_1$ . Con esta base de referencia podemos abordar de forma sencilla el análisis de la distribución de los ángulos de incidencia  $\epsilon$  en la superficie del canto, comparando casos reales con las predicciones que puedan hacerse desde las distintas hipótesis que podamos plantearnos acerca del significado cinemático o dinámico de los patrones de lineaciones de disolución.

Consideremos en primer lugar la hipótesis *dinámica/friccional*, según la cual las lineaciones contenidas en la superficie del canto son producidas por deslizamiento en aquellas porciones de la superficie en que se supera la resistencia friccional, y son paralelas a la componente de esfuerzo de cizalla. De acuerdo con ella, es de esperar una discontinuidad entre la zona del canto afectada por picos de disolución paralelos a  $\sigma_1$  ( $\epsilon=\alpha$ ) y la cubierta por estrías paralelas a  $\tau$  ( $\epsilon=0$ ), además de la franja ecuatorial sin estriaciones allí donde la superficie del canto es subparalela al eje  $\sigma_1$  (Fig. 3A y B). Si representásemos los valores de  $\alpha$  y  $\epsilon$  que caracterizan la lineación en cada porción de la superficie del canto en un gráfico cartesiano (Fig. 4A), su distribución teórica mostraría dos líneas o franjas separadas, correspondientes, respectivamente, a las dos primeras zonas mencionadas.



**Figura 3.- A)** Distribución de lineaciones en un canto de acuerdo con la hipótesis *dinámica/friccional* y, en consecuencia, con el criterio de Mohr-Coulomb;  $\alpha$ : ángulo entre el eje  $\sigma_1$  y la superficie del canto;  $\epsilon$ : ángulo de incidencia de la lineación en la superficie del canto. **B)** Esquema de la zonación concéntrica de lineaciones que se asocia al patrón «centrífugo» o radial, compatible con las dos hipótesis planteadas; I: picos de disolución (estilolitos y estrilolitos); II: estrías; III: ausencia de marcas. **C)** Distribución teórica de ángulos de incidencia  $\lambda$  bajo trayectorias de flujo determinadas por cizalla pura equiareal.

Cabe plantear una hipótesis alternativa, ésta de índole puramente *cinemática*: las lineaciones son paralelas a las trayectorias de flujo de los granos de la matriz en torno al canto, determinadas por el elipsoide de deformación del volumen rocoso. Cabe la posibilidad de que dichas trayectorias no sean desviadas por el canto, debido a que la solubilidad de éste permite una velocidad de penetración de los granos de la matriz igual a la velocidad del flujo. En tal caso, seguirán el trazado previsto por los modelos cinemáticos bidimensionales que, utilizando como origen de coordenadas el centro del volumen deformado, describen las trayectorias de movimiento de las partículas para cizalla pura (hipérbolas con simetría ortorrómbica), cizalla simple (líneas rectas paralelas) o combinaciones de ambas (Ramberg, 1975; Hoepfner *et al.*, 1983). Si en el centro del modelo colocamos un objeto (circular o elíptico, por ejemplo), se ve cómo en éste se produce también una zonación análoga a la observada en cantos reales, según las trayectorias teóricas de movimiento de los granos de la matriz sean convergentes, paralelas o divergentes del canto (zonas I, II y III, respectivamente, en la Fig. 3C). La diferencia con respecto a la hipótesis *dinámica-friccional* es que la transición entre las zonas no es aquí brusca sino gradual, característica que parece en principio más compatible con la continuidad morfológica observada entre estilolitos, estrilolitos y estrías en los cantos reales.

Podemos profundizar en este análisis comparativo definiendo con precisión las distribuciones de ángulos  $\varepsilon$  que pueden leerse entre las trayectorias de flujo y el contorno del objeto, que variarán según la forma de este último y del tipo de deformación aplicado. Para cizalla pura equiareal y objetos geométricos sencillos, las relaciones entre  $\varepsilon$  y  $\alpha$  pueden demostrarse analíticamente de forma simple (ver Apéndice). En el caso de un objeto circular, la relación es:

$$\varepsilon = 2\alpha - 90$$

Si se trata de un objeto elíptico de ejes  $a$  y  $b$ :

$$\operatorname{tg} \varepsilon = \frac{\operatorname{tg}^2 \alpha \left( \frac{a^2}{b^2} \right) - 1}{\operatorname{tg} \alpha \left( \frac{a^2}{b^2} + 1 \right)}$$

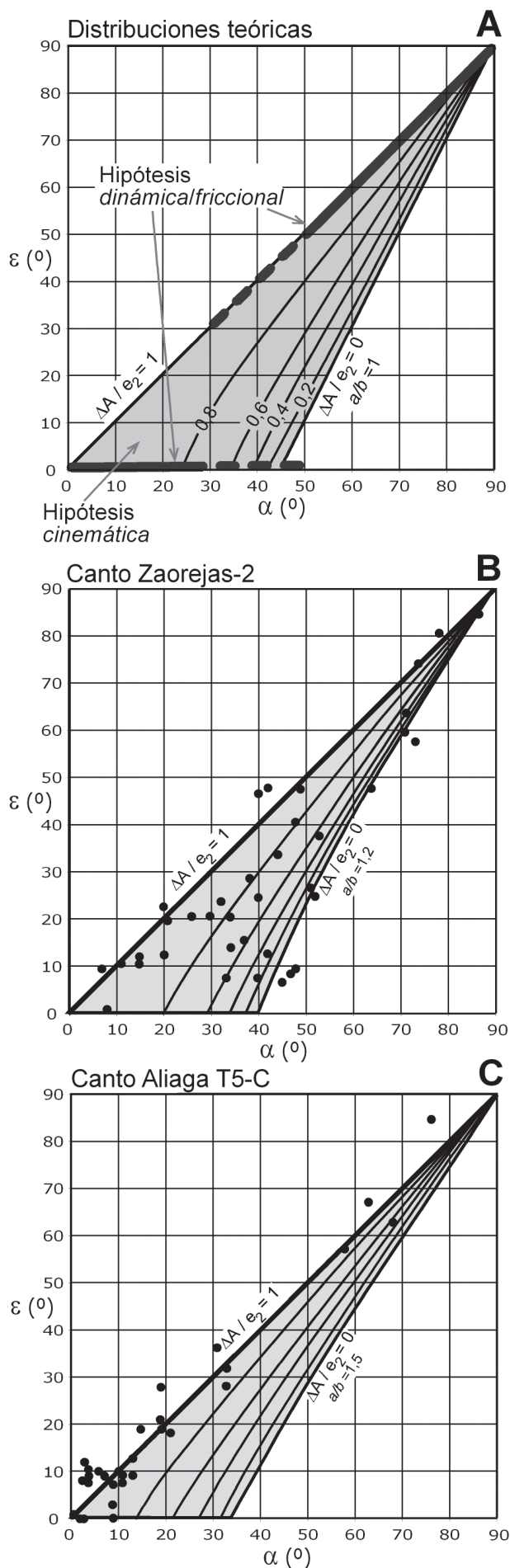
En la situación opuesta, si la deformación se produce con una reducción máxima de área, tal que  $e_1 = 0$  y  $\Delta A = e_2$  (expresado en términos tridimensionales:  $e_1 = e_2 = 0$ ,  $\Delta V = e_3$ ), las trayectorias de movimiento serían rectas y paralelas al eje de máximo acortamiento ( $\varepsilon = \alpha$ ). Los dos casos extremos (cizalla pura equiareal y deformación con máxima reducción de área) están representados por sendas líneas en el gráfico  $\alpha$ - $\varepsilon$ , que encierran un campo (en gris en la Fig. 4A) donde se situarían todos los posibles

escenarios intermedios (deformación con reducción parcial de área). En la figura 4A, la línea de la derecha es la correspondiente al objeto circular; para objetos elípticos, dicha línea se sitúa más a la izquierda conforme aumenta la excentricidad de la elipse, restringiendo progresivamente el área señalada en gris (p.ej. diagramas para elipses con  $a/b = 1,2$  y  $a/b = 1,5$  en la figura 4B y C, respectivamente).

Al variar los parámetros en juego (factor de reducción de área asociada a la deformación, forma de la sección elíptica que representa el objeto) llegamos a encontrarnos en situaciones en que las soluciones analíticas para la obtención de los valores de  $\varepsilon$  se complican. Puede recurrirse entonces a las herramientas de transformación de escalas incluidas en programas informáticos de dibujo o diseño gráfico, que permiten simular fielmente las trayectorias de movimiento bajo deformación progresiva homogénea en cualquier escenario cinemático. De este modo, utilizando el programa FreeHand MX de Macromedia, se han elaborado los modelos recogidos en la figura 5. En ellos se reconstruye el campo de desplazamientos en cizalla pura para el caso de deformación equiareal ( $\Delta A = 0$ ) y para otros en que hay reducción de área en diversos grados. La medición directa de los ángulos  $\alpha$  y  $\varepsilon$  sobre dichos modelos ha permitido la elaboración completa de ábacos como los representados en la figura 4. Por último, si las trayectorias son desviadas porque la solubilidad del canto no es suficiente para permitir la penetración de los granos a la velocidad de flujo de la matriz, los ángulos  $\varepsilon$  se verán sistemáticamente reducidos con respecto a los correspondientes en la hipótesis anterior. No obstante, el tratamiento cuantitativo en este supuesto requiere la introducción de parámetros físico-químicos que exceden el enfoque simplemente cinemático con el que se han elaborado los modelos expuestos.

Los modelos de distribución de ángulos de incidencia  $\varepsilon$  que predicen las dos hipótesis que he presentado (*dinámica/friccional* y *cinemática*) constituyen inferencias contrastables que pueden permitir avalar o refutar éstas. Por ello, más allá de la discusión teórica esbozada al comienzo de este apartado, he acometido un estudio empírico sobre cantos reales estriados bajo compresión tectónica ( $\sigma_1$  horizontal). He empleado para ello una serie de cantos individuales extraídos de conglomerados de diversas cuencas terciarias deformadas en contextos compresivos: Aliaga y Zaorejas (Oligoceno-Mioceno inferior, Cordillera Ibérica); Bajo Segura, área de Elche (Mioceno superior, Cordilleras Béticas); Saône, área de Ambérieu (Mioceno superior, contacto con el Jura francés). Los cantos son de composición carbonatada y forma elipsoidal, con relaciones de ejes máximo/mínimo comprendidas entre 1,2 y 2,0.

En diez de los cantos he hecho mediciones sistemáticas del ángulo  $\varepsilon$  y, tras inferir la orientación del eje  $\sigma_1$  a partir de picos de disolución ortogonales, he leído asimismo los correspondientes ángulos  $\alpha$ . Para

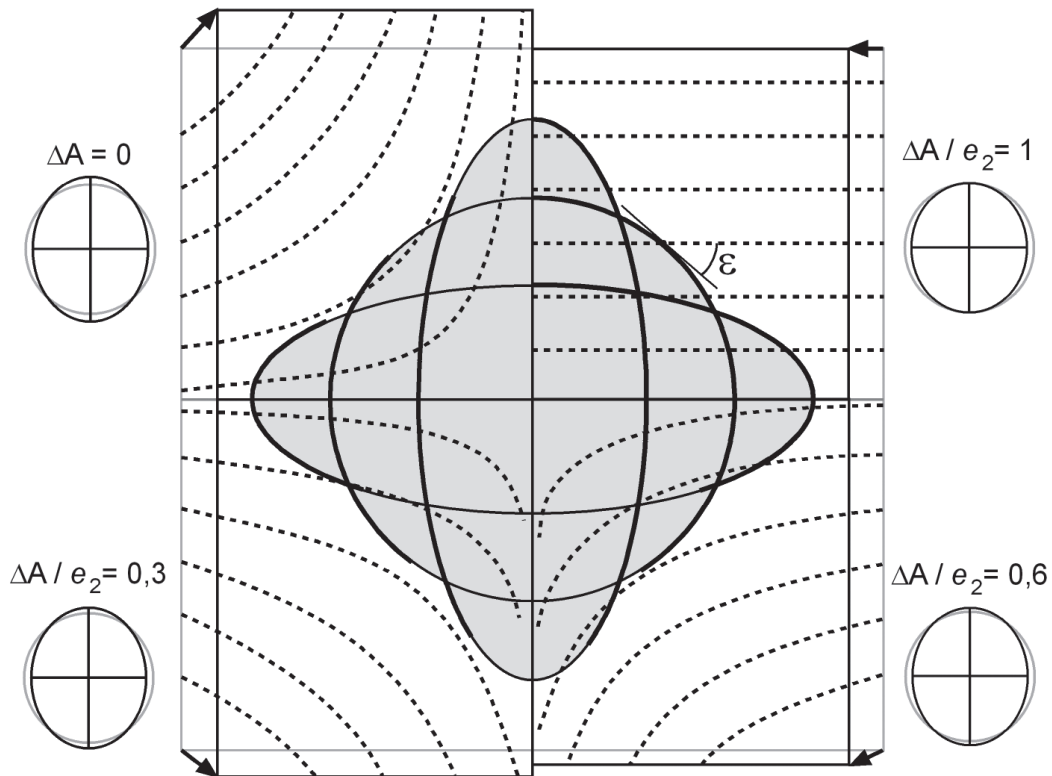


efectuar las mediciones he seguido un procedimiento práctico similar al descrito por Ruano y Galindo-Zaldívar (2004). Cada canto se ha orientado en el afloramiento y se ha extraído para su traslado. En un espacio exterior libre de interferencias magnéticas se ha montado sobre una base de plastilina, se ha reorientado y se han medido de forma precisa las orientaciones de la lineación y de la superficie del canto en varias decenas de puntos. Se ha utilizado una brújula Topochaix Universal (precisión de  $1^\circ$  en dirección y en inclinación) y, como elemento auxiliar, una pieza diédrica de metacrilato que se fija sobre la plastilina con una de sus aristas paralela a la lineación. Varios test de repetitividad realizados sobre grupos de 20 mediciones arrojan desviaciones estándar de dirección e inclinación entre  $1,6^\circ$  y  $2,2^\circ$ .

La figura 4B y C muestra dos de las distribuciones  $\epsilon$ - $\alpha$  obtenidas, que sirven como ejemplos representativos de los cantos estudiados. Se trata de nubes de puntos que en su mayoría quedan comprendidos o se sitúan muy cerca del área señalada en gris en cada ábaco, es decir, entre la recta  $\epsilon = \alpha$  y la curva que representa la distribución teórica en deformación equiareal para la relación de ejes de cada canto particular (asimilada la sección de éste a una elipse). No aparece nunca en ella ningún tipo de discontinuidad como la prevista por la hipótesis *dinámica/friccional* (Fig. 4A). El resultado es, por tanto, incompatible con esta última y sí avala, por el contrario, la hipótesis *cinemática*, admitiendo que las trayectorias de lineaciones reflejan una deformación con distintos grados de reducción de volumen o desviaciones parciales en la superficie del canto.

En los cantos individuales estudiados se observa una cierta tendencia al paralelismo de las lineaciones en todo su contorno. La desviación estándar promedio de las medidas en los diez cantos es de sólo  $10,1^\circ$  en dirección y  $7,1^\circ$  en inclinación. Esta tendencia es muy acusada en algún canto en concreto, con distribuciones de ángulos que se concentran en torno a la línea  $\epsilon = \alpha$  (Fig. 4C). También la he observado a escala de afloramiento en un conjunto de 48 estaciones estudiadas en los conglomerados de la cuenca terciaria de Aliaga (provincia de Teruel, Cordillera Ibérica; Simón, 2006), de la que proceden algunos de los cantos individuales estudiados, y donde las desviaciones estándar promedio son comparables a las anteriores

**Figura 4.-** A) Distribuciones teóricas de lineaciones en un diagrama  $\alpha$ - $\epsilon$ , para un objeto de sección circular, de acuerdo con las dos hipótesis genéticas planteadas. Las curvas dentro del área gris representan distribuciones compatibles con la hipótesis *cinemática* para deformaciones con distintos índices de reducción de área (valores de  $\Delta A/e_2$ ). B y C) Diagramas  $\alpha$ - $\epsilon$  correspondientes a dos de los cantos individuales estudiados. Las curvas que representan los valores de  $\Delta A/e_2$  varían respecto a las del primer diagrama en función del índice  $a/b$  de forma de la sección del canto (cociente entre los ejes paralelo y perpendicular, respectivamente, a la dirección de máximo acortamiento). Se observa cómo la hipótesis *cinemática* muestra una compatibilidad mucho mayor con los datos empíricos que la hipótesis *dinámica-friccional*.



**Figura 5.-** Modelos de trayectorias de flujo en cizalla pura homogénea para distintas hipótesis de variación de área ( $\Delta A$ ), simuladas mediante la herramienta de transformación de escalas del programa FreeHand MX de Macromedia.

( $11,5^\circ$  y  $6,3^\circ$ , respectivamente). Todo ello indica que el acortamiento horizontal va acompañado de una fuerte reducción del volumen externo del material deformado. Este hecho puede ser favorecido por varios factores: (1) elevada solubilidad de los cantos, que minimiza las desviaciones de los granos de la matriz; (2) transferencia del carbonato en disolución bien a los poros de la matriz (la roca no pierde masa pero sí volumen externo) o bien fuera del sistema (con pérdida neta de masa); (3) cementación de la roca con anterioridad a la deformación, que obligaría a que la matriz se comportase como una única unidad de flujo y la interfaz canto-matriz se convirtiese en una simple junta estilolítica. En cualquier caso, dicha tendencia propicia la unificación de los enfoques analíticos cinemático y dinámico, puesto que, bajo deformación no rotacional, las trayectorias serían estrictamente paralelas tanto al eje de acortamiento máximo ( $Z$ ) como al de esfuerzo máximo ( $\sigma_1$ ).

### Conclusiones

La zonación que presentan las lineaciones de disolución en la superficie de cantos solubles de conglomerado, producidas por indentación de granos insolubles de la matriz, puede ser explicada en primera aproximación tanto por una hipótesis *dinámica-friccional* (lineaciones paralelas a la componente de esfuerzo  $\tau$ ) como por una hipótesis *cinemática*

(lineaciones paralelas a las trayectorias de flujo de la matriz). No obstante, el estudio detallado de la distribución de los ángulos  $\varepsilon$  que forman dichas lineaciones con la superficie del canto en casos reales demuestra que éstas sólo son compatibles con la segunda de ellas. La hipótesis *cinemática* es coherente con la transición continua que se observa en la realidad entre los distintos tipos de lineaciones (estilolitos, estrilolitos y estrias), mientras que la hipótesis *dinámica-friccional* prevé una discontinuidad entre ellas que se contradice con los datos empíricos.

Las distribuciones  $\alpha$ - $\varepsilon$  observadas en cantos reales estriados con patrón *radial* sugieren dos interpretaciones complementarias: (1) Con carácter general, las lineaciones de disolución registran las trayectorias de flujo de la matriz. (2) Con carácter particular, si la deformación se produce con notable reducción de volumen ( $e_1 \rightarrow 0$ ,  $e_2 \rightarrow 0$ ,  $\Delta V \rightarrow e_3$ ), la distribución se acerca a la diagonal  $\varepsilon = \alpha$ ; en esta situación extrema, las lineaciones se hacen totalmente paralelas entre sí en todo el entorno del canto.

En coherencia con este modelo, los procedimientos de análisis de este tipo de lineaciones deben excluir completamente la referencia al principio de Bott (1959). De su aplicación no podrá inferirse, por tanto, el tensor desviatorio de esfuerzos sino sólo la orientación el eje  $\sigma_1$ . Caben en la práctica dos opciones:

(a) Si se observan cantos completos (o al menos uno de sus hemisferios) y pueden identificarse los polos de disolución preferente y el patrón de lineaciones en todo

su contorno, el procedimiento más directo y fiable consiste en medir la orientación de los picos de disolución ortogonales en dichos polos. Se trata, por tanto, de aplicar el criterio y el procedimiento clásicos de análisis de picos estilolíticos. Si la deformación tiene una magnitud pequeña y no hay evidencia de componente rotacional, los ejes de deformación pueden considerarse paralelos a los ejes de esfuerzos y el resultado que obtenemos puede leerse, por tanto, en términos tanto cinemáticos como dinámicos.

(b) Si queda expuesta sólo una porción limitada de cada canto, sigue siendo útil la medición de las lineaciones que se observen, en la medida en que se compruebe la tendencia al paralelismo de las mismas. En tal caso, la media de todas las medidas en un afloramiento puede considerarse asimismo estadísticamente paralela a  $\sigma_1$ .

Sólo las estriaciones con patrón *unidireccional* claro (Fig. 1B) pueden considerarse como ‘microfallas’ a efectos de análisis y cabe aplicarles, en consecuencia, los métodos convencionales de análisis poblacional que permiten inferir el tensor desviatorio de esfuerzos. Si la estriación unidireccional afecta a un solo canto (sobre todo si éste tiene una forma aplanada), no puede descartarse la posibilidad de que nos encontremos ante un patrón radial fuertemente asimétrico debido a la oblicuidad de las caras planas del canto respecto a la dirección de máximo acortamiento. Por tanto, sería deseable que, al menos en algunas de las superficies estriadas, pudiera corroborarse su naturaleza de falla en sentido estricto comprobando que afectan uniformemente a caras planas de varios cantos contiguos y a porciones de matriz entre ellos.

### Agradecimientos

Agradezco la ayuda de A. Estévez y P. Alfaro en la selección de afloramientos de conglomerados deformados en la cuenca del Bajo Segura y en el conocimiento de su contexto tectónico, así como la de Gerardo de Vicente en la cuenca de Zaorejas (Guadalajara). J. Gómez revisó amablemente el Apéndice.

### Referencias

- Arthaud, F. y Mattauer, M. (1969): Exemples de stylolites d'origine tectonique dans le Languedoc, leurs relations avec la tectonique cassante. *Bulletin Société géologique de France*, 7: 738-744.
- Benito, G. y Casas, A.M. (1987): Small-scale deformations in Quaternary deposits in the northeastern Iberian peninsula. *Géologie Méditerranée*, 14: 233-243.
- Blake, D.B. y Roy, Ch.J. (1949): Unusual stylolites. *American Journal of Science*, 247: 779-790.
- Bott, M.H.P. (1959): The mechanics of oblique slip faulting. *Geological Magazine*, 96: 109-117.
- Combes, Ph. (1984): *La tectonique récente de la Provence occidentale: Microtectonique, caractéristiques dynamiques et cinématiques. Méthodologie de zonation tectonique et relations avec la sismicité*. Tesis doctoral, Univ. Louis Pasteur, Strasbourg, 182 p.
- Eidelman, A. y Reches, Z. (1992): Fractured pebbles –A new stress indicator. *Geology*, 20: 307-310.
- Estévez, A. y Sanz de Galdeano, C. (1980): La néotectonique des environs de la Sierra Arana (Prov. de Grenade). *Cuadernos de Geología*, 11: 7-29.
- Estévez, A. y Sanz de Galdeano, C. (1983): Néotectonique du secteur central des chaînes Bétiques (bassins de Gaudix-Baza et de Grenade). *Revue de Géographie physique et Géologie Dynamique*, 24: 23-34.
- Fry, N. (1979): Random point distributions and strain measurements in rocks. *Tectonophysics*, 60: 89-105.
- Gallagher, J.J., Friedman, M., Handin, J. y Sowers, G.M. (1974): Experimental studies relating to microfracture in sandstone. *Tectonophysics*, 21: 203-247.
- Gratier, J.P., Muquet, L., Hassani, R. y Renard, F. (2005): Experimental microstylolites in quartz and modeled application to natural stylolitic structures. *Journal of Structural Geology*, 27: 89-100.
- Hippolyte, J.C. (2001): Palaeostress and neotectonic analysis of sheared conglomerates: Southwest Alps and Southern Apennines. *Journal of Structural Geology*, 23: 421-429.
- Hoepfner, R., Brix, M. y Vollbrecht, A. (1983): Some aspects on the origin of fold-type fabrics –theory, experiments and applications. *Geologische Rundschau*, 72: 421-450.
- McEwen, T.J. (1981): Brittle deformation in pitted pebble conglomerates. *Journal of Structural Geology*, 3: 25-37.
- Petit, J.P., Raynaud, S. y Cautru, J.P. (1985): Microtectonique cassante lors du plissement d'un conglomérat (Mio-Pliocène du Haut Atlas –Maroc). *Bulletin Société géologique de France* (8) 1: 415-421.
- Ramberg, H. (1975): Particle paths, displacement and progressive strain applicable to rocks. *Tectonophysics*, 28: 1-37.
- Rodríguez-Pascua, M.A. y De Vicente, G. (1998): Análisis de paleoesfuerzos en cantos de depósitos conglomeráticos terciarios de la cuenca de Zaorejas (Rama castellana de la Cordillera Ibérica). *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 11: 169-180.
- Rossi, M., Vidal, O. y Wunder, B. (2005): Experimental study of deformation processes within an aggregate under isotropic conditions. EGU General Assembly, *Geophysical Research Abstracts*, 7: 02698.
- Ruano, P. (2003): *Estructuras tectónicas recientes en la transversal central de las Cordilleras Béticas*. Tesis doctoral, Univ. de Granada, 446 p.
- Ruano, P. y Galindo-Zaldívar, J. (2004): Striated and pitted pebbles as paleostress markers: an example from the central transect of the Betic Cordillera (SE Spain). *Tectonophysics*, 379: 183-198.
- Sanz de Galdeano, C. y Estévez, A. (1981): Estriaciones tectónicas en cantos de conglomerados. Su estudio en las depresiones de Granada y Guadix-Baza. *Estudios Geológicos*, 37: 227-232.
- Schrader, F. (1988): Symmetry of pebble-deformation involving solution pits and slip-lineations in the northern Alpine Molasse Basin. *Journal of Structural Geology*, 10: 41-52.
- Simón, J.L. (2006): El registro de la compresión intraplaca en los conglomerados de la cuenca terciaria de Aliaga (Teruel, Cordillera Ibérica). *Revista de la Sociedad Geológica de España* (en prensa).
- Taboada, A. (1993): Stress and strain from striated pebbles. Theoretical analysis of striations on a rigid spherical body linked to a symmetrical tensor. *Journal of Structural Geology*, 15: 1315-1330.
- Trumit, P. (1968): Pressure solution phenomena in detrital rocks. *Sedimentary Geology*, 2: 89-114.

**Apéndice**

**Cálculo teórico del ángulo de incidencia  $\varepsilon$  en el supuesto de flujo de la matriz por cizalla pura equiareal alrededor de un objeto circular o elíptico.**

*(1) Objeto circular*

Las trayectorias de movimiento en dos dimensiones de los puntos de una matriz sometida a cizalla pura equiareal, tal que  $e_x = e_2$ ,  $e_y = e_1$  y  $(1+e_1)(1+e_2) = 1$ , siguen la ecuación de la hipérbola simple (Fig. A-1A):

$$y = -\frac{1}{x}$$

Consideremos el punto de intersección  $(x_0, y_0)$  entre dicha hipérbola y una circunferencia centrada en el origen. Los ángulos  $\delta$  y  $\alpha$  que forman sus respectivas tangentes en dicho punto con el eje x (eje de máximo acortamiento) permiten definir el ángulo de incidencia  $\varepsilon$ :

$$\varepsilon = \alpha - \delta$$

De la Fig. A-1A se desprenden las siguientes relaciones entre estos ángulos:

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \alpha &= -\frac{x_0}{y_0} = -\frac{x_0}{-\frac{1}{x_0}} = x_0^2 \\ \operatorname{tg} \delta &= \left. \frac{dy}{dx} \right|_{x_0} = \frac{1}{x_0^2} = \frac{1}{\operatorname{tg} \alpha} \\ \operatorname{tg} \varepsilon &= \frac{\operatorname{tg} \alpha - \operatorname{tg} \delta}{1 + \operatorname{tg} \alpha \cdot \operatorname{tg} \delta} = \frac{\operatorname{tg} \alpha - \frac{1}{\operatorname{tg} \alpha}}{1 + \operatorname{tg} \alpha \cdot \frac{1}{\operatorname{tg} \alpha}} = \frac{\operatorname{tg}^2 \alpha - 1}{2 \operatorname{tg} \alpha} \\ &= -\frac{1}{\operatorname{tg} 2\alpha} = \operatorname{tg}(2\alpha - 90) \end{aligned}$$

Admitiendo, por definición, que  $\varepsilon$  y  $\alpha$  son ángulos agudos:

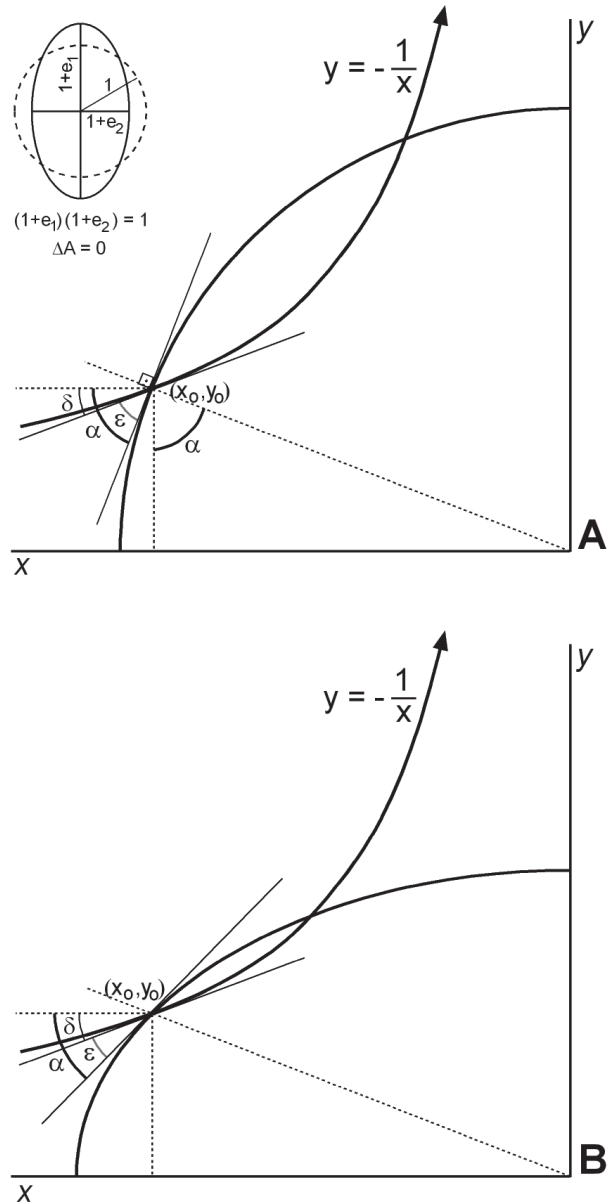
$$\varepsilon = 2\alpha - 90$$

*(2) Objeto elíptico*

En las mismas condiciones de deformación del caso anterior, las expresiones y relaciones entre los ángulos  $\delta$ ,  $\alpha$  y  $\varepsilon$  para una elipse de ejes  $a$  y  $b$  centrada en el origen son (Fig. A-1B):

$$\begin{aligned} \varepsilon &= \alpha - \delta \\ \operatorname{tg} \alpha &= -\frac{b^2 x_0}{a^2 y_0} = -\frac{b^2 x_0}{a^2 \left(-\frac{1}{x_0}\right)} = \frac{b^2}{a^2} x_0^2 \\ \operatorname{tg} \delta &= \left. \frac{dy}{dx} \right|_{x_0} = \frac{1}{x_0^2} \\ \operatorname{tg} \varepsilon &= \frac{\operatorname{tg} \alpha - \operatorname{tg} \delta}{1 + \operatorname{tg} \alpha \cdot \operatorname{tg} \delta} = \frac{\frac{b^2}{a^2} x_0^2 - \frac{1}{x_0^2}}{1 + \frac{b^2}{a^2} x_0^2 \cdot \frac{1}{x_0^2}} = \frac{\frac{b^2}{a^2} x_0^4 - 1}{x_0^2 \left(1 + \frac{b^2}{a^2}\right)} = \frac{\operatorname{tg}^2 \alpha \left(\frac{a^2}{b^2}\right) - 1}{\operatorname{tg} \alpha \left(\frac{a^2}{b^2} + 1\right)} \end{aligned}$$

En el caso particular de  $a = b$ , esta última expresión se reduce a la que hemos deducido anteriormente para el círculo.



**Figura A-1.-** Construcciones geométricas para la deducción de las expresiones que relacionan los ángulos  $\alpha$  y  $\varepsilon$ . Cada construcción representa un cuadrante de la sección de un objeto circular (A) o elíptico (B) y la trayectoria hiperbólica de movimiento de los puntos materiales en su entorno, bajo deformación continua por cizalla pura equiareal.

*Manuscrito recibido el 10 de marzo de 2006  
Aceptado el manuscrito revisado el 29 de mayo de 2006*