

Estructuras arqueadas de gran escala en el cinturón de pliegues y cabalgamientos del Arco de Gibraltar: un ensayo de modelización analógica

Large-scale arcuate structures in the Gibraltar Arc fold-and-thrust belt: an analogue modeling essay

Ana Crespo-Blanc ^(1,2) y Enric Suades ⁽²⁾

⁽¹⁾ Departamento de Geodinámica, Campus Fuentenueva s/n, 18071 Granada (España). acrespo@ugr.es

⁽²⁾ Instituto Andaluz de Ciencias de la Tierra. CSIC, 18071 Granada (España). esuades@ugr.es

ABSTRACT

In the westernmost part of the Gibraltar Arc orogenic system (west of 4°30'W), the Betic-Rif external wedge as a whole draws an arc. A simple structural pattern of folds and thrusts swinging around the Gibraltar Arc should be expected. Nevertheless, the presence of large scale arcuate structures characterizes the external wedge. Some of these structures are 25km long and show a half-moon geometry. In this paper we present preliminary results of analogue modeling which try to reproduce such structures. A sand pack flooded by silicone was pushed from behind by a rigid backstop with entrant geometry. Two straight, successive movements were imposed to the backstop. In map view, the structural pattern of the final stage of the model records arcuate structures, similar to the natural case, but in terms of kinematics, model and natural case are not comparable.

Key-words: Betic-Rif orogen, Gibraltar Arc, external wedge, arcuate structures, analogue modeling.

RESUMEN

En la parte más occidental del sistema del Arco de Gibraltar (al oeste de 4°30'W), las zonas externas dibujan un arco. Cabría esperar que en su interior, el patrón estructural de los pliegues y cabalgamientos dibujase un arco que mimetice al propio Arco de Gibraltar. No obstante, la presencia de estructuras arqueadas de gran escala caracterizan las zonas externas. Algunas de estas estructuras miden más de 25km y muestran geometría de media luna. En este artículo, se presentan resultados preliminares de modelos analógicos que simulan la formación de estas estructuras. Se acortó un paralelepípedo de arena con silicona a la base, empujándolo por detrás con un backstop rígido con forma de entrante, con dos direcciones de movimiento rectas y sucesivas. En planta, el patrón estructural del estadio final del modelo muestra estructuras arqueadas semejantes al caso natural, aunque en cuanto a cinemática, modelo y caso natural no son directamente comparables.

Palabras clave: Orógeno Bético-Rifeño, Arco de Gibraltar, zonas externas, estructuras arqueadas, modelización analógica.

Geogaceta, 50-1 (2011), 27-30.
ISSN:2173-6545

Fecha de recepción: 11 de Febrero de 2011

Fecha de revisión: 28 de Abril de 2011

Fecha de aceptación: 27 de Mayo de 2011

Introducción

El Arco de Gibraltar, en el extremo oeste del Mediterráneo, está marcado por la distribución cartográfica de los grandes complejos tectónicos, el límite externo de las zonas internas y el patrón estructural de los pliegues y cabalgamientos de las zonas externas (Fig. 1). Al oeste del meridiano 4°30'W, estas últimas dibujan un arco semejante al arco del Jura en los Alpes, en cuanto a curvatura, longitudes de cuerda y arco externo, así como tipo de sustrato (evaporitas del Trías; Hindle y Burkhard, 1999). Por lo tanto, el patrón estructural esperable es el de una simple variación de las direcciones de pliegues y cabalgamientos alrededor del Arco de Gibraltar, de NE-SW a NW-SE pasando por una dirección N-S. No obstante, nuestros datos muestran que la

geometría de las estructuras en las zonas externas es mucho más compleja. En efecto, aunque a escala regional se observa esta variación, la presencia de estructuras arqueadas caracteriza la rama norte del Arco de Gibraltar (Fig. 1, al norte del Estrecho). Algunas son muy cerradas, con forma de media luna y con una longitud que puede superar los 25km. Estas estructuras de gran escala se encuentran frente a un entrante marcado por el límite externo del Dominio de Alborán, las zonas internas que actuaron de backstop durante la formación del cinturón de pliegues y cabalgamientos de la cuña externa del Arco (Fig. 1). Este entrante está limitado por las zonas de fallas de Gaucín y Jebel Mousa, de dirección NW-SE y NE-SW respectivamente (Fig. 1; García-Dueñas *et al.*, 1990). Éstas debieron de ser activas durante la estructuración de la cuña

externa, ya que alrededor del extremo norte de la falla de Gaucín se observa cómo el patrón estructural de los pliegues y cabalgamientos mimetizan el límite del Dominio de Alborán (Crespo-Blanc y Campos, 2001).

Una revisión de la cartografía geológica a disposición (hojas MAGNAS) permite constreñir las relaciones entre las estructuras que marcan el patrón principal a nivel regional, las estructuras arqueadas y los sedimentos sin-orogénicos de edad Mioceno a Plioceno. Junto con un análisis estructural y cinemático detallado, estos datos permiten afirmar que estas estructuras de gran escala y forma de media luna son interferencias de estructuras contractivas: consisten en sistemas de cabalgamientos imbricados durante los primeros estadios del acortamiento principal, a su vez plegados durante una segunda fase que produce ro-

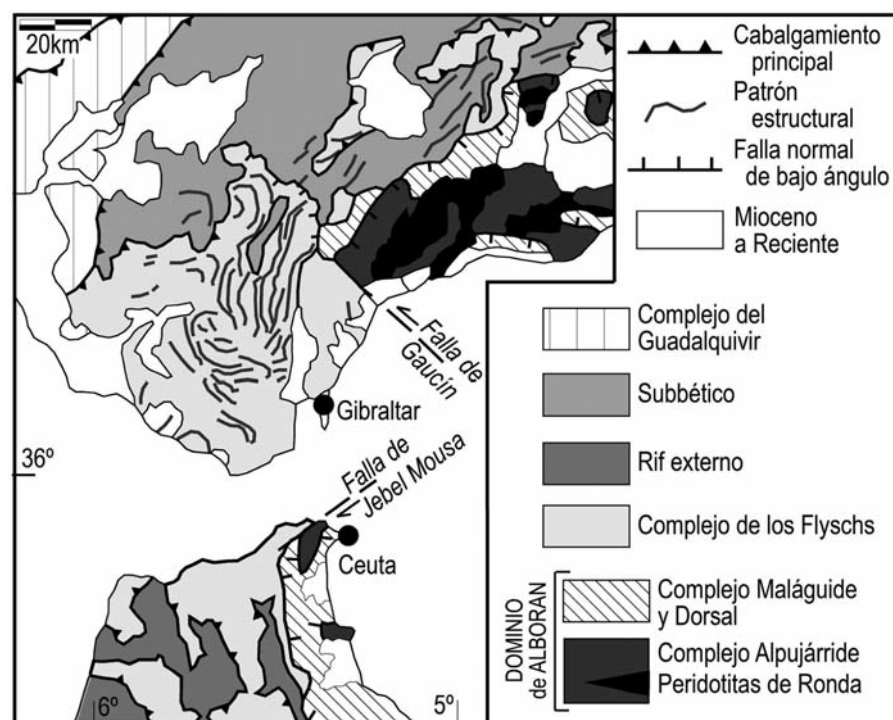


Fig.1.- Mapa tectónico simplificado del extremo occidental del Arco de Gibraltar. El patrón estructural en las zonas externas ha sido dibujado en las Béticas.

Fig.1.- Simplified tectonic map of the westernmost part of the Gibraltar Arc. The structural pattern of the external zones has been drawn in the Betics.

taciones de ejes verticales de hasta 140° (hojas MAGNAS; Luján *et al.*, 2006; trabajos en curso). En un cinturón de pliegues y cabalgamientos de una zona donde predomina un mecanismo de plegamiento por buckling (Crespo-Blanc y Campos, 2001), este tipo de interferencia sólo se produce en el caso de dos episodios de acortamientos subperpendiculares; si no es el caso, las charnelas de los primeros pliegues rotan hasta el paralelismo con los segundos (Odonne y Vialon, 1987). Aplicado al extremo occidental de las zonas externas del Arco de Gibraltar, dado que las direcciones de las trazas axiales de segunda fase varían entre NE-SW y NW-SE, pasando por N-S (Luján *et al.*, 2006; trabajos en curso), las direcciones de las estructuras debidas al acortamiento principal de primera fase deberían haber sido NW-SE a NE-SW pasando por E-W, lo que es incompatible con la evolución estructural que se conoce al día de hoy (e.g. Crespo-Blanc y Campos, 2001; Luján *et al.*, 2006; Balanyá *et al.*, 2007 y citas incluidas en estos trabajos). Necesitamos por lo tanto otro mecanismo para explicar la formación de estas estructuras con forma de media luna.

Modelos analógicos descritos en Crespo-Blanc (2008) muestran que se pueden producir estructuras arqueadas u obli-

cuas respecto al patrón estructural dominante si: a) el sustrato debajo del paralelepípedo inicial de arena es de silicona y b) la geometría del backstop que acorta el modelo es la de un entrante. En este caso, no es necesario invocar un cambio en la dirección de compresión para producir estructuras que se encuentran a ángulo recto del patrón estructural dominante en el modelo (ver también Vidal-Royo *et al.*, 2009). No obstante, en aquellos experimentos, no se formaron estructuras tan cerradas como las que se observan en el caso natural descrito.

En este artículo, se presentan los resultados preliminares de un modelo analógico semejante a los descritos en Crespo-Blanc (2008), aunque de mayor tamaño inicial y con un movimiento del backstop constituido por dos segmentos rectos. Se generan dos fases de acortamiento en el modelo, que en el caso natural, corresponden al acortamiento principal de dirección E-W (de edad Mioceno inferior a medio; Luján *et al.*, 2006; Balanyá *et al.*, 2007), seguido por la reorganización contractiva de dirección NNW-SSE de edad Mioceno superior y Plioceno (Comas *et al.*, 1989). El entrante, que forma un ángulo de 90°, simula las fallas de Gaucín y Jebel Moussa (Fig. 1). Su posición inicial respecto a la dirección de empuje se ha fijado en relación con el caso natural.

Modelo analógico de estructuras arqueadas: resultados preliminares

Las condiciones experimentales del modelo analógico que se realizó en el Laboratorio de Modelización analógica del Departamento de Geodinámica de la Universidad de Granada están resumidas en la Figura 2A. El paralelepípedo inicial consiste en una base continua de silicona (0,5 cm de espesor) sobre la que se ha tamizado arena (1 cm de espesor). Una descripción detallada del scaling y de los procedimientos de registro se puede encontrar en Crespo-Blanc (2008). Después de 22.51 cm se giró el modelo respecto al eje del motor, modificando así la dirección de empuje del backstop (27° horario), y se acortó el modelo otros 10.89 cm adicionales (Fig. 2A).

El acortamiento del modelo produce la formación de un cinturón de pliegues y cabalgamientos, cuya deformación progresiva aparece en la Figura 2 (B a F). Nos referiremos a la dirección N-S como la dirección de movimiento del backstop durante la primera fase del experimento. La Figura 2D corresponde al estadio del modelo al final de la primera fase del experimento, inmediatamente antes de modificar la dirección de movimiento del backstop, mientras que la Figura 3 ilustra el estadio final del experimento (comparar con Fig. 2F).

Al inicio del experimento, el efecto de borde consiste en cabalgamientos que mimetizan los bordes del paralelepípedo inicial. Luego, en el interior del modelo, en su parte más trasera, las primeras estructuras que se forman consisten en una serie de pliegues en caja, acompañados por sus respectivos cabalgamientos pro- y retro-vergentes en los flancos. Son ligeramente sinuosos y se disponen en-échele de un lado a otro del modelo (Fig. 2B). La dirección de estos pliegues es WNW-ESE, ni paralela ni perpendicular al movimiento del backstop o a cualquiera de sus bordes. Cuando prosigue el acortamiento, una segunda serie de pliegues en caja, sinuosos y dispuestos en-échele se desarrollan en una posición más frontal. Los pliegues individuales tienen una orientación ENE-WSW, mientras que los sinclinales (que posteriormente evolucionarán en pliegues en caja con forma de "S", Fig., 2C) son de dirección NE-SW. La envolvente de este tren de pliegues es subparalela al borde de dirección NE-SW del backstop. En la Figura 2C, se puede observar como un

tercer conjunto de pliegues en caja se ha desarrollado en la parte oeste del modelo. En este caso, la dirección de la envolvente

de estas estructuras en-échelon es ligeramente oblicua con respecto al borde del backstop. Al final de la primera fase del ex-

perimento, el patrón estructural muestra dos direcciones principales de estructuras, NE-SW y NW-SE, subparalelas a los bordes

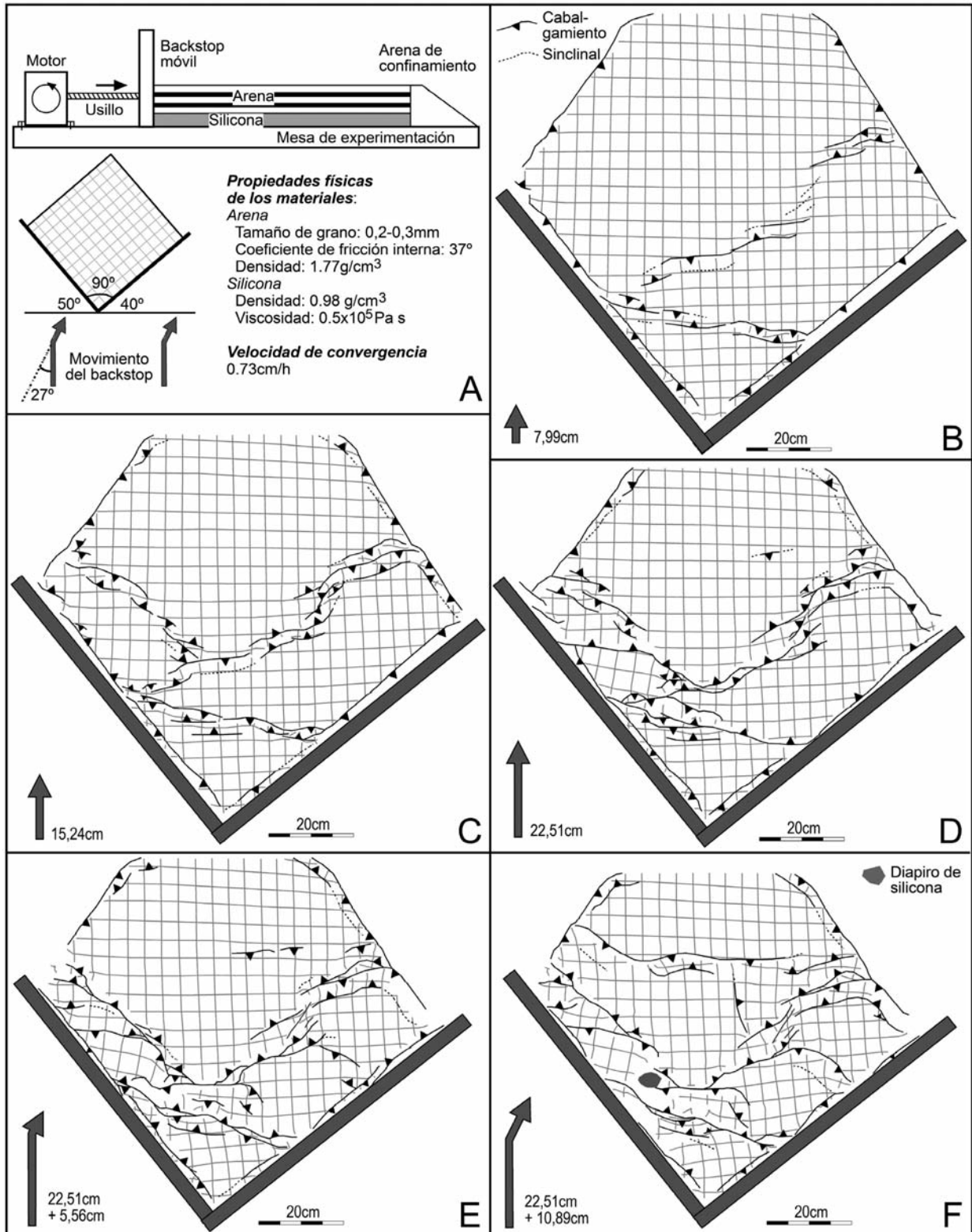


Fig. 2.- A) Esquemas de la mesa de experimentación y propiedades de los materiales analógicos. B a F) Dibujos de la deformación progresiva a partir de fotografías de la planta del modelo para diversas cantidades de acortamiento. B, C y D) Movimiento recto hacia arriba (distancia anotada). E y F) Segunda fase del experimento, después del cambio de la dirección de movimiento del backstop (27° horario).

Fig. 2.- A) Sketches of the experimental apparatus and analogue material properties. B to F) Line drawings of progressive deformation of the model in map view, for various amounts of shortening. B, C and D) Straight movement of the backstop to the top (distance annotated). E and F) Second phase of the experiment, after a direction change of the backstop movement (27° clockwise).



Fig. 3.- Fotografía del estadio final del experimento. Obsérvense las estructuras arqueadas en la parte trasera del modelo y los dos cabalgamientos subperpendiculares en su parte frontal.

Fig.3.- Photograph of the model final stage. Observe the arcuate structures in the rear part of the model and the subperpendicular thrust in its frontal part.

del backstop, que se unen en la parte central del modelo, formando así estructuras no cilíndricas arqueadas (Fig. 2D). No obstante, cabe destacar que a pesar de la dirección muy variable de las estructuras, no ha habido grandes rotaciones de bloques (zonas del modelo limitadas por bandas donde se concentran las estructuras). Lo muestra la orientación relativamente constante de los segmentos de la rejilla de referencia, a excepción de un bloque de la parte oeste del modelo (con rotación horaria).

En la segunda fase del experimento, después de 5,56 cm de movimiento adicional, se apretaron los pliegues y cabalgamientos anteriores, y se desarrollaron cabalgamientos de poca longitud, de dirección NW-SE y E-W en la parte este y norte del modelo, respectivamente (Fig. 2E). En el estadio final, en la parte más frontal del experimento se formaron simultáneamente pliegues en caja de dirección E-W, que recorren el modelo de una parte a otra, y un cabalgamiento de dirección N-S vergente hacia el W (Fig. 2F y Fig. 3). También cabe destacar las rotaciones en bloque en las zonas laterales del modelo, tal como lo indica el giro de la rejilla de referencia, antihorario al este del modelo, horario al oeste.

Discusión y conclusiones

El modelo analógico presentado en este manuscrito muestra la posibilidad de gene-

rar estructuras arqueadas en un modelo suficientemente grande para observar pliegues y cabalgamientos que se han desarrollado en el interior del paralelepípedo inicial y evitar efectos de borde.

No obstante, aunque el resultado en planta sea muy semejante, desde el punto de vista cinemático las estructuras del modelo son muy distintas a las que se observan en el caso natural de las zonas externas del Arco de Gibraltar. En efecto, en estas últimas, las estructuras arqueadas de gran escala resultan de la interferencia de pliegues, con una variación de hasta 140° de la dirección de transporte de una parte a otra de las medianas, mientras que en el modelo, la dirección de movimiento a lo largo de cabalgamientos individuales es *grosso modo* paralela a la dirección de movimiento del backstop (orientación relativamente constante de la rejilla de referencia). Tampoco se ha observado rotación progresiva alguna de estructuras oblicuas a la dirección de compresión formadas en los estadios iniciales del experimento. La superposición de un acortamiento oblicuo al de primera fase apenas modifica el patrón estructural resultante ya que el arqueamiento de las estructuras no es significativamente mayor al final de la modelización (comparar Figs. 2D y 2F). Finalmente, las rotaciones en bloque observadas en el estadio final no superan los 30°, mucho menor que las rotaciones de ejes verticales que se observan en los casos naturales.

Trabajos futuros para aclarar la génesis de las estructuras arqueadas de gran escala tales como las que se observan en el cinturón de pliegues y cabalgamientos del extremo oeste del Arco de Gibraltar incluyen dos líneas: a) en el laboratorio, aunque con una misma configuración de la mesa de experimentación, se usará otros materiales analógicos más favorables para indagar en la deformación progresiva de pliegues superpuestos, como la plastilina o la arcilla (e.g. Sengupta *et al.*, 2005); b) en el campo, se caracterizarán las relaciones de estas estructuras arqueadas con diapiros, fallas sin-sedimentarias, variaciones de espesor del sustrato evaporítico, zonas de transferencia o cualquier rasgo que pueda producir estructuras oblicuas en un momento temprano del acortamiento principal, y que posteriormente pueden ser plegadas.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por los proyectos RNM-3713, RNM-215, CSD2006-00041, CGL2008-03474 E/BTE, CTM2009-07715 y CGL2009-11384.

Referencias

- Balanyá, J.C., Crespo-Blanc, A., Díaz Azpiroz, M., Expósito, I. y Luján, M. (2007). *Tectonics*, 26, TC2005, doi:10.1029/2005TC001932.
- Comas M.C., Platt J.P., Soto J.I. y Watts A.B. (1999). En: *Proceedings of the Ocean Drilling Program, scientific results 161*. (R. Zahn, M.C. Comas, A. Klaus. Eds), ODP College Station, 555-580.
- Crespo-Blanc, A. y Campos, J. (2001). *Journal of Structural Geology*, 23, 1615-1630.
- Crespo-Blanc, A. (2008). *Journal of Structural Geology*, 30, 65-80.
- García-Dueñas, V., Esteras, M., Sandoval, N. y Bahmed, A. (1990). *Mapa tectónico del Arco de Gibraltar, 1:500.000*, S.E.C.E.G.
- Hindle, D. y Burkhard, M. (1999). *Journal of Structural Geology*, 21, 1089-1101.
- Luján, M., Crespo-Blanc A. y Balanyá, J.C. (2006). *Tectonics*, 25/6, TC6001-10.1029/2005TC001910:1-17.
- Odonne, F. y Vialon, P. (1987). *Journal of Structural Geology*, 9, 835-844.
- Sengupta, S., Ghosh, S.K., Deb, S.K., y Khan, D. (2005). *Journal of Structural Geology*, 27, 1282-1299.
- Vidal-Royo, O., Koyi, H.A. y Muñoz, J.A. (2009). *Journal of Structural Geology*, 31, 523-539.