

Las bifurcaciones en diaclasas secundarias: geometría tridimensional (ejemplos de la Cuenca del Ebro)

Cross-joint forking: 3-D geometry (examples from the Ebro basin, Spain)

L. Arlegui y J. L. Simón.

Departamento de Geología, Universidad de Zaragoza, Plaza San Francisco, s.n., 50009-Zaragoza, España.
email: arlegui@posta.unizar.es

ABSTRACT

Forking is the process of fracture bifurcation into two or more diverging fracture planes. It occurs when a fracture reaches a critical velocity concomitant with its approach to a previous discontinuity. The literature gives a comprehensive 2-D description of forking, and this work presents a 3-D description of these structures. Outcrop observations suggest that the radiant line (line bounding the parent joint and the bifurcated fractures) is curve shaped (like fracture tip while propagation), and the angle between bifurcated fractures remains approximately the same all along the vertical dimension of the joint. This geometry results from the influence of both the previous perpendicular joint towards the parent joint forks and the lithologic boundary at top and bottom of the jointed layer.

Key Words: joint, forking, cross joint, Ebro basin

Geogaceta, 24 (1998), 23-26
ISSN: 0213683X

Introducción

Cuando observamos trazas de diaclasas sobre una superficie de estratificación podemos identificar determinados diseños geométricos que se han formado como consecuencia de la interacción de las diaclasas entre sí y con otras fracturas. Además de la información que nos pueden proporcionar sobre las pautas de propagación o las condiciones en que se formaron, también tienen aplicación en la determinación de la cronología relativa de los sistemas de fracturas: Es en campos ajenos a la Geología donde se han estudiado más a fondo los procesos de interacción entre fracturas en propagación, elaborándose modelos que son asimismo aplicables a las diaclasas naturales (Preston, 1926, 1935; Schardin, 1959; Bieniawski, 1966, 1968; Fréchet, 1972; Erdogan y Sih, 1963; Melin, 1983). En los últimos años se ha despertado el interés de los geólogos por este tema, íntimamente ligado a la fractografía. Las causas de este interés hay que buscarlas tanto en las connotaciones que este fenómeno tiene en aspectos aplicados (la conectividad entre fracturas, y por tanto la transmisividad hidráulica de los macizos rocosos) como en los aspectos puramente científicos (conocimiento del cam-

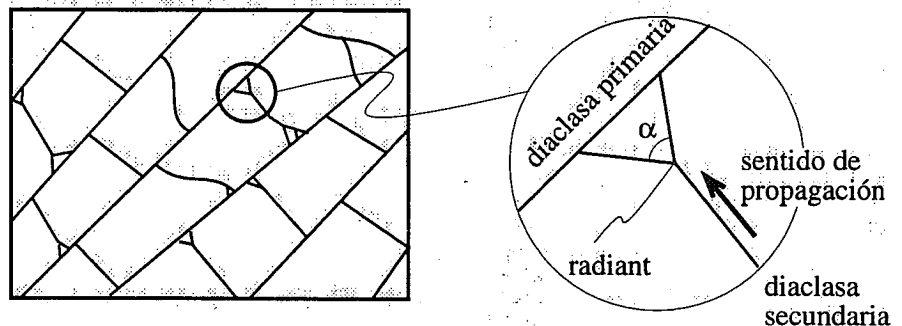


Fig. 1.- Tipos de interacción más frecuente entre diaclasas de distintas familias: ganchos y bifurcaciones. Derecha: elementos básicos de una bifurcación.

Fig. 1.- The more common structures originated by the interaction of joints belonging to different sets: hooks and forking. Right: basic elements in joint bifurcation.

po de esfuerzos remoto responsable de la fracturación y elaboración de modelos de perturbación de esfuerzos).

En la interacción entre diaclasas de diferentes familias aparecen diversos tipos de geometría (Kulander *et al.*, 1979; Bahat, 1987; Rives, 1992; Arlegui, 1996). Los más comunes (Fig.1) son los diseños curvos (producto de los giros en las trayectorias de propagación a los que acabamos de aludir) y las bifurcaciones. En la cuenca del Ebro existe una familia principal de diaclasas de dirección N-S (Arlegui y Simón, 1993), a la que se aso-

cia una familia secundaria E-W cuyos planos frecuentemente se interrumpen contra los anteriores (cross joints en el sentido de Hancock, 1985). En dichas intersecciones la relación que más frecuentemente se observa es la bifurcación o ramificación de las diaclasas E-W.

Origen mecánico del fenómeno de bifurcación

A partir de observaciones experimentales en materiales diversos se ha comprobado que la aparición de bifurcaciones

guarda una íntima relación con la velocidad de propagación de las fracturas (Bieniawski, 1966; Kulander *et al.*, 1979). Al alcanzar una velocidad crítica (que es función de las características reológicas del material) la fractura se bifurca, terminando la propagación estable de la misma. Preston (1935), a partir de experiencias sobre fracturas en vidrio, había ya descrito una interesante relación entre los valores de σ_1 y σ_3 y el ángulo de bifurcación, α (ángulo entre dos fracturas ramificadas a partir de un radiant.). Según este autor, a mayor relación σ_3/σ_1 menor es el ángulo de bifurcación. El hecho de que los radiants (puntos en los que las fracturas inician la bifurcación) se sitúan siempre en las proximidades de otra fractura sugiere que la existencia de una superficie libre en la roca propicia precisamente las condiciones de esfuerzo diferencial y velocidad de propagación necesarias para la bifurcación. También las inhomogeneidades reológicas de detalle parecen ejercer un cierto control. Se ha documentado en la literatura la escasez o inexistencia de bifurcaciones en determinados estratos; el hecho de que algunas rocas contengan una alta cantidad de «defectos» (microgrietas, poros, pequeños nódulos, etc.) puede explicar esta situación. Estos defectos dan lugar a que disminuya la energía elástica almacenada en la roca aminorando de este modo la velocidad de propagación (Kulander *et al.*, 1979).

En virtud de todo esto, las bifurcaciones pueden proporcionarnos información interesante sobre el desarrollo del diaclasado: (1) un criterio de cronología relativa; (2) una aproximación al valor de la relación σ_3/σ_1 ; (3) el sentido de propagación, y (4) una aproximación a la velocidad de propagación.

Bifurcación y definición de familias de diaclasas

No obstante lo anterior, en el terreno de la definición estadística de familias a partir de las mediciones de campo, las bifurcaciones constituyen una fuente potencial de problemas. Obviamente, sea cual sea el mecanismo que las produce, éstas deben atribuirse a un único evento de fracturación. Por tanto, debe tenerse un cuidado especial para no confundirlas con familias distintas de diaclasas tensionales atribuibles a sucesivos episodios de esfuerzos, o bien a supuestos sistemas conjugados de planos de cizalla. En este sentido, la figura 2 muestra un ejemplo especialmente significativo. En la curva suavizada de frecuencias

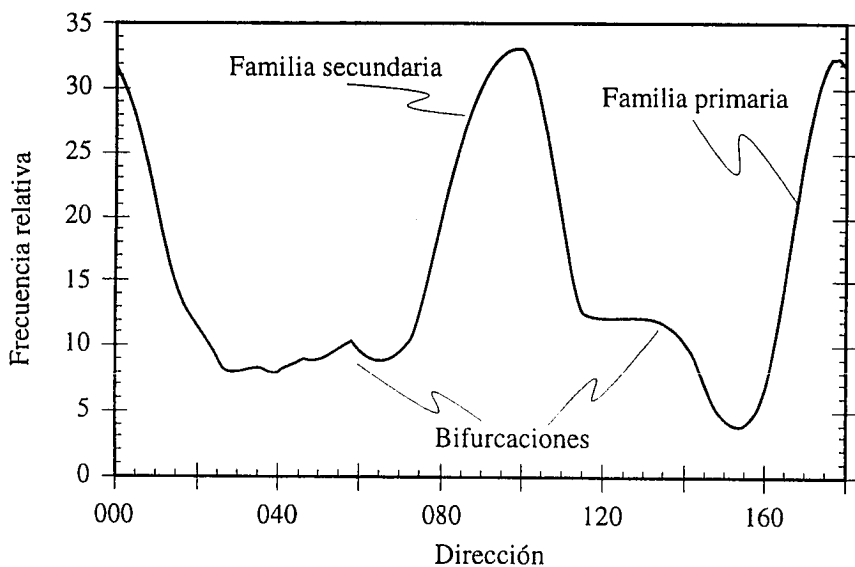


Fig. 2.- Curva de frecuencias típica de las direcciones de diaclasas en el Mioceno inferior de la Cuenca del Ebro (estación en el área del Barranco de Tudela, Navarra). Explicación en el texto.

Fig. 2.- Frequency plot of joint strikes in the Lower Miocene of the Ebro basin (station in the Barranco de Tudela, Navarra). See main text.



Fig. 3.- Aspecto de campo de las trazas de bifurcaciones en «reloj de arena» sobre una diaclasa primaria N-S. La fotografía está tomada desde el este, sentido en el que se propagan y bifurcan las diaclasas secundarias E-W.

Fig. 3.- Field view of some E-W joints forking in the plane of a primary N-S trending joint. Photograph was taken from the East, the same sense of propagation and bifurcation of secondary E-W joints.

(correspondiente a un afloramiento situado en el sector del Barranco de Tudela, Navarra) se observa la presencia de dos familias de diaclasas: una N-S, primaria, y otra E-W, formada por típicas cross

joints. En torno a la dirección E-W se aprecian en realidad varios máximos relativos: 060, 097 y 128. Una primera interpretación podría suponer que las fracturas 097 son tensionales, mientras las

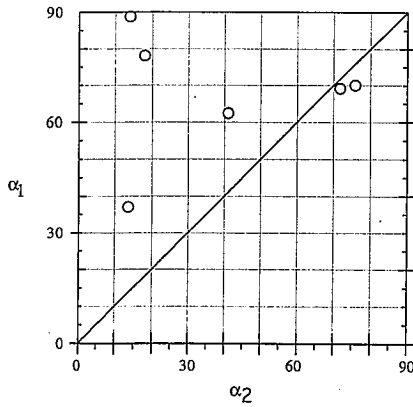


Fig. 4.- Comparación entre los ángulos de bifurcación de diaclasas E-W cerca del techo o muro de la capa (α_1) y en la parte central (α_2), para varios casos estudiados en el afloramiento de la figura 3.

Fig. 4.- Scatter plot of bifurcation angles near the lithological boundaries of a jointed layer (α_1) and in its central part (α_2) in the same outcrop of figure 3.

otras dos son fracturas de cizalla conjugadas, todas ellas compatibles con un esfuerzo horizontal máximo próximo a E-W. Sin embargo, nuestras observaciones de campo indican que las fracturas ENE y ESE se enraizan siempre en otras de dirección E-W, pudiendo interpretarse por tanto como resultado de un proceso de bifurcación. Obviamente, la discriminación entre las diferentes posibilidades depende de la calidad de los afloramientos. En un afloramiento en el que se puedan observar las trazas de las fracturas sobre una superficie de estratificación será inmediato identificar la presencia de bifurcaciones y la orientación "verdadera" de la familia de diaclasas secundaria.

Geometría tridimensional de la bifurcación

En algunos afloramientos del Barranco de Tudela hemos tenido la ocasión de observar otro aspecto geométrico de la bifurcación. Mientras las descripciones de este fenómeno se realizan generalmente a partir de observaciones bidimensionales en las superficies de estratificación, estos afloramientos proporcionan exposiciones tridimensionales. En uno de ellos (coordenadas 30TXM251617) una capa de caliza de 2.5 metros de espesor aparece afectada por dos familias de diaclasas, una primaria de dirección N-S y otra secundaria de dirección E-W. La familia secundaria se bifurca al propagarse hasta las cercanías de la familia primaria, de forma que sobre las superficies de diaclasa

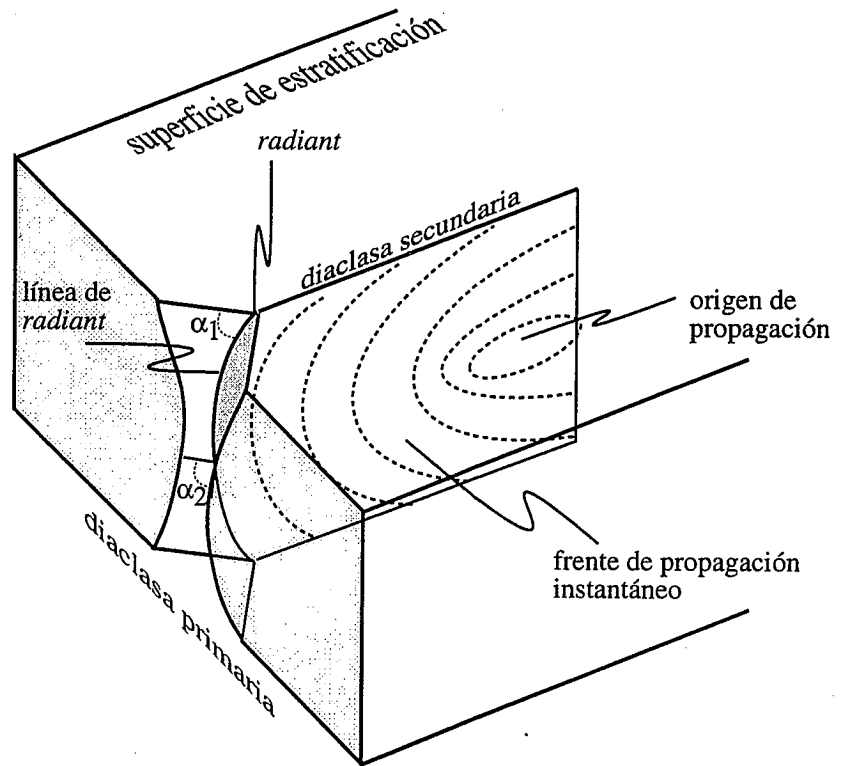


Fig. 5.- Modelo tridimensional propuesto para las bifurcaciones con geometría en «reloj de arena» (ver discusión en el texto).

Fig. 5.- 3D model for joint forking with "sandglass" geometry (see main text for discussion).

N-S no se observa una traza única de cada diaclasa E-W sino varias. Ahora bien, la distancia entre trazas es sistemáticamente mayor cerca del muro y techo de la capa y disminuye hacia el centro, lo cual confiere a la estructura, vista en sección vertical, una geometría en reloj de arena (Fig. 3).

Esta geometría podría obedecer a dos razones: (a) que el ángulo de bifurcación α tenga un valor mayor en el techo y muro de la capa que en el centro, en virtud de inhomogeneidades de la relación de esfuerzos σ_3/σ_1 inducidas por las interfaces litológicas. (b) que el ángulo α se mantenga, pero la distancia del radiant a la diaclasa N-S sea mayor cerca de los planos de estratificación, de forma que cuando las superficies bifurcadas alcanzan la diaclasa primaria la distancia entre ellas se habrá hecho también mayor. Sobre el afloramiento estudiado hemos medido las orientaciones de los planos bifurcados en un total de cinco estructuras en «reloj de arena», calculando a partir de ellas los ángulos diedros de bifurcación en las partes externas (α_1) y en la parte central (α_2). Los resultados (Fig. 4) muestran que cuatro de las seis medidas ambos ángulos son similares, mientras en las otras dos α_1 es mucho mayor que α_2 .

Por otra parte, las dos hipótesis geométricas contempladas tienen implicaciones distintas respecto a la forma de la línea de radiant, línea que une los puntos de radiant y que coincide, por tanto, con la intersección de las superficies bifurcadas entre sí y con la diaclasa principal. La primera posibilidad supone que dicha línea puede ser recta y paralela a la diaclasa primaria. La segunda comporta que la línea de radiant sea necesariamente curva, con una inclinación hacia la diaclasa primaria en la parte alta, orientación subvertical en el centro e inclinación contraria en la parte baja (Fig. 5). En nuestro caso las líneas de intersección entre superficies bifurcadas se ajustan perfectamente a este segundo modelo: inmersiones al este (en el mismo sentido en que se propagan las diaclasas secundarias analizadas) cerca del techo del estrato, e inmersiones contrarias o líneas de corte subverticales en las partes media y baja. En algunos casos las inclinaciones de las líneas de radiant son incluso inferiores a 30°.

Con todo ello, nuestra interpretación de la geometría de bifurcaciones en «reloj de arena» se inclina más a la segunda opción, reflejada gráficamente en la figura

5. Según ella, la bifurcación se habría producido con un ángulo α similar a lo ancho de la capa, pero iniciándose en una línea de radiant curva, próxima probablemente a lo que es el propio frente de propagación de la diaclasa. Este último aspecto sugiere que las condiciones de bifurcación se alcanzan casi simultáneamente en todos los puntos de dicho frente, y que el fenómeno es esencialmente isócrono.

Conclusiones

Las bifurcaciones en diaclasas secundarias constituyen una fuente considerable de información sobre las condiciones de esfuerzo que condujeron a la fracturación, las pautas y velocidades de propagación de las fracturas, así como una herramienta de determinación de cronología relativa entre familias. En el campo se ha de tener en cuenta la posibilidad de su presencia, sobre todo en afloramientos de escasa calidad, toda vez que pueden conducir a conclusiones erróneas sobre el número de familias de diaclasas presentes, así como a malinterpretaciones en la determinación de su relación con los ejes de esfuerzo.

Las bifurcaciones aumentan la densidad local de fracturación, modificando la conductividad hidráulica del macizo. En este sentido es interesante constatar que la bifurcación no sólo se presenta en relación con la presencia de fracturas previas, que actúan como superficies libres, sino también en las proximidades de las super-

ficies de discontinuidad litológica. Los modelos que se elaboran para evaluar la porosidad por fracturación han de tener en cuenta el incremento en la densidad de fracturación (y por tanto en la conductividad hidráulica) en su aspecto tridimensional, en virtud de las bifurcaciones por interacción entre dos o más familias de diaclasas y de éstas con la estratificación.

La influencia de las superficies de estratificación sobre la geometría tridimensional de la bifurcación puede ser considerable. Su presencia induce modificaciones en las condiciones de propagación de la diaclasa que se suman a las producidas por otras diaclasas previas. El resultado, en los casos estudiados por nosotros en la Cuenca del Ebro, es que los puntos de bifurcación (radiants) dibujan una línea curva que se aproxima a la forma del frente de propagación de la diaclasa, lo que supone que el fenómeno de bifurcación sería casi simultáneo en todo él. Como consecuencia de ello, cuando las superficies bifurcadas cerca del techo y muro de la capa alcanzan la diaclasa primaria se encuentran más alejadas entre sí que cuando se propagan por el centro de la misma, lo que da lugar a lo que hemos denominado geometría de bifurcación en «reloj de arena».

Referencias

Arlegui, L.E., (1996): *Tesis Doctoral*, Univ. de Zaragoza, 308 pp y anexos.

Arlegui, L.E., Simón, J.L., (1993): *Rev. Geol. Soc. Esp.*, 6 (1/2): 115-123
 Bahat, D., (1987): *Tectonophysics*, 136: 299-321.
 Bieniawski, Z.T., (1966): *Mechanism of rock fracture in compression*. Report of the South African Council of Scientific and Industrial research, No. MEG 459.
 Bieniawski, Z.T., (1968): *Felsmech. Ingenieurgeol.*, 6: 113-125.
 Erdogen, F., y Sih, G.C., (1963): *Jour. Basic Engineering*, 85: 519-527.
 Frechette, V.D., (1972): The fractology of glass. In: Pye, L. (Ed.): *Introduction to glass science*. Plenum Press, New York, 433-450.
 Hancock, P.L., (1985): *Jour. Struct. Geol.*, 7: 437-457.
 Kulander, B.R.; Barton, C.C. y Dean, S.L., (1979): *The application of fractography to core and outcrop fracture investigations*. U.S. Dept. of Energy, Morgantown Energy Technology Center, MET/SP-79/3. 174p.
 Melin, S., (1983): *Intern. Jour. Fracture*, 23: 37-45.
 Preston, F.W., (1926): *Jour. Soc. Glas Tech.*, 10: 234-269.
 Preston, F.W., (1935): *Jour. American Ceram. Soc.*, 18: 175-176.
 Rives, T., (1992): *Thèse de Doctorat*, Université des Sciences et Techniques de Languedoc, Montpellier II. 250pp.
 Schardin, H., (1959): Velocity effects in fracture. En Averbach, B.L., et al. (Eds.): *Fracture*. New York, John Wiley and Sons, p. 297-329.