

# Estudio comparativo de varios modelos de pliegues asociados a fallas. Problemas detectados

## Comparative study of various fault-related folds models. Detected troubles

R. Babín Vich y D. Gómez Ortiz

Dpto. Geodinámica, Fac. Ciencias Geológicas, U.C.M. Avda. Complutense s/n. 28040 Madrid

### ABSTRACT

A study over twenty-two northeast trending fault propagation folds has been performed. A portion of the fold and thrust belt, affecting the Cretaceous sediments located in the northern side of the Spanish Central System, has been mapped. In order to know the fold geometry, the Suppe & Medwedeff (1990), Jamison (1987) and Chester & Chester (1990) methods were applied and the obtained results were compared. The study has demonstrated that the values obtained from the synclinal structure, when the anticline is not present, whether are comprised into a wide rank of values, or differ in a number of degrees quite important respect to the results obtained from the values measured in the anticline. This differences must be taken into account for calculation of the fault geometry in this type of structural environments.

**Key words:** Fault-propagation folds, models, fault-ramp, anticline, syncline.

Geogaceta, 20 (4) (1996), 759-762  
ISSN: 0213683X

### Introducción

En terrenos compresionales que están caracterizados por plegamiento paralelo y deslizamiento según el plano de estratificación, las estructuras de pliegues relacionados con fallas se describen geométricamente como "fault-bend", "fault propagation" y "detachment". En muchos casos, los modelos geométricos basados en la conservación de longitud de líneas y en el balance de áreas, pueden ayudar a la interpretación de estas estructuras bajo la superficie.

Las características principales de cada uno de estos tipos de pliegues son las siguientes (Fig. 1):

- Los pliegues tipo "fault-bend" se desarrollan en el labio superior de una falla inversa (cabalgamiento), y son transportados a favor de una rampa, con posterioridad a la formación de ésta. Como resultado, el flanco frontal del pliegue se localiza en la parte externa de la rampa asociada.

- Los pliegues de propagación de falla también se asocian a una rampa, pero en este caso rampa y pliegue se forman al mismo tiempo, quedando el primero sobre la propia rampa. Por tanto, el pliegue se desarrolla en relación con la terminación de una falla inversa.

- El tercer modelo, "detachment fold", igual que los de propagación se desarro-

lla en la terminación de una falla, pero en este caso no está asociado con una rampa, sino que se relacionan con la existencia de una superficie de "detachment" o "décollement". Por debajo del pliegue, el desplazamiento a lo largo del "detachment" disminuye progresivamente.

### Análisis de los pliegues

Todos los análisis relacionados con los tres tipos de pliegues descritos, usan modelos estructurales con geometrías de tipo Kink. El espesor de las unidades estratigráficas permanece constante a lo largo de la estructura, y únicamente puede variar, (no siempre) en el flanco frontal del pliegue, debido a la existencia de engrosamiento o adelgazamiento de forma constante a lo largo del flanco.

El labio inferior de la falla, en todos los modelos, no sufre alteración. La sección estructural que muestra el pliegue, debe tener una orientación lo más próxima posible a la de transporte tectónico, para poder asumir la existencia de una deformación de tipo planar, con lo cual aseguramos que no hay pérdida ni ganancia de material en el plano de la sección. Al conservarse el volumen de la roca, esta estructura puede ser balanceada y así definir el grado de acortamiento correspondiente.

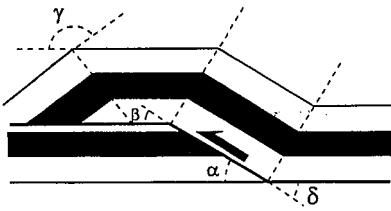
### Geometría de los modelos

- **Pliegues de propagación de falla:** consisten en dos Kink-bands AA' y CC' que se cortan. La superficie axial C es fija e intersecta a la falla en el punto de iniciación del pliegue. La distancia desde la terminación de la falla hasta el punto de iniciación del pliegue y la amplitud de los Kink-band formados, se incrementa según va siendo mayor el deslizamiento.

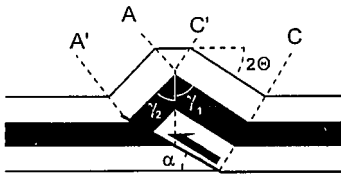
La geometría que se observa en la figura 1, es similar a la que aparece en muchos casos naturales. Los ángulos  $\gamma_1$  y  $\gamma_2$  se relacionan con el ángulo interflancos según:  $\gamma = \gamma_1 + \gamma_2$  y con el engrosamiento del flanco frontal  $tf/t$ , por  $tf/t = \text{sen } \gamma_2 / \text{sen } \gamma_1$  (Jamison, 1987), y también se puede calcular a partir de estos ángulos si existe o no conservación de área. Con estas ecuaciones, la geometría del pliegue puede ser conocida mediante el buzamiento de la rampa ( $\alpha$ ), el ángulo interflancos ( $\gamma$ ), el buzamiento del flanco trasero ( $2\theta$ ) y el engrosamiento del flanco frontal ( $tf/t$ ).

Aunque el modelo prevee soluciones para gran cantidad de valores del ángulo de buzamiento de la rampa, muchos de ellos no son geológicamente viables. Por ejemplo, cabalgamientos con poco buzamiento asociados a flancos traseros con buzamiento grande, requieren pliegues con vergencia opuesta a la falla. En general, las soluciones admisibles son aque-

**FAULT-BEND FOLD**



**FAULT PROPAGATION FOLD**



**DETACHMENT FOLD**

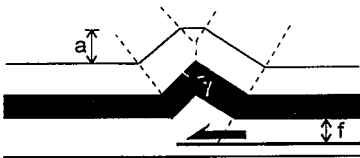


Fig. 1. Características geométricas de los distintos tipos de pliegues asociados a fallas.

Fig. 1. Geometric characteristics of the different kinds of fault-related folds.

llas en las que rampa y flanco trasero buzanan menos de 45° y el ángulo interflancos no sobrepasa los 120°.

-**Pliegues tipo "fault-bend"**: en este caso, el valor del ángulo interflancos ( $\gamma$ ), depende del ángulo de rampa ( $\alpha$ ), que viene definido por los ángulos superior e in-

fior de la rampa ( $\delta$  y  $\beta$ ), y del adelgazamiento o engrosamiento del flanco frontal (Fig. 1).

En caso de que el espesor se mantenga constante a través del pliegue, Suppe (1983) muestra que para un valor de ángulo de rampa determinado, hay dos valores posibles para el ángulo interflancos, excepto cuando el buzamiento de la rampa sea de 30°, valor máximo en este supuesto, en cuyo caso el ángulo interflancos sería de 120°. Este autor distingue estas dos soluciones, nombrando a los pliegues de ángulo interflancos grande, Modo I, y a los de pequeño valor, Modo II.

-**Pliegues de "detachment"**: Suponiendo que la superficie de "décollement" es planar y paralela a la estratificación del labio inferior, la geometría del pliegue se define en función del ángulo interflancos  $\gamma$  y de la relación  $a/f$  (Fig. 1). Para un valor dado de ésta, hay un rango de posibles soluciones que deberán ser chequeadas en cada caso concreto, para poder alcanzar la más idónea.

Como se observa en los dibujos correspondientes, todos los modelos, tanto su geometría, como su descripción, ecuaciones, etc., están referidos a la asociación de pliegue con falla, siendo siempre el pliegue una forma anticlinal. Sin embargo, muchas veces los afloramientos de campo muestran únicamente la forma sinclinal acompañante, debido a erosión del anticlinal, y a partir de ella debemos reconstruir tanto la geometría del anticlinal desaparecido, como de la rampa que ha actuado en profundidad, y que la mayor parte de las veces, ni siquiera aflora. Para estos casos, bastante frecuentes, hemos aplicado en base a los datos del afloramiento, los modelos de Suppe y Medwedeff (1990), Jamison (1987) y Chester y Chester (1990) correspondientes a plie-

gues de propagación de falla, todos ellos de fácil solución siempre que conozcamos alguno de los parámetros utilizados en las fórmulas.

El trabajo se ha efectuado sobre la banda cretácica que, con dirección NE-SW, aflora en la Hoja nº 457 (Turégano) a escala 1:50.000. Se han estudiado un total de 22 modelos de pliegues asociados a fallas, todos ellos correspondientes al tipo de pliegues de propagación de falla, con gran variedad de geometrías, tanto simétricos, como en rodilla e incluso con un flanco invertido. En esta nota, únicamente queremos llamar la atención acerca de los distintos resultados que se obtienen para el ángulo de rampa, según utilicemos datos referentes al anticlinal o al sinclinal, en el caso de que el primero esté erosionado. A continuación se describen brevemente cada uno de los modelos, para pasar después a un caso práctico.

El modelo de Suppe y Medwedeff (1990), tiene la ventaja de utilizar gran cantidad de parámetros geométricos, lo que permite, aún cuando las condiciones de afloramiento sean malas, una mejor definición de la geometría, incluso en el caso de anticlinal totalmente erosionado y existencia solo del sinclinal. A partir de su ángulo interflancos y de las relaciones de espesor entre flanco frontal y flanco trasero, podemos conocer un rango de valores posibles para el buzamiento de la rampa y para el ángulo interflancos del anticlinal. Cuanto más apretada sea la estructura sinclinal, más preciso es el valor que obtenemos para el buzamiento de la falla.

El modelo de Jamison (1987) utiliza menos parámetros, por lo que es más difícil obtener el ángulo de buzamiento de la rampa y la geometría total, a partir del sinclinal. Para estos casos, el autor cita en el apéndice de su trabajo una fórmula que relaciona el ángulo interflancos del sinclinal con el buzamiento de la falla ( $\alpha$ ):  $\beta_1 = \text{tg}^{-1} [(2 \text{sen } \alpha) / (2 \text{ cos } \alpha - 1)]$ , siendo  $\beta$  el ángulo entre la superficie axial sinclinal y el flanco tendido, suponiendo que la variación de espesor entre el flanco frontal y el tendido es la misma para todas las unidades, falladas o no. En este caso, para un valor de ángulo interflancos del anticlinal, el buzamiento obtenido para la falla tiene un valor mayor que el que se obtiene teniendo en cuenta el ángulo interflancos del sinclinal. Por tanto, utilizando la fórmula anterior el valor obtenido es siempre inferior al real. En aquellos pliegues completos en los que se puede medir el ángulo interflancos tanto en anticlinal como en sinclinal, hemos de sumarle una media de 13° para llegar a su valor real.

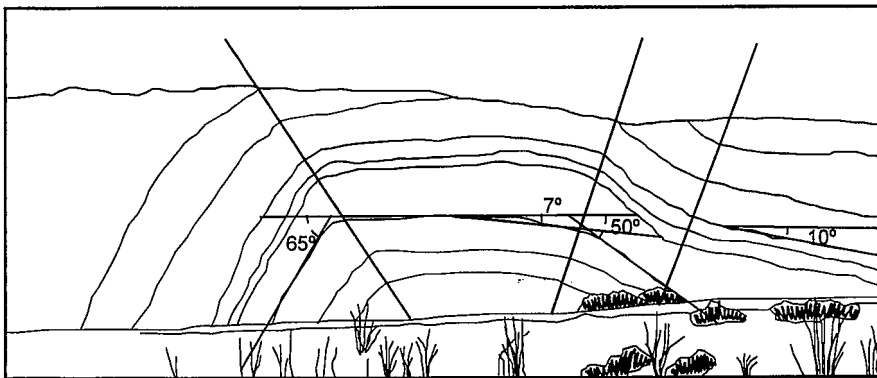


Fig 2.- Esquema de afloramiento y elementos geométricos del pliegue de Bernuy de Porreros.

Fig 2.- Outcrop scheme and geometric elements of the fold located near Bernuy de Porreros.

Por último, el modelo de Chester y Chester (1990), se basa en la relación de espesores de los flancos, el ángulo interflancos del anticlinal y el buzamiento de la falla. Cuando el anticlinal está erosionado, hay que apoyarse en la geometría sinclinal para determinar la estructura. En este caso, la ecuación es :

$$\alpha = (tf/t) \operatorname{cosec}(2\theta + \gamma) + \cot(2\theta + \gamma)$$

(ver Fig. 1).

También existe una relación entre el buzamiento del flanco frontal y el ángulo  $(2\theta + \gamma)$  que es la siguiente:  $\phi = 180 - (2\theta + \gamma)$ . Así podemos conocer el rango de valores para el ángulo de buzamiento de la falla, que estará comprendido entre un  $2\theta$  máximo y  $\gamma$  mínimo, hasta un mínimo valor de  $2\theta$  siendo  $\gamma$  máximo.

Hemos aplicado estos tres modelos al estudio de la geometría de los 22 pliegues del área de estudio, y hemos observado que en todos los casos en que afloran anticlinal y sinclinal, al aplicar el modelo de Jamison en cada uno de ellos, la diferencia de valores obtenida para la geometría de la falla está comprendida entre  $9^\circ$  y  $15^\circ$ , por lo cual hemos tomado una media de  $13^\circ$  que debemos sumar al valor obtenido a partir del sinclinal, para conocer la geometría de la falla. Los otros dos modelos, nos dan un rango de valores posibles para el buzamiento de la rampa, cuya precisión dependerá de la geometría del sinclinal aflorante.

### Estudio sobre un pliegue real

Uno de los pliegues que aparece completo, es el que aflora en la localidad de Bernuy de Porreros, cuyos principales parámetros geométricos se muestran en la tabla I.

La estructura principal (Fig. 2), está constituida por un pliegue muy asimétrico, con vergencia al NO y eje subhorizontal. El espesor que presentan las unidades en el flanco frontal del anticlinal es el mismo que se observa a lo largo del resto de la estructura.

- Modelo de Suppe y Medwedeff (1990). Utilizando el modelo de espesor constante y a partir de los datos de buzamiento del flanco frontal,  $65^\circ$ , y de flanco trasero del anticlinal,  $7^\circ$ , determinamos directamente el valor del ángulo de buzamiento de la falla,  $46^\circ$ , con una posible pérdida de buzamiento en profundidad de  $7^\circ$ . Conocido el valor de la rampa, podemos chequear la diferencia entre algunos valores angulares predichos por el modelo con los observados en el campo. Por ejemplo, el ángulo entre el flanco tendido del sinclinal y el plano axial sinclinal predicho, es de  $58^\circ$ ,  $5^\circ$  más de los observa-

dos en el campo. El ángulo interflancos del anticlinal es de  $106^\circ$ , tan solo  $2^\circ$  menos que los medidos en el campo. Por tanto el modelo se ajusta bastante bien a la estructura observada, y nos da la geometría que se muestra en la figura 3a.

- Modelo de Jamison (1987). Con el valor del ángulo interflancos del anticlinal y la relación de espesores, calculamos directamente la geometría de la falla, que nos da un ángulo de buzamiento para la rampa de  $48^\circ$ , muy semejante al obtenido en el modelo anterior (figura 3b).

- Modelo de Chester y Chester (1990). Conocemos directamente el valor del ángulo de buzamiento de la falla a partir de los ábacos que proporciona el autor, obteniendo un valor de  $48^\circ$  (figura 3c). En este caso también podemos comprobar el ajuste de la estructura modelizada con la real, comparando por ejemplo el ángulo entre el flanco tendido del sinclinal y su plano axial, siendo el valor que predice el modelo de  $57^\circ$ , y el valor real de  $53^\circ$ , con lo que el grado de error es bastante aceptable.

Como se puede observar, en el caso de que aflore un pliegue completo, la aplicación de los distintos modelos es inmediata, y todos ellos llegan a una solución muy similar para la geometría de la falla.

En el caso del modelo de Jamison (1987), si suponemos que el anticlinal no aflora y únicamente tenemos datos de la forma sinclinal, al aplicar la fórmula correspondiente, para un valor de  $52.5^\circ$  entre la traza axial sinclinal y su flanco tendido, el ángulo de buzamiento de rampa correspondiente, es de  $31^\circ$ , con una diferencia de  $15^\circ$  sobre el obtenido en base a las medidas sobre el anticlinal. Para un

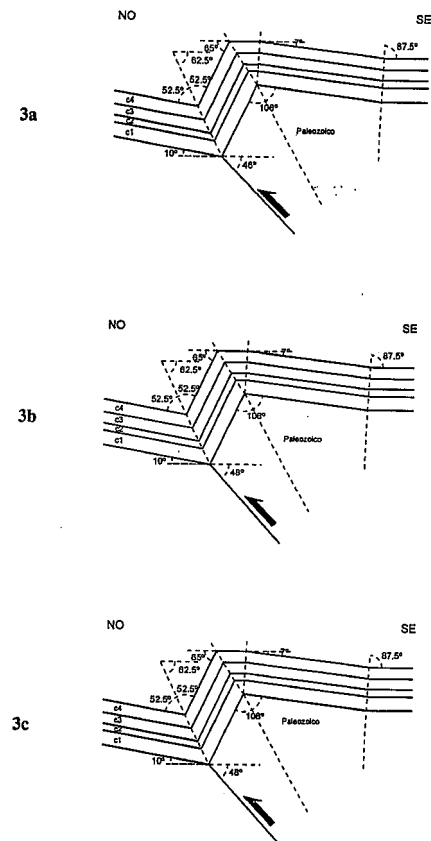


Fig. 3.- Distintas soluciones para el pliegue de la figura 2. 3a) Solución aportada por el modelo de Suppe y Medwedeff (1990). 3b) Solución obtenida mediante el modelo de Jamison (1987). 3c) Solución aportada por el modelo de Chester y Chester (1990).

Fig. 3.- Different kinds of solutions from the fold of figure 2. 3a) Proposed solution from the model of Suppe and Medwedeff (1990). 3b) Solution obtained by means of the model of Jamison (1987). 3c) Solution defined from the model of Chester and Chester (1990).

<b>Orientación media del flanco frontal</b>	N $40^\circ$ E $65^\circ$ NO
<b>Orientación media del flanco trasero del anticlinal</b>	N $38^\circ$ E $7^\circ$ SE
<b>Ángulo interflancos del anticlinal</b>	$108^\circ$
<b>Buzamiento del plano axial del sinclinal</b>	$62^\circ$ SE
<b>Relación tf/t</b>	$\cong 1$

Tabla I. Elementos geométricos del pliegue de la localidad de Bernuy de Porreros.

Table I. Geometric elements of the fold located near Bernuy de Porreros.

valor de buzamiento de rampa de  $46^\circ$ , el ángulo que forma la traza axial sinclinal con su flanco tendido, debería tener un valor de  $74^\circ$  (según la fórmula), y no los

$52.5^\circ$  medidos en el campo. Hemos constatado esta diferencia en todos aquellos pliegues que aparecen completos, por lo tanto podemos afirmar que existe un ver-

dadero problema a la hora de aplicar estas fórmulas en aquellos casos en los que no está presente la forma anticlinal.

### Conclusiones

- Existe una relación estrecha entre la geometría de las falas y la de los pliegues que originan. Existen diversos modelos que en función de distintos elementos geométricos, podemos predecir la forma de las estructuras cuando éstas no son visibles.

En el caso de pliegues de propagación de falla, la aplicación de los modelos a 22 casos reales cartografiados en la zona de Turégano revela que las soluciones obtenidas son muy parecidas cuando la geometría del anticlinal es visible.

En aquellos casos en los que única-

mente se dispone de la forma sinclinal, la precisión de la solución obtenida depende de la propia geometría del pliegue.

- Los tres modelos existentes presentan diferencias en cuanto al grado de detalle con el que se definen las relaciones geométricas pliegue-falla, siendo el de Suppe y Medwedeff (1990) el más preciso pero más complejo de utilizar, el de Jamison (1987) el más sencillo pero menos detallado, y el de Chester y Chester (1990) es un caso intermedio entre ambos.

- Para el modelo de Jamison (1987), se ha detectado una diferencia en el cálculo del ángulo de la rampa de la falla de unos 13° para el caso de que el cálculo se realice con la forma sinclinal en vez de la anticlinal, hecho que debe ser tenido en cuenta a la hora de efectuar los modelos.

### Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado gracias al proyecto DGICYT PB 94-0242.

### Referencias

- Chester, S.J. y Chester, F.M. (1990): *Jour. of Struc. Geology*, 12 (7): 903-910.
- Gómez, D. (1995): *Tesis de Licenciatura*. Universidad Complutense de Madrid, 300 p. (inédita).
- Jamison, W.R. (1987): *Jour. of Struc. Geology*, 9 (2): 207-219.
- Suppe, J. (1983): *Amer. Jour. of Science*, 283: 684-721.
- Suppe, J. y Medwedeff, D.A. (1990): *Eclogae Geol. Helv.*, 83(3): 409-454.