

## Modelos cinemáticos de la deformación varisca en la zona de cizalla de Hiendelaencina (Anticlinorio del Olo de Sapo, Zona Centroibérica)

### *Kinematic models for the Variscan deformation in the Hiendelaencina shear zone (Olo de Sapo Anticlinorium, Central Iberian Zone)*

C. Fernández<sup>1</sup>, R. Capote<sup>2</sup> y M. Díaz-Azpiroz<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Dpto. de Geodinámica y Paleontología, Facultad de Ciencias Experimentales, Universidad de Huelva, 21007 Huelva. fcarlos@uhu.es

<sup>2</sup> Dpto. de Geodinámica, Facultad de Ciencias Geológicas, Universidad Complutense de Madrid. capote@geo.ucm.es

<sup>3</sup> Dpto. de Sistemas Físicos, Químicos y Naturales, Universidad Pablo de Olavide, Crtra. Utrera, km 1, 41013 Sevilla. mdiaazp@upo.es

**Resumen:** Los modelos utilizados hasta el momento para la caracterización cinemática de la zona de cizalla dúctil de Hiendelaencina, cuya actividad principal se desarrolló durante la segunda fase varisca que afectó al Anticlinorio del Olo de Sapo (Zona Centroibérica, Macizo Ibérico), se basan en aproximaciones que no tienen en cuenta el carácter simultáneo de la actuación de las distintas componentes del flujo (cizalla simple, cizalla pura, cambio de volumen). En este trabajo se evalúa el ajuste de los datos de deformación interna y fábricas planolíneas resultantes de la actuación de la dicha zona de cizalla a modelos que consideran flujos triclinicos. Como consecuencia, se han identificado dos sectores dentro de la estructura (A y B, estando el primero originariamente situado al noroeste del segundo) con características cinemáticas contrastadas. En ambos casos la componente de cizalla simple implicó desplazamiento del bloque de techo hacia el sureste (zona de cizalla sub-horizontal o suavemente buzante al NO). El sector A fue afectado simultáneamente por un acortamiento sub-vertical y un estiramiento de dirección E-O, mientras que el sector B registró un estiramiento sub-vertical y un acortamiento E-O. Estas diferencias responderían a un reparto heterogéneo de las componentes del flujo dentro de una estructura de tipo “restraining bend”.

**Palabras clave:** Modelos cinemáticos, zonas de cizalla dúctil, Anticlinorio del Olo de Sapo, Hiendelaencina, deformación varisca.

**Abstract:** *The kinematic models applied to evaluate the ductile shear zone of Hiendelaencina (second Variscan phase affecting the Olo de Sapo Anticlinorium, Central Iberian Zone, Iberian Massif) are based on untenable assumptions about the non-simultaneous activity of the distinct acting flow components (simple shear, pure shear, volume change). In this work, the finite strain and plano-linear fabric data from the Hiendelaencina shear zone are tested against recent models considering triclinic flow histories. Two sectors (A to the NW, and B to the SE in the original arrangement of the sub-horizontal to gently NW-dipping shear zone) have been identified according to their contrasted kinematic characteristics. The simple shear component implies top-to-the-SE displacement for both sectors. The pure shear component includes sub-vertical shortening and E-W extrusion for sector A, and sub-vertical lengthening and E-W shortening at sector B. These differences are interpreted as due to heterogeneous flow partitioning within a general restraining bend structure.*

**Key words:** *Kinematic models, ductile shear zones, Olo de Sapo Anticlinorium, Hiendelaencina, Variscan deformation.*

### INTRODUCCIÓN Y SITUACIÓN GEOLÓGICA

La zona de cizalla de Hiendelaencina se sitúa en el extremo oriental del Anticlinorio del Olo de Sapo (Zona Centroibérica, Macizo Ibérico, Fig. 1). La actuación de esta zona de cizalla dúctil coincidió con la segunda fase de deformación varisca y afectó esencialmente, de techo a muro, a la Fm Hiendelaencina (Fm Olo de Sapo), al ortogneis Antoñita, y a los metasedimentos cámbricos de la Fm Angón, que constituyen la unidad más baja aflorante en la región estudiada (González Lodeiro, 1980; Fernández, 1991). En conjunto, la deformación asociada a la zona de cizalla de Hiendelaencina aumenta, de manera heterogénea, hacia la base de la

estructura (Fernández, 1991; Martínez Catalán et al., 2004), y ha dado lugar al desarrollo de una fábrica planolínear (S2/L2).

Un estudio muy detallado de la variación de la deformación interna asociada a la actuación de la zona de cizalla de Hiendelaencina ha sido avanzado en trabajos anteriores (Fernández, 1991; Martínez Catalán et al., 2004). En algún caso se ha llegado a ensayar una interpretación cinemática de los elipsoides de la deformación interna obtenidos (Fernández, 1991). Sin embargo, durante las dos últimas décadas se han producido avances muy notorios en el estudio y modelización de historias de deformación complejas, como las que hoy en día se supone que han debido de actuar en zonas de cizalla dúctil naturales. El objetivo principal de este trabajo es utilizar estos avances

teóricos recientes para presentar una interpretación cinemática más rigurosa que las disponibles hasta la fecha para la zona de cizalla de Hiendelaencina, y discutir algunas de sus implicaciones tectónicas.

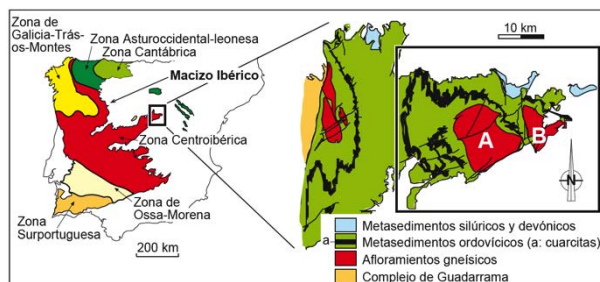


FIGURA 1. Situación geológica de la zona estudiada dentro del Macizo Ibérico (izquierda). A la derecha se muestra un esquema geológico del extremo oriental del Sistema Central Español, incluyendo, dentro de la zona recuadrada, el Domo de Hiendelaencina y los dos sectores con características deformacionales contrastadas (A y B) que han sido distinguidos en este trabajo. Los afloramientos gneísicos marcados en rojo constituyen las unidades principalmente afectadas por la zona de cizalla de Hiendelaencina.

## METODOLOGÍA Y RESULTADOS

Los primeros modelos cinemáticos de zonas de cizalla dúctil consideraron la actuación de una componente heterogénea de cizalla simple (p.ej., Ramsay y Graham, 1970). La comparación de estos modelos con las zonas de cizalla naturales puso de manifiesto la necesidad de contemplar también la actuación de otras historias de deformación, como la cizalla pura o el cambio de volumen. Los modelos basados en una combinación secuencial de componentes de la deformación (p. ej., Sanderson y Marchini, 1984) dieron paso a otros más realistas de actuación simultánea de dichas componentes (Fossen y Tikoff, 1993). Los modelos más generales publicados hasta la fecha (p. ej., Fernández y Díaz Azpiroz, 2009), aplicados con éxito a distintas zonas de cizalla naturales, permiten la simulación de historias de deformación con oblicuidad entre las distintas componentes y entre éstas y los elementos geométricos de los bordes de la zona de cizalla, esencialmente su dirección y buzamiento ( $\delta$  y  $\beta$ , respectivamente, en la Fig. 2). Tales modelos predicen la orientación y magnitud de los ejes principales del elipsoide de la deformación finita para valores concretos de ciertos parámetros significativos: número de vorticidad cinemática ( $W_k$ ), ángulo de cabeceo de la dirección de cizalla simple sobre el plano de cizalla (ángulo  $\phi$ , Fig. 2), ángulo entre la dirección de estiramiento (o de acortamiento) de la componente de cizalla pura y la dirección de buzamiento de la zona de cizalla (ángulo  $\nu$ , Fig. 2), y magnitud del acortamiento (o estiramiento) perpendicular a la zona de cizalla.

La comparación entre las predicciones de los modelos y la realidad exige obtener en la naturaleza una serie de datos que incluyen desde la orientación de

las fábricas planilineares resultantes de la deformación, hasta la determinación del elipsoide de la deformación finita, pasando por el establecimiento de la orientación aproximada del plano de máxima vorticidad. El ajuste entre el modelo y la realidad puede evaluarse de acuerdo con el uso de determinados protocolos que permiten, en el mejor de los casos, limitar los valores de  $\phi$ ,  $\nu$  y  $W_k$  en distintos puntos de la zona estudiada (Fernández et al., 2013).

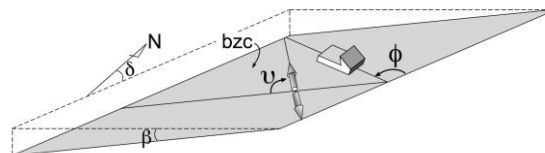


FIGURA 2. Principales elementos geométricos y cinemáticos que controlan la evolución estructural de las zonas de cizalla, de acuerdo con los modelos teóricos de superposición simultánea de componentes de flujo coaxial y no coaxial. A ellos habría que añadir el número de vorticidad cinemática ( $W_k$ ) y la magnitud del acortamiento (o estiramiento) finito perpendicular a los bordes de la zona de cizalla. El significado de los ángulos  $\delta$ ,  $\beta$ ,  $\phi$ , y  $\nu$  se explica en el texto principal ( $bzc$ , borde de la zona de cizalla).

El trabajo de Fernández (1991) permitió conocer la orientación de la fábrica planilinear, del plano de máxima vorticidad, y de la forma y orientación de los elipsoides de la deformación finita en la zona de cizalla de Hiendelaencina (Fig. 3), además de documentar la variación espacial de todos estos datos dentro de la zona estudiada. En dicho trabajo, y en el de Martínez Catalán et al. (2004), se incluye información acerca de las técnicas estructurales utilizadas para la determinación de la deformación finita. La información estructural disponible para la zona de cizalla de Hiendelaencina (Fernández, 1991) sugiere que su disposición inicial sería subhorizontal u orientada en dirección NE-SO ( $N30^{\circ}$ - $45^{\circ}$ E) y ligeramente buzante hacia el noroeste ( $\leq 10^{\circ}$ ). Por su parte, la dirección de movimiento asociada con la componente de cizalla simple (dirección del plano de máxima vorticidad) variaría entre  $N120^{\circ}$ E (sector A) y  $N135^{\circ}$ E (sector B), siempre con desplazamiento del bloque de techo hacia el SE de acuerdo con criterios cinemáticos de campo, datos microestructurales y fábricas cristalógraficas de cuarzo (Fernández, 1991). Los elipsoides de la deformación finita de ambos sectores son notablemente distintos, predominando los situados en el campo del aplastamiento aparente en el sector A, y dando paso a elipsoides mayoritariamente en el campo de la constricción aparente en el sector B (Fig. 3, columna izquierda). También hay diferencias significativas en la fábrica planilinear. Mientras que las lineaciones L2 presentan una variación superior a los  $90^{\circ}$  en el sector A, ajustándose a un segmento de círculo mayor, se agrupan alrededor de un máximo estadísticamente bien marcado en el sector B (Fig. 3, columna central). Algo similar puede decirse de la foliación S2, cuyos polos se agrupan según un máximo fuertemente inclinado hacia el SE en el sector A, pero se dispersan formando una

guirnalda incompleta de dirección NE-SO en el sector B (Fig. 3, columna derecha). Los sectores A y B de la zona de cizalla de Hiendelaencina se encuentran separados por fallas tardivariscas, de movimiento lateral izquierdo predominante. Una vez eliminados los desplazamientos a lo largo de tales fallas, el sector A se dispondría al noroeste del sector B.

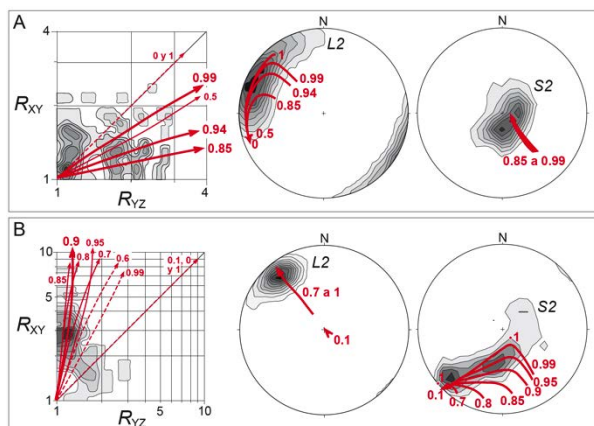


FIGURA 3. En los sectores A y B a los que hace referencia la figura 1: Columna izquierda: Diagramas logarítmicos de la deformación con proyección de los valores correspondientes a las relaciones axiales principales ( $R_{XY}$  y  $R_{YZ}$ ) obtenidas en un total de 70 muestras para A, y de 38 muestras para B. El patrón de densidad se ha elaborado con mallas de conteo de 0.1 (sector A) y 0.25 (sector B) unidades de R; los intervalos de contornos son de 1 punto para ambos sectores. Columnas central y derecha: Diagramas de proyección esférica de los datos de la lineación mineral y de estiramiento (L2) y de la foliación tectónica (S2) asociadas a la actuación de la zona de cizalla de Hiendelaencina en los sectores A y B. Proyección equiareal, hemisferio inferior. Método de Kamb: Intervalos de contornos:  $2\sigma$  (L2,  $n=50$ ) y  $3\sigma$  (S2,  $n=247$ ) para el sector A, y  $5\sigma$  (L2,  $n=176$ ) y  $3\sigma$  (S2,  $n=271$ ) para el sector B. Valores esperados bajo distribución uniforme igual a  $2\sigma$ .  $\sigma$ =desviación típica. "n" indica el número de datos utilizado en cada diagrama. Basado en los datos de Fernández (1991). Las curvas rojas muestran una selección de los resultados obtenidos en este trabajo para el ajuste entre el modelo de Fernández y Díaz Azpiroz (2009) y los datos de deformación interna obtenidos de la zona estudiada. En los diagramas logarítmicos de la deformación se superponen las curvas teóricas de distintos valores de  $W_k$ . Análogamente, en los diagramas de proyección esférica se comparan los patrones teóricos de orientación del eje X del elipsoide de la deformación finita, para distintos valores de  $W_k$ , con L2, y los patrones teóricos de orientación del eje Z de dicho elipsoide con S2. Las flechas apuntan en el sentido en el que aumenta la deformación finita. El ajuste en el sector A se muestra para  $\phi=70^\circ$  y  $\nu=50^\circ$ , mientras que en el sector B se ha considerado  $\phi=80^\circ$  y  $\nu=90^\circ$ . En ambos casos el buzamiento simulado para la zona de cizalla es de  $10^\circ$ .

Toda la información estructural descrita para la zona de cizalla de Hiendelaencina puede ser utilizada para la evaluación cinemática de dicha zona mediante el modelo de Fernández y Díaz Azpiroz (2009). La orientación original de la zona de cizalla y la del plano de máxima vorticidad han permitido trabajar con valores del ángulo  $\phi$  comprendidos entre  $60^\circ$  y  $80^\circ$ . Por otra parte, los patrones de orientación de L2 y S2 en cada sector, así como la variación en la forma de los elipsoides de la deformación finita, permiten proponer dos escenarios cinemáticos distintos en lo referente a la

componente coaxial del flujo. Por simplicidad, se ha utilizado la cizalla pura para simular dicha componente coaxial, que es el caso considerado por Fernández y Díaz Azpiroz (2009), aunque se están estudiando también situaciones más generales. En el sector A la mejor manera de explicar los elipsoides de aplastamiento, la dispersión de la lineación y la orientación estadísticamente estable de la foliación, consiste en asumir acortamiento perpendicular al borde de la zona de cizalla, lo que genera una combinación equivalente desde el punto de vista cinemático a la de una transpresión. Por su parte, en el sector B se ha hecho necesario considerar estiramiento perpendicular al borde de la zona de cizalla (equivalente cinemático a una transtensión), dado que es la única manera viable de explicar los elipsoides constrictivos, la estabilidad relativa de los datos de L2 y la amplia dispersión de los polos de S2. Finalmente, y gracias al uso del protocolo propuesto por Fernández et al. (2013), se ha efectuado una comparación de las predicciones del modelo con los datos de la zona de cizalla, encontrándose un ajuste óptimo para los valores de los parámetros que se muestran en la Tabla I.

	SECTOR A	SECTOR B
$\delta$	$N30^\circ E$	$N45^\circ E$
$\beta$	$\leq 10^\circ$	$\leq 10^\circ$
$\phi$	$60^\circ-70^\circ$	$80^\circ$
$\nu$	$50^\circ$	$90^\circ$
$W_k$	0.85-0.99	0.7-0.95

TABLA I. Resultados de la aplicación del modelo de Fernández y Díaz Azpiroz (2009) a los sectores A y B de la zona de cizalla de Hiendelaencina. El ángulo  $\nu$  define la orientación de la dirección de estiramiento y de acortamiento infinitesimal de la componente coaxial en los sectores A y B, respectivamente.

Los resultados más significativos se ilustran en la Fig. 3. En el sector A la dirección de extrusión (ángulo  $\nu$ ) debe desviarse un ángulo alto con respecto a la dirección de buzamiento de la zona de cizalla, o en caso contrario el modelo sería incapaz de reproducir la amplia dispersión mostrada por la fábrica lineal. Las formas y variación de los elipsoides teóricos muestran un excelente parecido con las trayectorias observadas en ambos sectores. En el sector A, la mayor densidad de elipsoides medidos puede ser explicada con trayectorias teóricas debidas a valores de  $W_k$  entre 0.85 y 0.99, valores que también explican satisfactoriamente tanto la dispersión de L2 como la orientación promedio de S2 (Fig. 3, fila superior). Análogamente, en el sector B el mejor ajuste se obtiene para valores de  $W_k$  comprendidos entre 0.7 y 0.95 (Fig. 3, fila inferior). En todos los casos, el incremento de la deformación hacia muro de la zona de cizalla es también congruente con las predicciones del modelo. Aunque en la Fig. 3 únicamente se reflejan los resultados para valores concretos de  $\phi$  y de  $\nu$ , la combinación de las

predicciones para los distintos valores de los parámetros considerados en la Tabla I permite obtener toda la variabilidad observada en los datos naturales.

## DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Uno de los resultados interesantes de este trabajo es la posibilidad de explicar la variación de la fábrica planar S2 en el sector B como consecuencia del incremento de la deformación bajo valores de vorticidad altos (0.9 a 0.99, diagrama inferior derecho de la Fig. 3). De hecho, el buzamiento de S2 aumenta desde el techo hacia el muro de la Fm. Hiendelaencina en el sector B, en paralelo con el incremento de la deformación finita (Fernández, 1991). Por el contrario, dicha variación es mucho menor en el caso del sector A. Aunque las fases posteriores de plegamiento, como la fase D3, han podido amplificar estas variaciones, se propone en este trabajo el carácter esencialmente precoz, sin-D2, de tal variabilidad.

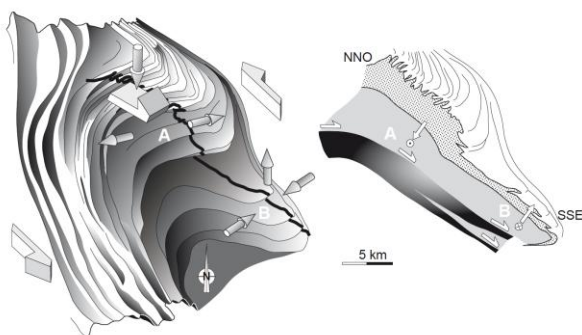


FIGURA 4. Bloque diagrama idealizado (izquierda) que plasma el modelo conceptual de la zona de cizalla de Hiendelaencina, así como el resto de estructuras asociadas a ella. Se trata de una zona de “restraining bend” en la que el cizallamiento izquierdo subvertical no afecta a la deformación medida en las zonas A y B. El perfil mostrado en la parte derecha (localizado con una línea gruesa en el bloque diagrama) representa las distintas componentes del flujo consideradas en este trabajo para cada uno de los sectores (A y B). Flechas asimétricas, cizalla simple; flechas simétricas, cizalla pura.

El modelo conceptual preferido para explicar las diferencias cinemáticas entre los sectores A y B (Fig. 5) es el de una zona de “restraining bend”, como fue propuesto en su día por Fernández (1991). Aunque algunas de las estructuras laterales pueden ser explicadas por la fase D3 (Martínez Catalán et al., 2004), sugerimos que pudieron comenzar a definirse ya durante, al menos, la segunda fase (como se ha indicado anteriormente para S2 en el sector B). La extrusión lateral en el sector A puede interpretarse en términos del estiramiento concéntrico que debe verificarse en el núcleo extrusivo de la estructura (véanse los modelos “extruding-spreading” de Merle, 1989), acompañada del colapso vertical debido al peso. Por otro lado, el acortamiento concéntrico del sector B

ha sido observado asimismo en la parte frontal de los modelos teóricos y analógicos de “spreading nappes” y puede ser una consecuencia de la constricción asociada a la “frontal rolling zone” de tales estructuras.

Este trabajo muestra cómo el uso de modelos cinemáticos generales ayuda a constreñir historias complejas de deformación en zonas de cizalla naturales más allá de lo que permite un mero análisis estructural en el marco de modelos conceptuales sencillos.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por los proyectos CGL2013-48408-C3-1-9 y CGL2013-46368-P (Ministerio de Economía y Competitividad). La revisión realizada por el Prof. Andrés Pocoví ha sido de gran ayuda para mejorar la versión final del manuscrito.

## REFERENCIAS

- Fernández, C. (1991): *Estudio de los procesos de deformación en la zona de cizalla de Hiendelaencina (Sistema Central Español)*. Tesis Doctoral, Univ. Complutense de Madrid, 522 p.
- Fernández, C. y Díaz Azpiroz, M. (2009): Triclinic transpression zones with inclined extrusion. *Journal of Structural Geology*, 31: 1255-1269.
- Fernández, C., Czeck, D. y Díaz Azpiroz, M. (2013): Testing the model of oblique transpression with oblique extrusion in two natural cases: steps and consequences. *Journal of Structural Geology*, 54, 85-102.
- Fossen, H. y Tikoff, B. (1993): The deformation matrix for simultaneous simple shearing, pure shearing and volume change, and its application to transpression-transension tectonics. *Journal of Structural Geology*, 15: 413-422.
- González Lodeiro, F. (1980): *Estudio geológico estructural de la terminación oriental de la Sierra de Guadarrama (Sistema Central Español)*. Tesis Doctoral, Univ. de Salamanca, 334 p.
- Martínez Catalán, J.R., González Lodeiro, F., González Clavijo, E., Fernández, C. y Díez Montes, A. (2004): Zona Centrobérica: Dominio del Olló de Sapo, Estructura. En: *Geología de España* (J.A. Vera, ed.). SGE-IGME, Madrid, 75-78.
- Merle, O. (1989): Strain models within spreading nappes. *Tectonophysics*, 165: 57-71.
- Ramsay, J.G. y Graham, R.H. (1970): Strain variation in shear belts. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 7: 786-813.
- Sanderson, D.J. y Marchini, W.R.D. (1984): Transpression. *Journal of Structural Geology*, 6: 449-458.