

Generación de una falla en dirección en el laboratorio como modelo analógico de una falla transformante continental

Generation of a strike-slip fault in the laboratory as an analogue model of a continental transform fault

EULOGIO PARDO-IGÚZQUIZA

Instituto Geológico y Minero de España (IGME), Ríos Rosas 23, 28003 Madrid, España. E-mail: e.pardo@igme.es

Resumen Se propone una modificación del experimento de Riedel como modelo análogo de una falla transformante continental en el contexto de la tectónica de placas. La modificación consiste en introducir el confinamiento lateral del material granular que representa las rocas sedimentarias de cobertera que experimentan deformación frágil por una falla en dirección del basamento. Con dicho confinamiento se realiza la visualización de estructuras tectónicas que se originan, si el material granular que se utiliza es el apropiado. De este modo la evolución y geometría de la zona de cizalla, las familias de fracturas de Riedel conjugadas, la elevación del terreno por transpresión con la formación de macizos o pilares tectónicos (horst) y la formación de fosas tectónicas oblicuas (oblique pull-apart basins) quedan claramente ilustradas. El diseño experimental que se propone es extremadamente sencillo y económico, de modo que su construcción y aplicación en el aula es inmediata. Asimismo el experimento genera, en el alumno, interés, curiosidad y espíritu crítico en la comprensión y explicación de los fenómenos geológicos.

Palabras clave: Geología estructural, modelo análogo, zona de cizalla, falla de desgarre, experimento de Riedel.

Abstract *A modification of the classic Riedel experiment is proposed as a physical model of a continental transform fault in the plate tectonics context. The modification consists of the introduction of the lateral confinement of the granular material that represents the cover of sedimentary rocks that experiment brittle deformation induced by a strike-slip fault of the basement. Such lateral confinement highlights the variety of tectonic structures that will appear when an appropriate granular material is used in the experiment. Thus, the evolution and geometry of the shear zone, Riedel shear fractures, the uplift of the terrain by transpression with the formation of tectonic horsts and the formation of oblique pull-apart basins are clearly illustrated. The experimental design is very simple and inexpensive so that it can be easily and quickly implemented in the classroom. Also the experiment will induce interest, curiosity and critical thinking in the students that will wonder about the comprehension and explanation of geological processes.*

Keywords: *Structural geology, physical model, shear zone, transform fault, Riedel experiment.*

INTRODUCCIÓN

Una de las primeras cosas que aprende un estudiante de geología es que, cuando hace una foto de una estructura geológica en el campo, se ha de colocar un objeto de tamaño conocido (una moneda, el martillo de geólogo, una persona,...) que sirva de escala. Si no se hiciera eso, al ver la

foto sería muy difícil (o quizás imposible) decir si la estructura que estamos viendo tiene un tamaño de milímetros, metros o kilómetros. Esto es así porque un gran número de estructuras geológicas no tienen un tamaño típico o característico y pueden presentarse en la naturaleza a tamaños muy dispares. Esto ocurre, por ejemplo, con la fracturación de las rocas. Las fracturas y las redes de fracturas

pueden aparecer desde escala microscópica (tamaño de varias micras) a escala continental (tamaño de cientos de kilómetros). Esto es, el tamaño de la fracturación puede cubrir un rango aproximado de hasta diez órdenes de magnitud, desde 10^{-5} m hasta 10^5 m. Esta característica, de no existir un tamaño típico, tiene el nombre técnico de invarianza de escala y puede ser aprovechada para reproducir en el laboratorio estructuras que aparecen a escala continental. En este trabajo se propone generar una falla en dirección en el laboratorio para reproducir las estructuras que aparecen asociadas a una falla transformante continental en el contexto de la tectónica de placas. Tchalenko (1970) señala como las similitudes de las zonas de cizalla a diferentes escalas se han reconocido desde los comienzos de la geología estructural y como tal hecho ha sido utilizado en estudios de modelado de los procesos tectónicos.

Recordemos que una falla (geológica) es una fractura en la roca donde hay un movimiento relativo entre los dos bloques generados por la fractura. Si dicho movimiento relativo se produce principalmente en la horizontal se tiene una falla en dirección o de rumbo (o de cizalla o de desgarre). Estas fallas en dirección pueden alcanzar una escala continental (de hasta 1000 km) y aparecen en el contexto de la tectónica de placas tanto en el océano (falla transformante oceánica) como en los continentes (falla transformante continental). En el laboratorio, se puede generar una falla en dirección de un modo muy sencillo utilizando el experimento clásico de Riedel (1929). En este experimento, el material que representa la roca sedimentaria de cobertera se coloca sobre dos placas o tablas que representan el basamento, donde se genera una falla en dirección mediante el movimiento relativo de ambas tablas. Esta falla en dirección genera una zona de cizalla en el material de cobertera. Este experimento en laboratorio utilizando dos placas y arcilla húmeda fue descrito por Riedel (1929). La falla en dirección del basamento, cuando se emplea arcilla húmeda como cobertera, no produce una falla maestra simple sino una zona de deformación conocida como zona de cizalla de Riedel. Una de las características principales de este sistema de cizalla de Riedel es una secuencia de fracturas de cizalla sintéticas (llamadas fracturas-R o fracturas de Riedel de bajo ángulo) que se solapan en una estructura de escalera (“*en échelon*”). En las zonas de transferencia estas fracturas sintéticas pueden estar conectadas por un sistema antitético de fracturas en escalera (llamadas fracturas-R’ o fracturas de Riedel de ángulo alto). Adicionalmente, estas fracturas antitéticas R’ también aparecen fuera de dichas zonas de transferencia. Conforme la deformación avanza pueden aparecer otros sistemas de fracturas sintéticas y antitéticas conjugadas (fracturas-P y fracturas-Y). Por último, también puede aparecer un sistema de fracturas extensionales (fracturas-T) (Davis, *et al.*, 2000). Las fracturas R y R’ aparecen con ángulos medios de 15 y 75 grados respectivamente (Misra *et al.*, 2009) con respecto a la dirección principal de cizalla. Aunque este ángulo depende del material que se utilice en el experimento analógico (talco, escayola, harina,...)

ya que está relacionado con el ángulo de fricción interna de dicho material, de modo que este ángulo aumenta con la cohesión del material (Dooley, y Schreurs, 2012). Las fracturas R y R’ son las más frecuentes y tienden a intersectarse unas con otras dando lugar a bloques rómbicos o sigmoidales que forman estructuras “en pez”.

Las estructuras de cizalla de Riedel se pueden observar a muy diferentes escalas desde la microscópica (Morgenstern y Tchalenko, 1967) a la continental (Frisch *et al.*, 2011; Fossen y Cavalcante, 2017). Tchalenko (1970) examina la similitud entre las zonas de cizalla a escala microscópica, de laboratorio (experimento de Riedel) y a escala regional, de campo. Fossen y Cavalcante (2017) realizan una revisión de las zonas de cizalla, siendo muy ilustrativa la figura 1 de dicho trabajo, donde se representa la similitud de una zona de cizalla microscópica en una arenisca, a escala de unos pocos centímetros, y una zona de cizalla a escala cartográfica de varios centenares de kilómetros. En efecto, las estructuras de cizalla de Riedel pueden observarse en el campo a escalas muy diferentes. Por ejemplo, Katz *et al.* (2004) muestran estructuras de Riedel a escala de muestra de mano (centímetros) y de afloramiento (unos pocos metros) en areniscas jurásicas. Tchalenko (1970) y Tchalenko y Ambraseys (1970) muestran estas estructuras a escala de cientos de metros asociadas a la falla Dasht-e Bayaz en Irán y Davis *et al.* (2000) muestra estas estructuras a escalas desde milímetros en lámina delgada, centímetros en muestra de mano a decenas de kilómetros en la Formación Areniscas Navajo del Jurásico en Utah (Estados Unidos). Muchos más ejemplos pueden encontrarse en la literatura geológica.

El experimento de Riedel clásico ha sido repetido con posterioridad en numerosos trabajos que han ido produciendo información complementaria. De este modo, Tchalenko (1970) demuestra como las zonas de cizalla de Riedel evolucionan como una secuencia de superficies enlazadas. El experimento de Riedel clásico se representa en la figura 1. En la figura 1A se muestra el esquema del dispositivo teórico, mientras que las figuras 1B a 1D muestran el resultado con harina. La figura 1B presenta el dispositivo práctico de placas, la figura 1C muestra la torta de harina sobre el dispositivo anterior antes de comenzar el experimento, mientras que la figura 1D muestra el resultado de la deformación para un desplazamiento relativo de las tablas de 5 mm. La figura 1E presenta otro dispositivo práctico de placas, la figura 1F muestra la torta de talco sobre el dispositivo anterior antes de comenzar el experimento, mientras que la figura 1G muestra el resultado de la deformación para un desplazamiento relativo de las tablas de 5 mm. Por último, la figura 1H muestra el resultado de la deformación para un desplazamiento relativo de las tablas de 35 mm. Los resultados mostrados son en cierto modo decepcionantes con respecto al realce de las familias de fracturas y otras estructuras que se forman. Con objeto de mejorar dicha situación, en este trabajo se introduce una modificación al experimento de Riedel tal y como se describe en la sección siguiente.

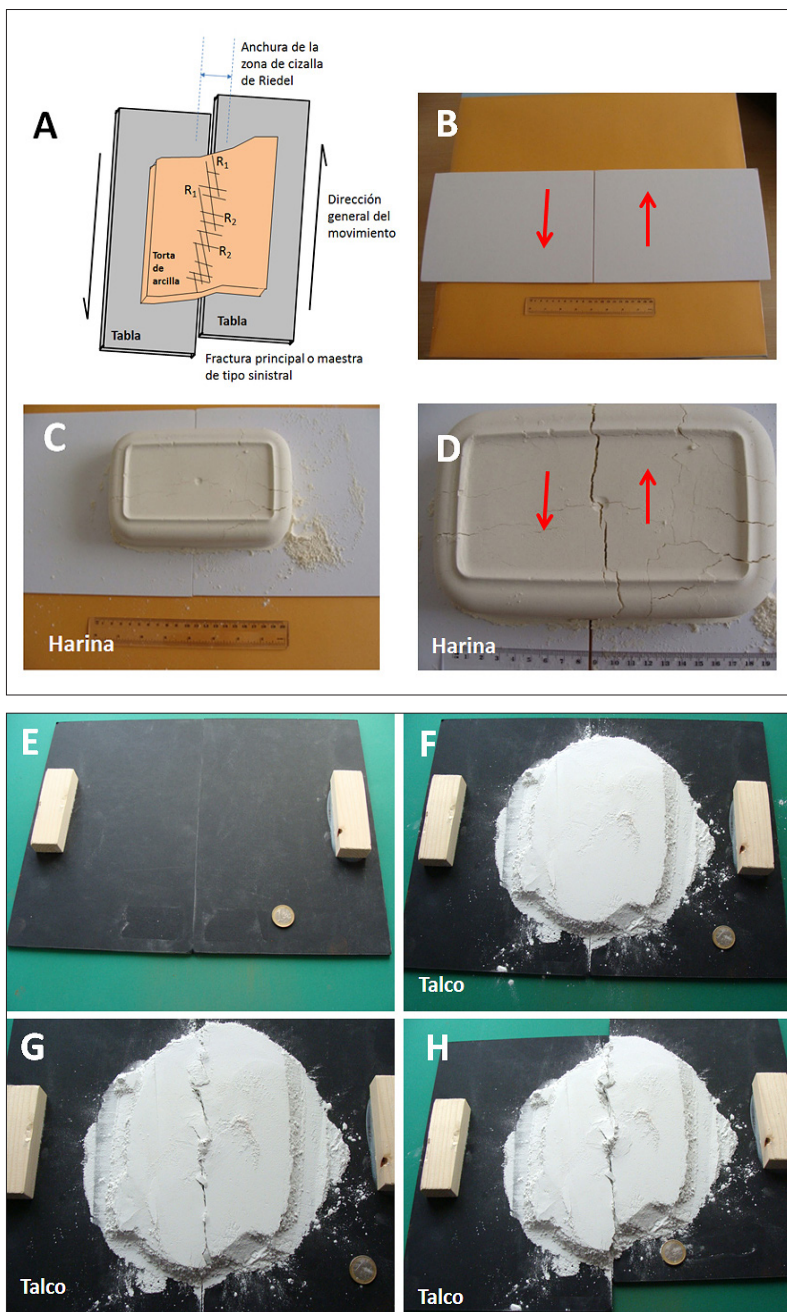


Fig. 1. Experimento de Riedel clásico. A. Esquema teórico. El movimiento relativo de dos placas o tablas, que simulan el zócalo con una falla en dirección, induce en una torta de arcilla, que representa la cobertera de roca sedimentaria que experimenta una deformación frágil, una zona de cizalla con varias familias de fracturas. Las fracturas-R son sintéticas (esto es, tienen un sentido de desplazamiento que coincide con el de la fractura principal o maestra) y forman un ángulo de entre 15 y 20 grados en sentido contrario a las agujas del reloj con la dirección de la falla maestra. Las fracturas-R' son antitéticas (esto es, tienen un sentido de desplazamiento contrario al de la fractura principal o maestra) y forman un ángulo de entre 60 y 70 grados en sentido contrario a las agujas del reloj con la dirección de la falla maestra. La falla principal es sinistral ya que si nos situamos sobre uno de los bloques, el bloque opuesto parece desplazarse hacia la izquierda. B. Experimento práctico con harina. Dos placas o tablas se colocan sobre una superficie horizontal en contacto una con la otra. Estas dos placas pueden representar el basamento fallado. C. Sobre las dos placas se coloca un material granular que representa la cobertera deformable. D. Por el movimiento relativo de ambas placas en la horizontal (falla en dirección) la cobertera se fractura en un sistema de fracturas en escalera ("en échelon"). E. Experimento práctico con talco. F. Sobre las dos placas se coloca un material granular que representa la cobertera deformable. En la foto se ha utilizado talco. D. Por el movimiento relativo de ambas placas en la horizontal (falla en dirección) la cobertera se fractura en un sistema de fracturas en escalera ("en échelon").

UNA MODIFICACIÓN DEL EXPERIMENTO DE RIEDEL

El experimento de Riedel clásico no tiene un confinamiento lateral del material granular que se utiliza como análogo del material rocoso. Se propone introducir dicho confinamiento con el diseño experimental mostrado en la figura 2A. Este diseño experimental es muy simple y económico, por lo que se puede introducir en el aula de modo inmediato. No son precisas más que dos tablas y un listón de madera cortado en bloques y pegados a las tablas tal y como se muestra en la figura 2A para generar el dispositivo mostrado en dicha figura. La figura 2B muestra el dispositivo listo para realizar el experimento. Las tablas aparecen juntas y dejan un recinto cerrado donde se coloca el material granular (talco en la figura 2B) que se comprime utilizando otra tabla, por ejemplo. En la figura se propone un movimiento de tipo sinistral que es el que se seguirá en todos los experimentos realizados. En el movimiento relativo de tipo sinistral, si nos colocamos como observadores en uno de los bloques, comprobaremos como el bloque opuesto se desplaza hacia la izquierda. Como material sedimentario de cobertera se proponen materiales granulares económicos y fáciles de conseguir. En la figura 2 se han representado los seis tipos de materiales probados en los experimentos realizados para la confección de este trabajo: talco (Fig. 2C), esto es polvo fino de un filosilicato, escayola (Fig. 4D) o polvo fino de yeso calcinado, harina (Fig. 4E) o polvo fino de cereal molido, cacao (Fig. 4F), arena fina homométrica (Fig. 4G) y arena heterométrica (Fig. 4H).

Resultados utilizando talco

La figura 3A presenta el resultado del experimento modificado de Riedel utilizando talco y con un desplazamiento relativo sinistral entre las placas de 5 mm. Se observa la aparición de fracturas sintéticas de tipo R (tres de mayor tamaño y otras menores) en relevo y en las zonas de transferencia, así como fuera de ellas, la aparición de un número mayor de fracturas de tipo R'. El talco es un material muy fino y cohesivo que reproduce muy bien la geometría de las deformaciones como respuesta al esfuerzo impuesto como se puede observar en la figura 3B. En esta figura también se observa como se ha generado una familia de fracturas, que actúan como fallas inversas y que son perpendiculares a R. Conforme se incrementa el desplazamiento, de modo que el movimiento relativo de las dos tablas es de 35 mm, se observa como la deformación aumenta y se ponen de manifiesto las bandas de transpresión y transtensión que producen elevaciones y hundimientos del terreno respectivamente (Fig. 3C). La zona de transpresión origina fosas tectónicas (Fig. 4A) (*graben*) y la zona de transtensión origina pilares o macizos tectónicos (Fig. 4B) (*horst*) como se puede ver claramente en el detalle de la figura 3D. Las fosas tectónicas son cuencas oblicuas de separación (*oblique pull-apart basins*). En la naturaleza las zonas de pilares tectónicos sufrirán preferentemente erosión mientras que las fosas tectónicas forman depresiones endorreicas que reciben el aporte de sedimento

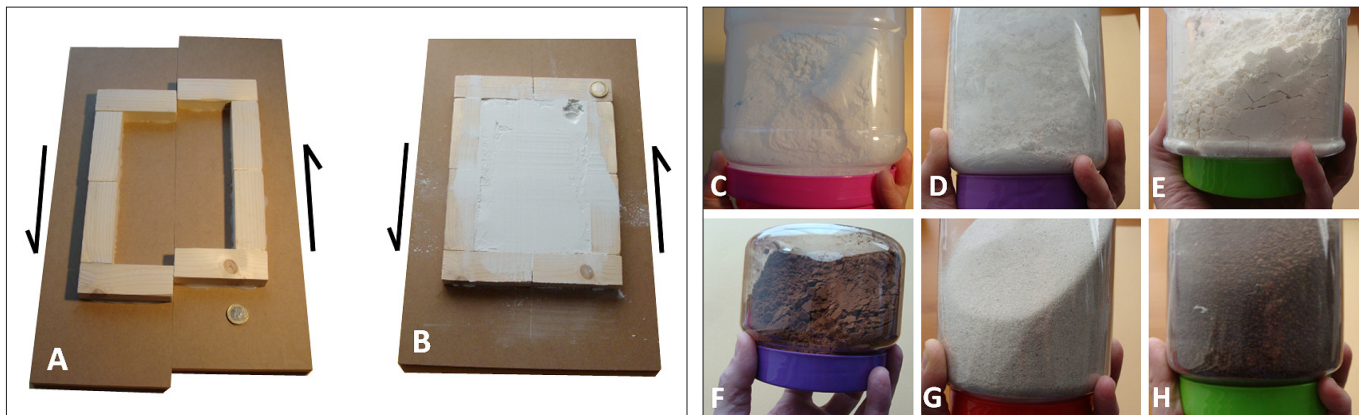


Fig. 2. Experimento de Riedel modificado al introducir el confinamiento lateral del material que representa la cobertera deformable. A. Diseño experimental consistente en dos tablas y 8 piezas de madera de 10 cm de largo obtenidas de un listón. El material se obtiene fácilmente de cualquier tienda de bricolaje. Se pegan 4 trozos de madera a cada tabla de modo que quede el dispositivo en forma de U como se observa en la foto; de modo que al juntar las dos tablas queda un recinto cerrado donde se coloca el material granular que simula la roca. B. Diseño experimental con el material granular (talco en la fotografía) colocado y listo para comenzar el experimento. Con una tercera tabla se ha presionado el material para que quede enrasado y liso, de modo que puedan observarse las estructuras que aparecen al aplicar un esfuerzo de cizalla (movimiento relativo entre ambas tablas en el plano horizontal). La roca sedimentaria de cobertera que se coloca sobre las tablas que simulan el zócalo se simula mediante el uso de un material granular. C. Talco, polvo fino de un filosilicato. D. Escayola, polvo fino de yeso calcinado. E. Harina, polvo fino de cereal molido. F. Polvo de cacao desprovisto de su manteca. G. Arena fina homométrica. H. Arena silícea heterométrica. El talco, la escayola, el cacao y la harina son materiales cohesivos y darán buenos resultados en el experimento de Riedel. La arena puede ser cohesiva si se humedece pero no da buenos resultados en el experimento de Riedel.

y donde la acumulación de agua puede formar lagos, que pueden alcanzar grandes dimensiones, según la escala que se esté tratando.

Puede resultar paradójico que aparezcan bandas de transpresión y transtensión en un experimento de cizalla simple, donde la falla de basamento es en todo momento paralela a la dirección de desplazamiento. Para explicar cómo aparecen estas zonas de transpresión y transtensión se puede recurrir al diseño experimental mostrado en la figura 4C. Se trata de una placa de corcho donde se ha generado una fractura no recta sino curvada (sigmoidea). Cuando se mueven de modo relativo ambas placas se puede observar como en la zona señalada como (a) en la figura 4C se produce una presión oblicua entre las placas y, en efecto, se puede experimentar como las placas de corcho tienden a levantarse. Por otra parte, en la zona señalada como (b) se induce una tensión oblicua o transtensión que tiende a separar ambas placas dando lugar a una fosa tectónica. En la figura 3C se ha señalado esta línea sigmoidea de cizalla mediante una línea blanca de trazos cortos, mientras que la fractura maestra se ha señalado como una línea recta con trazos más largos. En la naturaleza, aunque la falla maestra del basamento sea perfectamente recta, el material de cobertera tiene transiciones laterales de facies, hay discontinuidades previas, cada litología tiene diferente comportamiento reológico; mientras que en el experimento se han generado diferencias espaciales por el diferente grado de compactación del material, que difícilmente será perfectamente uniforme, y las fracturas de cizalla de Riedel que aparecen al comenzar el experimento, y que pueden rotar en el transcurso del mismo. Dichas diferencias introducen anisotropías en el material cuya influencia se pone de manifiesto conforme avanza la deformación.

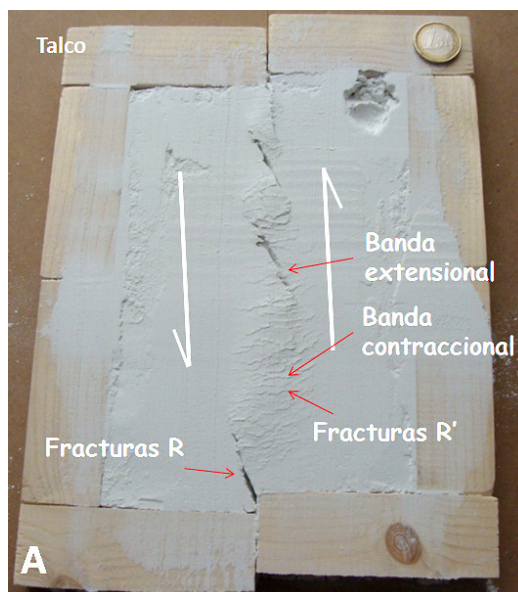
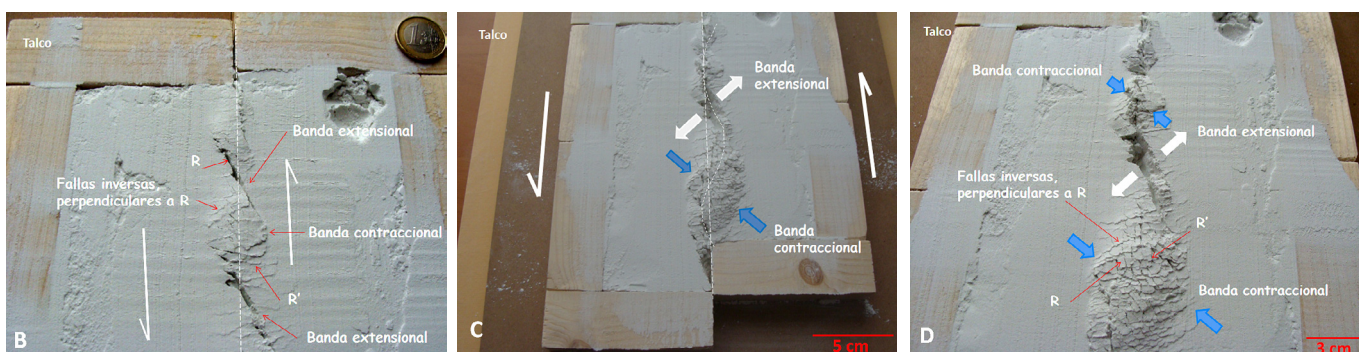


Fig. 3. A. Resultado del experimento modificado de Riedel utilizando talco y con un desplazamiento relativo entre las placas de 5 mm. B. Detalle de A. La línea discontinua marca la discontinuidad de base. C. Resultado del experimento modificado de Riedel utilizando talco y con un desplazamiento relativo entre las placas de 35 mm. La línea recta discontinua marca la discontinuidad de base mientras que el significado de la línea discontinua ondulada se explica en el texto. D. Detalle de C.



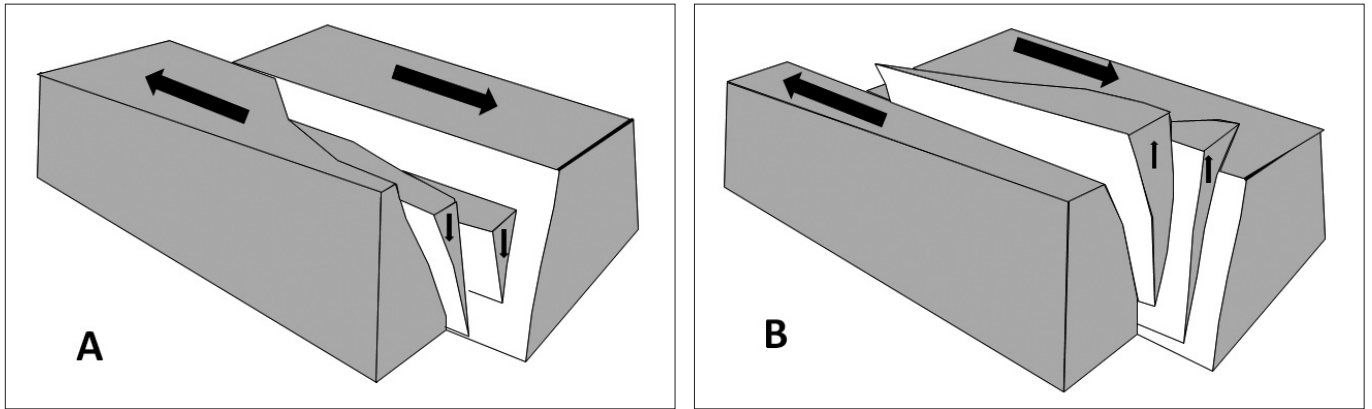
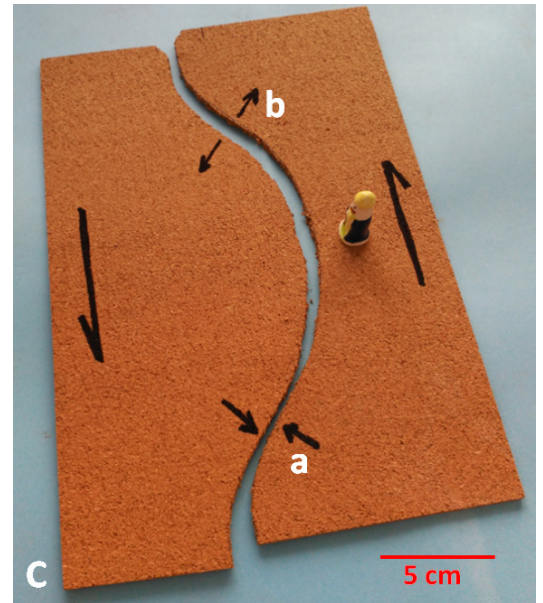


Fig. 4. A. Estructura de flor negativa o formación de un graben o fosa tectónica en una zona de transtensión. B. Estructura en flor positiva o formación de un horst o macizo o pilar tectónico en una zona de transpresión. En la figura, por simplicidad, los planos de falla se han representado rectos y planos, aunque sería más realista dibujarlos de modo más irregular. C. Diseño experimental con una placa de corcho donde se ha practicado una fractura curvilínea de tal modo que al aplicar un esfuerzo de cizalla sinistral se pueden observar la aparición de esfuerzos oblicuos de presión (banda de transpresión) y tensión (zona de transtensión).



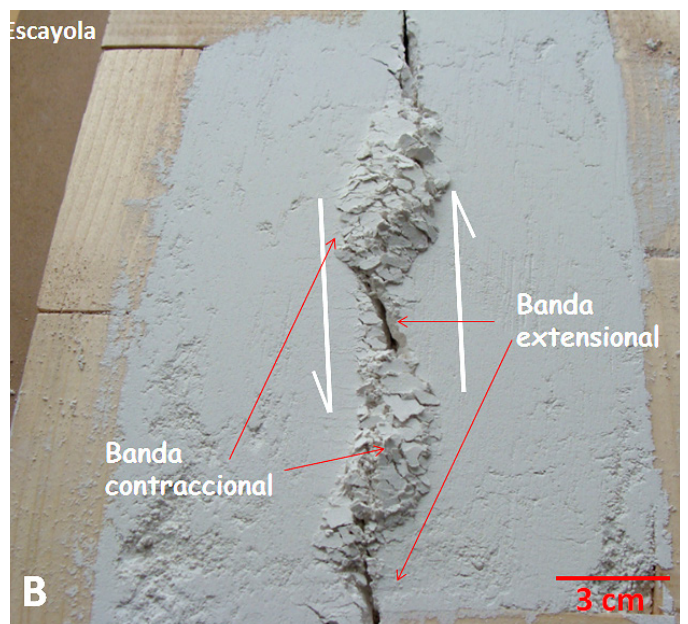
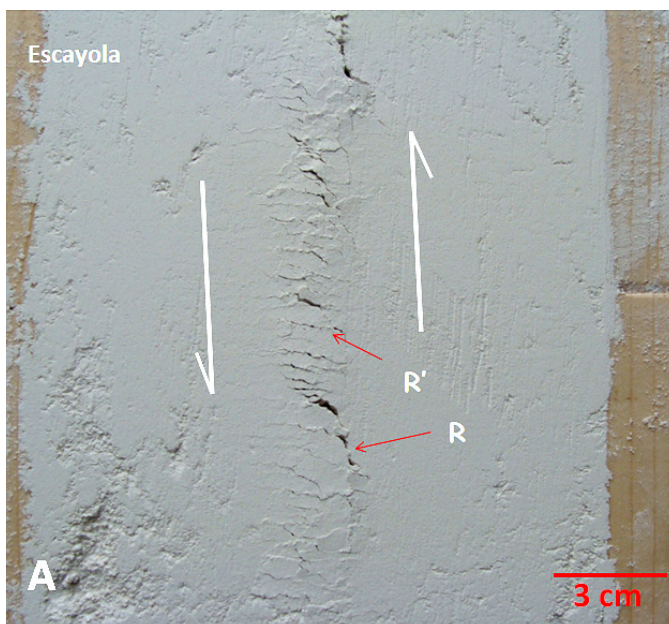
Resultados utilizando escayola

Los resultados del experimento modificado de Riedel utilizando escayola se muestran en la figura 5, para desplazamientos relativos de las tablas de 5 mm (Fig. 5A) y 35 mm (Fig. 5B). Con una deformación pequeña, de 5 mm, se puede observar cómo se han desarrollado mucho más las fracturas de Riedel anti-téticas (R') que fracturas de Riedel sintéticas (R). Ambas fracturas pueden llegar a unirse dando fracturas sigmoidales, como las observadas en el experimento de Riedel clásico de la figura 2D. Para una deformación significativa de 35 mm (Fig. 5B) se observa la aparición de las bandas de presión y tensión con obvios levantamientos del terreno y hundimiento y separación del mismo respectivamente, para ambas zonas de esfuerzos oblicuos. En la zona de transpresión se produce un cuarteamiento del material por la intersección de las fracturas de Riedel R y R'.

Fig. 5. Resultado del experimento modificado de Riedel utilizando escayola. A. Desplazamiento relativo entre las placas de 5 mm. B. Desplazamiento relativo entre las placas de 35 mm.

Resultados utilizando harina

Si el material que se utiliza en el experimento de Riedel es harina (de trigo en los ejemplos mostrados), los resultados son lo que se muestran en la figura 6. En la figura 6A se observa el diseño experimental con la harina dispuesta en la zona confina-



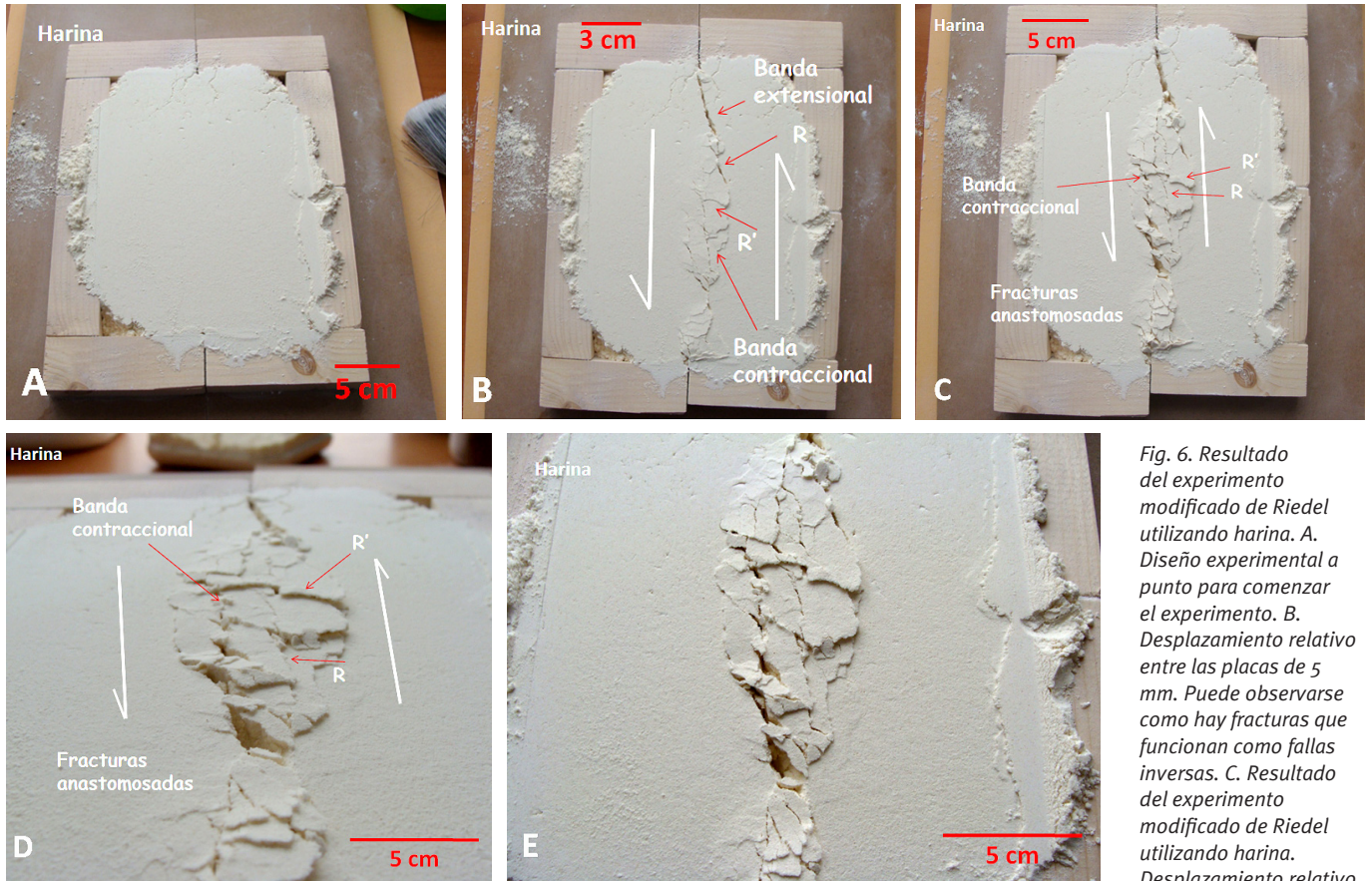


Fig. 6. Resultado del experimento modificado de Riedel utilizando harina. A. Diseño experimental a punto para comenzar el experimento. B. Desplazamiento relativo entre las placas de 5 mm. Puede observarse como hay fracturas que funcionan como fallas inversas. C. Resultado del experimento modificado de Riedel utilizando harina. Desplazamiento relativo entre las placas de 15 mm. Pueden observarse las estructuras "en pez" menores dentro de una estructura "en pez" de mayor escala. Puede observarse como hay fracturas que funcionan como fallas inversas. D. Vista oblicua para destacar el solapamiento de capas por fallas inversas. E. Vista cenital para observar las fracturas anastomosadas y estructuras "en pez". Las figuras D y E son detalles de C.

da, listo para realizar el experimento. En la figura 6B puede observarse como para una deformación pequeña, de desplazamiento relativo entre las tablas de 5 mm, aparecen pocas, pero muy marcadas y distintivas, fracturas de cizalla de Riedel R y R'. Conforme la deformación avanza para un desplazamiento relativo de 15 mm, las fracturas se anastomosan formando una trama cruzada con bordes curvilíneos que dan estructuras rómbicas con bordes suaves sigmoidales, o de tipo "pez". En la figura 6C esa estructura en "pez" coincide con la banda contraccional y puede observarse como dichas estructuras se forman a diversas escalas. Las figuras 6D y 6E muestran una ampliación de la figura 6C, con vista oblicua (Fig. 6D) y cenital (Fig. 6E). En la vista oblicua puede verse la superposición de capas de harina mediante un sistema de fallas inversas formando

una estructura en flor positiva como la mostrada en el esquema de la figura 4B.

Resultados utilizando cacao

La figura 7 muestra los resultados del experimento modificado de Riedel utilizando cacao. En la figura 7A se muestra el diseño experimental. En la figura 7B puede observarse como para una deformación pequeña, de desplazamiento relativo entre las tablas de 5 mm, aparecen pocas, pero muy marcadas y distintivas, fracturas de cizalla de Riedel R y R', que ya forman una alternancia de bandas de transpresión y transtensión. El incremento del desplazamiento de las tablas a 35 mm, realza dichas bandas generando una fosa tectónica muy marcada en la banda de transtensión y se produce un cuarteamiento del material, por intersección de

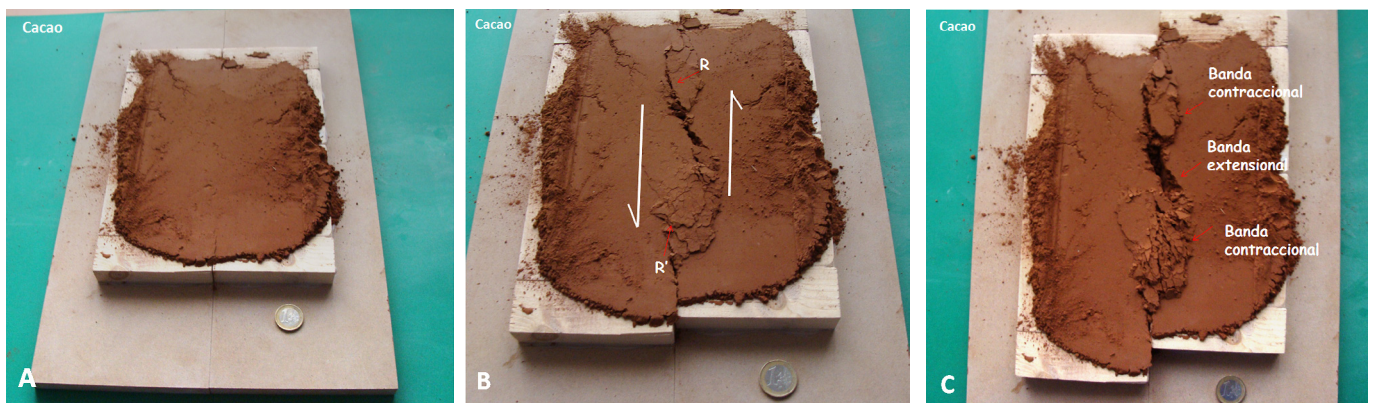


Fig. 7. Resultado del experimento modificado de Riedel utilizando cacao. A. Diseño experimental a punto para comenzar el experimento. B. Resultado con un desplazamiento relativo entre las placas de 5 mm. C. Resultado con un desplazamiento relativo entre las placas de 35 mm.

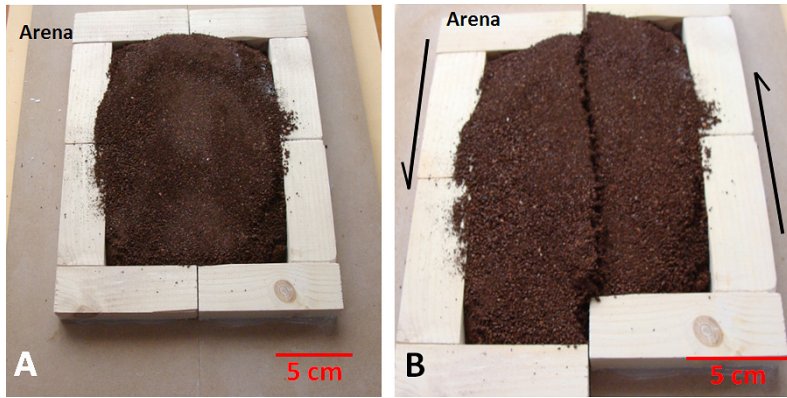


Fig. 8. Resultado del experimento modificado de Riedel utilizando arena silíceo heterométrica ligeramente humedecida. A. Diseño experimental a punto para comenzar el experimento. B. Desplazamiento relativo entre las placas de 30 mm. Sólo se observa la falla maestra o principal.

las familias de fracturas, en las bandas de transpresión.

Resultados utilizando arena

Si se utiliza arena fina homométrica seca no se obtiene ninguna estructura de detalle, aparte de la fractura maestra a lo largo de la dirección de cizalla. Tampoco se obtienen fracturas adicionales a la maestra si se humedece dicha arena. Si se utiliza arena heterométrica (Fig. 8A) seca tampoco se obtienen estructuras reseñables. Incluso cuando se humedece esta arena, que incrementa su cohesión por la presencia de pequeñas fracciones limosas y en menor medida arcillosas, se obtienen los resultados mostrados en la figura 8B donde tampoco se

observan estructuras de menor escala de la zona de cizalla de Riedel. Dichas estructuras no pueden reproducirse por la falta de cohesión del material y por no ser un material lo suficientemente fino.

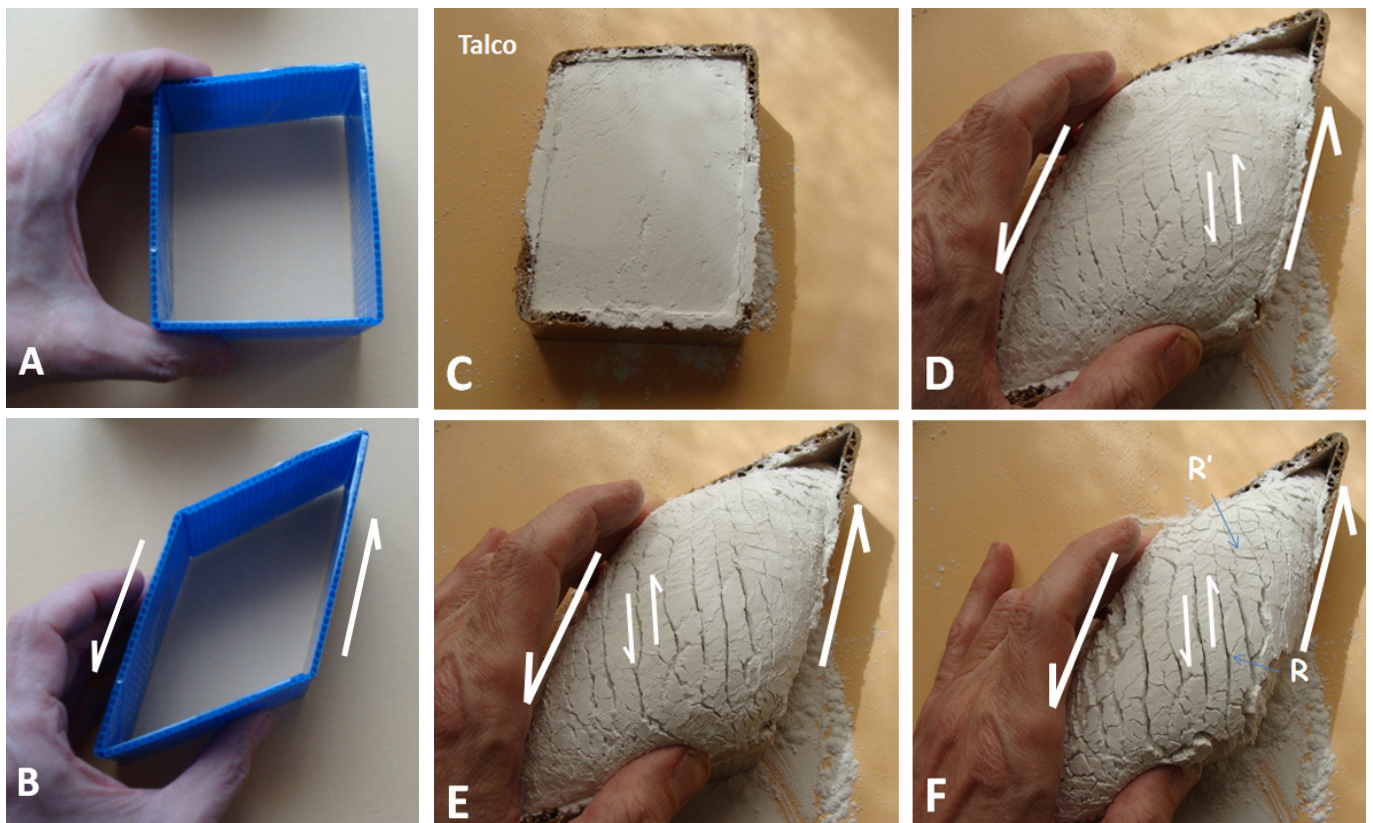
Una variante del experimento de Riedel modificado

Un diseño experimental tan sencillo como un caja de plástico o de cartón, sin tapa y donde se ha quitado el fondo (Fig. 9A) se puede utilizar para reforzar el concepto de esfuerzo de cizalla simple (Fig. 9B) e ilustrar la generación de las fracturas de cizalla de Riedel R y R' como puede verse en las figuras 9C a 9F. En la figura 9C se muestra el dispositivo cargado con el material granular (talco en la figura) listo para comenzar la experiencia. En las figuras 9D, 9E y 9F se puede observar el resultado del experimento en diferentes fases de desarrollo con una secuencia de esfuerzo y deformación crecientes. Es muy claro el desarrollo de las familias conjugadas de fracturas de Riedel R y R' que se intersecan y fragmentan el material en pequeñas formas romboidales.

CONSIDERACIONES FINALES

Las deformaciones de cizalla a todos los tamaños son el tipo de distorsión tectónica más abundante en la litosfera, y entre ellas, las zonas de cizalla horizontal tienen un importante interés práctico (Bokun, 2009). Incluso aunque se trate de una falla simple del basamento, en la cobertera se genera una zona de cizalla que se engloba en el concepto más general de zonas de falla y sistemas de falla (Faulkner *et al.*, 2010).

Fig. 9. A. Un diseño experimental alternativo para el experimento modificado de Riedel con confinamiento lateral del material. B. Deformación en cizalla. C. Dispositivo antes de comenzar el experimento utilizando talco. La deformación progresiva se muestra en D, E y F. Utilizando talco se observa perfectamente la red de fracturas conjugadas de Riedel.



Tchalenko (1970) habla de estructuras de Riedel observadas dentro de una estructura de Riedel a mayor escala (“*Riedel within Riedel structures*”) un claro ejemplo del concepto de autosimilitud (esto es, una parte se parece al todo) y que junto al concepto de invarianza de escala, analizada en este trabajo, son dos características propias de los objetos fractales (Mandelbrot, 1983). En efecto, las redes de fracturas son fractales (Marrett *et al.*, 1999; Roy *et al.*, 2007).

El modelado numérico en ordenador, utilizando ecuaciones diferenciales (Chemenda *et al.*, 2016) que definen los esfuerzos y la deformación, es un complemento a los estudios de laboratorio y campo. Con estas técnicas, un estudio detallado de la morfología de fallas en dirección se tiene en Gamond (1983), Bilham y King (1989) y Wakabayashi (2007). Asimismo, el análisis teórico también ha sido comparado con los resultados de modelos analógicos (Misra *et al.*, 2009).

La elección del material granular que simula la roca y la elección del diseño experimental ejercen una influencia muy grande sobre las estructuras que aparecerán en el modelo analógico (físico) con el que se experimente (Cloos, 1955; Dooley y Schreurs, 2012). Las cuencas sedimentarias de separación (*pull-apart basins*) son depresiones estructurales formadas en zonas de transtensión cuyo origen y evolución se ha estudiado con modelos físicos (Rahe *et al.*, 1998) utilizando diseños experimentales más complejos que el propuesto en el presente trabajo, donde hemos querido mostrar estructuras complejas generadas utilizando un diseño experimental muy simple. En la naturaleza cuando la roca de cobertera es una roca dura sometida a deformación frágil de cizalla, se pueden formar cataclásitas de foliadas a laminadas (Sanz de Galdeano *et al.*, 1985; Swanson, 2006; Balanya *et al.*, 2010). Las estructuras de cizalla de Riedel se pueden producir por terremotos de gran magnitud (Rao *et al.*, 2011). Estos no son sino ejemplos de líneas complementarias que el docente puede utilizar para completar el trabajo propuesto en este artículo.

Las diferentes estructuras que aparecen para los diferentes materiales analizados (talco, escayola, harina, cacao y arena) dependen de la cohesión y del ángulo de fricción interna de los mismos (Abdelmalak *et al.*, 2016). A su vez estas propiedades dependen de otras variables como el tamaño de grano, su rugosidad, la humedad, etc. (Siliveru *et al.*, 2017; Giorgeti *et al.*, 2015). El estudio del efecto de estas propiedades en los resultados del experimento de Riedel está fuera del alcance de este trabajo pero puede ser tratados en el aula, probando diferentes tipos de harina, variando la humedad ambiente, etc. y examinando su efecto sobre las estructuras resultantes en el experimento.

Por último, el experimento descrito en este trabajo puede considerarse como análogo físico de una falla transformante continental. Esta similitud en el contexto de la tectónica de placas impresionará más a los discentes y generará mayor interés de cara a la realización del experimento y su interpretación. La falla transformante del mar Muerto (FTMM) (Weinberger *et al.*, 2009) y la falla transformante de San Andrés (Bilham y King, 1989) son los dos ejemplos

mejor estudiados de fallas transformantes continentales. Ambos casos están asociados a una gran actividad sísmica (Meghraoui, 2015) y la FTMM se aprecia muy bien en modelos digitales del terreno y en Google Earth por su estructura en forma de rift (Smit *et al.*, 2010), aunque no es un rift en el sentido tectónico. El mar Muerto y el mar de Galilea se han formado en fosas tectónicas asociadas a la FTMM mientras que los pliegues de Palmira están asociados a una zona de transpresión asociado a la misma. La FTMM ha sido estudiada en detalle desde la escala microscópica hasta la escala continental en Weber *et al.* (2009). La zona ha experimentado un desplazamiento relativo en la horizontal de unos 100 km y la velocidad media actual de la separación es de unos 5 mm/año (Weber *et al.*, 2009). Todas las figuras para dicha analogía puede encontrarlas el docente en los trabajos mencionados pero no pueden ser reproducirlas en este artículo ya que están sujetas a copyright.

CONCLUSIONES

Los modelos analógicos permiten reproducir, a escala de laboratorio, procesos naturales que suceden en largos periodos de tiempo, esto es, a escala geológica. Dichos modelos han de ser dimensionados, de modo que se disminuyen las dimensiones espaciales y temporales de los procesos geológicos sustituyendo las rocas por materiales seleccionados de manera cuidadosa de acuerdo a sus propiedades (Schellart, 2000; Abdelmalak *et al.*, 2016; Klinkmüller *et al.*, 2016) que están escaladas con las de las rocas naturales y que nos permiten, deformándolos a velocidades mayores, y utilizando esfuerzos menores, generar unos procesos dimensionados respecto al análogo natural. En el presente trabajo no se han dimensionado los materiales sino que se ha priorizado que dichos materiales sean fácilmente accesibles y de coste económico. Mientras que los materiales más utilizados previamente han sido talco, arena silíceo seca, arcilla húmeda (Souza Gomes, 2013), siliconas y gelatinas (Giuseppe *et al.*, 2009), en este trabajo se han introducido escayola, harina y cacao como materiales alternativos. El talco es el material que permite obtener estructuras de mayor detalle mientras que la harina ha permitido generar interesantes estructuras “en pez”.

Los marcadores de deformación (ver p.ej., Liesa *et al.*, 1997) no se han utilizado por la dificultad de su implantación en los materiales utilizados. No obstante, se recomienda su uso, el cual permitiría comprobar realmente la componente de cizalla de las distintas fracturas formadas en los experimentos, dotando de mayor rigor científico a los resultados obtenidos.

Se ha propuesto una modificación del experimento de Riedel donde se introduce el confinamiento lateral del material granular que experimenta la roca sedimentaria de cobertera, que se dispone sobre un basamento que se somete a una deformación de cizalla simple. Se observa muy bien la aparición de fracturas conjugadas de Riedel así como de zonas de transpresión y transtensión, con sus estructuras correspondientes de pilares tectónicos y fosas tectóni-

cas, respectivamente. Ciertamente el efecto del confinamiento puede ser variable en función del tipo de material, pero los resultados aquí mostrados (figuras 3 a 9) mejoran los que se obtuvieron por el experimento de Riedel clásico mostrado en la figura 1.

En conclusión, los modelos físicos analógicos, como el mostrado en el presente trabajo, pueden ser utilizados en el aula, por su extrema sencillez, para introducir importantes conceptos de geología de un modo que puede ser mucho más fácilmente asimilable por el alumno. Además, implicando a los alumnos en su construcción y en el desarrollo del experimento, se conseguirá fomentar su interés, curiosidad y espíritu crítico en la interpretación de los resultados. El experimento propuesto puede ser grabado en video por los alumnos mediante los teléfonos móviles, de tal modo que a posteriori se puede analizar la secuencia de fotogramas para estudiar la nucleación y aparición de estructuras, la rotación de las mismas y la formación de geometrías de las principales formas tectónicas que aparecen en el experimento.

AGRADECIMIENTOS

Quisiera mostrar mi agradecimiento a los dos revisores anónimos cuyos comentarios han contribuido a mejorar, de manera significativa, la versión final de este trabajo.

BIBLIOGRAFÍA

Abdelmalak, M.M., Bulois, C., Mourgues, R., Galland, O., Legland, J.-B. y Gruber, C., (2016). Description of new dry granular materials of variable cohesion and friction coefficient: Implications for laboratory modeling of the brittle crust. *Tectonophysics*, 684, 39–51.

Balanyá, J.C., Expósito, I., Crespo-Blanc, A. y Luján, M. (2010). Zonas de falla y desarrollo de cataclasitas en la Unidad del Aljibe (Complejo del Survo de los Flyschs, Béticas). *Geogaceta*, 48, 191-194.

Bilham, R. y King, G. (1989). The morphology of strike-slip faults: examples from the San Andreas Fault, California. *Journal of Geophysical Research*, 94, 10204-10216.

Bokun, A.N. (2009). Horizontal shear zones: physical modeling of formation and structure. *Physics of Solid Earth*, 45, 69-78.

Chemenda, A.I., Cavalié, O., Vergnolle, M., Bouissou, S. y Delouis, B. (2016). Numerical model of formation of a 3-D strike-slip fault system. *Comptes Rendus Geoscience*, 348, 61-69.

Cloos, E. (1955). Experimental analysis of fractural patterns. *Geological Society of America Bulletin*, 66, 241–256.

Davis, G.H., Bump, A. P., García P.E. y Ahlgren, S.G. (2000). Conjugate Riedel deformation band shear zones. *Journal of Structural Geology*, 22, 169-190.

Di Giuseppe E., Funicello F., Corbi F., Ranalli G., y Mojoli G. (2009). Gelatins as rock analogs: A systematic study of their rheological and physical properties *Tectonophysics*, 473, 391–403.

Dooley, T.P. y Schreurs, G., (2012) Analogue modelling of intraplate strike-slip tectonics: A review and new experimental results. *Tectonophysics*, 574-575, 1-71.

Faulkner, D.R., Jackson, C.A.L., Lunn, R.J., Schlische,

R.W., Shipton, Z.K., Wibberley, C.A. J. y Withjack, M.O. (2010). A review of recent developments concerning the structure, mechanics and fluid flow properties of fault zones. *Journal of Structural Geology*, 32, 1557-1575.

Fossen, H. y Cavalcante, G.C. G. (2017). *Seam zones – A review*. *Earth-Science Reviews*, 171, 434-455.

Frisch, W., Meschede, M. y Blakey, R. (2011). *Plate Tectonics. Continental Drift and Mountain Building*. Springer-Verlag, Berlin, 212 p.

Gamond, J.F. (1983). Displacement features associated with fault zones: a comparison between observed examples and experimental models. *Journal of Structural Geology*, 5, 33–45.

Giorgetti, C., Carpenter, B.M. y Collettini, C. (2015). Frictional behavior of talc-calcite mixtures. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 120, 6614–6633.

Katz, Y., Weinberger, R. y Aydın, A. (2004). Geometry and kinematic evolution of Riedel shear structures, Capitol Reef National Park, Utah. *Journal of Structural Geology*, 26, 491-501.

Klinkmüller M., Schreurs G., Rosenau M. y Kemnitz, H. (2016). Properties of granular analogue model materials: A community wide survey. *Tectonophysics*, 684, 23-38.

Liesa, C.L., Román, T., Arlegui, L.E., Cortés, A.L. y Gil, A. (1997). El uso de modelos experimentales en la enseñanza de la Geología Estructural (II): aplicación a la deformación discontinua. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 5-3, 226-234.

Mandelbrot, B.B. (1983). *The fractal geometry of nature*. W.H. Freeman, San Francisco.

Marrett, R., Ortega, O.J. y Kelsey, C.M. (1999). Extent of power-law scaling for natural fractures in rock. *Geology*, 27, 799–802.

Meghraoui, M. (2015). Paleoseismic history of the Dead Sea fault zone. *Encyclopedia of Earthquake Engineering*, Springer-Verlag, Berlin, 20 p.

Misra, S., Mandal, N. y Chakraborty, C. (2009) Formation of Riedel shear fractures in granular materials: Findings from analogue shear experiments and theoretical analysis. *Tectonophysics*, 471, 253-259.

Morgenstern, N.R. y Tchalenko, J.S. (1967). Microscopic structures in kaolin subjected to direct shear. *Geotechnique*, 17, 309-328.

Rahe, B., Ferrill, D.A. y Morris, A.P. (1998). Physical analog modeling of pull-apart basin evolution. *Tectonophysics*, 285, 21-40.

Rao, G., Lin, A., Yan, B., Jia, D., Wu, X. y Ren, Z. (2011). Co-seismic Riedel shear structures produced by the 2010 Mw 6.9 Yushu earthquake, central Tibetan Plateau, China. *Tectonophysics*, 507, 86-94.

Riedel, W. (1929). Zur Mechanik geologischer Brucherscheinungen. *Zentralblatt für Mineralogie, Geologie, und Paläontologie B*, 354-368.

Roy, A., Perfect, E., Dunne, W.M. y McKay, L.D. (2007). Fractal characterization of fracture networks: An improved box-counting technique. *Journal of Geophysical Research*, 112, B12201, 1-9.

Sanz de Galdeano, C., Rodríguez-Fernández, J. y López-Garrido, A.C. (1985). A strike-slip fault corridor withing the Alpujarra Mountains (Betic Cordilleras, Spain). *Geologische Rundschau*, 74/3, 641-655.

Schellart, W.P. (2000). Shear test results for cohesion and friction coefficients for different granular materials: scaling implications for their usage in analogue modelling. *Tectonophysics*, 324, 1–16.

Smit, S., Brun, J.-P., Cloetingh, S. y Ben-Avraham, Z. (2010). The rift-like structure and asymmetry of the Dead

Sea Fault. *Earth and Planetary Science Letters*, 290, 74-82.

Souza Gomes, C.J., (2013). Investigating new materials in the context of analog-physical models. *Journal of Structural Geology*, 46, 158-166.

Silveru, K., Ambrose, R.P.K. y Vadlani, P.V. (2017). Significance of composition and particle size on the shear flow properties of wheat flour. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 97, 2300-2306.

Swanson, M.T. (2006). Late Paleozoic strike-slip faults and related vein arrays of Cape Elizabeth, Maine. *Journal of Structural Geology*, 28, 456-473.

Tchalenko, J.S. (1970). Similarities between shear-zones of different magnitudes. *Geological Society of America Bulletin*, 81, 1625-1640.

Tchalenko, J.S. y Ambraseys, N.N. (1970). Structural analysis of the Dasht-eBayaz (Iran) earthquake fractures. *Geological Society of America Bulletin*, 81, 41-60.

Wakabayashi, J. (2007). Stepovers that migrate with respect to affected deposits: field characteristics and speculation on some details of their evolution. En: *Cunningham, y Mann, P. (Eds.) Tectonics of Strike-Slip Restraining and Releasing Bends. Geological Society, London, Special Publications*, 290, 169-188.

Weber, M., Abu-Ayyash, K., Abueladas, A., et al. (otros 57 autores) (2009). Anatomy of the Dead Sea transform from lithospheric to microscopic scale. *Reviews of Geophysics*, 47, RG2002, 1-44.

Weinberger, R., Gross, M.R. y Sneh, A. (2009). Evolving deformation along a transform plate boundary: Example from the Dead Sea Fault in northern Israel. *Tectonics*, 28, TC5005, 1-19. ■

Este artículo fue recibido el día 6 de noviembre de 2018 y aceptado definitivamente para su publicación el 10 de enero de 2019.