

**EL USO DE MODELOS EXPERIMENTALES EN LA ENSEÑANZA
DE GEOLOGÍA ESTRUCTURAL (II)
APLICACIÓN A LA DEFORMACIÓN DISCONTINUA**

*Experimental modelling in theaching Structural Geology (II)
Application to discontinuous deformation*

C. L. Liesa (1), T. Román (2), L. E. Arlegui (1), A. L. Cortés (1) y A. Gil (1)

RESUMEN:

La modelización experimental tiene actualmente gran auge como herramienta para la comprensión de la mecánica de la litosfera y de las estructuras discontinuas que aparecen en ella. En la enseñanza de la geología estructural se muestra como un instrumento eficaz para motivar al alumnado y facilitarle la observación directa de los principales procesos tectónicos. En este trabajo se usan dispositivos experimentales simples que permiten reconstruir, analizar y comprender las principales estructuras tectónicas (fallas direccionales, normales e inversas, cabalgamientos y pliegues) y algunos regímenes tectónicos (extensión y compresión uniaxial y extensión multidireccional). Los resultados y observaciones se adaptan a los niveles de enseñanza de educación secundaria y universitaria.

ABSTRACT:

At present, experimental modelling is a powerful tool both to understand the mechanics of the lithosphere and in the teaching of Structural Geology. It enhances serendipity in students because of the facilities given to the direct observation of the main tectonic processes. In this work we use simple experimental dispositives to reconstruct, analyze and understand the main tectonic structures (strike-slip, normal and reverse faults, thrusts and folds) and some tectonic regimes (uniaxial extension, uniaxial compression, and multidirectional extension). The results and observations are adapted to secondary school and university levels.

Palabras clave: *Modelización experimental, deformación discontinua, falla direccional, falla normal, falla inversa.*

Keywords: *Experimental modelling, discontinuous deformation, strike-slip fault, normal fault, reverse fault.*

INTRODUCCIÓN

Ya en el siglo pasado se empezaron a reproducir en el laboratorio algunos fenómenos tectónicos, tales como la formación de pliegues, fallas, diaclasas y esquistosidad (Daubrée, 1871). En una primera etapa, estas experiencias fueron puramente cualitativas. Paulatinamente, se han intentado realizar modelos respetando las reglas de similitud y de esta forma se ha llegado a aplicar a los modelos parámetros precisos que permiten el estudio matemático riguroso de los fenómenos (Mattauer, 1976). La finalidad de estos modelos analógicos en geología es precisar mejor la evolución, las causas y los mecanismos de los procesos geológicos causantes de las estructuras observadas en la naturaleza. La modelización analógica permite además la adquisición de parámetros asociados a los procesos tectónicos (geometría tridimensional, mecanismos, velocidades y tiempos), parámetros a menudo de difícil deducción a partir del análisis de los datos reales (campo o sísmica). El principio de la modelización analógica es construir modelos dimensionados, lo más próximos posibles a sus equivalentes naturales, desde el punto

de vista de la repartición de fuerzas, de la reología y de las condiciones de desplazamiento en los límites del modelo (Vendeville, 1987). La tectónica experimental cuantitativa está actualmente en pleno auge en el campo de la investigación.

La modelización cualitativa de procesos tectónicos mediante maquetas posee una dimensión adicional en su faceta como herramienta docente. Es bien conocida por el profesorado la necesidad de realizar actividades prácticas que acerquen al alumno a la realidad de los conceptos impartidos. La realización de maquetas de sencilla elaboración en el laboratorio es un útil de primer orden en el proceso de aprendizaje de la geología estructural, puesto que permite la observación directa de las condiciones necesarias para la formación de las principales estructuras, su nucleación y desarrollo e incluso de cómo se suceden unas a otras. Este tipo de experiencias sigue las indicaciones del MEC en cuanto que para el alumno de Enseñanza Secundaria la Geología ha de aparecer en su carácter empírico y predominantemente experimental, a la vez que en su construcción teórica y de modelos.

(1) Dpto. de Geología, Fac. de Ciencias, Universidad de Zaragoza. 50009 Zaragoza

(2) Dpto. de Geodinámica, Fac. de Ciencias, Universidad del País Vasco. Apartado 644. 48080 Bilbao

En este trabajo se describen y se dan las pautas necesarias para la realización de una serie de maquetas que reproducen la formación de las principales estructuras tectónicas de carácter discontinuo. Se describen los experimentos de simulación de zonas de desgarre, fallas normales e inversas y cabalgamientos. Para ello será necesario hacer varias experiencias con diferentes regímenes tectónicos (extensión y compresión uniaxial y extensión multidireccional). Las maquetas permitirán estudiar la disposición y la geometría de las estructuras resultantes y los parámetros que las condicionan.

DEFORMACIÓN SUPERFICIAL ASOCIADA A UNA FALLA DE DESGARRE EN PROFUNDIDAD: EL EXPERIMENTO DE RIEDEL

En la naturaleza, la deformación de las rocas no se produce siempre de una forma continua (como los pliegues) sino que frecuentemente se realiza mediante fracturación de una forma discontinua, a través de superficies discretas en las que se pierde la cohesión original de la roca. Las estructuras resultantes de este comportamiento frágil (frecuente en la corteza superior) por el cual unos bloques de roca se diferencian de otros, son las diaclasas y las fallas (Hobbs *et al.*, 1981). Estas últimas son discontinuidades planas entre bloques de roca que se han desplazado uno respecto del otro en una dirección paralela a la discontinuidad. Atendiendo al tipo de movimiento relativo de los bloques respecto al plano de falla, se clasifican en fallas normales, inversas y direccionales o de desgarre (Fig. 1).

El objetivo de esta reconstrucción es analizar el efecto de la cizalla producida en el movimiento de una falla direccional en el zócalo de comportamiento frágil sobre una cobertera de comportamiento más dúctil que la recubre. A pequeña escala, puede representar las bandas en las que se resuelve la pequeña deformación plástica que antecede a la rotura de la roca y a la formación de una falla visible.

Procedimiento experimental

El experimento de Riedel (Cloos, 1928; Riedel, 1929) reconstruye la deformación esperable en tales condiciones con dos tablas (zócalo frágil), que se hacen deslizar una respecto de la otra, sobre las cuales se coloca una torta de arcilla (cobertera de comportamiento más dúctil) de unos pocos centímetros de espesor. El dispositivo experimental es mostrado en la figura 2A y el procedimiento experimental se basa en realizar sucesivos desplazamientos entre las tablas. El diseño de un dispositivo similar se detalla en el trabajo de Bonito (1997).

Para ver como progresa la deformación en la torta de arcilla es recomendable usar una serie de marcadores débilmente impresos de forma que no controlen posteriormente la localización de las estructuras. Estos pueden ser una serie de líneas perpendiculares a la fractura de zócalo y/o circunferencias alineadas sobre esta última.

En cada uno de esos estadios se deberán obser-

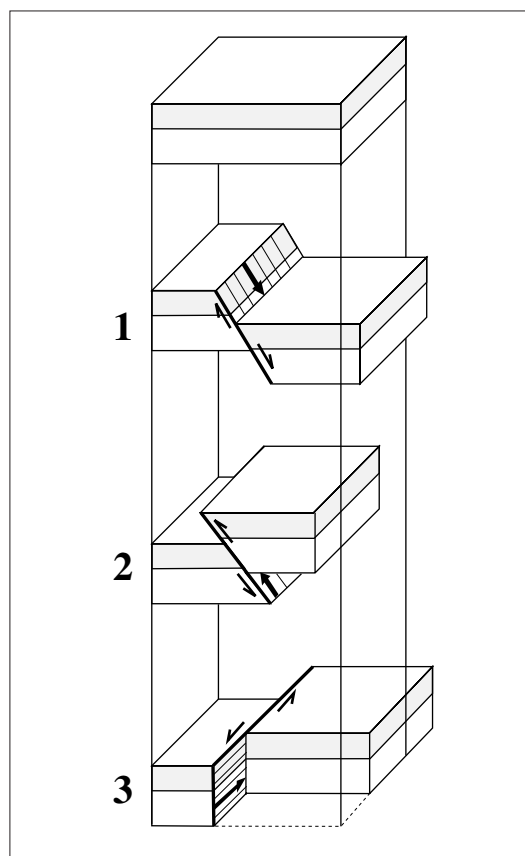


Figura 1. Tipos de fallas atendiendo al movimiento relativo de los bloques. 1) falla normal; 2) falla inversa y 3) falla direccional sinistral. Modificada de Mattauer (1976, p. 81).

var las estructuras menores que aparecen en superficie y los efectos que producen sobre los marcadores así como las variaciones que sufren las estructuras ya formadas al progresar la deformación.

Resultados

La cizalla inducida por el desplazamiento de las tablas (basamento) se puede manifestar en la torta de arcilla (cobertera) por la aparición de los siguientes tipos de estructuras menores (Fig. 2B y C): (1) una familia de pequeñas fracturas, con igual sentido que el accidente de "zócalo", que se forman a un ángulo de 15° respecto a ésta (fracturas R de Riedel, 1929); (2) otra familia de sentido contrario, a unos 75° del mismo (fracturas R'); (3) grietas de extensión (fracturas T) a 45° de la banda de cizalla; (4) una familia de microfallas (P), con igual sentido de desplazamiento que la cizalla principal y con disposición simétrica respecto a las R; (5) pliegues (p) a -45° de la fractura principal; (6) planos de esquistosidad (S) con la misma orientación que los pliegues (Cloos, 1928; Ramsay, 1977; Wilcox *et al.*, 1973; Dresen, 1991). No obstante en la mayoría de las experiencias, y dependiendo de las condiciones impuestas (esencialmente espesor y humedad de la torta de arcilla, diferenciación o no de capas en ella y velocidad de la deformación), sólo aparecerán algunas de las estructuras anteriores.

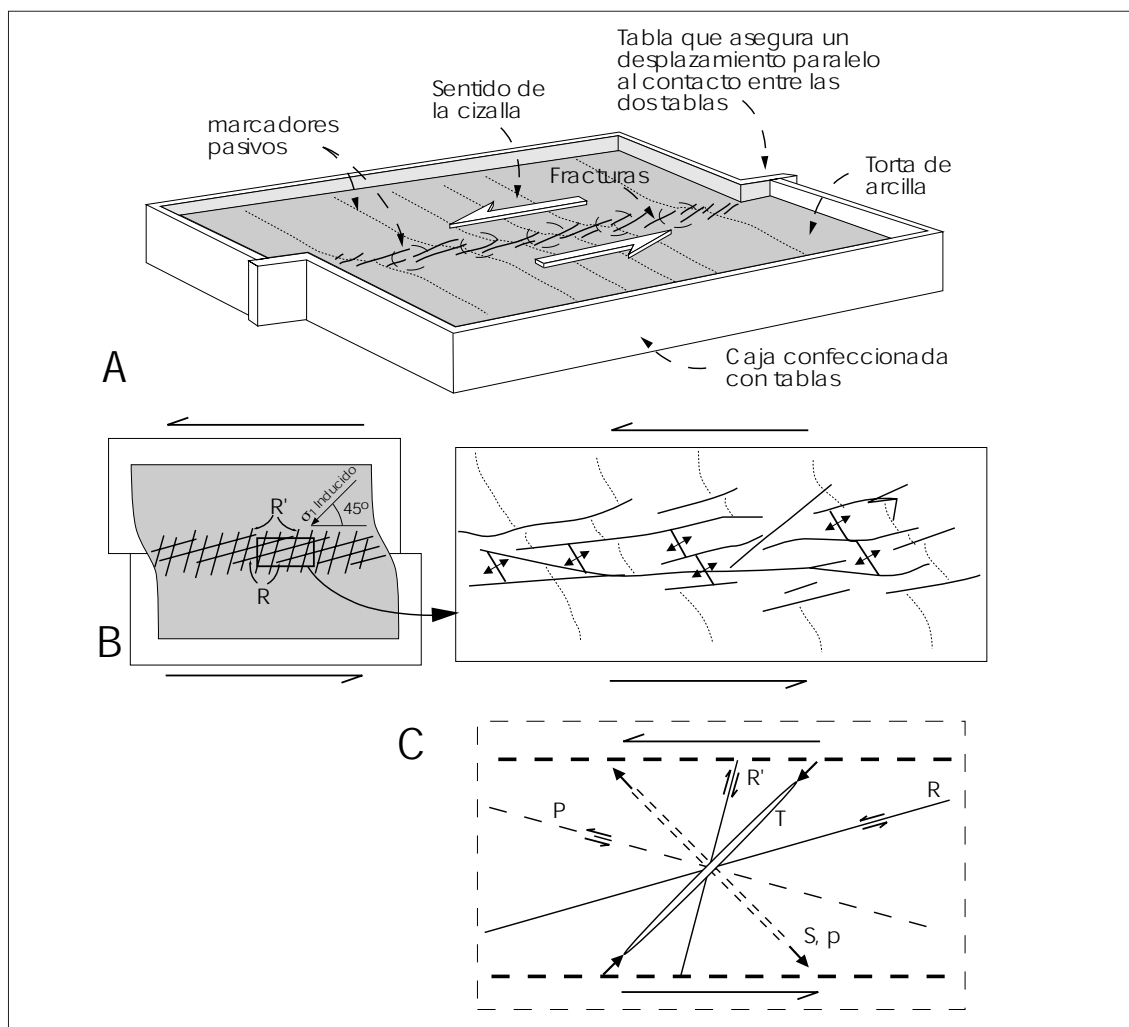


Figura 2. A- Dispositivo experimental utilizado en la reproducción del experimento de Riedel. B- Estructuras más frecuentes y detalle de las mismas. C- Conjunto de estructuras que pueden aparecer en una zona de cizalla.

En el experimento se va aumentando progresivamente el desplazamiento relativo de las dos tablas que sustentan la torta de arcilla (Fig. 3). En el **estadio 1** de evolución, no aparecen estructuras apreciables en la superficie de la torta de arcilla y la deformación se resuelve internamente en ella. En el **estadio 2**, aparecen la familia de fracturas de cizalla R bien desarrollada y, a continuación, la familia de fracturas R', normalmente menos desarrollada, que desplazarán los marcadores. Más tarde, **estadio 3**, se empiezan a desarrollar las microfallas P y las grietas tensionales (fracturas T). Así mismo, se podrán generar pliegues, reflejados en el experimento como crestas y valles de la torta de arcilla, y en situaciones especiales esquistosidad. A la vez que progresa el desplazamiento, y asociada a la cizalla inducida, las estructuras anteriores deberían sufrir una rotación ganando ángulo respecto del plano principal. Sin embargo, durante el procedimiento experimental este giro se realiza en sentido contrario. En el **estadio final**, aparece la fractura principal, por rotura de los puentes de arcilla entre distintas fracturas, con la misma orientación que la fractura del zócalo.

Los alumnos podrán ser divididos en grupos de tres o cuatro personas que realizarán el experimento en distintas condiciones iniciales (espesor, humedad, etc.). Esto permitirá comparar los resultados y hacer distintos tipos de observaciones que pueden ir enfocadas a niveles docentes unas veces de educación secundaria y otras de universidad.

A nivel de educación secundaria los alumnos deberán llegar a reconocer las distintas estructuras que aparecen y el orden secuencial de las mismas así como su evolución una vez formadas. Conocer como influyen las distintas variables del modelo (esencialmente espesor de la torta de arcilla, condiciones de humedad, tasa de deformación) en el resultado final obtenido. En el caso de la variación del espesor de la cobertera (torta de arcilla) y sus condiciones de humedad puede resultar muy interesante la comparación de los resultados de los diferentes modelos obtenidos por los distintos grupos de alumnos.

A nivel universitario además, puede resultar interesante comparar nuestros resultados con los obte-

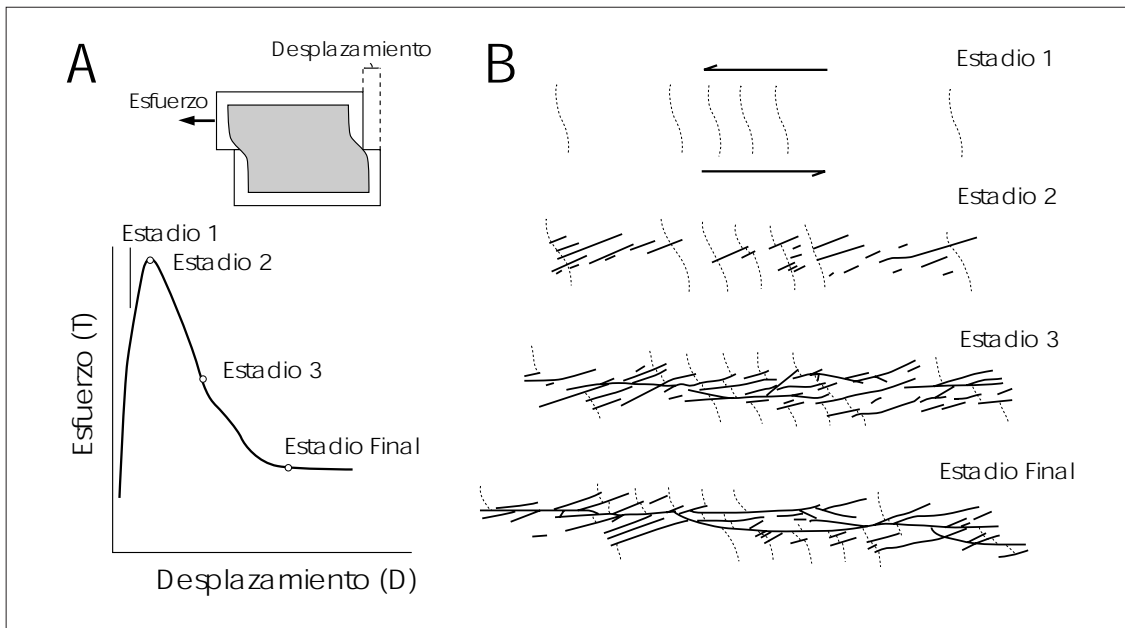


Figura 3. Experimento de deformación progresiva en una banda de cizalla. A- Gráfico esfuerzo (T)-desplazamiento (D). B- Cuatro estadios en el desarrollo de la cizalla: estadio I, deformación interna "pre-pico"; estadio II, estructura "de pico"; estadio III, estructura "post-pico" y estadio final, estructura residual. Modificado de Tchalenko (1970).

nidos por Fabre y Robert (1975) que rehicieron el experimento discriminando entre dos situaciones diferentes: (a) el caso de una "cobertera" delgada y bien adherida al "zócalo" y (b) el de una "cobertera" de gran espesor y baja adherencia. Los resultados más destacados obtenidos por estos autores son: En el caso (a) la falla del zócalo acaba apareciendo en la cobertera al progresar la deformación y romperse los puentes de arcilla entre las fracturas R; en este caso la familia R' alcanza un desarrollo mínimo y puede no llegar a aparecer. En el caso (b) se produce un despliegue más homogéneo tanto de las fracturas R como de las R'. Otro aspecto incluiría la comparación de los resultados obtenidos para condiciones similares y distintas velocidades de deformación así como la comparación del conjunto de resultados con los obtenidos por Tchalenko (1970) que separa tres estadios de evolución de acuerdo con las estructuras que aparecen y con el gráfico de esfuerzo-desplazamiento obtenido en la propia experiencia de laboratorio (Fig. 3).

RECONSTRUCCIÓN EXPERIMENTAL DE FALLAS NORMALES E INVERSAS: LA CAJA DE ARENA

Cuando las rocas son frágiles la deformación no puede manifestarse más que por planos de rotura, es decir fallas (Mattauer, 1976). Los diferentes tipos de fallas corresponden a distintos tipos de movimientos relativos de los bloques (ver Fig. 1). Las fallas normales se suelen originar por efectos de descompresión después de un engrosamiento cortical o asociadas a fosas tectónicas o grábenes. El desplazamiento que se produce corresponde a un estira-

miento. Las fallas inversas están relacionadas con etapas compresivas y acompañan al plegamiento. Cuando el plano de falla está muy poco inclinado se denomina *cabalgamiento*. El desplazamiento corresponde a un acortamiento.

Las experiencias realizadas con arena proporcionan buenos modelos de fallas, siendo Hubbert (1961) uno de los precursores en la realización de este tipo de modelos. En estas experiencias se utiliza la arena como material frágil representativo de la corteza superior. Con el experimento que a continuación se detalla se podrán observar:

- las condiciones necesarias para la formación de fallas inversas y cabalgamientos, así como de fallas normales y grábenes.
- la nucleación y el desarrollo progresivo de dichas estructuras.

El alumno podrá observar un proceso continuo en el que aplicando unas condiciones determinadas a los límites de la maqueta, contexto compresivo, se forman fallas inversas y cabalgamientos. Cambiando las condiciones en los límites, contexto distensivo, podrá observar la formación de fallas normales y grábenes.

Procedimiento experimental

El dispositivo experimental consta de una caja de madera de dimensiones recomendadas 55x35x20 cm, cuyas paredes laterales son de cristal, lo que permite observar la deformación en corte durante la experiencia. Otras dimensiones de la caja y la forma de confección de la misma pueden encontrarse en Bonito (1997). Dentro de la caja se dispone un pis-

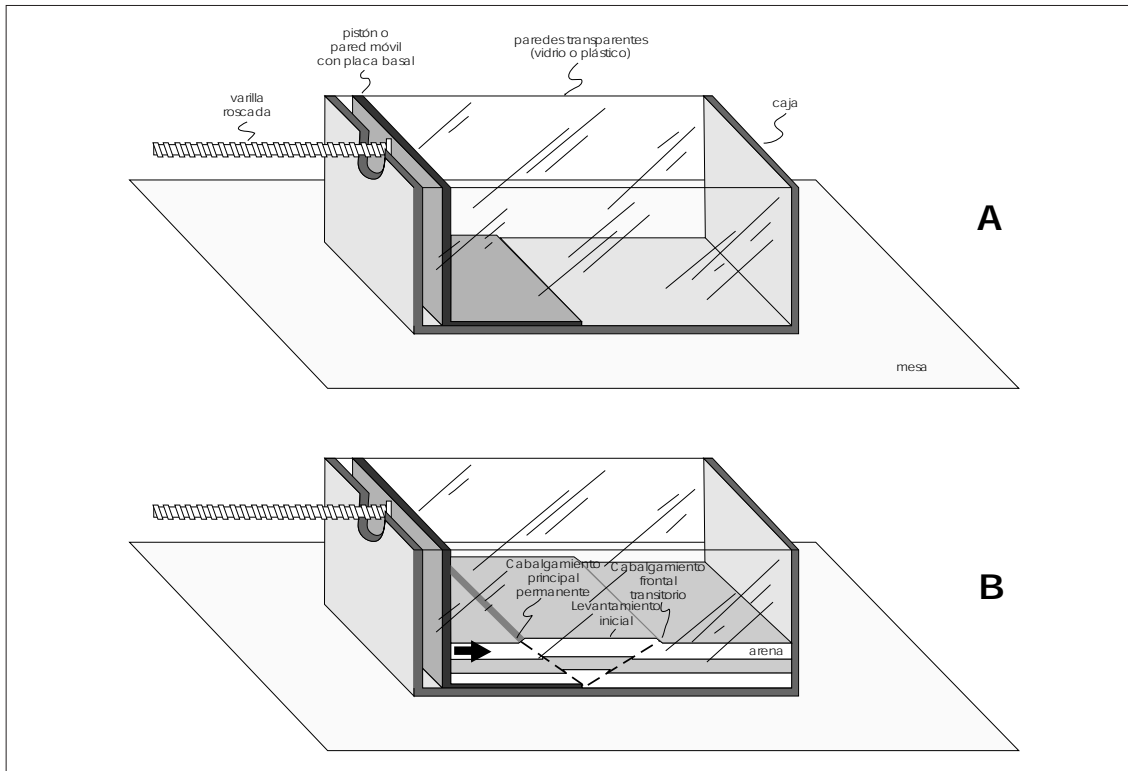


Figura 4. A- Dispositivo experimental de la caja de arena. B- Estadio inicial de la deformación en contexto compresivo. Modificado de Tondji Biyo (1995).

tón o pared móvil unida a una placa basal (Fig. 4A). En el extremo de la placa basal será donde se inicie el acortamiento o estiramiento y donde se nucleen las estructuras. El pistón se mueve con una manivela acoplada a una varilla roscada en un sentido o en otro en función del tipo de régimen tectónico (compresivo o extensivo) que se quiera reproducir.

A lo largo de las paredes laterales se produce un frotamiento que da lugar a esfuerzos tangenciales, este efecto puede ser reducido lubricando las paredes con un producto limpiacristales. La arena reposa directamente bien sobre la base de la caja bien sobre la placa basal móvil. De esta forma, en el contacto arena-caja existirá rozamiento, mientras que la parte de modelo que reposa sobre la placa será transportada pasivamente a lo largo del proceso. Este dispositivo experimental ha sido utilizado ampliamente por los investigadores (Krantz, 1991; Tondji Biyo, 1995).

Existen otros dispositivos experimentales utilizados para la realización de este mismo tipo de experimento (Malavieille, 1984; Vendeville, 1987; Tondji Biyo, 1995), estos modelos se diferencian principalmente en las condiciones en los límites de la caja que imponen el régimen tectónico (placa móvil, tela, lámina elástica, etc.). Uno de ellos ha sido utilizado ya tanto en enseñanza Universitaria como en Medias debido a la fácil concepción del aparato. Este último consta de una tela móvil situada en la base del modelo en lugar de la placa basal. En este caso será necesaria una ranura en la base de la caja (situada en el centro de la misma) por la que

pasa la tela de la que se tira con una manivela o rodillo (Malavieille, 1984).

La arena se introduce en la caja y se extiende con una tablilla hasta conseguir una capa de espesor constante (aproximadamente 1cm). Sobre ésta se sitúa arena de otro color y se extiende de nuevo. El proceso se repite varias veces obteniendo una alternancia de arena de diferentes colores a modo de estratos, lo que permitirá una mejor observación de las estructuras en corte. La arena se colorea con una pequeña cantidad de tinta china o bien de azul de metileno disueltos en agua. Después de impregnar la arena de forma homogénea se deja secar bien. El proceso de secado puede ser acelerado con un horno. Si se dispone de un tamiz, se recomienda tamizar la arena a una granulometría determinada (< 500 mm) con el fin de localizar mejor las estructuras. El espesor del modelo deberá estar comprendido entre 3 y 6 cm para asegurar una buena observación de las estructuras.

La deformación podrá ser observada a lo largo de la experiencia tanto en superficie como en corte a través de las paredes laterales. Si una de las paredes laterales puede ser desatornillada, al terminar la experiencia y tras mojar el modelo podremos realizar una serie de cortes seriados que permitan observar las estructuras profundas. Para mojar el modelo, una vez terminado el experimento, se preserva su superficie añadiendo arena de color diferente al último estrato. Es importante no saturar demasiado la arena para evitar que el agua la arrastre y el modelo se desmorone.

Resultados

Con el desarrollo del presente experimento se podrá observar en superficie la aparición y evolución de la traza de las distintas estructuras, así como la generación de relieve. Así mismo, podrá observarse en corte cómo continúan en profundidad dichas estructuras y qué buzamientos presentan, obteniendo así una visión tridimensional de las estructuras.

En **contexto compresivo**, la tasa de acortamiento final recomendada será del 20%, lo que supone empujar el pistón 10 cm si el modelo tiene una longitud inicial de 50 cm. Desde el inicio de la deformación aparecen dos fallas inversas en la superficie de los modelos. Estas fallas presentan vergencias opuestas y se enraizan en la base del modelo, en el límite de la placa basal, dando lugar a un levantamiento inicial (*pop up*) (Fig. 4B). Los buzamientos iniciales de estas dos fallas están en torno a 30° . Éstas dividen el modelo en tres dominios (Tondji Biyo, 1995): 1) un dominio no deformado encima de la placa basal y limitado por delante por la falla inversa vergente hacia el pistón que da lugar al cabalgamiento principal permanente, 2) un dominio deformado que engloba los dos accidentes, y 3) una zona externa, o dominio frontal, que se irá deformando progresivamente.

La deformación se continúa hacia el dominio frontal mediante el emplazamiento de cabalgamientos que se van sucediendo, siendo más reciente el más externo. Por otro lado, el dominio no deformado es cabalgado por el accidente principal.

Al final de la experiencia, las trazas de los accidentes en superficie son relativamente rectilíneas, a veces se unen unas con otras mediante segmentos con componente direccional y cabalgante que constituyen rampas oblicuas. En la serie frontal, el espaciado entre los cabalgamientos crece sensiblemente hacia la zona externa (Fig. 5). La evolución del sistema frontal corresponde a un transporte pasivo de los primeros accidentes ya inactivos a lo largo de la rampa principal. Estos accidentes sufren una rotación pasiva que aumenta su buzamiento. Al ter-

minar la experiencia, el accidente más reciente presenta un buzamiento de sólo 20° (Fig. 5). La zona deformada cabalga progresivamente sobre el dominio no deformado. El cabalgamiento principal suele presentar una traza única en superficie. En corte, este cabalgamiento atraviesa todo el espesor del modelo variando su buzamiento (Fig. 5). La estructura final del modelo es un anticlinal asimétrico que verge hacia el dominio no deformado (Tondji Biyo, 1995).

La estructuración del modelo dependerá del espesor del mismo. Cuanto más potente sea el modelo, menor será el número de fallas, mayor el espaciado entre ellas y mayor la anchura del dominio deformado.

En **contexto distensivo**, la tasa de estiramiento final recomendada será de un 2,5 %, lo que supone estirar del pistón 1 cm si el modelo tiene una longitud inicial de 40 cm. Desde el inicio de la deformación aparecen dos fallas normales en la superficie del modelo. Estas fallas presentan vergencias opuestas y se enraizan en la base del modelo, en el límite de la placa basal, dando lugar a un graben. Los buzamientos iniciales de estas dos fallas se aproximan a 60° . Al igual que en el caso anterior la maqueta queda dividida desde el principio en tres dominios, separados en este caso por fallas normales que constituirán dos accidentes principales permanentes.

La deformación continúa dentro el dominio deformado mediante la aparición de nuevas fallas normales que se suceden paralelas a la falla que limita la zona externa (Fig. 6), siendo más reciente la más interna. De esta manera el dominio deformado se ensancha progresivamente.

Al final de la experiencia, las trazas de los accidentes en superficie son rectilíneas. Los dos dominios no deformados, el situado encima de la placa móvil y el externo, quedan intactos, limitados por las dos fallas iniciales. En corte, las fallas atraviesan todo el espesor del modelo (Fig. 6). La estructura final es un graben asimétrico, con mayor desarrollo de fallas hacia el dominio externo.

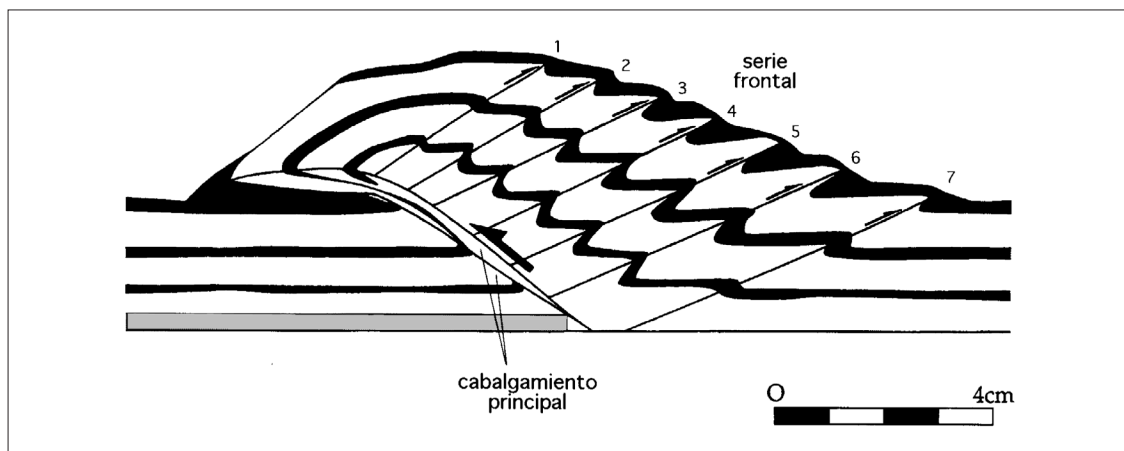


Figura 5. Estado de la deformación al final de la experiencia en contexto compresivo. Vista en corte. Acortamiento del 20 %. 1 a 7 indica la secuencia de formación de los cabalgamientos de la serie frontal. Sacado de Tondji Biyo (1995).

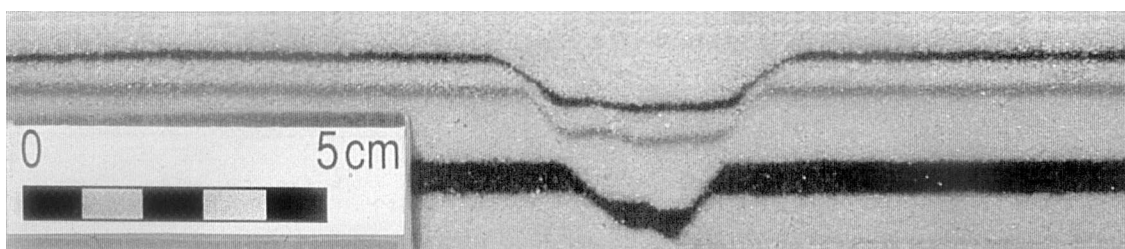


Figura 6. Estado de la deformación al final de la experiencia en contexto distensivo. Vista en corte. Estiramiento del 2,5 %. El pistón está situado a la derecha.

En este caso la estructuración del modelo también dependerá del espesor del mismo, por lo que sería interesante que los alumnos distribuidos en grupos hicieran ambos experimentos con distintos espesores, de forma que pudiesen comparar las diferencias en la estructuración final de los modelos en función de la variación de este parámetro.

En función de los distintos niveles de aprendizaje estos resultados podrán explotarse en mayor o menor grado. Así, los alumnos de enseñanza secundaria deberán ser capaces de observar las diferencias entre fallas normales y grábenes, y fallas inversas y cabalgamientos, tanto en su geometría como en las condiciones de formación.

Los alumnos de enseñanza superior deberán ser capaces de observar cómo evolucionan ambos sistemas en su conjunto, determinar la secuencia de aparición de las diferentes estructuras tanto en superficie como en corte, cómo se interrelacionan dichas estructuras y cómo evolucionan a lo largo del experimento, manteniéndose activas, rotando pasivamente o quedando inmediatamente inactivas tras su formación. En este caso sería interesante ver los cortes seriados del experimento, lo que permitiría asegurarse de haber eliminado todos los efectos de borde en la observación de las estructuras en profundidad.

RECONSTRUCCIÓN EXPERIMENTAL DE LA EXTENSIÓN MULTIDIRECCIONAL: El experimento de Simón Gómez et al. (1988)

Esta experiencia simula la deformación que aparece en la cobertera asociada al desarrollo de un domo bajo la misma. Se pretenden analizar las relaciones entre la fracturación inducida en la cobertera a lo largo del desarrollo del domo y la geometría del mismo. Este experimento fue realizado por Simón Gómez *et al.* (1988) para estudiar la fracturación generada en un campo de esfuerzos de distensión radial o multidireccional. En la naturaleza este tipo de deformación puede asociarse al desarrollo de un cuerpo intrusivo plutónico, un diapiro, o a un abombamiento cortical relacionado con la dinámica tectónica. En este experimento la presencia de discontinuidades previas puede controlar el patrón de fracturación resultante del abombamiento.

Aunque la experiencia fue diseñada fundamentalmente con fines de investigación, la relativa sencillez del dispositivo y la calidad de las observaciones que se pueden efectuar la convierten en una herramienta didáctica muy válida.

Procedimiento experimental

El dispositivo experimental consta de un armazón base taladrado que permite el paso del conducto de aire hasta el globo (Fig. 7). Sobre la plataforma y conectado a la toma de aire se coloca un globo desinflado. Simón Gómez *et al.* (1988) proponen el uso de globos de diferentes formas (esféricos y alargados) de modo que se pueda simular el efecto de diferentes tipos de domos. Sobre el globo se coloca una lámina elástica, sujeta por un sistema de abrazaderas, que impide el contacto directo del globo con los materiales que van a simular la cobertera. Ésta última se modeliza con arcilla o con una mezcla de arcilla y arena (Simón Gómez *et al.*, 1988, usaron una mezcla de arcilla-38%- y arena 62%). Es posible simular una situación de zócalo-cobertera disponiendo dos capas diferentes, en este caso se recomienda que la capa inferior sea siempre de arcilla-

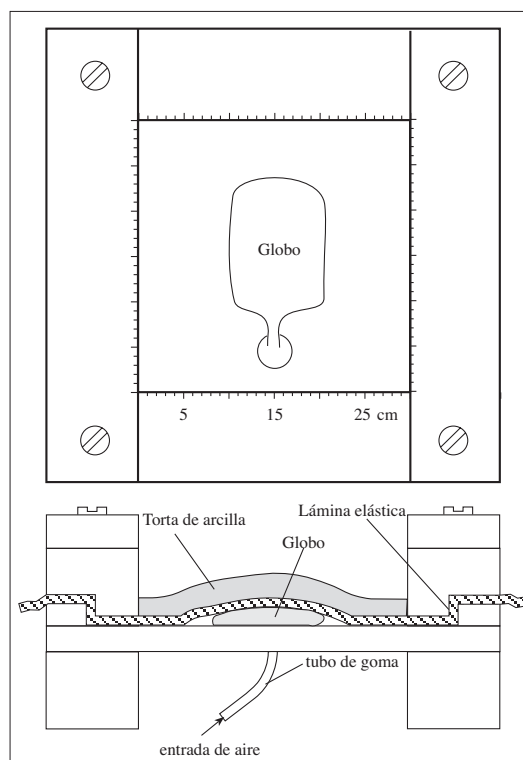


Figura 7. Esquema del dispositivo experimental para la simulación del desarrollo de un domo. Un modelo parecido había sido utilizado ya anteriormente por Hans Cloos para producir un abombamiento que explicase el origen de un sistema de fallas en el valle del Alto Rin.

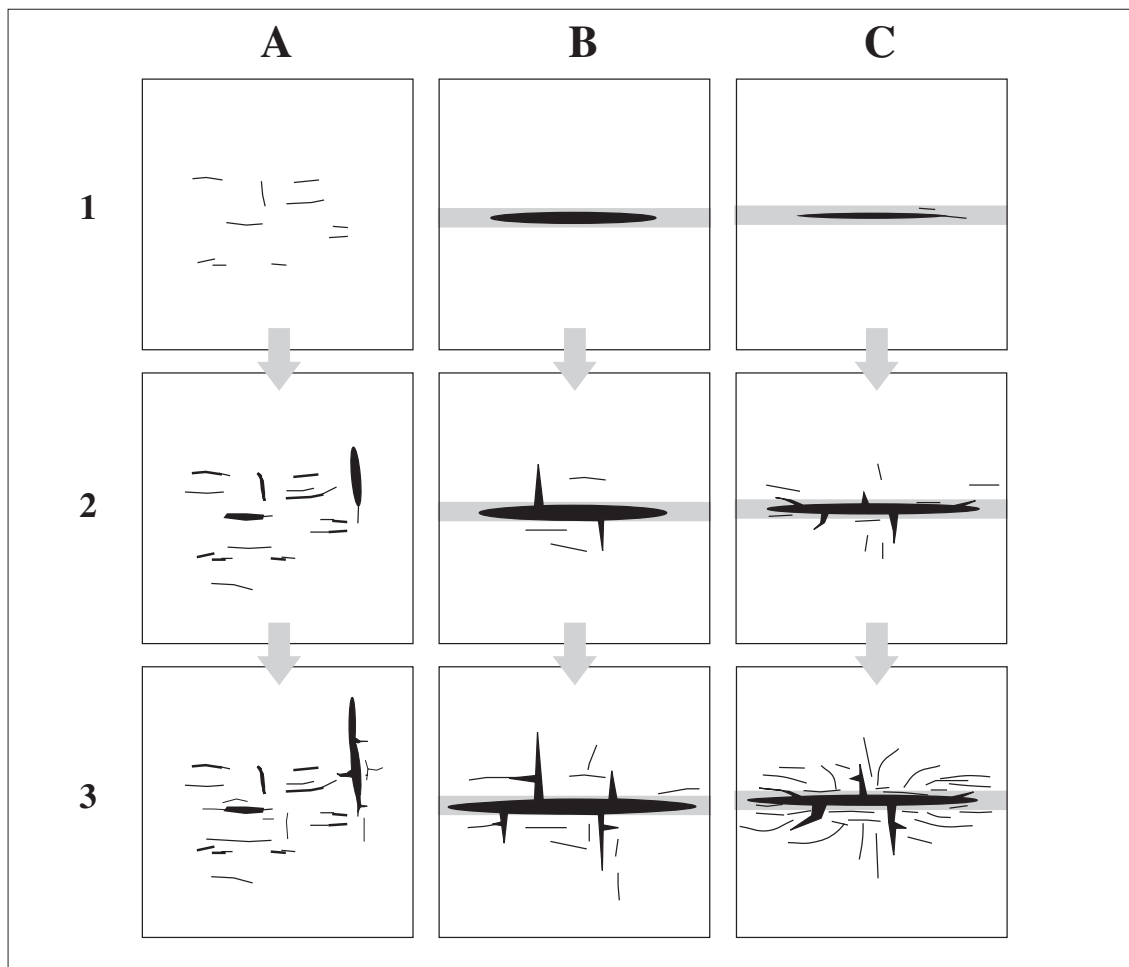


Figura 8. Esquemas idealizados de varios casos experimentales. A- Caso de un domo alargado sin presencia de fracturas previas. B- Caso de un domo circular con presencia de fracturas previas. C- Caso de un domo alargado con presencia de fracturas previas. La situación de las fracturas previas está señalada con trazo gris grueso. La realización de secuencias de esquemas similares a estos (o bien fotos seriadas) durante el desarrollo del experimento resulta muy recomendable.

lla y la superior de arena. Se pueden situar discontinuidades en el zócalo para observar el efecto de la presencia de estas fallas previas en la geometría de la fracturación en cobertera.

Resultados

El principal objetivo en esta práctica es la observación de las fracturas que aparecen en la cobertera, su secuencia de propagación y las relaciones geométricas entre las estructuras resultantes y las condiciones de partida impuestas en el experimento: grado de inflado, forma del globo y la presencia o no de discontinuidades previas. Por tanto, se impone la observación cuidadosa a lo largo de todo el proceso, siendo recomendable hacer hincapie en los sucesivos estadios de desarrollo de la fracturación.

Un ejemplo de desarrollo de este experimento podemos encontrarlo en el trabajo de Simón Gómez *et al.* (1988). El dispositivo se configuró de una de las formas más simples posibles, una capa de arcilla (con un contenido de agua del 18%) de 1 cm de espesor sin discontinuidades previas sobre un globo alargado. En primer lugar, con un levantamiento de 2

cm se obtuvo un conjunto inicial de fracturas paralelo al eje mayor del domo. En una etapa posterior (levantamiento de 3.2 cm) aparece un nuevo conjunto de discontinuidades en ángulo recto con las anteriores (Fig. 8A). Esta es una característica de especial interés, ya que refleja la abundancia de patrones ortogonales de fracturación en situaciones distensivas.

En un segundo experimento Simón Gómez *et al.* (1988) contemplan la presencia de discontinuidades previas afectando a una capa inferior de arcilla representativa de un zócalo rígido. En este caso se observa un claro control de las discontinuidades previas de zócalo sobre la orientación de las nuevas fracturas que aparecen en la capa de arena (cobertera) (Fig. 8B y C).

Para un nivel docente de enseñanza secundaria, basta con subrayar la relación entre la distensión producida por el domo y la generación de fracturas. En un nivel de enseñanza universitaria se harán observaciones sobre la geometría de la fracturación (modelos radiales y ortogonales de fracturación), presencia de perturbación de esfuerzos por fracturas previas y secuencia de propagación.

CONSIDERACIONES FINALES

Se han presentado tres dispositivos experimentales que permiten emular la formación y evolución de diferentes tipos de estructuras discontinuas. Los tres modelos permiten la observación de aspectos geométricos de cada tipo de deformación, como la orientación de fracturas y distintos tipos de fallas (direccionales, normales, inversas y cabalgamientos) en relación a las condiciones de contorno impuestas en cada experimento. Otro aspecto geométrico de interés es cómo las estructuras desarrolladas afectan a marcadores pasivos. Finalmente la distribución del patrón resultante de todo el conjunto de estructuras desarrolladas (tanto menores como mayores).

A diferencia de los aspectos geométricos obtenidos en los modelos, que pueden ser comparados con las estructuras observadas directamente en el campo, los aspectos cinemáticos, de muy difícil o nula observación en la naturaleza, tienen una visualización directa durante el proceso de modelización.

Entre los aspectos cinemáticos destacamos: 1) la deformación progresiva y la sucesión y evolución de las diferentes estructuras que aparecen en una banda de cizalla, 2) la formación y evolución de fallas normales, inversas y cabalgamientos y su secuencia de aparición, y 4) la secuencia de formación de las distintas familias de fracturas asociadas al abombamiento de la cobertera.

Además del interés docente de la experimentación en Geología Estructural al permitir llegar a comprender procesos que tienen lugar en periodos de millones de años, esta metodología es adecuada al permitir la observación de cómo se originan, desarrollan y asocian estructuras geológicas de muy diferentes escalas.

Agradecimientos

Agradecemos a los Drs. José Luis Simón Gómez y Begoña Martínez Peña la revisión crítica de este manuscrito. Las experiencias presentadas en

este trabajo constituyen o han constituido parte del programa de prácticas de la asignatura de Geología Estructural del 5º curso de la Licenciatura en Ciencias Geológicas de la Universidad de Zaragoza impartida por el Dr. José Luis Simón.

BIBLIOGRAFÍA

- Bonito, J. (1997). Deformación de las rocas de la corteza terrestre. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 5.2, 149-158.
- Cloos, H. (1928). Experiment zur inneren Tektonik. *Centralbl. f. Mineral u. Pal.*, 1928 B, 609-621.
- Daubrée, A. (1871). Etudes synthétiques de Géologie expérimentale. *Mém. Carte géol. France*.
- Dresen, G. (1991). Stress distribution and the orientation of Riedel Shears. *Tectonophysics*, 188, 239-247.
- Fabre, D. y Robert, J.P. (1975). Analyse expérimentale des ruptures de la couverture liées à un mouvement décrochant du roche et applications. *Ann. Soc. Geol. Nord. XCV*, 3, 175-182.
- Hobbs, B.E., Means, W.D. y Williams, P.F. (1981). Geología Estructural. Ed. Omega. Barcelona, 518 p.
- Hubbert, M. K. (1961). Mechanical basis for certain familiar geologic structures. *Bull. Geol. Soc. Amer.*, 62, 355-372.
- Krantz, R. W. (1991). Normal fault geometry and fault reactivation in tectonic inversion experiments, in: A. M. Roberts, G. Yielding & B. Freeman eds. The geometry of normal faults. Geological Soc. Special Publication, 56, 219-229.
- Malavieille, J. (1984). Modélisation expérimentale des chevauchements imbriqués: application aux chaînes de montagnes. *Bull. Soc. géol. France* (7), XXVI, 1, 129-138.
- Mattauer, M. (1976). *Las deformaciones de los materiales de la corteza terrestre*. Ed. Omega. Barcelona, 524 p.
- Ramsay, J.G. (1977). Plegamiento y fracturación de las rocas. H. Blume ediciones. Madrid, 590 p.
- Riedel, W. (1929). Zur mechanik geologischer Brucherscheinungen. *Centralbl. f. Mineral. u. Pal.*, 1929 B, 354-368.
- Simón Gómez, J. L., Seron, F. J. and Casas, A. M. (1988). Stress deflection and fracture development in a multidirectional extension regime, mathematical and experimental approach with field examples. *Annales Tectonicae*, II, 21-32.
- Tchalenko, J. S. (1970). Similarities between shear zones of different magnitudes. *Geological Society of America Bulletin*, 81, 1625-1640.
- Tondji Biyo, J. J. (1995). Chevauchements et bassins compressifs. Influence de l'érosion et de la sédimentation. Modélisation analogique et exemples naturels. *Mem. Géosciences Rennes*, 59, 426 p.
- Vendeville, B. (1987). Champs de failles et tectonique en extension. Modélisation expérimentale. *Mem. Géosciences Rennes*, 15, 392 p.
- Wilcox, R. E., Harding, T. P. and Seely, D. R. (1973). Basic wrench tectonics. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 57, 74-96. ■