

10º Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos
Sesiones Generales: "Energía y Sociedad, aliados inseparables"

ESTUDIO DEL CAMPO DE VELOCIDADES DE UN PLIEGUE POR DESPEGUE A PARTIR DE UN MODELO ANÁLOGO

Berenice Lía Plotek¹, Cecilia Guzmán², Ernesto Osvaldo Cristallini³

1: Laboratorio de Modelado Geológico (LaMoGe), Instituto de Estudios Andinos Pablo Groeber,

Departamento de Ciencias Geológicas, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales,

Universidad de Buenos Aires-CONICET., bereplotek@gmail.com.

2: Instituto de Estudios Andinos Pablo Groeber, Departamento de Ciencias Geológicas,

Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires-CONICET., ceciguzmi@hotmail.com.

3: CONICET - LaTe Andes S.A., ecristallini@gmail.com

Palabras clave: **Anticlinal, Vectores Cinemáticos, Modelos Experimentales**

ABSTRACT

Analysis of the velocity field of a detachment fold from an analogous model.

To analyze the development of a detachment fold and obtain the velocity field during the compression, an analogous model was carried out. This model tries to reproduce in a simplified way the conditions under which this type of folding occurs. Paper sheets were used to simulate a material with fragile behavior, placed on a base composed of a material with greater cohesion to resemble the nature of evaporate or shale rocks that tend to be more ductile. As the structure is formed, photographs were taken on both sides to follow the evolution of the fold. These photographs were processed and analyzed with the PIV-MATLAB program to obtain the kinematic vectors that represent the velocity field. Based on our analysis, in the first zone of the structure there is a strong domain of the horizontal component, where the movement of the particles predominates in the direction imposed by the motor. Upon reaching the first axial surface, the movement of the particles begins in the zone dominated by the rising of the anticline flank. In this area are the highest values of horizontal velocity for the early stages of construction of the fold. The lifting of the limb requires progressive movement of rock particles in the vertical direction. As progress is made in the construction of the fold, the velocity field rotates, displacement along the horizontal direction becomes smaller while the amount of vertical movement increases. In this way the hinge is built and gains height, while the wavelength of the structure remains constant. In more advanced stages of the anticlinal evolution towards the interior of the area delimited by the axial surfaces, the vertical component dominates. This results in an upward migration of the particles that allows the conformation of the hinge area of the detachment fold.

INTRODUCCIÓN

Con el objetivo de analizar el desarrollo de un pliegue por despegue, estudiar la deformación del mismo y obtener el campo de velocidades durante la compresión, se llevó adelante un modelo análogo. El mismo intenta reproducir de manera simplificada las condiciones bajo las cuales

ocurren dichos plegamientos.

El modelado análogo tiene como objetivos principales reproducir mediante experimentos en un laboratorio procesos geológicos para su observación y posterior estudio (Schellart y Strak 2016). Estos procesos tienen en la naturaleza múltiples causas, diversos mecanismos de deformación y una compleja historia de evolución, motivo por el cual no resultan sencillos de comprender. En muchos casos, los modelos análogos plantean simplificaciones que permiten analizar mejor las diferentes fases de construcción de una estructura (Vidal *et al.* 2008). A su vez, y a diferencia de los casos que ocurren en la naturaleza, el modelado análogo tiene como principal ventaja la capacidad de documentar cada uno de los diferentes estadios de la historia evolutiva de una estructura, permitiendo su comparación con el resultado final (Corti, 2005).

En este trabajo se analiza el movimiento de las partículas durante la conformación de un pliegue por despegue y se caracterizan los vectores cinemáticos que definen el campo de velocidad involucrado en la formación de la estructura.

METODOLOGÍA DE TRABAJO

El objetivo de los experimentos realizados es obtener y analizar el campo de velocidades durante la formación de un pliegue por despegue. A continuación se describe el diseño utilizado para modelar dicha estructura mediante la compresión de diferentes materiales (Fig. 1).

Se utiliza una caja de 55 cm de largo por 15 cm de ancho con paredes de acrílico cuyo lateral estaba compuesto por un pistón móvil, sujeto a un motor que permite el movimiento

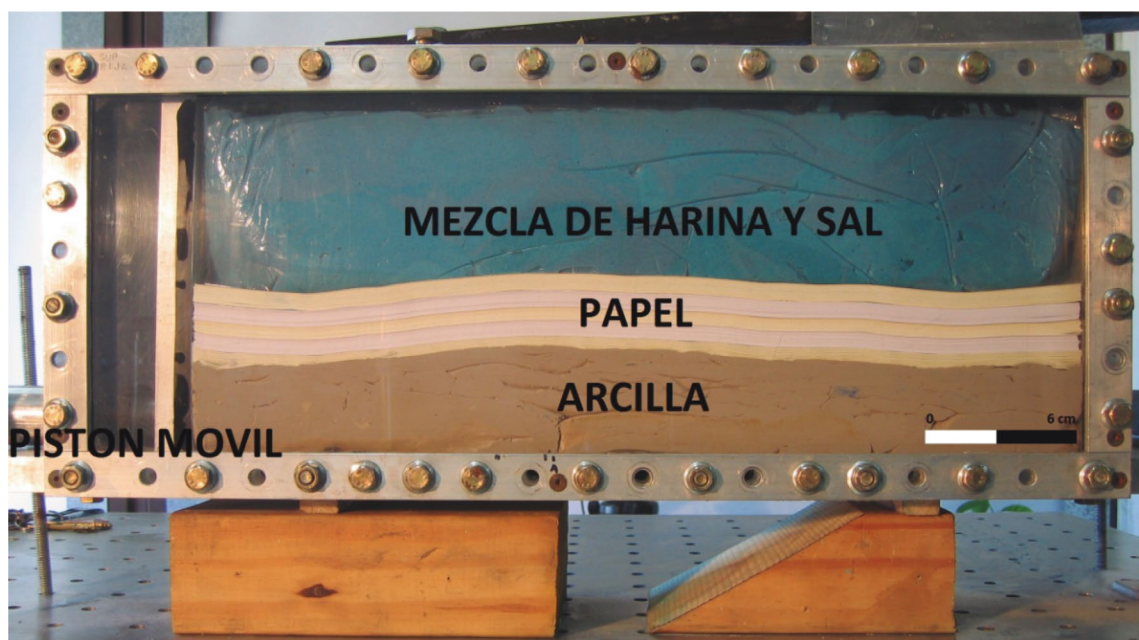


Figura 1. Fotografía del experimento señalando los materiales utilizados. Se observa un leve endomamiento en las arcillas realizado con el propósito de inducir la formación del pliegue por despegue en el sector central del modelo.

del mismo comprimiendo los materiales dispuestos en el interior. Para simular los estratos con comportamiento frágil que constituyen el plegamiento se utilizaron láminas de papel de 80 g/m² y 50 cm de largo, hasta alcanzar los 5 cm de altura. A su vez, para simular el material con comportamiento dúctil que se ubica por debajo y que fluye durante la deformación hacia el núcleo del pliegue se utilizaron 5 cm de arcilla en la base del modelo.

Con el fin de asegurar la transmisión del movimiento del pistón hacia delante en el material que rellena la caja se colocó una plancha de alto impacto sujeta al mismo. Para simular la carga litosférica, se rellena la caja acrílica con una mezcla de harina y sal hasta el tope y luego se cierra para asegurar el aumento de la presión y la compactación tanto de la arcilla como de la mezcla superior. Para evitar posibles infiltraciones del material y proteger las capas de papel, se utilizó papel filme transparente. A medida que la estructura se va conformando, se toman fotografías en ambos laterales para poder seguir la evolución del pliegue. Las fotografías son perpendiculares a la dirección de movimiento del pistón móvil para poder visualizar los estadios de la estructura. Se obtuvieron en total 40 imágenes. Dichas fotografías fueron posteriormente procesadas mediante la utilización del software Irfanview y luego analizadas con el programa PIV-MATLAB para obtener los vectores cinemáticos que marcan el campo de velocidades. Al modelo se lo comprime durante 40 minutos y se obtuvo un acortamiento total de 7.6 cm (15.2% de acortamiento).

A partir de cada fotografía, como se mencionó anteriormente, se realiza con el programa PIV – MATLAB 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 son de 128, 64 y 32 pixels (Fig. 2). Desde el punto central de cada área definida compara los pixels para dos imágenes sucesivas, detectando diferencias que atribuye al movimiento y trazando los vectores. Luego del procesamiento se obtiene como resultado la misma imagen utilizada al inicio, pero con los

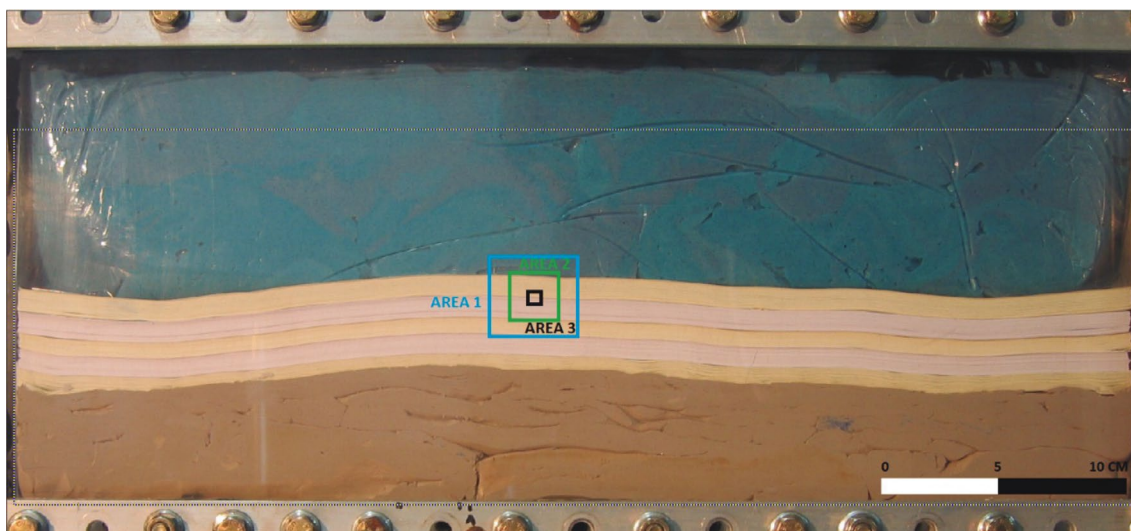


Figura 2. Fotografía del experimento señalando las áreas para trazar los vectores.

vectores que indican dirección, sentido y magnitud del movimiento. Los vectores que representan el campo de velocidad son graficados separando la componente horizontal, representada en el gráfico por los valores en el eje X, y la componente vertical, representada en el eje Y. Puntualmente se trabaja con aquellos vectores que representan el movimiento de las partículas en las capas de papel, ya que para esta experiencia se quiere determinar el comportamiento de los estratos frágiles. 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.

RESULTADOS:

A continuación se describen los resultados obtenidos a lo largo del análisis de las fotografías del modelo. Para poder realizar esto, se definen filas de vectores cuya numeración arranca en la base del modelo. Puntualmente los gráficos se construyen para las filas 8, 9 o 10 que contienen a los vectores que señalan el movimiento de las partículas de las capas de papel. En esta etapa temprana del movimiento, a los 2 minutos de compresión (3.8 mm, 0.50% del acortamiento total alcanzado, siendo 7.6 cm el 100%), se puede apreciar que los vectores señalan el flujo de partículas en sentido contrario al impuesto por el pistón móvil (Fig. 3). Como se observa graficando las componentes X e Y de los vectores para la fila 8, la componente horizontal del vector de velocidad presenta valores negativos por esta razón (Fig. 4a). Se interpreta que esto ocurre porque a medida que el motor ejerce presión sobre el modelo, la arcilla y el resto de los materiales se oponen al movimiento generando una fuerza en sentido contrario. A su vez se puede apreciar que los valores mayores se encuentran cercanos al pistón y los mismos van disminuyendo a medida que el material se aleja del mismo. Esta tendencia es la esperada ya que la deformación se propaga con menor intensidad en las zonas distantes al inicio del movimiento. Exactamente lo mismo se observa con la componente vertical del movimiento (Fig. 3). El gráfico para la componente vertical del vector velocidad muestra que los valores de velocidad decrecen a medida que el material se aleja del pistón móvil. Se parte de un valor positivo que disminuye progresivamente. Aproximadamente al llegar al domo los valores tienden a cero, lo cual indica la ausencia de movimiento vertical. Luego, los valores se tornan negativos, lo cual expresa que las partículas se están desplazando hacia abajo. Esto ocurre porque se empiezan a conformar los flancos del anticlinal. A medida que el material dúctil se vaya desplazando hacia el centro y levante la charnela del pliegue, los sectores periféricos al núcleo deberán migrar hacia abajo para ir levantando los limbos.

Si se compara este gráfico (Fig. 4a) con el obtenido para la fila 9 (Fig. 4b), se puede observar que los valores de velocidades en términos generales son levemente menores. Para explicar esto se debe tener en cuenta que en el contacto arcilla - papel se genera una fuerza de rozamiento que se opone al movimiento. Por lo tanto, a medida que las partículas se ubican más lejos de esta interface, la fuerza de rozamiento decrece y se tendrán mayores valores frente a los observados

en la cercanía del contacto papel-arcilla. Por otro lado, a medida que crezcan los flancos del anticlinal, la trayectoria que hacen las partículas en las filas superiores será mayor a la que deben hacer las partículas en los niveles inferiores, por ende, la velocidad será mayor.

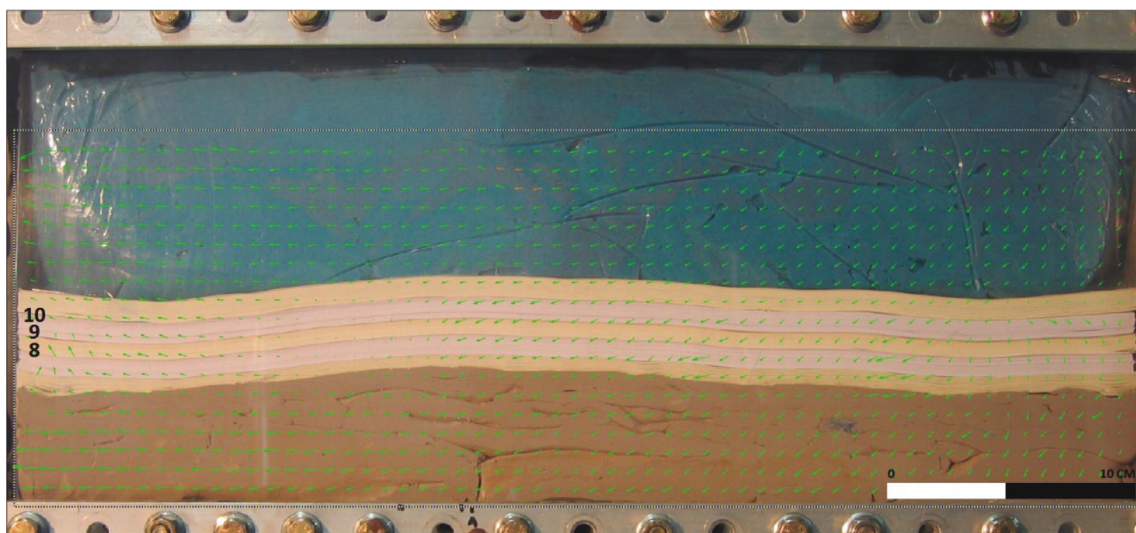


Figura 3. Fotografía del experimento con los vectores que indican el movimiento de las partículas. Se puede observar que en esta primera instancia, el movimiento es en el sentido opuesto al impuesto por el pistón móvil, situado hacia la izquierda del modelo. Además, hacia el sector derecho se puede ver la tendencia en el movimiento de las partículas, que van migrando hacia abajo para comenzar a conformar el flanco del anticlinal.

En la fila 9 se observa una tendencia similar para la componente vertical del vector velocidad. Los valores decrecen a medida que el material se aleja del pistón móvil, y llegan a cero en la zona donde se encuentra el inicio del domo ($X=10$ cm). Posteriormente sigue decreciendo, indicando que ahora el movimiento de las partículas es hacia abajo, hasta alcanzar un valor constante, el cual se mantiene desde $X=20$ cm hasta $X=25$ cm, aproximadamente (Fig. 4b). Se debe notar que este segmento coincide con el aumento de velocidad en la componente horizontal, donde el movimiento es en sentido contrario al desplazamiento del pistón móvil. A continuación, la componente vertical del vector de velocidad se aproxima nuevamente a cero, para luego aumentar levemente, otra vez hacia abajo.

La componente horizontal del vector de velocidad muestra una tendencia variable, pero en su totalidad el movimiento es en sentido contrario al impuesto por el motor. Se observan dos sectores interesantes en base a la tendencia representada en el gráfico. Por un lado, donde la coordenada $X=10$ cm, la velocidad se está aproximando a cero (Fig. 4b). En esta posición, la componente vertical del vector de velocidad también tiende a ser nula, como ya se mencionó anteriormente. Se interpreta que el endomamiento de arcilla inicialmente inducido en el modelo podría estar actuando como un obstáculo para el desplazamiento en ambas direcciones, tanto en el eje vertical como en el horizontal.

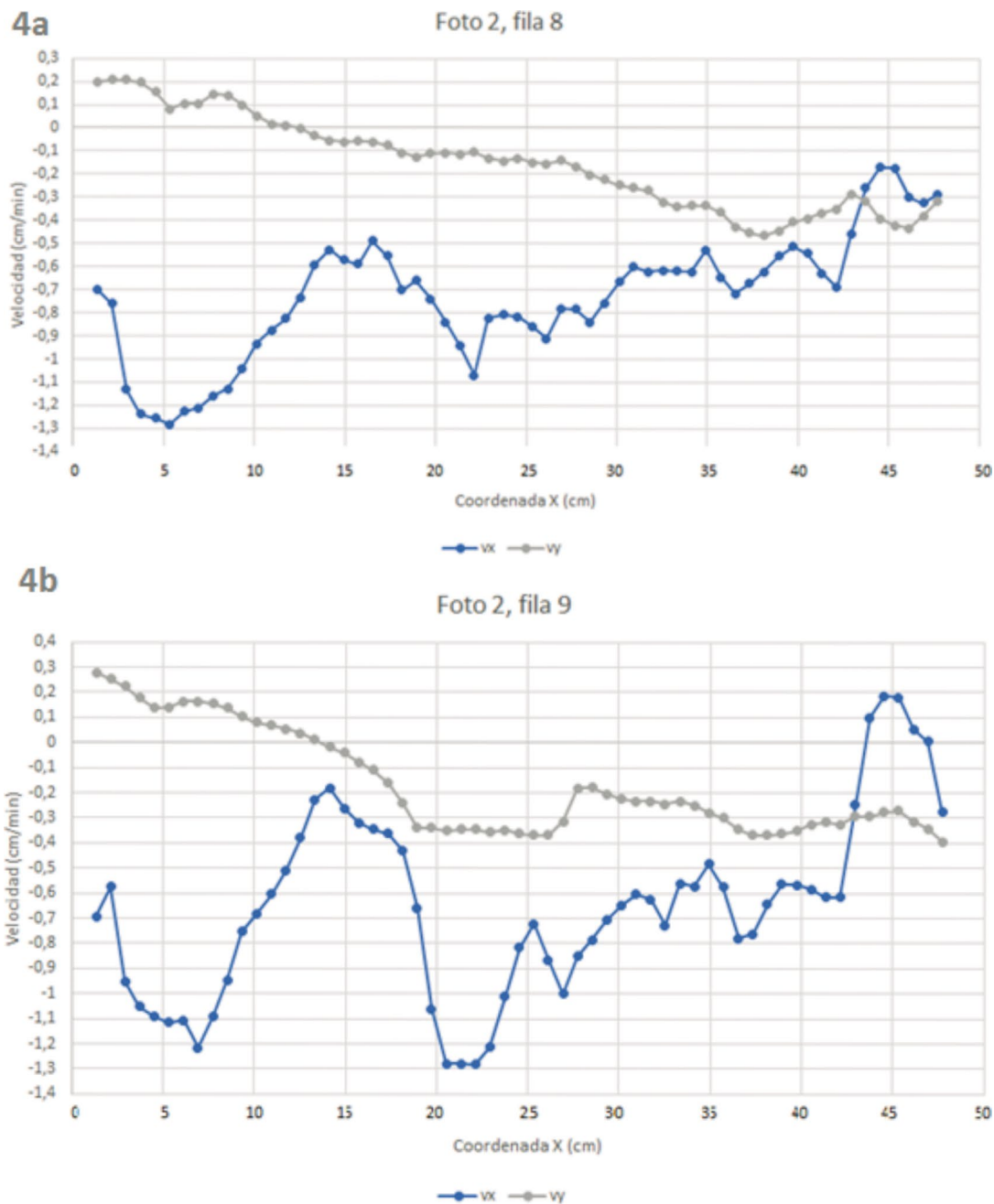


Figura 4. A) Variación en la magnitud de los vectores de velocidad de desplazamiento horizontal (V_x) y vertical (V_y) para la fila 8 de la figura 3. La componente vertical del vector velocidad disminuye a medida que las partículas se alejan del pistón móvil, tornándose negativa en el sector donde se comienza a conformar el flanco del anticlinal. En esta parte las partículas migran hacia abajo lentamente. La componente horizontal muestra que la migración de las partículas es en el sentido inverso al movimiento impuesto por el motor. B) Variación en la magnitud de los vectores de velocidad de desplazamiento horizontal (V_x) y vertical (V_y) para la fila 9 de la figura 3.

Se sigue exactamente el mismo procedimiento que en el caso anterior para las fotografías que muestran el desarrollo posterior del anticlinal. La foto es obtenida a partir del modelo análogo y se analiza con el programa PIV que permite obtener el valor, sentido y dirección de los vectores que indican el campo de velocidades en este momento puntual de construcción del pliegue por despegue, a los 4

minutos de acortamiento (7.6 mm, 1% de acortamiento) (Fig. 5). A diferencia de la imagen anterior, en este caso ya es posible observar como hacia el lado izquierdo domina el movimiento en la dirección del empuje impuesta por el pistón móvil. A medida que el material se traslada hacia delante, se comienza a visualizar la conformación inicial del flanco. Los vectores de desplazamiento poseen una componente vertical que señala el levantamiento de la estructura. En la región central y hacia la pared fija todavía domina claramente la componente horizontal, pero es posible ver la migración de las partículas hacia abajo en el sector de la periferia, comenzando a dar origen al otro flanco del pliegue por despegue.

Estas situaciones descriptas previamente se pueden visualizar mejor construyendo los gráficos que representan la componente vertical y horizontal del vector de desplazamiento, representadas en los ejes X e Y (Figs 6a y 6b). Se puede apreciar con claridad la tendencia de la velocidad para la componente vertical del vector, V_y . Se observa un progresivo aumento de la velocidad dentro del sector cercano al pistón móvil, donde a medida que las partículas se alejan del mismo va decreciendo. El material migra hacia arriba a medida que se produce el levantamiento del primer flanco del pliegue por despegue. A su vez, a medida que las partículas se alejan del pistón móvil, la componente vertical de la velocidad decrece. En $X=30$ cm (Figs. 6a y 6b) aproximadamente la componente vertical del vector velocidad es nula. Finalmente, el sector más cercano al borde opuesto se aprecia un incremento de la velocidad, pero esta vez en sentido contrario. El material migra hacia abajo. Este desplazamiento en sentido opuesto se debe a la arcilla que migra hacia el núcleo anticlinal y levanta los flancos de papel, generando que el material de la periferia también deba acomodarse.

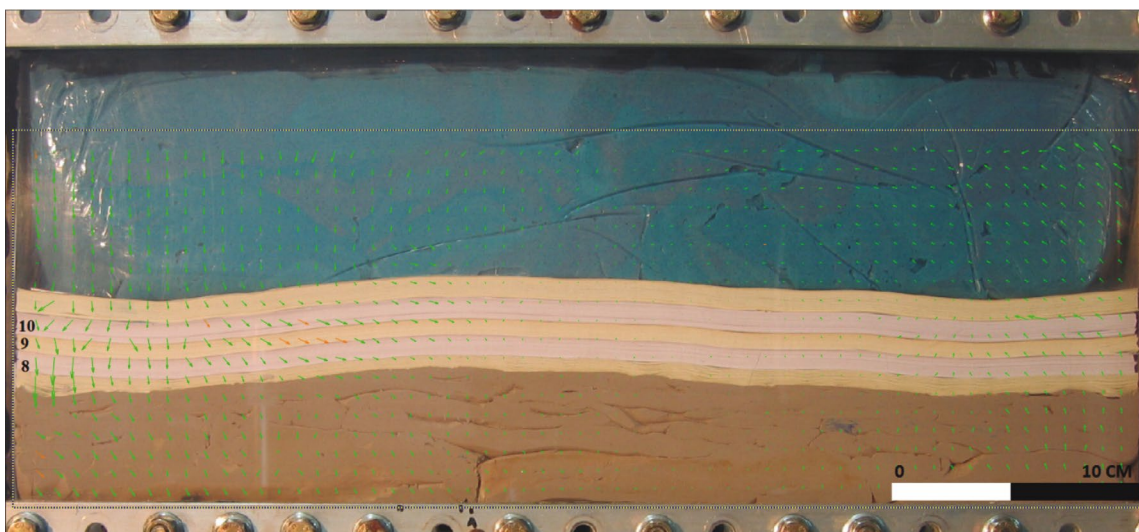


Figura 5. Fotografía del experimento a los 4 minutos de compresión. Las observaciones más significativas son que domina el movimiento en el sentido de desplazamiento impuesto por el pistón móvil, y que se comienzan a definir los flancos del anticlinal.

La componente horizontal del vector de velocidad no sigue una tendencia tan uniforme como en el caso anterior. A diferencia de la fotografía señalada previamente (Fig. 3) del modelo, en esta oportunidad el movimiento es en el sentido de avance del pistón móvil. Todo el material se desplaza hacia la derecha, con valores de velocidad que rondan $V_x = 0.6$ a 1.4 cm/min (Fig. 6a).

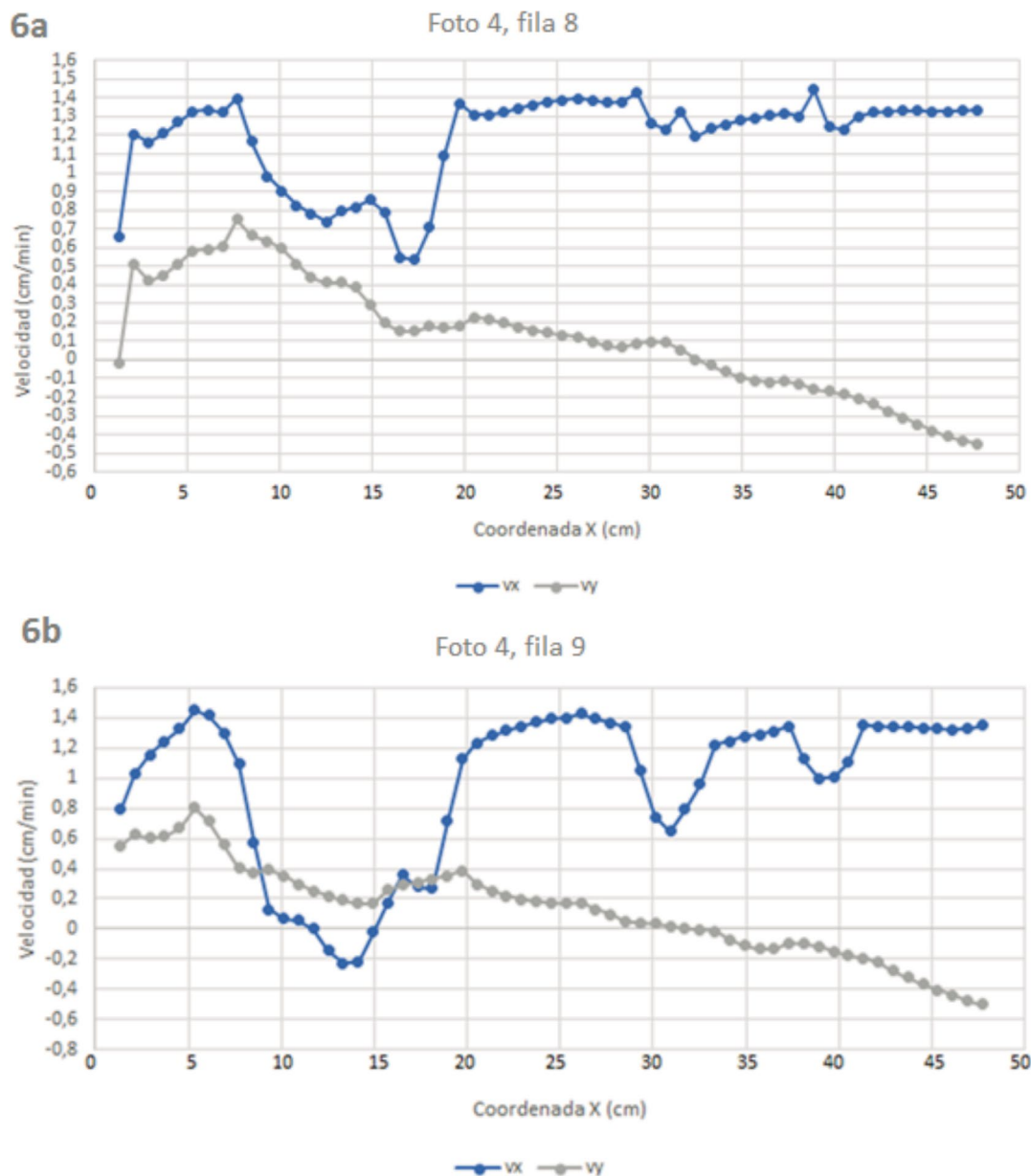


Figura 6. A) Variación en la magnitud de los vectores de velocidad de desplazamiento horizontal (V_x) y vertical (V_y) para la fila 8 de la figura 5. El material migra hacia arriba a medida que se produce el levantamiento del flanco del pliegue por despegue. A su vez, a medida que se aleja del pistón móvil, la componente vertical del vector de velocidad decrece. V_y es negativa hacia el final, indicando la migración del material hacia abajo B) Variación en la magnitud de los vectores de velocidad de desplazamiento horizontal (V_x) y vertical (V_y) para la fila 9 de la figura 5.

En términos generales, los valores son relativamente constantes, sobre todo hacia el sector alejado del motor. Solamente llama la atención una leve caída hacia $X=7,5$ cm. Se debe notar que este punto coincide perfectamente con el aumento de la componente vertical del vector de velocidad (Fig. 6a). Por lo tanto, se puede decir que hacia el inicio de la conformación del anticlinal, la velocidad en el eje horizontal disminuye mientras que la mayoría del movimiento se concentra en el eje vertical, hacia arriba. Pasado este punto, la componente horizontal sigue en caída, hasta volver a subir en $X=17,5$ cm. En este punto también se puede notar que la componente vertical

comienza a estabilizarse, con valores cada vez menores (Fig. 6a). En las filas posteriores se sigue visualizando esta misma tendencia (Fig. 6b).

La componente vertical del vector velocidad disminuye a medida que las partículas se alejan del pistón móvil, siendo siempre positiva hasta $X=30$ cm (Fig. 6b). En este punto todo el movimiento se da en el eje horizontal. Luego, la componente vertical del vector velocidad aumenta, pero en sentido contrario, como se puede apreciar en la fotografía del experimento el material se desplaza hacia abajo. En $X=5$ cm (Fig. 6b) se pueden encontrar los mayores valores de la componente vertical del vector velocidad. Viendo la imagen, en este punto es donde se está conformando el inicio del limbo de la estructura.

En cuanto a la componente horizontal del vector velocidad, los valores crecen hasta $X=5$ cm (Fig. 6b), donde sufre una brusca caída. Esta posición representa el inicio del limbo. Como se dijo antes, el movimiento se concentra en el eje vertical. A medida que se conforma el flanco se puede ver como la componente horizontal pasa a tener valores negativos que señalan el desplazamiento en el sentido contrario al movimiento del pistón. Finalmente, hacia $X=15$ cm (Fig. 6b) los valores crecen nuevamente y se estabilizan hasta alcanzar valores relativamente constantes. En términos generales, domina el movimiento hacia la derecha en el sentido impuesto por el motor.

Comparando esto con la fila 8 (Fig. 6a), se encuentran valores mayores porque hay menor acción por parte de la fuerza de rozamiento generada en el contacto arcilla papel y también porque las partículas situadas en los estratos superiores deben realizar una trayectoria mayor a medida que se va levantando el anticlinal por despegue.

Luego de 15 minutos de compresión (2.9 cm, 38% de acortamiento) se obtiene la fotografía que se presenta a continuación y la misma es también analizada para obtener los vectores de velocidad (Fig. 7).

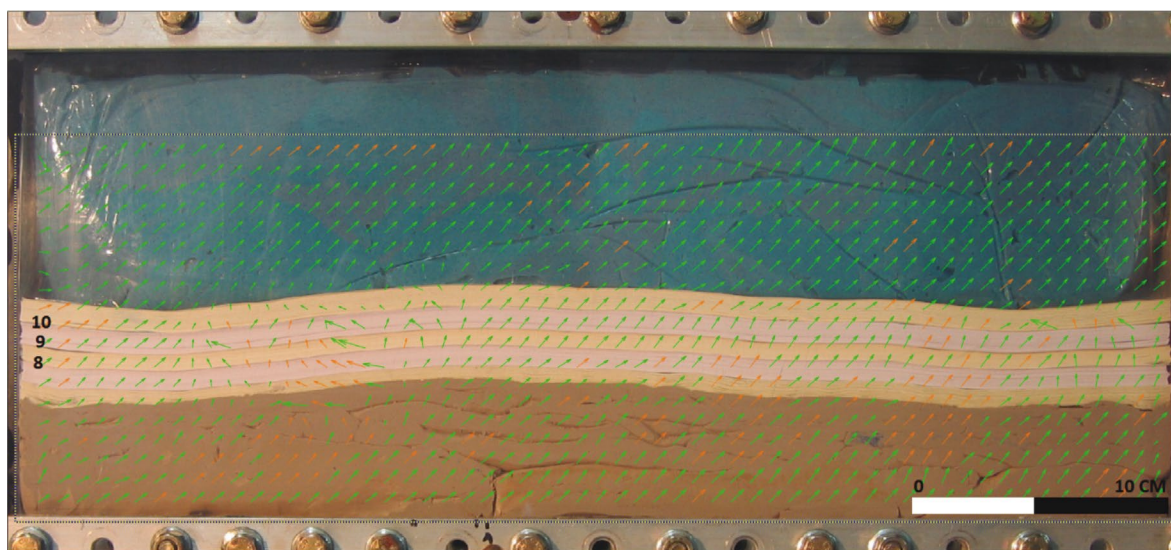


Figura 7. Fotografía del experimento a los 15 minutos de compresión. A diferencia de los casos anteriores, comienza a existir una marcada presencia de la componente vertical, dominando el movimiento hacia arriba en casi toda la estructura.

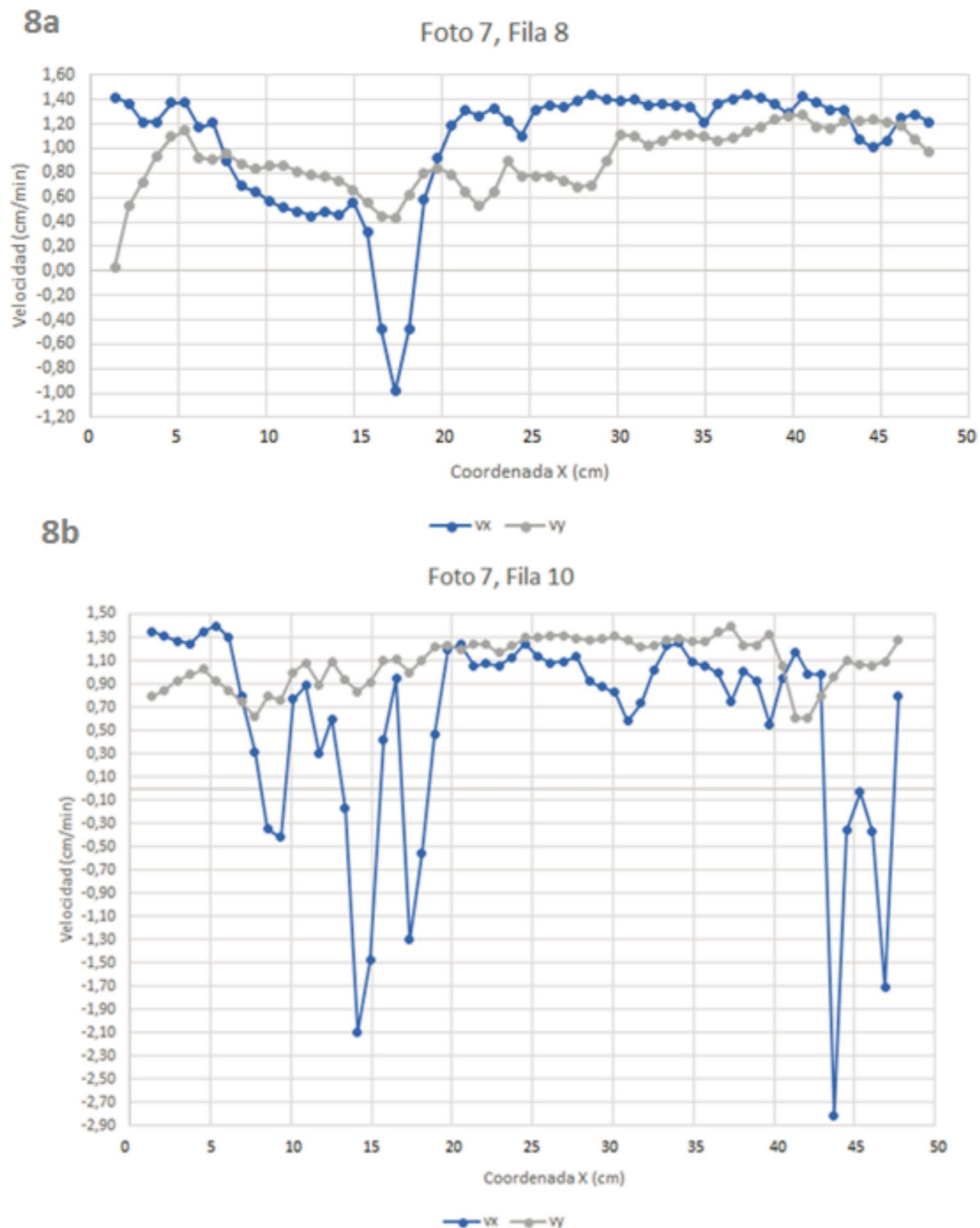


Figura 8. A) Variación en la magnitud de los vectores de velocidad de desplazamiento horizontal (V_x) y vertical (V_y) para la fila 8 de la fotografía 7. B) Variación en la magnitud de los vectores de velocidad de desplazamiento horizontal (V_x) y vertical (V_y) para la fila 10 de la fotografía 7. Se observa que a partir de este momento el resultado graficado es caótico. Se postula que esto se debe a que ya no se está refiriendo a un único estrato, como en los casos previos. Por el contrario, el aumento de la inclinación de las capas generó que los valores de velocidad en cada fila ya no correspondan a un único banco.

En ambos gráficos obtenidos (Figs 8a y 8b), la tendencia de la componente vertical es similar a los casos analizados previamente. Desde el lado izquierdo donde se situó al pistón móvil se observa

la migración del material hacia arriba, hasta $X=5$ cm (Fig. 8a) el gradiente de velocidad es bastante pronunciado. Se alcanza en este punto un valor máximo y luego la componente horizontal de la velocidad decrece hasta alcanzar un valor mínimo hacia $X=17.5$ cm aproximadamente (Fig. 8a). En la fotografía ya se observan configurados parcialmente ambos limbos de la estructura, siendo aquel situado en el sector izquierdo el que presenta mayor pendiente (Fig. 7). La charnela todavía no se encuentra bien definida, pero los vectores muestran la migración de arcilla hacia el sector del núcleo del anticlinal.

En cuanto a la componente horizontal, se puede ver que el movimiento en términos generales es en el sentido impuesto por el pistón móvil pero que existe un sector hacia el tope del limbo izquierdo donde el movimiento de las partículas se da en sentido contrario. Al configurarse el flanco, el material se traslada en sentido opuesto. Si se grafica la componente horizontal y vertical de la velocidad del material situado en las filas superiores (Fig. 8b), se encuentra con un resultado bastante caótico. Por ejemplo, si se observan los vectores de la fila 10 se obtiene una tendencia muy desordenada para la componente horizontal del vector de velocidad, con marcados cambios en los valores y en el sentido del movimiento (Fig. 8b). Para explicar esto se debe tener en cuenta que en este punto ya no se tienen valores que representan un único estrato, porque al estar más avanzada la construcción del pliegue se grafican valores de velocidad que corresponden a diferentes capas. La variación en la componente vertical del vector velocidad es levemente más clara, evidenciando la migración hacia arriba de las partículas estudiadas y sin cambios abruptos.

Para finalizar se exhiben los gráficos correspondientes a los vectores obtenidos a partir de la fotografía 10 (3.8 cm, 50% de acortamiento) (Fig. 9). Hacia esta etapa final la charnela ya

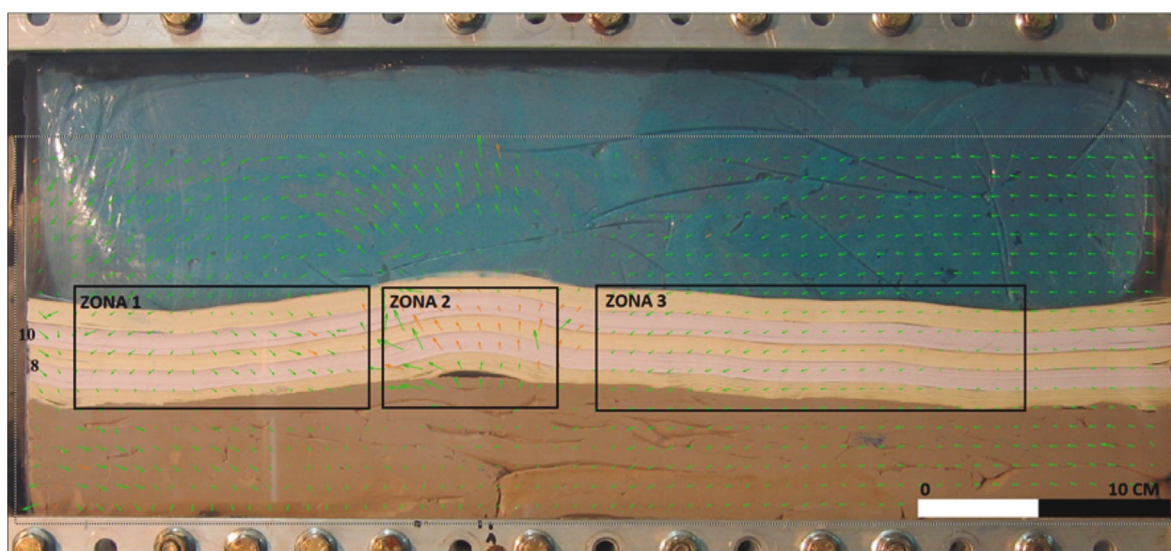


Figura 9. Fotografía del experimento a los 20 minutos de compresión. Se pueden delimitar 3 zonas, la primera cercana al pistón, en el sector izquierdo de la imagen. En esta primera zona, domina el movimiento en el eje vertical hacia abajo y en el eje horizontal hacia delante, marcando la conformación del flanco. La segunda zona se encuentra en la parte central y domina el movimiento netamente vertical, generando el área de la charnela. En la tercera zona hay menor movimiento por ser mayor la distancia al pistón, pero aun así se pueden delimitar los vectores que marcan la migración del material hacia abajo permitiendo la inclinación de los bancos para conformar el otro limbo del anticlinal.

se encuentra ligeramente conformada, dominando en el sector central en movimiento en el eje vertical hacia arriba, marcando el levantamiento del anticlinal. A su vez, los dos limbos pasan a estar conformados, y se puede apreciar la migración del material dúctil hacia el núcleo del pliegue por despegue (Fig. 10a y.10b).

Al graficar las componentes de los vectores para la fila inferior (Fig. 10a) se comienza analizando la tendencia de la componente vertical del vector de velocidad. A diferencia de los casos previos, en esta etapa del modelo el pliegue ya es claramente visible y ambos flancos se encuentran conformados. Lo que se puede apreciar en el sector cercano al pistón es como el material migra hacia abajo a medida que se genera el sinclinal al pie del anticlinal mayor. Así como las partículas en esta parte realizan este movimiento, en el sector central se puede observar bien marcado el levantamiento hacia el centro del pliegue por despegue. Como se visualiza en la imagen, en esta

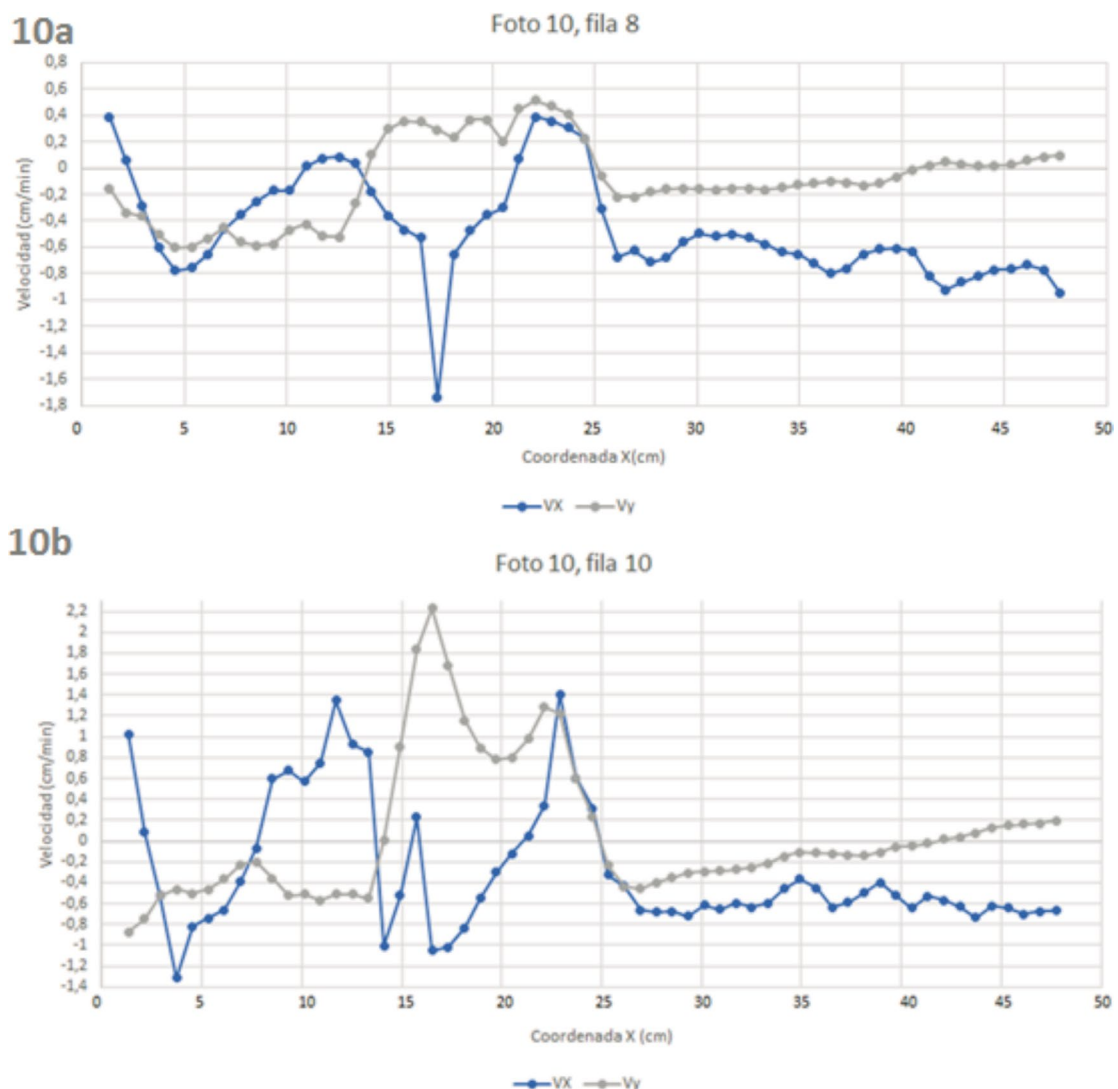


Figura 10. A) Variación en la magnitud de los vectores de velocidad de desplazamiento horizontal (Vx) y vertical (Vy) para la fila 8 de la figura 9. B) Variación en la magnitud de los vectores de velocidad de desplazamiento horizontal (Vx) y vertical (Vy) para la fila 10 de la figura 9.

zona la componente vertical domina y se va levantando la charnela a medida que la arcilla fluye hacia el núcleo. Desde $X=14$ cm a $X=25$ cm, la componente vertical es positiva señalando este crecimiento (Fig. 10a). Ya con partículas en sectores alejados del pistón, el movimiento tiende a desaparecer y la componente vertical de la velocidad presenta valores cercanos a cero.

En cuanto a la componente horizontal, la tendencia observada es un poco menos clara pero igualmente se pueden separar los distintos patrones que se reflejan en el gráfico. Desde el pistón se puede observar como el movimiento al inicio es hacia la derecha, pero la velocidad va disminuyendo progresivamente hasta llegar a ser nula. Luego los valores de dicha componente vuelven a aumentar, pero en sentido contrario al impuesto por el pistón.

Si tenemos en cuenta la imagen analizada, y los resultados descriptos anteriormente para la componente vertical, esto corresponde al inicio del sinclinal. A medida que se conforma esta estructura, el material debe migrar hacia el pistón, contrario a lo que se espera debido al movimiento impuesto por el mismo. Ya en el flanco del anticlinal, conformado entre $X=7,5$ cm y $X=12,5$ cm (Fig. 10a), se observa una caída en los valores de la velocidad. A medida que se recorre el limbo del anticlinal y aumenta la inclinación del mismo vemos que el movimiento es en sentido opuesto. Esto se visualiza mejor en la imagen (Fig. 9), y en el gráfico se corresponde con el pico negativo de V_x en $X=17,5$ cm (Fig. 10a).

Finalmente, los valores decrecen hasta llegar a cero, indicando la ausencia de movimiento de partículas en sentido horizontal. Pasando esta zona, se ubica el segundo flanco del pliegue y domina el movimiento en el sentido del pistón móvil entre $X=22$ a $X=25$ aproximadamente (Fig. 10a).

Se puede observar que hacia $X=26$ en adelante (Fig. 10a), el movimiento nuevamente se torna en sentido contrario. Esto se puede explicar si se toma en cuenta la migración de la arcilla situada por debajo de las capas estudiadas. El material dúctil fluye hacia el núcleo rellenando el espacio que se va creando a medida que se conforma el pliegue, y arrastra las partículas situadas por encima. Cuando se diseña el gráfico para los vectores obtenidos en niveles superiores (Fig. 10b), como el caso de la fila 10, la tendencia para la componente vertical es bastante similar, con un pico positivo que evidencia el levantamiento del anticlinal. En la horizontal, sin embargo, la tendencia ya no es clara. Esto se atribuye a que ya no se está analizando el movimiento de partículas situadas a un mismo nivel. A medida que avanza la construcción del pliegue se torna difícil tomar partículas que representen el movimiento en un mismo estrato.

DISCUSION

Simplificando los gráficos analizados previamente es posible plantear la variación de la componente vertical del vector velocidad, representada en el eje Y (Fig. 11). Inicialmente, se parte de un valor cercano a cero que va aumentando progresivamente a medida que avanzamos hacia la charnela del pliegue. Para esta posición, se encuentran los mayores valores, con el material

migrando hacia arriba y construyendo la estructura anticlinal. Luego la velocidad va decayendo, como se aprecia en los flancos para tender a cero a medida que nos alejamos hacia el extremo contrario al pistón móvil.

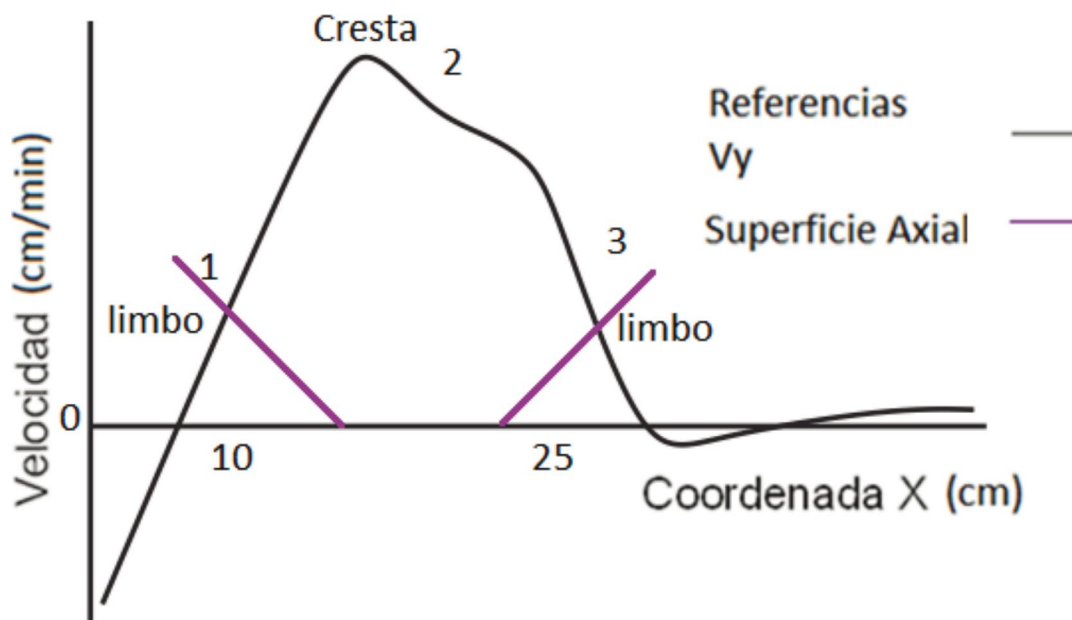


Figura 11. Esquema que muestra las variaciones de la componente vertical del vector velocidad de forma simplificada. La línea negra representa a V_y de acuerdo a los datos experimentales obtenidos a partir del modelo análogo. Las líneas violetas marcan las superficies axiales que provocan el levantamiento de los flancos. La componente vertical de la velocidad es negativa al inicio, luego aumenta progresivamente a medida que se avanza hasta la posición del primer flanco de la estructura. En el sector del centro del anticlinal alcanza los mayores valores, y luego hacia el otro flanco decae.

Debido a que esta tendencia se obtiene bajo condiciones experimentales, se deben señalar dos cuestiones. En primera instancia, el valor de la componente vertical es negativo, como se observa en la Figura 11. El pistón a medida que empuja hacia delante induce la migración del material en sentido contrario. Las partículas por lo tanto muestran un movimiento hacia abajo en el eje vertical, de allí que la componente vertical del vector velocidad al inicio presente valores negativos. Por otro lado, luego de la estructura anticlinal existe un leve movimiento que no se pierde en el extremo opuesto al pistón móvil. La propagación de la deformación continúa hasta el borde, por eso en los gráficos obtenidos si se aprecia cierto movimiento.

A su vez, el gradiente de velocidad para la componente vertical no es igual en ambos flancos del pliegue por despegue. El lado que se encuentra situado cerca del pistón móvil presenta un gradiente mayor, mientras que los valores de velocidad en el flanco opuesto exhiben una pendiente menor. Al ingresar al área delimitada por la superficie axial la componente vertical del vector velocidad sube, indicando el levantamiento del flanco. Esto se encuentra representado con el número 1 en el esquema (Fig. 11). En la zona central se alcanza el valor más alto, con el alzamiento del sector de la charnela, como lo marca el número 2. La referencia 3 señala como la velocidad en la componente vertical disminuye progresivamente a medida que se abandona la

estructura anticlinal, hasta tender a cero del lado opuesto al motor (Fig. 11).

En los estadios finales de deformación se observa una estructura simétrica, por lo tanto ambas superficies axiales tienen el mismo ángulo. Desde ya que no todos los pliegues por despegue pueden ser analizados de esta forma, sobre todo aquellos que son muy asimétricos. A medida que se propaga la deformación, las partículas ingresan en el dominio delimitado por la superficie axial que conforma el levantamiento del primer flanco, el contacto de las partículas con dicha superficie axial marca el aumento de la componente vertical del vector velocidad, V_y . Previo a este contacto, dicha componente se mantiene constante. Solo cuando ingresa al dominio delimitado por las superficies axiales la componente vertical de la velocidad sube, llega a un máximo y se mantiene en el por un sector prolongado que representa a la charnela. El ancho de este sector está directamente relacionado con la longitud de onda del plegamiento. En el segundo flanco, por su parte, la velocidad ya viene disminuyendo previo al contacto con la superficie axial. Posteriormente no se ven cambios significativos en el gradiente de velocidad, es decir que la pendiente se mantiene constante.

En cuanto la componente horizontal del vector velocidad, los valores mayores se encuentran cercanos al pistón, donde la fuerza ejercida es mayor. Luego va decayendo con la propagación de la deformación hacia delante.

Combinando lo dicho previamente sobre la componente vertical con la componente horizontal para los vectores de velocidad en etapas avanzadas se puede plantear la siguiente generalización (Fig. 12). Si bien es una simplificación, ilustra lo representado en las imágenes de las etapas más tardías del desarrollo del modelo análogo (Fig. 13). Se parte de una velocidad dada por el movimiento del pistón móvil, V_0 . En la primera zona existe un marcado dominio de la componente horizontal, donde predomina el movimiento horizontal de las partículas hacia delante en la dirección impuesta por el motor. Al arribar al primer dominio delimitado por la superficie axial, comienza el movimiento de las partículas en la zona dominada por el levantamiento del flanco del anticlinal. Esto requiere el progresivo aumento de la componente vertical del vector velocidad. A medida que se avanza en la construcción del pliegue, el campo de velocidades rota, siendo la componente horizontal cada vez menor y la componente vertical va aumentando. De esta forma se construye la charnela y gana altura, mientras que la longitud de onda del pliegue se mantiene constante. Hacia el final del área delimitada por las superficies axiales, domina ampliamente la componente vertical, existiendo una migración hacia arriba de las partículas que permite la conformación de la zona de la charnela del pliegue por despegue.

Idealmente, al abandonar esta zona la magnitud de la velocidad de las partículas tiende a cero. En el modelo análogo se puede ver que a medida que nos alejamos del pistón móvil, el esfuerzo desaparece y por lo tanto las capas de papel se mantienen horizontales. Lo presentado en este esquema resumido, se puede ver con claridad en las fotografías del modelo análogo a los 30 minutos (5.7 cm, 75% del acortamiento total alcanzado) (Fig. 13).

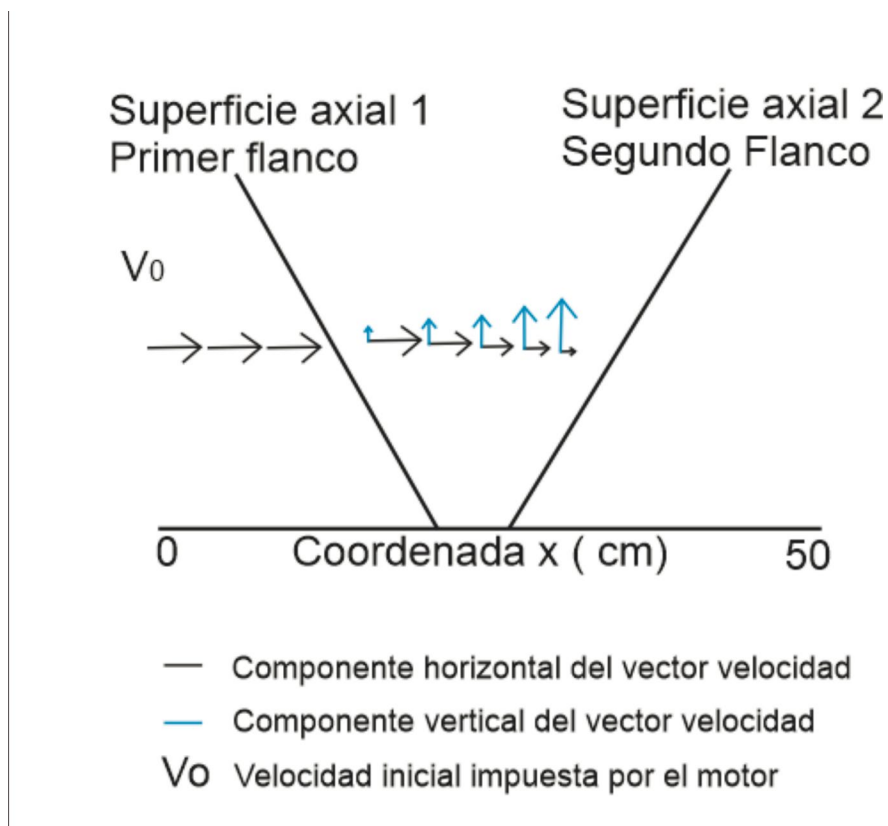


Figura 12. Esquema que muestra las variaciones de la componente vertical y horizontal de la velocidad de forma simplificada. Las líneas negras representan las superficies axiales que delimitan el levantamiento de los flancos y la construcción del pliegue. Se puede observar como a medida que se ingresa al área del anticlinal rota el campo cinemático, el cual en un principio estaba dominando por la componente horizontal. Los vectores no se encuentran a escala, se representan de ese tamaño para su mejor visualización.

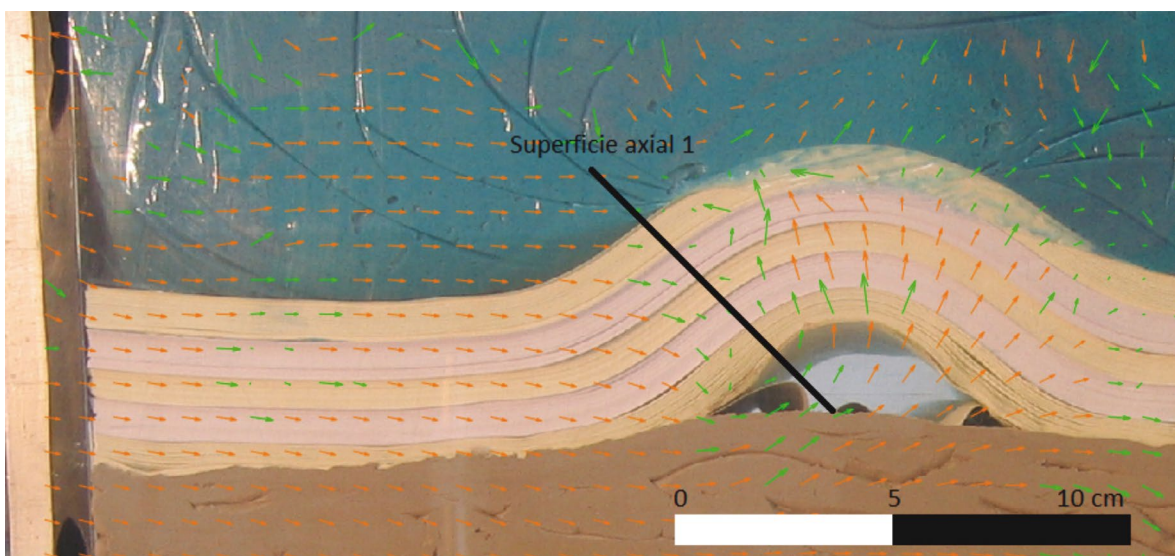


Figura 13. Imagen del modelo a los 30 minutos, 75% del acortamiento total alcanzado, con los vectores obtenidos. Se puede visualizar bien como en el sector cercano al pistón, del lado izquierdo, domina la componente horizontal del vector velocidad. La línea negra representa la superficie axial que construye el primer flanco. Cuando las partículas ingresan al sector del levantamiento de la estructura se puede ver la rotación del campo vectorial, que hacia el sector de la charnela muestra el dominio de la componente vertical.

CONCLUSIONES

A lo largo del presente trabajo puede visualizarse como a partir de un sencillo modelo análogo se pueden obtener los vectores que representan el campo cinemático a lo largo de la conformación de un pliegue por despegue. Dicho campo permite inferir como ocurre la migración del material y la rotación de los bancos a medida que se levanta el anticlinal.

Los gráficos con los valores de velocidad en ambos ejes discriminados permiten plantear que tanto la componente vertical como la componente horizontal del vector velocidad poseen una tendencia clara a lo largo del tiempo. Para la componente vertical, la velocidad es cercana a cero al inicio, donde domina el empuje hacia adelante generado por el pistón. Luego aumenta progresivamente a medida que se avanza hasta la posición del primer flanco de la estructura, donde ocurre la inclinación de las capas para formar el limbo. En el sector del centro del anticlinal la componente vertical alcanza los mayores valores, permitiendo el crecimiento de la región de la charnela del pliegue con el progresivo aumento de la altura. Hacia el otro flanco decae, conformando el segundo limbo.

Por su parte, se puede determinar que el campo de velocidades rota en la estructura a medida que se va conformando. El sector cercano al pistón exhibe un dominio de la componente horizontal, con el material migrando en la dirección impuesta por el motor. Cuando las partículas migran hacia el sector delimitado por la primera superficie axial la componente horizontal del movimiento va perdiendo protagonismo y hacia la región central del anticlinal domina totalmente la componente vertical, acentuando el alzamiento del núcleo. Esto va acompañado de la migración de material dúctil hacia el centro de la estructura.

Restaría poder comparar estos resultados con ejemplos de campo para un mayor análisis de los pliegues por despegue, estructura para la cual todavía no hay modelos cinemáticos bien definidos.

REFERENCIAS CITADAS

- Corti, C. 2005. Analogue modelling of tectonic processes: theory and applications. Disponible en línea en www.geociencias.unam.mx/cursos_cegeo/deformacion).
- Schellart, W.P. y Strak, V., 2016. A review of analogue modelling of geodynamic processes: Approaches, scaling, materials and quantification, with an application to subduction experiments. *Journal of Geodynamics*, 100, 7-32.
- Vidal, R.O., Oriol, F., Koyi, H. y Roca, E. 2008. 3D reconstruction of analogue modelling experiments from 2D datasets. *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata* 49(2): 524-528.

