

MODELADO ANÁLOGO DE PLIEGUES POR PROPAGACIÓN DE FALLA: OBTENCIÓN Y COMPARACIÓN DEL CAMPO CINEMÁTICO

Berenice Plotek^a, Cecilia Guzmán^a, Ernesto Cristallini^b

^a *Laboratorio de Modelado Geológico, Instituto de Estudios Andinos Don Pablo Groeber, UBA-CONICET, ARGENTINA.*

^b *LA.TE. ANDES S.A. – CONICET, ARGENTINA.*

e-mail: bereplotek@gmail.com

RESUMEN

Los pliegues por propagación de falla se forman contemporáneamente a la propagación de una falla a través de una serie de estratos, donde el acortamiento da lugar a la formación de un pliegue en la zona próxima a su terminación. Una de las principales características de este tipo particular de plegamiento es que su limbo frontal presenta mayor ángulo de inclinación. Los primeros métodos para analizar la evolución se basan en construcciones a partir de relaciones geométricas. Erslev (1991) propone un método cinemático, denominado *Trishear*, debido a que estas estructuras presentan una zona triangular de deformación penetrativa focalizada. Esto puede ser modelado por medio de cizalla conformando un modelo alternativo donde los bancos rotan progresivamente y con heterogeneidad en la deformación, sobre todo hacia el limbo frontal (Allmendinger R.W., 1998). De esta manera, se relaciona la geometría y el desplazamiento de la falla con la forma del anticlinal. Este método es especialmente útil ya que permite obtener los patrones de deformación. Sin embargo, su punto débil es que las distribuciones de velocidad pueden no tener validez mecánica, ya que no toma en cuenta las propiedades de los materiales que sufren deformación. Durante este trabajo se describe un modelo experimental realizado en el laboratorio a partir de materiales simples para la obtención del campo cinemático a lo largo del desarrollo de la estructura a partir de imágenes seriadas. El propósito consiste en definir las diferentes etapas de formación del anticlinal y plantear cómo evoluciona el campo cinemático, representado por los vectores de velocidad que se observan en las fotografías, sin dejar de lado el marco mecánico.

Palabras Clave: Modelo Análogo, Pliegues, Propagación de falla, Trishear.

INTRODUCCIÓN

Los pliegues de propagación de falla se forman contemporáneamente a la propagación de una falla a través de una serie de estratos, de forma que el acortamiento da lugar a la formación de un pliegue en la zona próxima a su terminación. El artículo de Suppe J. y

Medwedeff D.A., 1990 fue el primero en presentar estudios detallados de estas estructuras, introduciendo dos modelos geométricos. El primero de estos modelos se basa en la conservación del espesor y el área de los bancos mientras que el segundo permite cambios de espesor hacia el sector del limbo frontal. Una de las principales características de este tipo particular de plegamientos es que la estructura resultante es asimétrica y el limbo frontal se caracteriza por su mayor ángulo de inclinación (Shaw et al, 2005; Brandes C. y Tanner D.C., 2014)” ver Fig.1”. En este mecanismo, la falla y el plegamiento son contemporáneos (Suppe J. y Medwedeff D.A., 1990; Saffar M. Al., 1993).

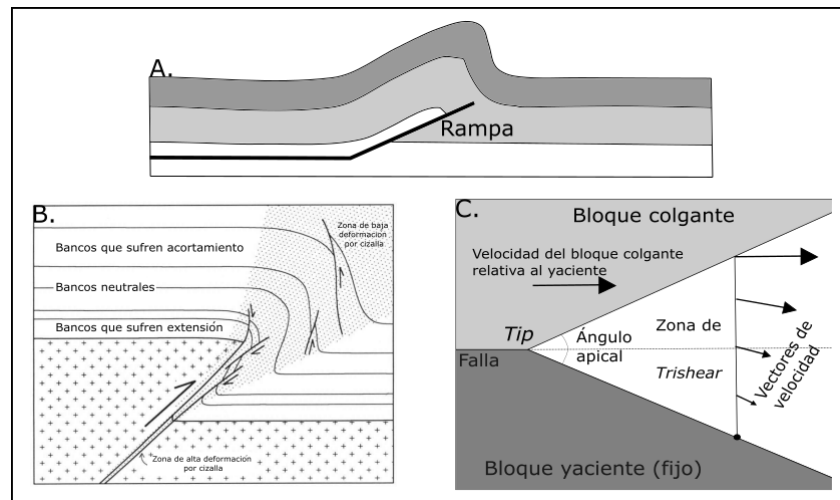


Figura 1. a. Esquema de un pliegue por propagación de falla mostrando su rampa asociada (Modificado de Jamison W.R., 1987). **b.** Modelo conceptual de la zona de cizalla triangular para pliegues de propagación de falla con participación de basamento, mostrando el *strain* que sufren los bancos involucrados. (Modificado de Erslev E. y Rogers J.L., 1993). **c.** Geometría de la zona de cizalla triangular (Modificado de Allmendinger R.W., 1998).

Esta estructura comúnmente presenta un sinclinal en la base del bloque yacente y cambios tanto de espesor como de inclinación de los estratos en el limbo frontal. Estos rasgos no pueden ser explicados por medio de los modelos de bandas *kink* mencionados anteriormente (Suppe J. y Medwedeff D.A., 1990; Saffar M. Al., 1993). Debido a esto, un nuevo modelo, esta vez basado en la cinemática, fue desarrollado y denominado *Trishear* (Erslev E., 1991). Los pliegues estudiados presentan una zona triangular de deformación penetrativa, especialmente focalizada en el extremo superior de la falla o *tip* “ver Fig.1”. Esto puede ser modelado por medio de cizalla ofreciendo un método alternativo a los ya existentes. Mientras que los modelos que involucran migración de superficies axiales predicen valores de inclinación uniformes y deformación homogénea a lo largo de todo el sector frontal, los casos reales muestran grandes variaciones en estas características. Se observa en general que los estratos rotan progresivamente y que existe heterogeneidad en la deformación (Erslev E., 1991, Allmendinger R.W., 1998).

Ya que los modelos cinemáticos no pueden replicar los detalles de la deformación, la técnica del modelado análogo se utiliza para complementar los datos ya que permite

incorporar un marco mecánico al método cinemático. En esta investigación, el modelado análogo es usado para estudiar el campo cinemático al que se encuentran sometidas las partículas que componen diversos materiales durante la generación de un anticlinal por propagación de falla. Se realiza con el programa PIVlab–MATLAB (Thielicke W. y Stamhuis E.J., 2014) el análisis para obtener el campo de velocidad representado por vectores. Las siglas PIV hacen referencia a un velocimetría por imagen de partículas. Por lo tanto, lo que se obtiene es un campo instantáneo de velocidades en un plano del modelo análogo.

Metodología

Se utiliza una caja de 50 cm de largo por 15 cm de ancho y 20 cm de alto, con paredes de acrílico cuyo lateral está compuesto por un pistón móvil sujeto a un motor que permite el movimiento de este comprimiendo los materiales dispuestos en el interior. Se utiliza una lámina de plástico de alto impacto, rígida, para replicar la falla principal de 14 cm, ubicada a 23 cm del pistón móvil con un ángulo de 45 grados recreando una falla inversa. A su vez, para evitar que la placa se deslice por la arena y suba durante la compresión, se agregan unos tapones del mismo material a un lado para aumentar el rozamiento con los granos y que resulte más difícil el deslizamiento “ver Fig. 2”. Este lado se coloca de manera tal que corresponda con el bloque yacente de la falla. Se la sujeta con cinta a los costados de la caja mientras se rellena la base con arena fina masiva hasta alcanzar 10 cm de altura y posteriormente se remueve cuidadosamente la cinta.

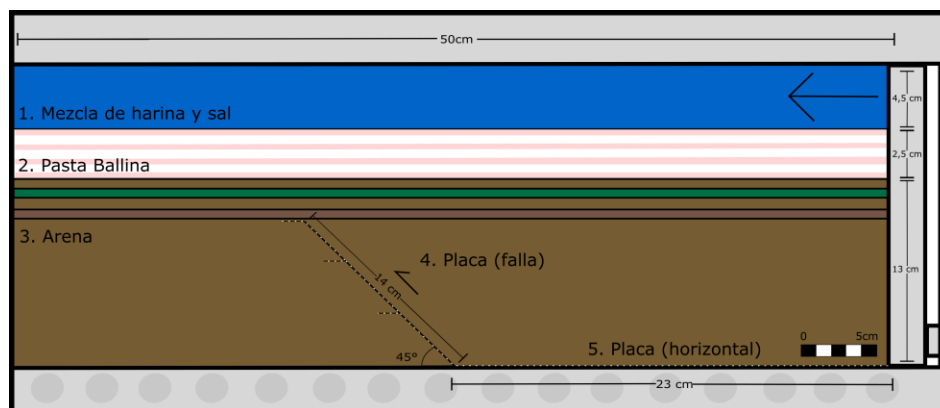


Figura 2. Esquema del experimento señalando los materiales utilizados. 1: Mezcla de sal y harina coloreada. 2: Pasta azucarada. 3: Arena. 4: Placa de alto impacto de 14 cm de largo que actúa como falla principal; en el lado externo posee pequeños picos del mismo material para evitar su deslizamiento. Se encuentra ubicada en contacto con una placa horizontal. 5. Placa de alto impacto de 23 cm de largo, ubicada en la base del modelo y fijada al pistón móvil. La flecha negra en el margen superior izquierdo indica el sentido del movimiento del pistón móvil.

Para poder visualizar la deformación que sufre la arena, se sedimentan en forma homogénea 4 capas de arena coloreada, conformando láminas hasta alcanzar 3 cm de altura. Finalizado este armado, se humedece ligeramente con agua todo el modelo para eliminar restos de aire que pueden quedar atrapados entre los granos. Luego, se permite que

seque para no mojar la pasta azucarada y recuperar el valor de cohesión interna que caracteriza a la arena, que debe permanecer bajo para garantizar el escalado del modelo. Para simular los estratos que constituyen el plegamiento se utilizan láminas de pasta azucarada blanca y rosa alternadas de 50 cm de largo, hasta alcanzar los 2,5 cm de altura total. Por arriba de estas capas, se coloca un film transparente para protegerlas de la humedad que desprende la masa de sal y harina colocada en la parte superior. Dicha masa se usa para comprimir todo el modelo, recreando la carga litósfera. Se sitúan en total 4,5 cm de mezcla. La caja se cierra a presión, pero a medida que la misma aumenta, se abrirán levemente los mismos para evitar la flexión y/o quiebre del pistón móvil “ver Fig.2”. Al modelo se lo comprime durante 80 minutos y se obtuvo un acortamiento total de 12 cm (24% de acortamiento). La velocidad del motor era de 1 cm cada 7 minutos. A medida que la estructura es conformada, se toman fotografías en ambos laterales para poder seguir la evolución del pliegue. Se obtuvieron en total 80 imágenes, 1 por minuto. Dichas fotografías fueron posteriormente procesadas mediante la utilización del software IrfanviewTM para eliminar zonas no deseadas y luego analizadas con el programa PIVlab–MATLAB (Thielicke W.y Stamhuis E.J., 2014) para obtener los vectores cinemáticos que indican el campo de velocidades.

Velocimetría por Imagen de Partículas

La técnica PIV consta de cuatro partes principales: 1. La obtención de las imágenes; 2. Pre-procesamiento y mejora de las imágenes; 3. Aplicación de un algoritmo de correlación cruzada sobre imágenes consecutivas y 4. Post-procesamiento que permite la interpretación de resultados (Termini D. y Di Leonardo A., 2018) “ver Fig.3”. Opera a partir del seguimiento de la textura, es decir, la variación espacial del brillo dentro de una imagen, a través de una serie de imágenes. La imagen inicial se divide en una grilla de parches de prueba. Cada parche de prueba posee unas coordenadas de ubicación tanto para el eje X como para el eje Y en la imagen 1 a un tiempo igual a t_1 “ver Fig.3”.

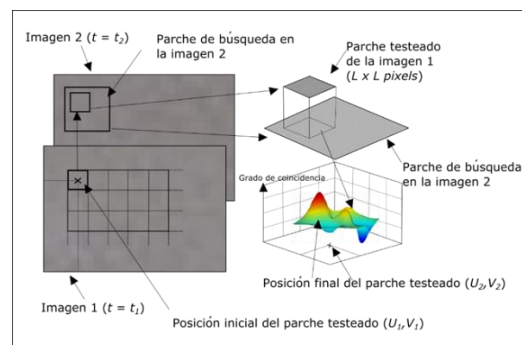


Figura 3. Principios de la técnica PIV (Modificado de White D.J. y Take W.A., 2002).

Para encontrar la nueva ubicación de este parche en una imagen posterior, se realiza una operación donde se evalúa la correlación entre el parche de prueba extraído de la imagen 1 y un parche de mayores dimensiones definido en la misma parte de la imagen 2, con un tiempo igual a t_2 . La ubicación en la que se encuentra la correlación más alta indica la

posición desplazada del parche (White D.J. y Take W.A., 2002). Esta operación se repite para toda la grilla de parches dentro de la imagen, luego el ciclo es repetido para cada imagen dentro de la serie, para obtener trayectorias completas. A partir de cada fotografía, como se mencionó anteriormente, se realiza con el programa PIVlab – MATLAB (Thielicke W. y Stamhuis E.J., 2014) el análisis para obtener el campo de vectores. Este programa para poder conformar los vectores crea, dentro de la serie de imágenes, áreas que son definidas por el usuario al introducir un valor determinado de *pixels* para ser analizados. En este caso puntual las áreas de interrogación son de 96, 64 y 32 *pixels*. Luego del procesamiento se obtienen como resultado los vectores que indican dirección, sentido y magnitud del movimiento. A partir de los gráficos obtenidos es posible analizar el movimiento a lo largo de la conformación de la estructura e inferir los cambios del campo de velocidades.

Escalado del modelo

La teoría del escalado permitió comparar cuantitativamente experimentos analógicos y prototipos naturales. Esta teoría exige similitud geométrica, cinemática y dinámica, lo que permite escalar los resultados del modelo (Hubbert M., 1937). En este trabajo, nos enfocamos en los diferentes dominios del campo cinemático durante la evolución de un pliegue de propagación de falla en lugar de los valores absolutos de los vectores de velocidad. El modelo descrito fue escalado de tal manera que 1 cm en el experimento simula 100 m en un prototipo natural (factor de escala geométrico $\lambda = 1 \times 10^{-4}$). Tanto el prototipo natural como el modelo están sujetos al mismo valor de aceleración gravitacional y en consecuencia a la misma fuerza gravitacional, imponiendo un factor de escala $g = 1$. Se decidió utilizar la densidad media de la corteza continental como densidad para el prototipo natural, que se estimó en alrededor de $2,60 \text{ g / cm}^3$ (Saha et al. 2016; Rosas et al. 2017). La densidad del modelo es el promedio entre las densidades de los materiales utilizados, $1,40 \text{ g / cm}^3$. De esta forma, el valor del radio de densidad (δ) es igual a 0,54. El factor de escala de tensión S es igual a $5,4 \times 10^{-5}$ “ver Ec. (1)”:

$$\text{Ec. (1)} \quad S = \delta \cdot g \cdot \lambda = 5,4 \times 10^{-5}$$

Suponiendo un comportamiento de Coulomb frágil para las rocas del basamento, la arena es apropiada para trabajar a la escala seleccionada. En este caso la arena, con una cohesión en el rango de 1000 Pa, podría representar materiales de prototipos que se aproximan a los 20 MPa. La plastilina o materiales de modelado similares son aproximaciones útiles a las rocas en simulaciones (McClay K.R., 1976, Zulauf J. y Zulauf G., 2004, Fan et al. 2020). El comportamiento de la pasta azucarada es como la plastilina, solo comienza a fluir a altas temperaturas. Suponiendo un comportamiento dúctil de la cubierta sedimentaria, este material es conveniente para realizar el experimento análogo. La viscosidad de este material es $\sim 2,2 \times 10^7 \text{ Pa s}$ y podría representar una capa cortical dúctil con una viscosidad $\sim 10^{21} \text{ Pa s}$ (Shinevar et al. 2018)

RESULTADOS

A continuación, se presentan los resultados obtenidos. Las imágenes muestran los vectores que reflejan el campo cinemático al que se encuentran sometidas las partículas durante la configuración del pliegue. La figura 4 ilustra la componente total del vector velocidad para 6 estadios en la evolución del modelo. Cada panel muestra tanto la magnitud de la velocidad, representada con una escala de colores, y los vectores propiamente dichos. No serán descritos los vectores que reflejan el movimiento en el sector de la mezcla de harina y sal ya que su propósito es exclusivamente aportar presión para simular una carga litoestática.

En los primeros minutos, las partículas migran en el sentido impuesto por el pistón móvil. Los vectores se encuentran representados exclusivamente por la componente horizontal de la velocidad, V_x , y pierden magnitud hacia el lado correspondiente al bloque yacente de la falla principal. El sector central del modelo concentra las mayores magnitudes y se delimita la zona de rotación progresiva (ZRP). Las partículas son empujadas por el pistón, migrando hacia delante con un dominio marcado de la componente horizontal V_x hasta que aparece la componente vertical V_y , en el inicio de la ZRP “ver Fig.4a”. La magnitud de los vectores aumenta, y los valores máximos totales se concentran en este sector, tal como lo muestra la escala de colores. La componente vertical de los vectores de velocidad sube progresivamente a medida que las partículas ingresan en el sector adyacente a la placa de alto impacto que genera la falla principal. En este punto, se define también en este estadio, la zona de vectores paralelos (ZVP) donde el movimiento del material exhibe vectores de velocidad paralelos a dicha placa “ver Fig.4a”. Gradualmente, los vectores se colocan paralelos a la falla principal. No existe un límite neto entre ambas zonas delimitadas, pero la aparición de la componente V_y se da antes en aquellos vectores que reflejan el movimiento de las partículas en los niveles superiores. La rotación en la base del modelo ocurre solamente en aquellas partículas situadas al lado de la placa de alto impacto, de allí que el inicio de la ZRP sea señalado con una línea diagonal punteada “ver Fig. 4a”. Si bien todavía no se encuentra configurado el flanco frontal del anticlinal, en el sector superior que le corresponde también se observan magnitudes mayores para los vectores de velocidad. Resulta llamativo que las mayores magnitudes de velocidad se encuentren en el sector central del modelo, en la ZRP, en lugar de localizarse en el sector aledaño al pistón móvil.

En etapas posteriores del experimento, se aprecia la configuración del limbo frontal y es posible definir la zona que muestra la nueva rotación (ZNR). Este sector presenta forma de triángulo invertido con el ápice localizado en el extremo superior de la falla principal “ver Fig.4b”. No presenta simetría con respecto a la misma. Las partículas que constituyen el limbo frontal ingresan en la ZNR con vectores de velocidad paralelos a la placa de alto impacto. Progresivamente, disminuye la componente vertical del vector velocidad V_y , que era la dominante en el bloque colgante. A su vez, aumenta nuevamente la componente horizontal del vector velocidad, V_x , la cual había disminuido previamente dentro de la ZRP. En cuanto a la magnitud de los vectores analizados, presentan valores mayores de velocidad en el centro del bloque colgante de la falla.

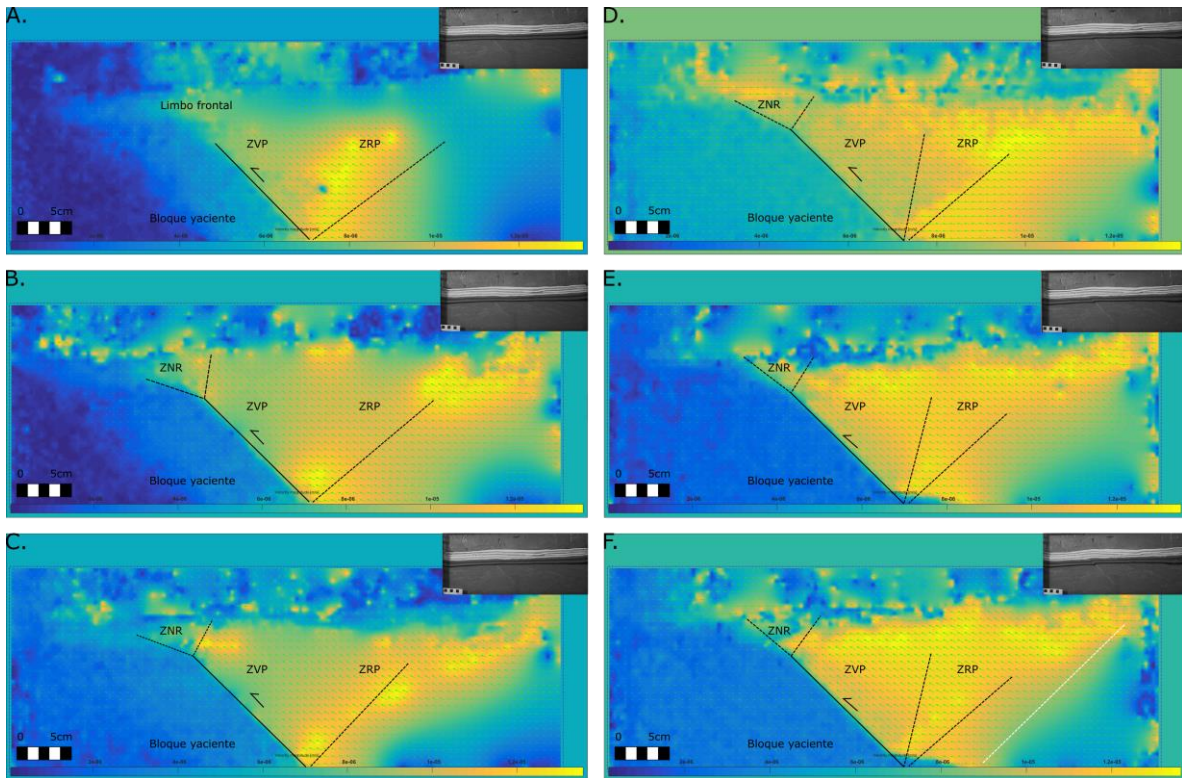


Figura 4. Campo de velocidad total graficado por medio de una escala de colores donde los valores máximos se representan en color amarillo y los valores mínimos se exhiben en color azul. La posición de la placa de alto impacto que actúa como falla principal se representa con una línea recta negra. El inicio de la zona de rotación progresiva (ZRP) se marca con línea punteada. Dentro de esta zona aparece y aumenta la componente V_y del vector velocidad. ZVP hace referencia a la zona de vectores paralelos, donde los mismos se presentan paralelos a la falla principal. En el bloque yacente casi no se registra movimiento de las partículas. **a.** La fotografía corresponde a los 7 minutos de compresión (1,05 cm de acortamiento, siendo el 8,75% del valor total alcanzado). Si bien la fotografía del experimento todavía no muestra el limbo frontal configurado, en el sector se pueden apreciar también altos valores de magnitud. **b.** La fotografía corresponde a los 10 minutos de compresión (1,5 cm de acortamiento, siendo el 12,5% del valor total alcanzado). Aparece la zona de nueva rotación (ZNR) en el limbo frontal del pliegue. **c.** La fotografía corresponde a los 13 minutos de compresión (1,95 cm de acortamiento, siendo el 16,25% del valor total alcanzado). La zona de vectores paralelos (ZVP) crece. **d.** La fotografía corresponde a los 16 minutos de compresión (2,40 cm de acortamiento, siendo el 20% del valor total alcanzado). Los límites de la zona de rotación progresiva (ZRP) se marcan con línea punteada. La zona de vectores paralelos (ZVP) aumenta su tamaño. Se estructura el limbo frontal del anticlinal. **e.** La fotografía corresponde a los 19 minutos de compresión (2,85 cm de acortamiento, siendo el 23,75% del valor total alcanzado). La zona de vectores paralelos (ZVP) aumenta su tamaño a expensas de la ZRP. Los límites de la ZNR son dinámicos. En particular, el inferior tiende a rotar para quedar posicionado paralelo a la placa, como una prolongación de esta. **f.** La fotografía corresponde a los 22 minutos de compresión (3,3 cm de acortamiento, siendo el 27,5% del valor total alcanzado). El limbo frontal se encuentra configurado y aparece un retrocorrimento, señalado con línea punteada blanca.

Hacia el límite con el bloque yacente, la magnitud decrece “ver Fig. 4b”. Las 3 zonas configuradas se presentan en los siguientes estadios del modelo análogo estudiado. Se puede notar el aumento del rechazo de la falla principal, debido a la separación de los bancos de arena “ver Fig. 4c”. La diferencia principal con respecto a las fases previas es que la zona donde se concentran los vectores paralelos (ZVP) a la falla principal aumenta

su espesor a expensas de la zona de rotación progresiva (ZRP) “ver Figs. 4c y 4d”. A partir de esta etapa, y en estadios posteriores, es posible definir el límite entre las zonas de rotación progresiva y de vectores paralelos “ver Figs. 4d y 4e”. Los límites de la zona de nueva rotación (ZNR) no son fijos, por el contrario, tienden a desplazarse. En comparación con las etapas analizadas previamente, en fases más avanzadas de la evolución del pliegue por propagación de falla, se observa una disminución del ancho de esta zona de rotación. Esto se da en particular por la migración del borde situado sobre el bloque yacente, que rota y se posiciona como una prolongación de la placa de alto impacto “ver Fig. 4e”. Finalmente, el pliegue por propagación de falla queda bien configurado. A partir de este estadio, y pese a la colocación de la placa horizontal en la base de la caja para impedirlo, se observa la presencia de un retrocorrimiento “ver Fig. 4f”. No ocurre la aparición de fallas inversas menores en el sector del bloque yacente. La configuración del campo cinemático descrita se conserva hasta el final del modelo análogo.

DISCUSIONES

Al respecto del campo cinemático, se observan en la serie de fotografías analizadas dos rotaciones. En el bloque colgante del experimento realizado, la tendencia general es que los vectores ganan progresivamente componente vertical V_y hasta posicionarse de manera paralela a la falla principal simulada con la placa de alto impacto. El campo cinemático inicialmente es dominado por la componente horizontal V_x , en el sentido impuesto por el pistón. La zona de rotación puede ser esquematizada con forma de triángulo invertido, con el ápice situado hacia la base del modelo y aledaño al límite inferior de la falla. Los vectores que identifican el movimiento de las partículas situadas en niveles superiores muestran la aparición de la componente vertical V_y antes que aquellos localizados en los niveles inferiores. Esto se atribuye a cuestiones experimentales ya que la fricción basal generada por el borde de la caja tiene influencia. En los primeros estadios de este modelo análogo, el inicio de la rotación puede esquematizarse por medio de una línea recta, y en etapas posteriores es posible definir el límite entre el sector donde se aprecia la rotación progresiva y el sector donde los vectores ya se colocan paralelos a la falla. En esta zona, denominada zona de vectores paralelos, domina la componente vertical del vector velocidad. Justo arriba del *tip* de la falla principal, ocurre una nueva rotación en el área frontal. Al igual que en caso anterior, la zona se esquematiza como un triángulo invertido con el ápice localizado en el *tip* de la falla. La zona delimitada es asimétrica con respecto a esta, y sus bordes son dinámicos. El campo vectorial en el sector del bloque colgante es paralelo a la falla, y a medida que las partículas ingresan en esta zona, los vectores que muestran el movimiento sufren la disminución de la componente vertical V_y junto con el gradual aumento de la componente horizontal V_x . La rotación progresa a medida que los vectores pierden magnitud hasta tender a cero en la zona del límite inferior situado en el lado del bloque yacente. En cuanto a la dinámica de los bordes, el cambio es muy notorio en este límite inferior, ya que termina quedando paralelo a la falla principal, como una prolongación de la placa de alto impacto.

Se observa que el pliegue representado en el modelo análogo y el campo vectorial obtenido se ajustan bien al modelo de *Trishear* “ver Fig. 1”: Se aprecia que en extremo superior de la

falla hay una zona de geometría triangular que acumula mayor deformación en la configuración del limbo frontal del pliegue y a medida que las partículas se acercan al límite con el bloque yacente de la falla, los vectores de velocidad disminuyen su magnitud. Las primeras descripciones asociadas a este método señalan que, en el tope de la zona de cizalla, los vectores son similares en sentido y magnitud a los del bloque colgante de la falla (Allmendinger R.W., 1998). Esta característica se registra bien en los gráficos del modelo análogo presentado “ver Fig. 4”. El área que se describe a lo largo de este trabajo como la zona de nueva rotación localizada a partir del extremo superior de la falla principal es equivalente a la zona de *Trishear* asimétrica descrita por primera vez en el trabajo de Zehnder A.T. y Allmendinger R.W., 2000. En este caso, los ángulos de los límites situados en los lados correspondientes al bloque colgante y yacente de la falla no son iguales, siendo el primero mayor “ver Fig. 5”. En la bibliografía se pueden encontrar numerosos trabajos que ilustran la dinámica de estos límites, como en el artículo de Mitra S. y Miller J.F., 2013 donde efectúan un modelo análogo elaborado con arcilla. La diferencia principal con el experimento presentado en este trabajo es que la zona de *Trishear* es definida a partir de las estructuras secundarias y la deformación total, por lo tanto, se expande a medida que progresa el modelo análogo “ver Fig. 6”. En el caso del modelo análogo realizado en este experimento, la zona se define a partir de los vectores cinemáticos y lo que se observa es que inicialmente la zona de rotación con forma triangular posee mayor tamaño “ver Fig. 5a” que, en los estadios posteriores, donde el borde inferior situado del lado del bloque yacente de la falla migra “ver Fig. 5b”. Por lo tanto, si se define la zona en base a la rotación de los vectores, es posible plantear que el ancho disminuye. Ahora, si se define en base a la deformación total generada, es cierto que se expande, como bien lo señala el artículo de Mitra S. y Miller J.F., 2013 “ver Fig. 6”.

CONCLUSIONES

En el modelo se definen tres zonas a partir de la tendencia general que siguen los vectores cinemáticos. El movimiento se inicia con vectores que tienen una única componente horizontal en la dirección impuesta por el pistón, y luego rotan con un progresivo aumento de la componente vertical. Se define este sector como la zona de rotación progresiva. Luego los vectores cinemáticos tienden a colocarse paralelos a la falla principal a medida que las partículas migran dentro del área definida como zona de vectores paralelos. Cerca del extremo superior de la falla principal ocurre una rotación nueva en un área con forma triangular cuyo ápice se ubica en el *tip* de la falla. Esta zona es equivalente a la de *Trishear* en los modelos teóricos propuestos para reconstruir pliegues por propagación de falla. A diferencia de modelos análogos realizados con arcilla previamente por otros autores, donde se analiza la deformación total y el tamaño de la zona a partir de fallamiento secundario, aquí es posible sostener que la zona disminuye su espesor, ya que se observa la migración del borde inferior situado hacia el lado del bloque yacente de la falla, hasta colocarse casi paralelo a la misma. Por lo tanto, ocurre la disminución del ángulo que la caracteriza. La zona donde ocurre la rotación es asimétrica con respecto a la placa del alto impacto. El bloque colgante de la falla no se comporta como un bloque rígido, por el contrario, también sufre deformación a medida que se configura el anticlinal. La pasta azucarada resulta ser un

material apto para generar este tipo de pliegues, a partir de la influencia de la placa de alto impacto que simula ser una falla inversa que se propaga, afectando también material con comportamiento granular como la arena.

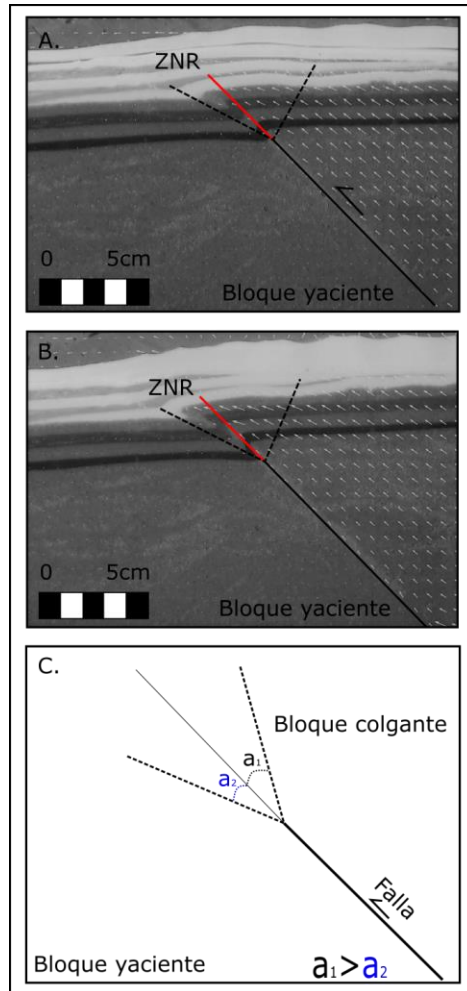


Figura 5. Zona de nueva rotación (ZNR) señalada en el modelo análogo. La falla principal se marca con línea continua negra. Las líneas punteadas indican los límites de la zona de nueva rotación. La línea roja esquematiza la prolongación de la falla. **a.** Campo de velocidad total graficado sobre la fotografía que corresponde a los 14 minutos de compresión, 2,10 cm de acortamiento alcanzados representando el 17,50% del total. **b.** Campo de velocidad total graficado sobre la fotografía que corresponde a los 20 minutos de compresión, 3 cm de acortamiento alcanzados representando el 25% del total. **c.** La zona de rotación progresiva es comparable al *Trishear* asimétrico. En este caso puntual, el ángulo correspondiente al lado situado en el bloque colgante es mayor al ángulo correspondiente al lado situado hacia el bloque yacente de la falla principal (Modificado de Zehnder A.T. y Allmendinger R. W., 2000).

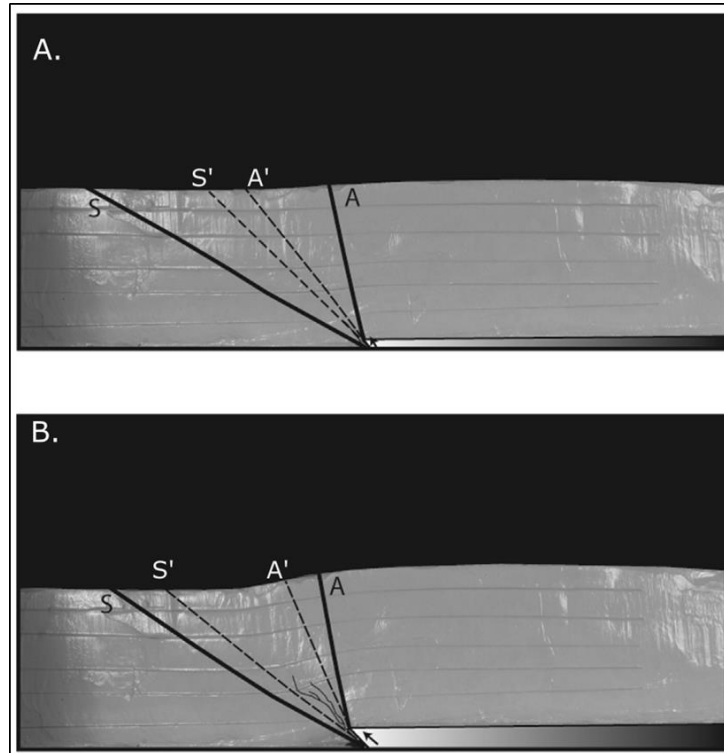


Figura 6. Progresiva evolución de la zona de *Trishear* para deformación compresiva asociada a una falla de basamento a 45° de inclinación. En línea recta se marcan los límites finales de la zona, A situado hacia el bloque colgante y S ubicado en el bloque yacente de la falla inversa. A' y S' corresponden a la posición de dichos límites en cada estadio del modelo análogo realizado en arcilla. Se observa que la zona de *Trishear* se expande. **a.** Estadio inicial del modelo. **b.** Estadio intermedio del modelo (Modificado de Mitra S. y Miller J.F., 2013).

REFERENCIAS

- Allmendinger, R.W. Inverse and forward numerical modeling of trishear fault-propagation folds. *Tectonics*, 17: 640-656 (1998).
- Brandes, C. y Tanner, D.C. Fault-related folding: A review of kinematic models and their application., *Earth-Science Rev.* (2014).
- Erslev, E. Trishear fault-propagation folding. *Geology* 19, 617-620 (1991).
- Erslev, E. y Rogers, J.L. Basement-cover geometry of Laramide fault-propagation folds: Laramide Basement Deform. Rocky Mt. Forel. West. United States. *Geological Society of America Special Paper* 280, 125–146 (1993).
- Fan, X., Jia, D., Yin, H., Shen, L., Liu, J., Cui, J., Chuang, S., Yang, S. Analogue modeling of the northern Longmen Shan thrust belt (eastern margin of the Tibetan plateau) and strain analysis based on Particle Image Velocimetry, *J. Asian Earth Sci.* (2020).
- Hubbert, M. Theory of scale models as applied to the study of geologic structures. *Bull. Geol. Soc. Am.* 48, 1459–1520 (1937).
- Jamison, W. R. Geometric analysis of fold development in over thrust terranes. *J. Struct. Geol.* 9, 207-219 (1987).
- McClay, K.R. The rheology of plasticine. *Tectonophysics* 33 (1976).
- Mitra, S., Miller, J.F. Strain variation with progressive deformation in basement-involved trishear structures. *J. Struct. Geol.* 53, 70–79 (2013).

- Termini, D., Di Leonardo, A. Efficiency of a digital particle image velocimetry (DPIV) method for monitoring the surface velocity of hyper-concentrated flows. *Geosciences (Switzerland)* (2018).
- Thielicke, W. y Stamhuis, E. J. PIVlab - Towards User-friendly, Affordable and Accurate Digital Particle Image Velocimetry in MATLAB. *J. Open Res. Softw.* 2, e30 (2014).
- Rosas, F.M., Duarte, J.C., Almeida, P., Schellart, W.P., Riel, N., Terrinha, P. Analogue modelling of thrust systems: Passive vs. active hanging wall strain accommodation and sharp vs. smooth fault-ramp geometries. *J. Struct. Geol.* 99, 45–69 (2017).
- Saffar, M. Al. Geometry of fault-propagation folds: method and application. *Tectonophysics*, 223(3–4), 363–380 (1993).
- Saha, P., Bose, S., Mandal, N. Sandbox modelling of sequential thrusting in a mechanically two-layered system and its implications in fold-and-thrust belts. *J. Geodyn.* 100, 104–114 (2016).
- Shaw, J.H., Novoa, E., Connors, C.D. Structural controls on growth stratigraphy in contractional fault-related folds. *AAPG Mem.* 400–412 (2005).
- Shinevar, W.J., Behn, M.D., Hirth, G., Jagoutz, O. Inferring crustal viscosity from seismic velocity: Application to the lower crust of Southern California. *Earth Planet. Sci. Lett.* 494, 83–91 (2018).
- Suppe, J. y Medwedeff, D. A. Geometry and kinematics of fault-propagation folding. *Eclogae Geol. Helv.* 83(3), 409–454 (1990).
- White, D.J., Take, W. A. GeoPIV: Particle Image Velocimetry (PIV) software for use in geotechnical testing., *Cambridge University Engineering Department Technical Report* (2002).
- Zehnder, A.T., Allmendinger, R.W. Velocity field for the trishear model. *J. Struct. Geol.* 22, 1009–1014 (2000).
- Zulauf, J., Zulauf, G. Rheology of plasticine used as rock analogue: The impact of temperature, composition and strain. *J. Struct. Geol.* 26, 725–737 (2004).