

Análisis estructural de los mármoles de la banda metamórfica de Aracena (Macizo Ibérico meridional). Implicaciones tectónicas regionales

Structural analysis of marbles from the Aracena metamorphic belt (southern Iberian Massif). Regional tectonic implications

M. Díaz Azpiroz⁽¹⁾ y C. Fernández⁽²⁾

⁽¹⁾ AYESA. Pabellón de Checoslovaquia. Isla de La Cartuja, 41092, Sevilla

⁽²⁾ Departamento de Geodinámica y Paleontología (U. Huelva). Campus La Rábida, Palos de la Frontera, 21819 Huelva

ABSTRACT

The structural analysis of marbles from the Aracena metamorphic belt has proven to be very useful to deduce the structure and the tectonic evolution of the continental domain of this belt, which, in turn, is a key area in the understanding of the Iberian Massif and the Variscan Belt. The layering of the marbles from the continental domain (DC-S₀) is defined by a compositional banding along with several boudinaged calc-silicate and amphibolitic layers. The morphology of these boudins implies that the calc-silicate and amphibolitic layers are much more competent than the surrounding marble. Also, the boudinage structures suggest that they were formed by stretching parallel to the layering, probably related to axial flattening (DC-D₂). Both the layering and the main metamorphic foliation (DC-S₂) generated during DC-D₂ were affected by open folds of the third deformational event (DC-D₃) and later, by shear zones developed during the last ductile event recorded in the continental domain (DC-D₄), which gave place to a tectonic breccia of rigid calc-silicate clasts surrounded by a ductile marble matrix.

Key words: Iberian Massif, Aracena metamorphic belt, marble, boudin

Geogaceta, 31 (2002), 119-122

ISSN:0213683X

Introducción

Estudios recientes acerca de la banda metamórfica de Aracena han aportado información de gran interés geológico en relación con la evolución de la Cadena Varisca, así como acerca de los procesos petrológicos y tectónicos que toman parte en la generación de orógenos. De particular relevancia ha resultado el análisis estructural llevado a cabo en esta zona de especial complejidad del Macizo Ibérico. El presente trabajo es parte del mencionado estudio, y en él se analizan las estructuras encontradas en los mármoles del dominio continental de la banda metamórfica de Aracena.

La banda metamórfica de Aracena (BMA) es una banda estrecha (algunas decenas de kilómetros de ancho) y larga (más de 100 km de longitud) localizada en el contacto entre las zonas de Ossa-Morena (ZOM) y Surportuguesa (ZSP), en el extremo suroccidental del Macizo Ibérico (Fig. 1). De acuerdo con la división propuesta por Castro *et al.*

(1999), en la BMA se distinguen dos grandes dominios: uno de afinidad oceánica al sur (dominio oceánico, DO), y otro septentrional constituido por rocas eminentemente continentales (dominio continental, DC). El primero de estos dominios está constituido por las metabasitas de Acebuches y por los esquistos del terreno del Pulo do Lobo. Por su parte, en la zona meridional del DC se han encontrado rocas metamórficas de alto grado de muy diversa naturaleza, las cuales han sido distribuidas en dos series principales atendiendo a criterios litológicos y estructurales (Díaz Azpiroz, 2001). La serie aluminica está definida por gneises y migmatitas de origen pelítico, mientras que la serie calcomagnesiana está formada por gneises leucocráticos, rocas de silicatos cálcicos, anfíbolitas y mármoles. La serie calcomagnesiana pudo tener su origen en una sucesión vulcanosedimentaria bimodal asociada a un proceso de *rifting* continental durante el período Cámbrico - Silúrico.

Descripción de los mármoles de la BMA

Los mármoles del DC de la BMA suelen aparecer en el muro de la serie calcomagnesiana, en bandas de longitud hectométrica, de decenas de metros de potencia y habitualmente plegadas. Estos mármoles han sido correlacionados con las formaciones carbonatadas del Cámbrico inferior situadas entre la serie pelítica precámbrica y la serie vulcanosedimentaria (Bard, 1969). Además de éstos, es habitual encontrar intercalaciones de potencia métrica dentro de las rocas de silicatos cálcicos.

El mineral carbonatado mayoritario de los mármoles de la BMA es la dolomita (Chacón Muñoz *et al.*, 2001). No obstante, estos mármoles son, por lo general, bastante impuros, de forma que, además de los minerales carbonatados que constituyen la mayor parte de la roca, presentan una serie de minerales calcomagnesianos, los cuales pueden aparecer como fases minoritarias o accesorias. Así, la paragénesis fundamental de los mármoles de la BMA es la siguiente:

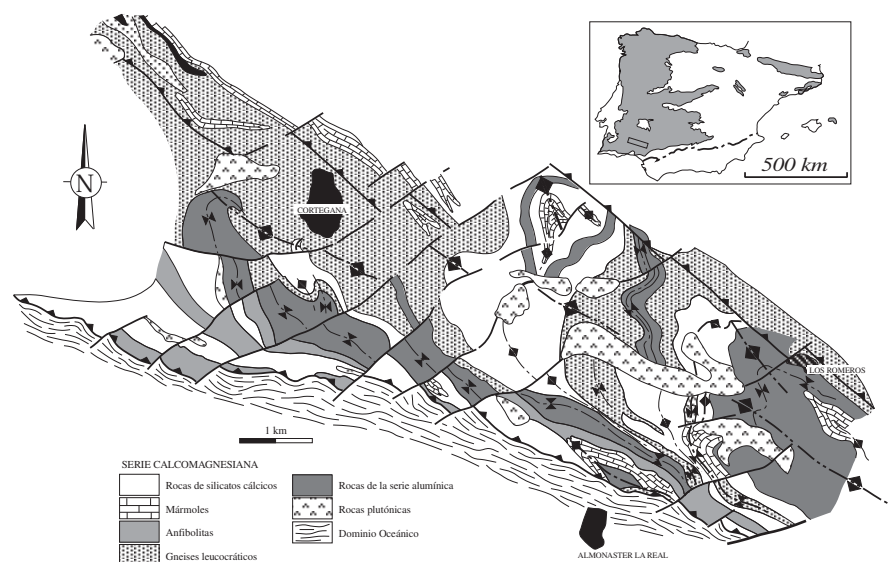


Fig. 1.- Mapa de la zona de alto grado de la banda metamórfica de Aracena en el que se muestran los afloramientos más importantes de mármoles.

Fig. 1.- Map of the high grade zone of the Aracena metamorphic belt with the main marble outcrops.

Dol + Cal $\pm$ Di $\pm$ Pl $\pm$ Amp $\pm$ Ol $\pm$ Wo $\pm$ Ttn

La mayor parte de los mármoles estudiados contienen diópsido y olivino, lo cual indica que sufrieron un metamorfismo en la facies de las anfibolitas. Se han encontrado, asimismo, mármoles con wollastonita, los cuales alcanzaron temperaturas en torno a los 800 °C.

Los mármoles de la BMA presentan un bandeo composicional en el que se distinguen bandas más puras (muy ricas en carbonatos, con cantidades muy inferiores de minerales calcomagnesianos) y otras con gran abundancia de plagioclasa y clinopiroxeno, y proporciones menores de carbonatos. Paralelas a esta estratificación se han encontrado bandas centimétricas de rocas de silicatos cálcicos y anfibolitas, que han sido interpretadas como intercalaciones de rocas volcánicas en una serie carbonatada (Crespo-Blanc, 1991; Díaz Azpiroz, 2001). La mineralogía de las bandas de rocas de silicatos cálcicos, con anfíbol, diópsido y, en ocasiones, ortopiroxeno, indica que estas rocas estuvieron sometidas a altas temperaturas. Las bandas de anfibolita presentan una mineralogía con plagioclasa y anfíbol.

Estructuras observadas en los mármoles de la BMA

De acuerdo con lo expresado anteriormente, el bandeo composicional de los mármoles, así como la intercalación de rocas de silicatos cálcicos y anfibolitas en los mismos constituyen la estratificación original de la serie y la foliación más antigua

del DC. En consecuencia, denominamos a esta estructura DC-S₀. Paralelamente a dicho bandeo se aprecia una foliación definida por «trenes» de clinopiroxeno, anfíbol olivino y/o menas, así como por la orientación de los mismos. Asimismo, las bandas de rocas de silicatos cálcicos y de anfibolitas presentan una foliación interna definida por la orientación de los minerales ferromagnesianos, la cual es paralela al contacto de cada banda y a la foliación de los mármoles. Estas constituyen una foliación metamórfica de alta temperatura equivalente a la foliación principal descrita en el DC (DC-S₂), generada durante las dos primeras fases de deformación que afectaron a dicho dominio (Díaz Azpiroz *et al.*, en prep.). El hecho de que la foliación metamórfica de los mármoles sea paralela a la estratificación indica la gran intensidad de la deformación que dio lugar a dicha foliación. La ausencia de evidencias de una foliación metamórfica anterior DC-S₂ se explica si se tiene en cuenta la facilidad con la que la calcita y la dolomita recrystalizan estáticamente, incluso en condiciones de metamorfismo de bajo grado (Schmid, 1982; Schmid *et al.*, 1987). Esto hace muy difícil que se preserven estructuras de deformación en los mármoles, especialmente a altas temperaturas, como es el caso de la BMA.

Es habitual que las bandas de rocas de silicatos cálcicos y de anfibolitas que aparecen interestratificadas en los mármoles se encuentren en forma de *boudins* (Fig. 2a). En estos *boudins* se aprecia la presencia de una textura granoblástica bien

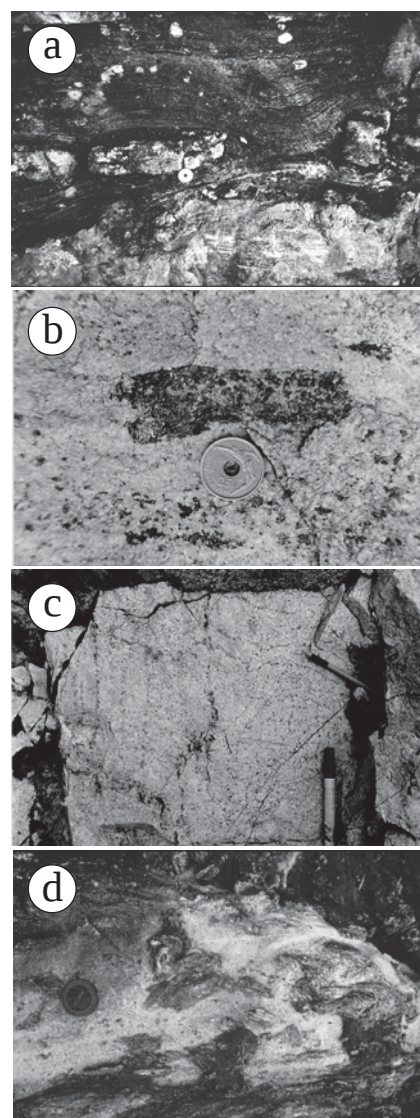


Fig. 2.- Fotografías en las que se muestran distintas estructuras observadas en los mármoles. (a) Estratificación definida por intercalaciones de *boudins* de rocas de silicatos cálcicos. Se aprecia la morfología rectangular de los *boudins* así como el desarrollo de «pliegues de estrangulamiento» en los «cuellos» de los mismos. (b) Detalle de un *boudin* de roca de silicatos cálcicos en el que se aprecia el borde en forma de «boca de pez». (c) La foliación metamórfica principal de los mármoles afectada por pliegues abiertos, asociada a los cuales se desarrolla una foliación de plano axial subvertical. (d) Brecha tectónica constituida por bloques rígidos de rocas de silicatos cálcicos rodeados por una matriz dúctil de mármol.

Fig. 2.- Photographs showing different structures observed in the marbles. (a) Layering defined by intercalated calc-silicate rocks boudins. It can be observed the rectangular morphology of the boudins and the scar folds developed in their necks. (b) Detailed photograph of a barrel shaped boudin. (c) The main metamorphic foliation of the marbles is affected by open folds. Associated with these folds a vertical axial plane foliation develops. (d) Tectonic breccia with rigid calc-silicate clasts surrounded by a ductile marble matrix.

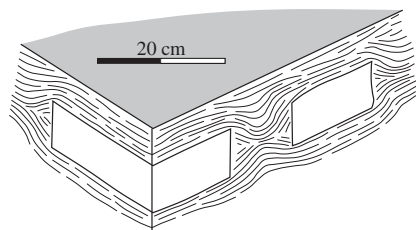


Fig. 3.- Esquema en el que se muestra una estructura en «tableta de chocolate» definida por intercalaciones de rocas de silicatos cálcicos en los mármoles.

Fig. 3.- Line-drawing showing a chocolate tablet boudinage defined by calc-silicate intercalations within the marbles.

desarrollada, así como plagioclasas con estructuras *core-mantle*, generadas mediante recrystalización dinámica. Normalmente, los *boudins* de rocas de silicatos cálcicos y anfibolitas presentan secciones rectangulares (Fig. 2a) y, ocasionalmente, muestran límites en «boca de pez» (Fig. 2b). Cuando la foliación del mármol en el «cuello» de un *boudin* es reconocible, ésta suele definir «pliegues de estrangulamiento» (Fig. 2a). En algunos afloramientos se han encontrado estructuras de tipo *boudinage* en «tableta de chocolate» (Fig. 3)

En los mármoles de la BMA, tanto DC-S₀ como DC-S₂ se encuentran afectadas por pliegues abiertos (ángulo entre flancos entre 45° y 150°) con planos axiales subverticales (Fig. 2c). No es habitual que en estos pliegues se desarrolle una foliación paralela al plano axial. No obstante, en un afloramiento cercano a Santa Ana La Real se ha observado la presencia de una foliación de plano axial subvertical asociada a estos pliegues, definida por la orientación de anfíboles (Fig. 2c). De acuerdo con Díaz Azpiroz (2001), estos pliegues abiertos fueron generados durante la tercera fase de deformación que afectó al DC (DC-D₃).

Esporádicamente, se han encontrado brechas formadas por una gran cantidad de cantos de rocas de silicatos cálcicos rodeados por una matriz de mármol (Fig. 2d). Los cantos de rocas de silicatos cálcicos presentan una fuerte deformación interna, con desarrollo de foliación milonítica. Junto a estas brechas, se han observado niveles de rocas de silicatos cálcicos con una foliación milonítica muy penetrativa.

Discusión

Generación de las estructuras de *boudinage*

Tanto las bandas de rocas de silicatos cálcicos y de anfibolitas como los mármo-

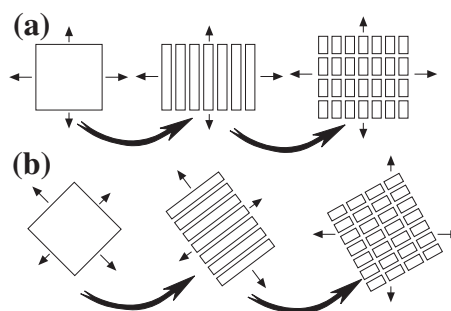


Fig. 4.- Representación esquemática en la que se muestran dos de los mecanismos propuestos por Ghosh (1988) para el desarrollo de estructuras en «tableta de chocolate». (a) Desarrollo de dos juegos de *boudins* perpendiculares generados por aplastamiento. (b) Desarrollo de una estructura en «tableta de chocolate» por la superposición de dos fases de deformación.

Fig. 4.- Schematic representation of two of the mechanisms proposed by Ghosh (1988) for the development of chocolate tablet boudinage. (a) Development of two sets of mutually perpendicular boudins in flattening type of strain. (b) Development of chocolate tablet boudinage in superposed deformations.

les en los que se encuentran intercalados sufrieron un metamorfismo de alta temperatura asociado a una deformación intensa. Sin embargo, la respuesta de cada una de las rocas a dicha deformación fue diferente, siendo el comportamiento de los mármoles mucho más dúctil que el de las intercalaciones ferromagnesianas. De esta forma, los mármoles fluyeron alrededor de las bandas de rocas de silicatos cálcicos y anfibolitas, las cuales, debido a la intensidad de la deformación, rotaron hasta paralelizarse con la foliación metamórfica DC-S₂. Posteriormente, y debido a un fuerte estiramiento paralelo a las capas, las bandas ferromagnesianas sufrieron un proceso de *boudinage* (véase Holmquist, 1930, 1931; Corin, 1932; Wegmann, 1932). Al mismo tiempo, en el interior de los *boudins* tuvo lugar una deformación en estado sólido, probablemente con un comportamiento dúctil-frágil. La diferencia de competencia entre los mármoles y las bandas de rocas de silicatos cálcicos y anfibolitas queda evidenciada por la morfología rectangular de los *boudins* generados (Ramberg, 1955; Griggs y Handin, 1960; Ramsay, 1967; Ramsay y Huber, 1987; Ghosh, 1988, 1993).

Los límites en forma de «boca de pez» y los «pliegues de estrangulamiento» se forman una vez generado el *boudin*. En ese momento, el material dúctil (el mármol) fluye hacia el «cuello» del *boudin*, dando lugar a lo que Whitten (1966) denominó «pliegues de estrangulamiento». Este flujo del material incompetente genera una deformación por cizalla simple heterogénea, más intensa en el límite del *boudin* que en el interior del mismo. Como

consecuencia, los límites del *boudin* se alargan y acaban involucrados en la formación de los «pliegues de estrangulamiento», de modo que se curvan hacia adentro, dando lugar a la formación del límite en «boca de pez» (Wegmann, 1932; Ramberg, 1955).

Las estructuras en «tableta de chocolate» (Fig. 4) se pueden producir por la superposición de dos deformaciones (Ramsay y Huber, 1987), ya sean éstas correspondientes a un aplastamiento o a una extensión uniaxial (Ghosh, 1988, 1993), o como consecuencia de una deformación en el campo del aplastamiento, lo que implica estiramiento según dos de los ejes principales de la elipse de la deformación (Ramsay y Huber, 1983; Ghosh, 1993). En este último caso, los dos juegos de fracturas que definen este tipo de estructuras no se pueden desarrollar de forma simultánea (Ramsay, 1967; Sanderson, 1974; Ghosh, 1988). Según la teoría y los experimentos desarrollados por Ghosh en 1988, en un régimen de aplastamiento en el que los esfuerzos distensivos son distintos entre sí (Fig. 4a), el primer juego de fracturas se produce con una orientación perpendicular al esfuerzo de máxima distensión. La aparición de este primer juego de fracturas altera la distribución del esfuerzo en la capa competente, lo que provoca la aparición de un segundo juego de fracturas. Por lo tanto, independientemente del proceso de formación, la geometría del segundo juego de *boudins* y, por tanto, la morfología de la estructura en «tableta de chocolate», está influenciada por la geometría del juego formado en primer lugar (Ghosh, 1988).

Implicaciones regionales

Las estructuras de *boudinage* descritas en los mármoles fueron generadas durante DC-D₂, y responden, como ya se ha comentado, a una deformación consistente en un estiramiento paralelo a la foliación, probablemente asociado a un aplastamiento axial. Análisis de fábricas cristalográficas de ejes *c* de cuarzo en gneises leucocráticos del DC (Díaz Azpiroz y Fernández Rodríguez, en prep.) parecen confirmar que la segunda fase de deformación que tuvo lugar en el DC de la BMA consistió en un aplastamiento axial.

Posteriormente, tanto la estratificación como la foliación metamórfica principal de los mármoles fueron afectadas por pliegues abiertos generados durante la tercera fase de deformación (DC-D₃), los cuales plegaron, asimismo, a la foliación metamórfica de alta temperatura observada en el resto de litología del DC (Díaz Azpiroz, 2001; Díaz Azpiroz *et al.*, en prep.).

Las brechas de mármoles con cantos de rocas de silicatos cálcicos son brechas tectónicas generadas, probablemente, por la actuación de zonas de cizalla asociadas a la última fase de deformación dúctil descrita por Díaz Azpiroz (2001) en el DC (DC-D₄). Originalmente, el protolito de estas brechas sería una serie de mármoles con intercalaciones, probablemente *boudins*, de rocas de silicatos cálcicos. La aplicación de una deformación por cizalla a estas rocas, en condiciones de metamorfismo medio a alto, produjo la milonitización dúctil de todo el conjunto. Sin embargo, a medida que la temperatura fue descendiendo, las condiciones de la deformación se hicieron frágiles para las rocas de silicatos cálcicos, mientras que para los mármoles continuaban siendo dúctiles. En semejante contexto,

los niveles milonitizados de rocas de silicatos cálcicos intercalados en los mármoles se fracturaron y se movieron a modo de «enclaves», en una matriz de mármol que fluía dúctilmente.

Conclusiones

El análisis estructural llevado a cabo en los mármoles de la BMA ha sido una herramienta fundamental a la hora de deducir la evolución tectónica del DC, y ha servido para identificar muchas de las fases de deformación que afectaron a dicho dominio. Los mármoles estudiados presentan un bandeo composicional y una estratificación definida por *boudins* de rocas de silicatos cálcicos y anfibolitas (DC-S₀). La morfología de estos *boudins* sugiere un gran contraste de competencias entre los mármoles y las rocas de silicatos cálcicos y anfibolitas. Asimismo, estas estructuras pueden responder a una deformación (DC-D₂) por aplastamiento axial con estiramiento paralelo a las capas. Tanto la estratificación como la foliación metamórfica de alta temperatura de los mármoles fueron afectadas por pliegues abiertos de la tercera fase de deformación del DC (DC-D₃). Finalmente, algunos mármoles fueron deformados por zonas de cizalla asociadas a la última fase de deformación dúctil (DC-D₄), dando lugar al desarrollo de brechas tectónicas consistentes en una matriz dúctil de mármol englobando a cantos rígidos de rocas de silicatos cálcicos.

Agradecimientos

Este trabajo es parte de la Tesis Doctoral de Manuel Díaz Azpiroz, la cual ha sido financiada con una beca FPI del MEC (FP94-52263949), por el proyecto PB94-1085 y por la Universidad de Huelva.

Referencias

- Bard, J.P. (1969): *Thèse d'Etat*, Université de Montpellier, 397 p.
- Castro, A., Fernández, C., El-Hmidi, H., El-Biad, M., Díaz, M., de la Rosa, J.D., y Stuart, F. (1999): *Inter. Jour. Earth Sci.*, 88, 26-37.
- Chacón Muñoz, H., Fernández Rodríguez, C., Fernández Caliani, J.C. y Moreno-Ventas Bravo, I. (2001): XXI Reunión de la S.E.M., Málaga.
- Corin, F. (1932): *Bull. Soc. Belge. Géol.*, 42, 101-117.
- Crespo-Blanc, A. (1991): *Tesis Doctoral*, U. Granada, 327 p.
- Díaz Azpiroz, M. (2001): *Tesis Doctoral*, U. Huelva, 556 p.
- Ghosh, S.K. (1988): *Jour. Struct. Geol.*, 10, 541-553.
- Ghosh, S.K. (1993): Pergamon, 598 p.
- Griggs, D. y Handin, J. (1960): *Geol. Soc. Amer. Mem.*, 79: 382 pp.
- Holmquist, P.J. (1930): *Geol. För. Stoc. kh. Förh.*, 52, 357-365.
- Holmquist, P.J. (1931): *Geol. För. Stoc. kh. Förh.*, 53, 193-208.
- Ramberg, H. (1955): *Jour. Geol.*, 63: 512-526.
- Ramsay, J.G. (1967): McGraw-Hill, 591 p.
- Ramsay, J.G. y Huber, M.I. (1983): Academic Press, 307 p.
- Ramsay, J.G. y Huber, M.I. (1987): Academic Press, 393 p.
- Sanderson, D.J. (1974): *Jour. Geol.*, 82, 651-661.
- Schmid, S.M. (1982): En *Mountain Building Processes*, Hsü, K. J. (Ed.), Academic Press. 95-110.
- Schmid, S.M., Zingg, A. y Handy, M. (1987): *Tectonophysics*, 135, 47-66.
- Wegmann, E. (1932): *Bull. Soc. Géol. France*, 2, 477-489.
- Whitten, E.H.T. (1966): Rand McNally & Co., 680 p.