

# EXPERIENCIAS E IDEAS PARA EL AULA

## EL USO DE MODELOS EXPERIMENTALES EN LA ENSEÑANZA DE GEOLOGÍA ESTRUCTURAL (I) APLICACIÓN A LA DEFORMACIÓN CONTINUA

*Experimental modelling in teaching Structural Geology (I) Application to continuous deformation*

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

### RESUMEN:

*El uso de modelos experimentales sencillos es un modo fácil de comprender los mecanismos de deformación de las rocas. La modelización experimental es, por ello, recomendable en el proceso de enseñanza-aprendizaje de la Geología Estructural. En este trabajo se usan dispositivos experimentales simples que permiten reconstruir, analizar y comprender los mecanismos de deformación continua de la cizalla simple y del plegamiento flexural. Los resultados y observaciones se adaptan a los niveles de enseñanza de educación secundaria y universitaria.*

### ABSTRACT:

*The use of experimental models allows to understand the deformation mechanisms of rocks. Experimental modelling which easing the direct observation of the main tectonic processes is a good tool in teaching Structural Geology. In this work we use simple experimental devices to reconstruct, analyze and understand simple shear and flexural folding. The results and observations of these models are adapted to the secondary school and university teaching levels.*

**Palabras clave:** *Modelización experimental, deformación continua, cizalla simple, plegamiento flexural.*  
**Keywords:** *Experimental modelling, continuous deformation, single shear, flexural folding.*

### INTRODUCCIÓN

Modelos experimentales sencillos con la finalidad de conocer los mecanismos de deformación responsables de la formación de las montañas ya fueron reproducidos por Daubrée (1871). Desde entonces han surgido numerosos experimentos que emulan procesos deformacionales de menor escala. El fin de estos modelos es, en definitiva, la observación de las causas y los mecanismos de los distintos procesos geológicos causantes de las estructuras que aparecen en la naturaleza y de la evolución de estas estructuras en periodos de tiempo considerablemente menores a los que necesitan.

La modelización de mecanismos de deformación mediante maquetas posee una dimensión adicional en su faceta como herramienta docente. 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 los principales mecanismos de deformación a través de la observación de algunas estructuras resultantes de los mismos (pliegues, por ejemplo) o de la variación geométrica de determinados marcadores. También permite conocer la evolución en el tiempo y en el

espacio de los distintos procesos así como de las estructuras resultantes. Además permite trabajar uno de los objetivos generales planteados en el DCB para la Enseñanza Secundaria: "Participar en la planificación y realización en equipo de experiencias científicas sencillas ..." en el área de las Ciencias de la Naturaleza.

En la mayor parte de las prácticas de gabinete, así como en aquellas específicas en las que se utilizan modelos experimentales sencillos, se deben plantear tres fases bien diferenciadas. En la primera el profesor plantea el problema sobre el que se va a trabajar. La dificultad del problema dependerá, en gran medida, de la profundidad alcanzada sobre el tema en las clases teóricas así como de la complejidad de las técnicas utilizadas en su desarrollo. Durante la segunda fase, el alumno debe realizar por sí mismo, individualmente o en pequeños grupos, el trabajo propuesto mientras el profesor se limita a supervisar su trabajo. En la tercera fase, de presentación y comentario de los resultados, el profesor toma parte activa corrigiendo, moderando, preguntando y coordinando las distintas opiniones de los alumnos sobre algún punto concreto.

(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

Las maquetas que se presentan en este trabajo reproducen los mecanismos de deformación de la cizalla simple y el plegamiento flexural. La principal característica de estos dos mecanismos es la de producir una deformación continua del volumen de roca afectado, esto es, no da lugar a planos discretos de rotura a lo largo del volumen de roca deformado.

## MODELIZACIÓN DE LA CIZALLA SIMPLE

En la Naturaleza es frecuente encontrar objetos que actualmente no presentan su geometría original sino que han sufrido modificaciones en su forma, volumen o disposición debido a los procesos de deformación. Los métodos de trabajo de Geología Estructural no permiten acceder de modo directo a la evaluación de un cambio de volumen o una traslación en el espacio de un objeto determinado, ya que es difícil conocer con exactitud su tamaño o su situación original. Podemos determinar sin embargo el cambio de forma de algunos objetos de geometría sencilla (líneas rectas, círculos, fósiles con una forma característica, etc.).

Cuando una línea sufre una rotación respecto a su orientación inicial se puede decir que ha sufrido una *deformación angular* o de *cizalla*, definiendo como *ángulo de cizalla* aquel que forma esta línea con la normal a otra a la que inicialmente era perpendicular (Fig. 1).

La *cizalla simple* (Ramsay, 1977, pp. 100-108; Hobbs *et al.*, 1981: pp. 26) es una deformación que no implica cambio de volumen o traslación del objeto original. Es una deformación de carácter rotacional controlada por un proceso de cizalla sobre una línea (o plano) determinada. Para Ramsay y Huber (1983) la cizalla simple es un desplazamiento que transforma un cuadrado inicial en un paralelogramo donde los vectores de desplazamiento son todos originalmente paralelos a una familia de caras del cuadrado y del paralelogramo. El vector dirección es conocido como *dirección de cizalla* y el plano que contiene a ésta y a la perpendicular al paralelogramo se denomina *plano de cizalla* (Fig. 1A).

Algunos autores plantean una analogía entre la deformación por cizalla simple y la dislocación homogénea que se puede producir en las cartas de una baraja. La familia de planos no distorsionados correspondería a las cartas, que continúan paralelas a su situación en el estado no deformado.

### Procedimiento experimental

Basado en la analogía planteada con la dislocación de las cartas de la baraja, se propone un dispositivo experimental que permite aplicar una deformación de cizalla simple sobre un paquete de tablillas, haciéndolas deslizar unas sobre otras y controlando el ángulo de cizalla a voluntad.

El dispositivo propuesto es una caja rectangular de madera con dos tablas fijas paralelas entre sí que controlarán la dirección de la cizalla (Fig. 2A). Entre las dos tablas fijas se coloca un paquete de tablillas

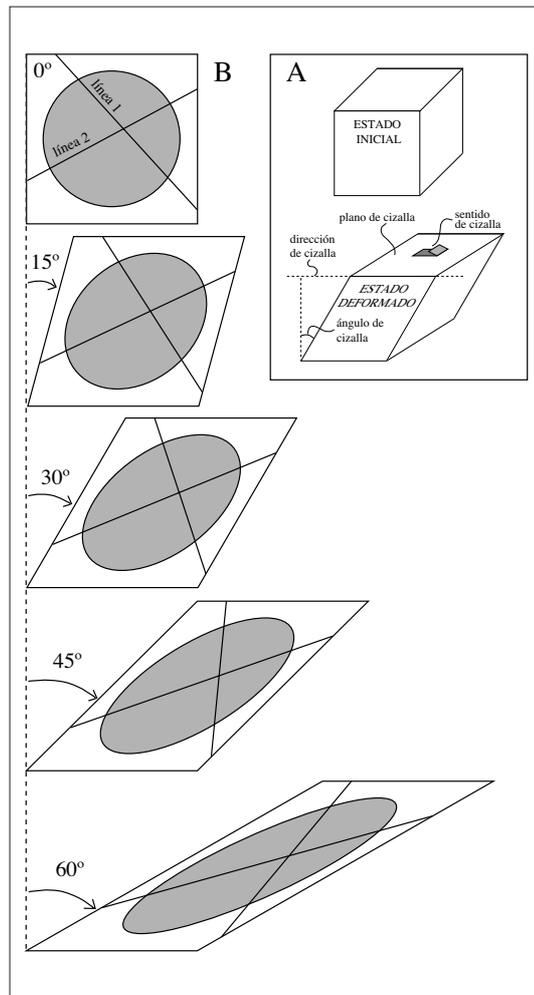


Figura 1. A- Parámetros que definen la deformación por cizalla simple. B- Evolución de la elipse de deformación y variación en la longitud y orientación de dos líneas oblicuas a la dirección de cizalla al aumentar el ángulo de cizalla.

llas (por ejemplo: paneles de marquetería) sobre cuya cara superior se pueden dibujar líneas con distintas inclinaciones, un triángulo o una circunferencia (Fig. 2B).

Para aplicar un ángulo de cizalla determinado planteamos dos posibilidades:

- 1) introducir en el dispositivo dos cuñas opuestas (modelo de Ramsay y Huber, 1983, pág. 2) con el ángulo de cizalla fijo (con lo que observaremos la deformación finita sufrida por el conjunto de tablillas),

- 2) utilizar dos barras o tablas adicionales (Fig. 2C) que permitan aplicar cualquier ángulo de cizalla mediante el giro simultáneo de las mismas sobre los costados del paquete de tablillas (de esta manera podemos observar la deformación progresiva del conjunto).

### Resultados

En el caso planteado (Fig. 1B), sobre el lateral del paquete de tablillas dibujamos una circunferen-

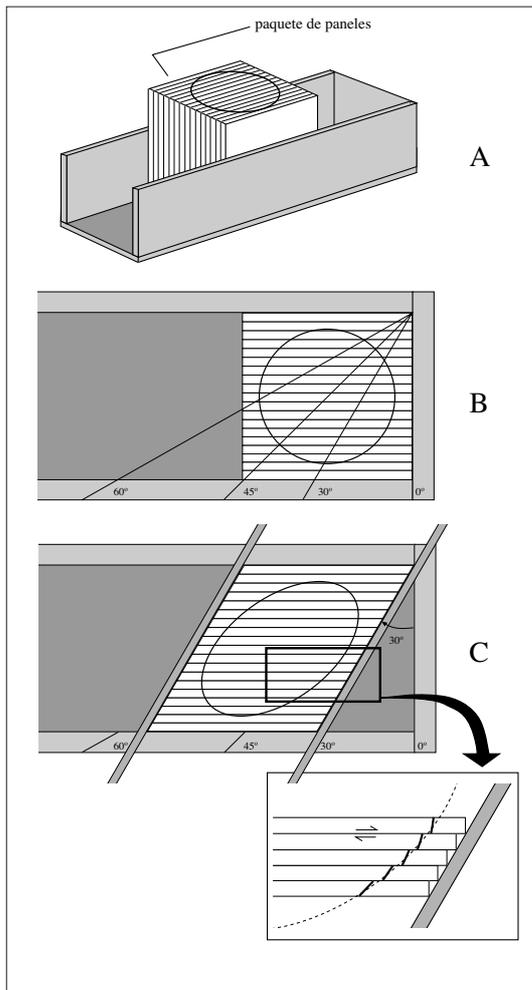


Figura 2. Dispositivo experimental para simular la cizalla simple. A Caja de madera y paquete de tablillas. B Vista en planta del estado inicial no deformado, donde se observa el marcador en superficie y distintos ángulos de cizalla predeterminados en la superficie de una de las paredes laterales. C Aplicación de una cizalla de 30° mediante dos tablas paralelas. En el detalle se observa que la deformación continua se resuelve mediante pequeños deslizamientos tablilla sobre tablilla.

cia y dos líneas originalmente oblicuas a la dirección de la cizalla. Con la utilización del dispositivo experimental debemos ir controlando las variaciones que sufren las líneas en su longitud e inclinación respecto a la dirección de cizalla y relacionarlas con el aumento del ángulo de cizalla mediante la construcción de curvas que expresen dichas variaciones. También es importante poder observar y describir la evolución de la elipse de deformación, es decir, cómo una circunferencia se convierte en una elipse siguiendo un proceso de cizalla simple progresiva.

A partir del dispositivo experimental hemos calculado la variación de longitud y orientación (ángulo con la dirección de cizalla) que sufren las líneas dibujadas inicialmente:

ángulo de cizalla	línea 1		línea 2	
	longitud (mm)	orientación	longitud (mm)	orientación
0°	56,5	28°	61,5	132°
15°	63	23°	54	122°
30°	70,5	22	48	107°
45°	81	19°	45,5	84°
60°	100	18°	59	50°

Dependiendo del nivel de los estudiantes con los que se realice la experiencia, la reconstrucción experimental de este tipo de deformación permitirá a los alumnos:

1) observar el estadio inicial y final, así como la evolución entre uno y otro (deformación progresiva), de un proceso de deformación por cizalla simple

2) extraer consecuencias sobre la naturaleza de los ejes de deformación y su variación a lo largo del proceso

3) calcular los cambios que sufrirá o que podría sufrir una línea (o una figura determinada) en su longitud y orientación dependiendo del ángulo que forme con la dirección de cizalla (para ello se propone la realización de curvas, ábacos o fórmulas que relacionen el cambio de forma y orientación con el aumento del ángulo de cizalla como actividad adicional al experimento). En el ejemplo se observa cómo una de las líneas aumenta de longitud cuando aumenta el ángulo de cizalla, mientras que la otra, en cambio, disminuye al principio y se alarga después. De esta manera podemos estudiar la deformación progresiva de figuras geométricas concretas.

## RECONSTRUCCIÓN EXPERIMENTAL DE UN PLEGAMIENTO FLEXURAL

Uno de los rasgos más notables que presentan las rocas estratificadas es que con frecuencia las capas aparecen curvadas formando pliegues. De los distintos tipos de pliegues y procesos de plegamiento que ocurren en la naturaleza los denominados pliegues de flexión son los más abundantes (Ramsay, 1977; p.391). Este tipo de pliegues y el proceso que los produce presenta las siguientes características:

1) El plegamiento de las capas es consecuencia de un acortamiento paralelo a ellas (Fig. 3a).

2) A lo largo de la superficie plegada (tanto en la zona de los flancos como en la charnela) se mantiene constante el espesor de las capas. Este es el motivo por el que en geología a este tipo de pliegues se los denomina "pliegues isopacos" (Fig. 3b).

3) Mientras que las zonas de flanco se deforman por cizalla simple (continua en el interior de las capas o concentrada en las superficies que las limitan) la

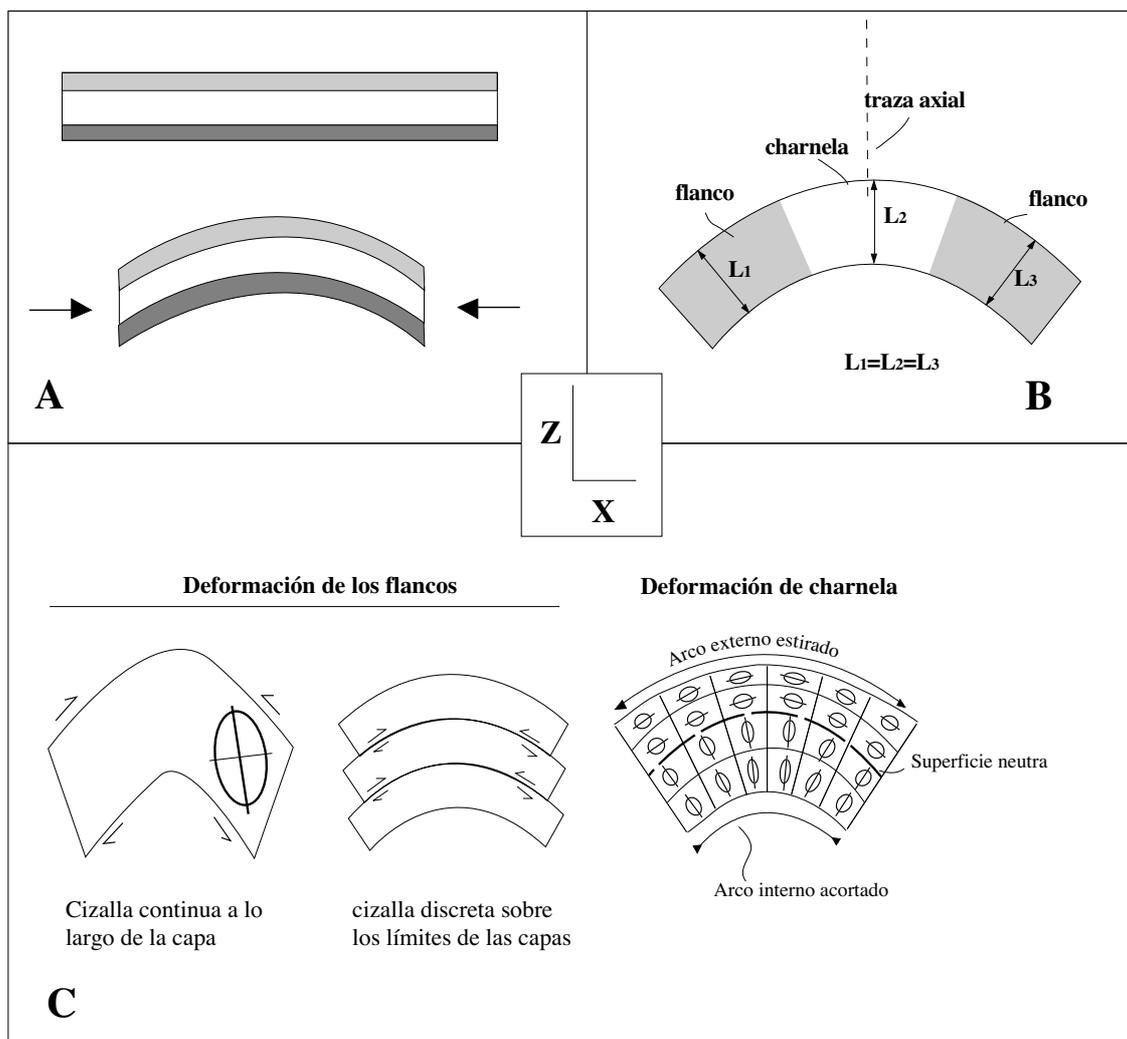


Figura 3. A- Plegamiento de un paquete de capas por una compresión horizontal. B- Constancia del espesor ( $L$ ) a lo largo de una capa plegada por flexión. C- Mecanismos de deformación en las zonas de flanco y charnela de un pliegue flexural.

zona de la charnela lo hace mediante estiramiento en su parte externa y acortamiento en la interna (Fig 3c).

Aunque las capas afectadas por este tipo de plegamiento son muy abundantes en la naturaleza, sólo en contadas ocasiones es posible observar el tipo de modificaciones que tienen lugar en el interior de ellas. Con la presente reconstrucción experimental se pretende:

- 1) visualizar de un modo sencillo el estado de deformación en el interior de una capa plegada por flexión diferenciando sus efectos en la zona de la charnela y en los flancos
- 2) estimar el tipo y la cantidad de deformación en las distintas zonas del pliegue experimental a lo largo del proceso de plegamiento,
- 3) distinguir los diversos mecanismos de desarrollo de pliegues flexurales y,
- 4) reconocer el tipo de estructuras geológicas que pueden ser compatibles con este proceso.

## PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

**Deformación flexural en la zona de charnela.** Para modelizar el efecto del plegamiento flexural de la zona de charnela de una capa o estrato emplearemos una torta de arcilla de 25 x 10 x 2 cm sobre la que se dibujan circunferencias de referencia que van a permitir hacer un seguimiento del proceso de plegamiento de la torta (Fig. 4A). En el transcurso del plegamiento, la modificación de la forma de las circunferencias en elipses y la orientación de sus ejes largos respecto a las superficies externas de la torta van a permitir caracterizar la deformación sufrida en cada instante en su interior. Los resultados de la experiencia, es decir la variación de la forma y orientación de las elipses va a depender del espesor y grado de humedad de la torta de arcilla

Para tratar de emular los procesos naturales, la deformación progresiva de una capa se modeliza considerando un incremento sucesivo de la inclinación de las superficies envolventes de la torta de ar-

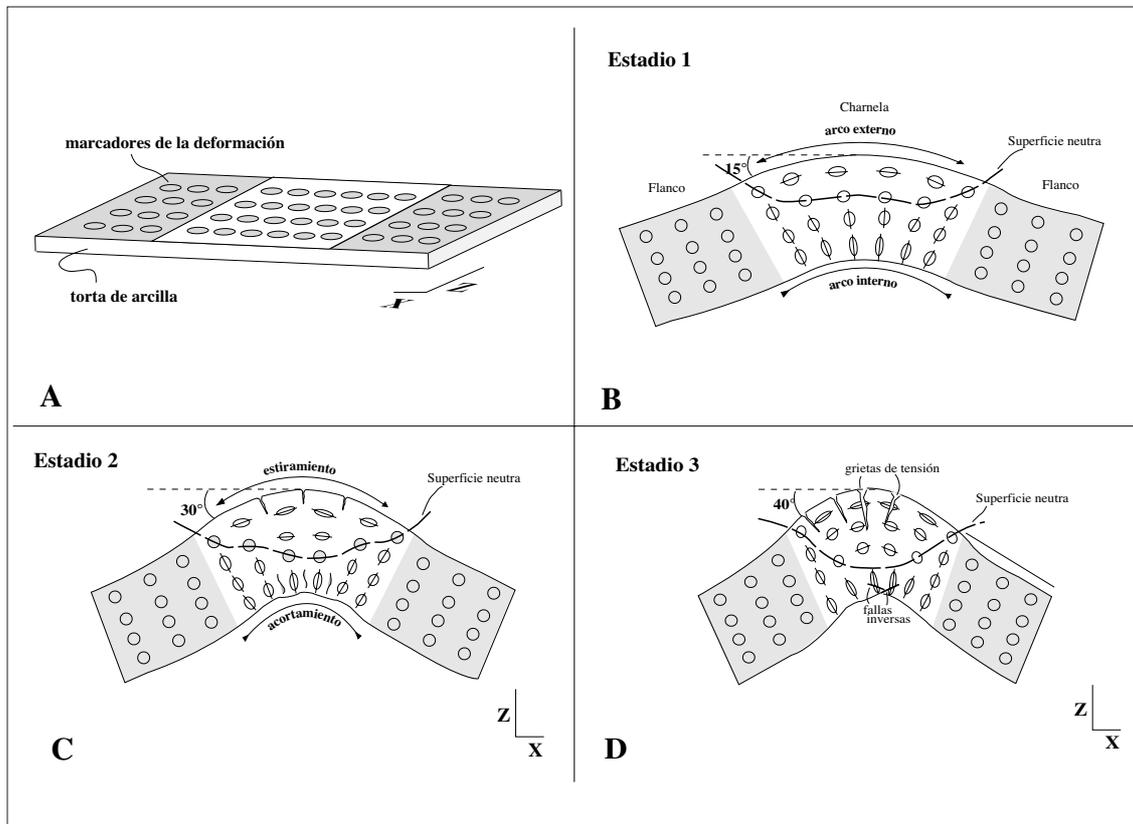


Figura 4. A- Dispositivo experimental para simular la deformación por un mecanismo de plegamiento flexural en la zona de charnela. Las circunferencias dibujadas sobre la superficie de la torta representan los “marcadores pasivos de la deformación” que se transformarán en elipses de distinta excentricidad y orientación en los distintos estadios considerados. B, C y D- Vista en planta de tres estadios del experimento de plegamiento flexural. En cada uno se indica la forma y orientación de las elipses y la posición de la “superficie neutra” así como los mecanismos que operarán en las distintas regiones de la charnela. Obsérvese que la deformación en la charnela da lugar al desarrollo de grietas de extensión asociadas al estiramiento del arco externo de la charnela y pliegues menores y fallas inversas ligados al acortamiento en el arco interno, mientras que los flancos se mantienen indeformados a lo largo del proceso.

cilla a lo largo de tres estadios (Fig. 4B, C y D). Para ello se irá moldeando la arcilla suavemente con la ayuda de dos varillas flexibles para evitar la distorsión de la arcilla con los dedos. En nuestro ejemplo, para el primer estadio se ha considerado una inclinación de las superficies de  $15^\circ$  mientras que para el segundo y tercer estadio de  $30^\circ$  y  $40^\circ$ , respectivamente.

**Deformación flexural de los flancos.** A diferencia de la charnela donde es posible diferenciar zonas sometidas a distintos mecanismos de deformación (acortamiento en el arco interno y estiramiento en el externo) en los flancos el único mecanismo que opera es la cizalla simple paralela a las capas (Fig. 3C). En este caso el dispositivo experimental consiste en un paquete de cuartillas convencional en uno de cuyos bordes se dibujan las circunferencias que permitirán observar las características geométricas de la deformación (Fig. 5A). El paquete es soportado por la zona de la charnela permitiendo el libre deslizamiento de las cuartillas en la zona de los flancos (Fig. 5B).

## Resultados

En el caso de la deformación flexural en la **zona de charnela** de un pliegue, la variación de la forma de las elipses y de la orientación de sus ejes largos respecto a los bordes de la torta depende del grado de apretamiento del pliegue. En cada uno de los tres estadios considerados será posible confeccionar tablas donde queden reflejadas las modificaciones geométricas de las elipses.

**Estadio 1** (Fig. 4B). En la parte externa de la charnela aparecen elipses con el eje largo paralelo a la superficie externa de la torta, mientras que en el arco interno los ejes largos de las elipses forman  $90^\circ$  con la superficie de la torta. Entre ambos conjuntos de elipses permanecen circunferencias que indican ausencia de deformación que definen lo que en geología estructural se conoce como “superficie neutra”.

En el **estadio 2** (Fig. 4C), se desarrollan algunas estructuras en ambas partes de la charnela que permiten identificar el tipo de deformación que está teniendo lugar. De este modo, en el arco externo aparecen grietas perpendiculares a la superficie ex-

terna de la torta que responden al estiramiento que se produce en esta zona del pliegue mientras que en la parte interna se producen pequeños repliegues de la superficie externa de la torta que responden a un acortamiento.

En el **estadio 3** (Fig. 4D), como consecuencia del incremento de la curvatura de la torta de arcilla la "superficie neutra" se desplaza hacia la parte inferior con lo que aumenta la porción de la charnela sometida a estiramiento. Este mayor estiramiento produce un incremento de la apertura de las grietas existentes y la generación de otras nuevas. En el arco interno de la charnela el incremento del acortamiento se traduce en la formación de pequeñas fallas inversas que desplazan las elipses.

En **los flancos** la deformación flexural se ha modelizado con un paquete de cuartillas de papel (Fig. 5A). El rasgo característico es la aparición de elipses oblicuas a los límites de las cuartillas (límites de una capa o estrato), cuya excentricidad aumenta progresivamente desde la zona de la charnela donde la deformación es nula tal y como lo demuestra la persistencia de la circunferencia inicial (Fig. 5B). En ambos flancos la orientación de los ejes largos de las elipses (es decir de máximo esti-

ramiento) es compatible con la dirección de la cizalla inducida por el libre deslizamiento de las cuartillas (Fig. 5B).

Las micro y mesoestructuras que pueden desarrollarse en los flancos de este tipo de pliegues han de ser compatibles con el mecanismo de cizalla simple paralelo a las capas. De este modo, teniendo en cuenta la orientación de los ejes largos (o de máximo estiramiento en la roca) de las elipses y cortos (o de máximo acortamiento) en cada flanco, podrán desarrollarse tanto estructuras tensionales (grietas de extensión) perpendiculares a los ejes largos de las elipses como contraccionales (planos de esquistosidad) perpendiculares a los ejes cortos. En el caso de pliegues con el plano axial vertical, ambos conjuntos de estructuras presentarán una disposición simétrica respecto a dicha superficie (Fig. 5C).

La realización de los experimentos propuestos permite efectuar distintos tipos de observaciones que pueden ser incluidas dentro de 2 grupos, geométricas y cinemáticas, enfocadas a niveles docentes de educación secundaria y universidad respectivamente.

- Las observaciones puramente geométricas incluyen caracterizar los distintos estadios del

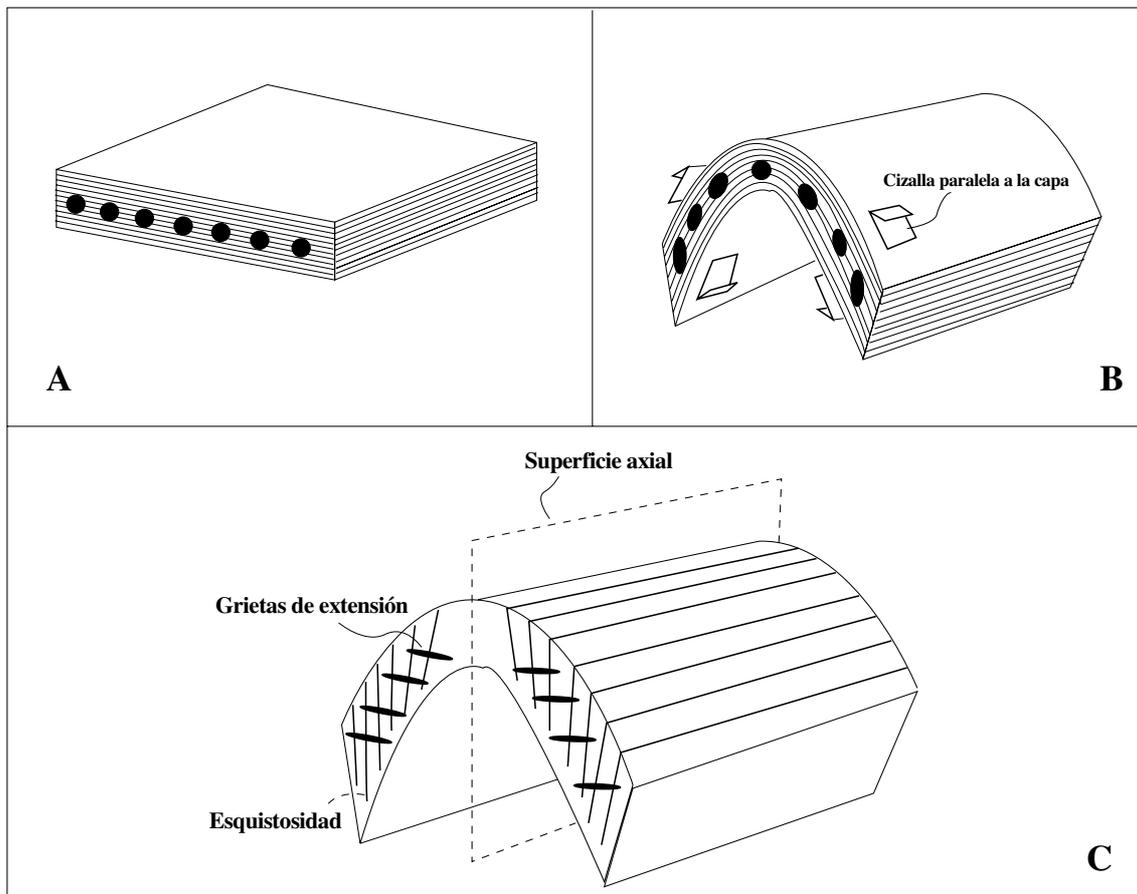


Figura 5. Dispositivo experimental para modelizar la deformación flexural en un paquete de cuartillas. A- Estado indeformado y situación de los marcadores de referencia. B- Situación deformada donde se aprecia la aparición de elipses en ambos flancos del pliegue, cuya orientación está condicionada por el sentido de la cizalla inducida por el deslizamiento de las cuartillas.

proceso de plegamiento flexural en función de la forma y orientación de los marcadores (elipses) de la deformación en la torta. Dentro de este aspecto se hará un especial hincapié en detectar las diferencias existentes entre las zonas de flanco y charnela.

- Un segundo tipo de observaciones incluyen la cuantificación de la deformación en la torta de arcilla y la determinación de los diferentes mecanismos de deformación a lo largo del proceso de plegamiento. El primer aspecto supone medir la excentricidad de las distintas elipses y la desviación de su eje largo respecto a una línea de referencia predeterminada. Estos datos pueden ser representados en gráficos bidimensionales en los que se obtienen distintos tipos de curvas según las distintas intensidades de deformación (Ramsay, 1967; Lisle, 1985).

El tipo de mecanismo de deformación del pliegue de arcilla depende de la zona del pliegue que se considere (flanco o charnela). De este modo la cizalla paralela a la capa es dominante en los flancos y la deformación longitudinal (estiramiento y acortamiento perpendicular a la capa de arcilla) en la charnela. Ambos tipos de observaciones complementan los puramente geométricos y permiten llegar a comprender los aspectos cinemáticos del proceso de plegamiento.

## CONSIDERACIONES FINALES

Las prácticas de gabinete son un instrumento fundamental para el desarrollo de habilidades y destrezas en Geología Estructural. Lo esencial en las clases prácticas es el trabajo del estudiante. La utilidad de las clases prácticas es obvia para aprender nuevos conceptos, reafirmar los conceptos aprendidos en clases magistrales, o trabajar con datos obtenidos durante las prácticas de campo. Además, se ponen de manifiesto aspectos que en clases teóricas no habían sido bien comprendidos y que es preciso aclarar. En este sentido, el uso de modelos experimentales en Geología Estructural es de una gran utilidad puesto que constituye la única forma de observar y comprender la cinemática de los distintos procesos tectónicos que entran en juego en la deformación de las rocas de la corteza terrestre. Además, en la modelización se puede ir analizando el efecto de la variación de cada uno de los parámetros que entran en juego en el proceso fijando los restantes parámetros.

La experimentación en Geología representa una actividad fundamental para llegar a comprender los procesos que tienen lugar en la naturaleza y que, en la mayoría de las ocasiones, se desarrollan a lo largo de millones de años. En Geología Estructural aspectos tales como la geometría de las estructuras tectónicas, los factores que controlan su desarrollo y su evolución a lo largo del tiempo, constituyen la base para comprender los procesos y llegar a establecer hipótesis acordes con las evidencias observacionales.

Desde el punto de vista didáctico la utilización de dispositivos experimentales capaces de emular situaciones naturales resulta imprescindible para entender la relación de causalidad entre los procesos geológicos y las estructuras resultantes. El empleo de estos dispositivos permite llevar a cabo fundamentalmente dos tipos de tareas. Éstas incluyen la observación, descripción y caracterización cualitativa y cuantitativa de aspectos geométricos y cinemáticos.

Los aspectos geométricos contemplados en este trabajo se basan tanto en la variación de la forma inicial de marcadores pasivos sujetos a deformación como en la caracterización de la estructura primaria (pliegue) y la caracterización y distribución de estructuras menores secundarias (grietas en charnela externa y micropliegues y fallas contraccionales en charnela interna) en los distintos estados del proceso.

Desde el punto de vista cinemático, los resultados de los distintos experimentos incluyen: 1) la variación de la forma y orientación de los marcadores a lo largo del proceso y su caracterización cualitativa y cuantitativa tanto en el mecanismo de cizalla simple como en el de plegamiento flexural; 2) la migración de las zonas afectadas por distintos tipos de deformación (variación de la posición de la línea neutra durante el proceso de plegamiento flexural) y 3) el desarrollo y crecimiento de las estructuras menores.

La diferenciación en niveles docentes de Enseñanzas Media y Universitaria se plantea en función de distintos niveles de comprensión y aproximación a los procesos más frecuentes en geología estructural. Esto es una caracterización descriptiva a partir de aspectos puramente geométricos y la determinación de la relación causa-efecto mediante la elaboración de modelos cinemáticos de los procesos.

## 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

- Daubrée, A. (1871). Etudes synthétiques de Géologie expérimentale. *Mém. Carte géol. France*.
- Hobbs, B.E., Means, W.O. y Williams, P.F. (1976). *Geología Estructural*. Ed. Omega. Barcelona. 518 p.
- Lisle, R.J. (1985). *Geological Strain analysis. A manual for the Rf/θ technique*. Pergamon Press. U.K., 99 p.
- 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.
- Ramsay, J.G. y Hubert, M. (1983). *The technics of modern structural geology. Vol. 1.: Strain analysis*. Academic Press, 307 pp. ■