

EXPERIMENTACIÓN ANALÓGICA SOBRE EL DESARROLLO DE UN DIAPIRO Y LA DEFORMACIÓN PRODUCIDA EN LAS ROCAS ENCAJANTES

Experimental tectonics about the diapiric phenomena and associated tectonic structures on the country rocks

Paulo Emanuel Fonseca (*/**), Luisa Pinto Ribeiro (**), Ricardo Caranova (**) y Patrícia Filipe (**)

RESUMEN

En este artículo se pretende mostrar como la tectónica experimental permite simular fenómenos geológicos, contribuyendo a una relación mayor entre profesores y alumnos en asuntos relativos a la geología y despertando el interés de los estudiantes por las Ciencias de la Tierra. El fenómeno de diapirismo, aquí simulado, es relativamente frecuente en la naturaleza, y puede observarse en varias localidades de Portugal. Como ejemplos tenemos el diapiro magmático de Sintra y los diapiros salinos del Algarve y del borde W del "Macizo Calcário Estremeño" (Valle Tifónico de Caldas da Rainha). La realización de este experimento permite observar el fenómeno desde las fases iniciales, con la formación del cuerpo diapírico, y el desarrollo progresivo de estructuras en las rocas encajantes que caracterizan este proceso. Pondremos especial atención en la observación de este tipo de estructuras, discutiendo además el proceso de intrusión, la preparación del experimento y los materiales utilizados. Esta actividad fue realizada en LATTEX (Laboratório de Tectonofísica e Tectónica Experimental), Unidad de Investigación de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Lisboa, y pretende informar a los profesores de geología, para que puedan, con sus alumnos, preparar estas experiencias en las clases.

ABSTRACT

The purpose of this paper is to show how experimental tectonics could simulate geological phenomena's and so how this kind of work, involving students and teachers, could contribute to the motivation of the younger for the Earth Sciences. The diapiric phenomena, simulated in this work, are frequent in nature and it could be observed in several places, as in Sintra (magmatic diapirism) where an igneous intrusion occurs, in Algarve and in the West border of the Maciço Calcário Estremenho (Caldas da Rainha thifonic valley). The last cases related to salt diapiric phenomena. The aim of the experiments is to observe the phenomena since the initial stages with the formation of the diapiric body and the generation of the tectonic structures associated on the country rocks, very characteristic of this kind of mechanism. The ductile and fragile structures are the main observation targets as the discussion of the entire process and preparation and the materials used in the experiment. This simulation was performed in LATTEX (Laboratório de Tectonofísica e Tectónica Experimental), an Investigation Unit of the Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, that have as one of the main goals prepare and trained the future Geologic teachers in this kind of experimental activities.

Palabras clave: Tectónica experimental, materiales analógicos, fenómenos diapíricos, fallas normales e inversas, pliegues.

Keywords: Experimental tectonics, analogic materials, diapiric phenomena, normal and reverse faults, folding.

1. INTRODUCCIÓN

En Geología y en particular en la Tectónica/ Geodinámica interna, existen en la naturaleza fenómenos que todos los alumnos, desde la ense-

ñanza básica hasta la universidad, tienen dificultad en visualizar y comprender. Uno de los más complejos es, sin duda, la instalación en niveles estratigráficos superiores (por intrusión) de cuerpos, sean estos magmáticos o salinos que en las

* LATTEX-Labo. Tectonofísica e Tectónica Experimental e Depart. de Geologia, FCUL, Ed. C2, 5º Piso, Campo Grande, 1749-016 Lisboa, Portugal; e-mail: gpetfons@fc.ul.pt

**Depart. de Geologia, FCUL, Ed. C2, 5º Piso, Campo Grande, 1700 Lisboa, Portugal

situaciones más simples rompen los estratos sedimentarios. Con los experimentos que se describen a continuación, acompañados de explicaciones sencillas y didácticas, se contribuye a una mejor visualización de los fenómenos de diapirismo.

La modelización experimental aquí presentada tiene como destinatarios a los alumnos de ESO y Bachillerato de las asignaturas de Ciencias Naturales. Se pretende que los alumnos adquieran conocimientos básicos sobre las intrusiones de cuerpos en estratos sedimentarios no deformados, su aspecto durante la intrusión, la forma como ésta se realiza y las deformaciones producidas por plegamiento y fracturación.

Se aconseja que este trabajo vaya acompañado de salidas de campo anteriores y posteriores a su realización. Antes, para que los alumnos observen los ejemplos naturales que van a simular en el laboratorio o la clase. Después, para que puedan cuestionar los métodos utilizados durante el experimento, observar algunos detalles que puedan tener lugar durante la simulación y su explicación final en el campo.

Para este trabajo, realizado en los alrededores de Lisboa, se utilizó como ejemplo natural el Macizo de Sintra, que es, según algunos autores (Kullberg 1987; Leal 1990), un diapiro magmático. En otras regiones se pueden utilizar no sólo ejemplos de diapirismo magmático, sino también de diapirismo salino.

Los autores ya han sido previamente confrontados con los resultados de este trabajo, una vez que estas experiencias han sido realizadas durante varios años lectivos por alumnos de Secundaria y también por alumnos universitarios (futuros profesores), siendo los resultados obtenidos extremadamente positivos.

Los primeros trabajos sobre modelación experimental en Portugal, fueron realizados por George Zbyszewski en 1947. Este geólogo, recientemente fallecido y a quien los autores quieren rendir homenaje, desarrolló muchos trabajos en el ámbito de la Geología Estructural y de la Tectónica. Además, fue pionero en la simulación de mecanismos de halocinesis y diapirismo salino, utilizando como ejemplo natural el Valle Tifónico de Caldas da Rainha (Zbyszewski 1947).

2. OBJETIVOS

Es muy frecuente que en muchos centros escolares no exista material pedagógico y didáctico de apoyo a los trabajos prácticos de Geología y en general de las Geociencias. En otros casos, existe material muy sofisticado que, en nuestra opinión, es demasiado complejo para alcanzar los objetivos pretendidos por los programas escolares. Se deberá tener en cuenta que los mejores trabajos prácticos, posibles de desarrollar, deberán estar

acompañados por salidas de campo, visitas de estudio a zonas previamente seleccionadas y cuidadosamente escogidas para estos objetivos. Hay que recordar siempre la máxima: - Naturaleza – el Laboratorio Vivo. Pensamos que la mejor táctica en las clases prácticas es, después de transmitir los conocimientos básicos sobre fenómenos simples que ocurren en nuestro planeta, intentar hacer su modelización de una forma simple e intuitiva para los alumnos. Mientras las piezas y modelos vendidos por empresas especializadas son extremadamente caros y complejos, y no llegan a cumplir los objetivos deseados, ni nos muestran la realidad que nos rodea, pequeñas y simples experiencias, como la que vamos a describir pueden ser realizadas con éxito. Los materiales a utilizar son baratos, de fácil utilización y pueden ser encontrados con facilidad. Así, se pueden utilizar materiales tales como arenas, anilina, pegamentos líquidos, transparencias, cámaras de aire (de moto o bicicleta), globos, cartón, papel de periódico y, finalmente, cajas de acrílico transparente previamente montadas para el experimento, que pueden ser sustituidas por un acuario de pequeñas dimensiones que no esté a uso.

El principal objetivo de este trabajo es la realización de una experiencia didáctica, e inculcar en los alumnos y profesores el espíritu crítico y creativo. A esta experiencia se encuentran asociados no sólo conceptos simples sino también conceptos más complejos como:

- a) el concepto de *escala* y de material analógico,
- b) los conceptos de intrusión magmática o de diapirismo salino (en el caso de sedimentos salinos), y de edad relativa de las estructuras,
- c) conceptos como el de las causas actuales (o actualismo) y de superposición, dado que la modelación se realiza bajo estratos sedimentarios superpuestos e inicialmente horizontales, constituyendo una secuencia sedimentaria (los estratos más antiguos están más abajo y los más recientes en la zona superior de la secuencia)
- d) finalmente el concepto de intersección, que nos indica que las intrusiones y las fallas son más recientes que las rocas a las que están afectando.

Se pretende también con este trabajo una mayor compenetración profesor/alumno, el incentivo al trabajo en grupo o en equipo y, finalmente, y lo más importante, empezar a conocer a nivel experimental, con el manejo de materiales simples y baratos (como las arenas de colores) utilizados en la realización de la experiencia, la simulación de casos reales de la naturaleza.

En el caso natural que se pretende modelizar con esta experiencia –El Macizo Eruptivo de Sintra– la mayoría de las dudas que los alumnos tienen están relacionadas con la formación de algunas de las estructuras circundantes, como la formación del pliegue sinclinal anular circundante

y eje arqueado (Alves 1964; Reis 1987; Ribeiro *et al.* 1990). Estas estructuras se sitúan en las proximidades de este macizo y se encuentran bien expuestas en las zonas de Praia Grande y Guincho. Algunas dudas que surgieron en las salidas de campo estaban relacionadas con la formación de pliegues con flancos invertidos en las estructuras más próximas del macizo granítico. La formación y/o la transición de estos flancos invertidos a accidentes tectónicos cabalgantes son también dudas frecuentes (Kullberg 1985; Ribeiro *et al.* 1990).

Hay que recordar, en adición, que esta experiencia permite visualizar, modelar y representar, en la caja de cristal o acrílico (donde se realiza la simulación), a la escala deseada, un proceso de deformación, a varias profundidades de la corteza continental. Como consecuencia, el nivel que se observa en la naturaleza (es decir, en el campo) es un nivel erosivo inferior a los que están representados en la caja, o sea, a una profundidad dada de la superficie del experimento.

Finalmente, es importante resaltar que, aunque el experimento sea reproducible con resultados semejantes, existen siempre pequeñas diferencias. Estas diferencias, como veremos más adelante, están relacionadas con:

1. El espesor inicial de los diferentes estratos,
2. La localización intra-estrato de los niveles guía,
3. La velocidad con que se llena el globo y los respectivos reajustes entre el globo y los estratos sedimentarios,
4. La posición del globo, más próximo o más alejado de la esquina de la caja o del acuario.

Estas pequeñas diferencias deben de ser utilizadas por el profesor para resaltar el hecho que, al igual que sucede en el modelo analógico, en la naturaleza pueden existir diferencias atribuibles a fenómenos semejantes (comparación de escalas). Por ejemplo, diferentes velocidades de intrusión puede originar pliegues (deformación lenta o fallas deformación rápida).

3. DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL UTILIZADO

Para la realización del experimento se utiliza una caja de material acrílico transparente con 19, 20 y 17 cm de longitud, anchura y altura, respectivamente. Se pueden utilizar otras dimensiones, dependiendo de la observación y de la escala pretendida. De esta forma el tamaño de la caja varía de acuerdo con la cantidad de material (arena y polvos) disponibles para la ejecución de esta experiencia y del tamaño del modelo que se pretende representar. Opcionalmente se puede también utilizar una pequeña bomba de acuario y un tubo de plástico de entre 1,5 y 2 metros de largo (Fig.1).

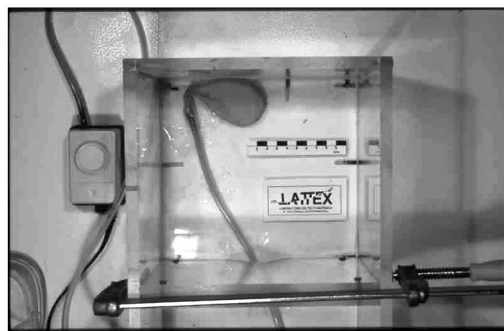


Fig. 1 – Material utilizado para la preparación del experimento: un acuario o caja de material acrílico, un globo, un tubo de plástico de acuario, cinta adhesiva y una bomba de acuario (opcional). Para una mejor observación de las estructuras y por economía de material (arena y polvos), se recomienda que el tamaño de la caja no sea muy grande.

Para representar el ascenso del cuerpo diapírico fué utilizado un pequeño globo hinchable, que simula la intrusión del material natural (granito o sal).

Las arenas blancas, las arenas coloreadas, el polvo de cemento y de hematita son los materiales utilizados para simular el comportamiento de las rocas encajantes (country rocks) del diapiro. Los polvos con colores más fuertes (aunque en el experimento se utilizaron polvos de cemento y hematita, también pueden utilizarse polvos culinarios, tales como azafrán, pimentón, chocolate, canela y caril) son utilizados como marcadores o niveles guía, de las estructuras que se van formando durante la realización del experimento. La elección de estos materiales está relacionada con sus propiedades reológicas que, a grandes rasgos son semejantes a las que existen en la corteza superficial, donde predomina un comportamiento frágil de las rocas (rocas competentes). Como es de esperar las estructuras desarrolladas son más espectaculares en las rocas sedimentarias encajantes, tanto en el ejemplo natural como en sus equivalentes analógicos.

4. DESCRIPCIÓN DE LOS EXPERIMENTOS

Para realizar el experimento se colocó en el fondo de la caja de material acrílico un globo conectado cuidadosamente a la bomba de aire (bomba de acuario) con ayuda de cinta adhesiva. Si queremos realizar una repetición del experimento se puede optar por soplar directamente el globo, que fue el criterio utilizado. Para una mejor observación de las estructuras se colocó el globo muy próximo a uno de los vértices de la caja, con el fin de poder observar en dos secciones perpendiculares el desarrollo continuo de las mismas durante la ascensión del diapiro. En el fondo de la caja y sobre el globo se colocó un estrato de silicona (PDMS-SGM36, fabricado por Dow Corning) de aproximadamente 7 mm de espesor. La utilización de este material es

opcional y sirve exclusivamente para que el levantamiento producido por la ascensión del cuerpo diátrico sea continua y dé lugar a un levantamiento uniforme de los estratos suprayacentes. No obstante, la eliminación de este nivel exige: i) la utilización de arena muy seca y desagregada; ii) situar el globo muy próximo al vértice de la caja.

Sobre la silicona se colocan estratos consecutivos de arena, intercalados con finos estratos de polvo de hematita y cemento (Fig. 2). Los estratos se distribuyen por toda la caja, poniendo especial cuidado en que estén bien formados en los bordes de la caja, donde serán utilizados como nivel guía.



Fig. 2 – La arena y el polvo se disponen formando estratos con ayuda de una cuchara, procurando que éstos sean regulares. Para ello se puede extender el material con la ayuda de una regla o cartón.

Después de la colocación de todos los estratos de arena y polvo, el modelo final presenta un espesor de, aproximadamente, 6 a 8 cm (Fig. 3 a 8). De este modo, los niveles de arena situados más abajo tendrán características más plásticas (dúctiles), mientras que los niveles guía de grano más fino serán los potenciales generadores de fallas (estructuras frágiles).

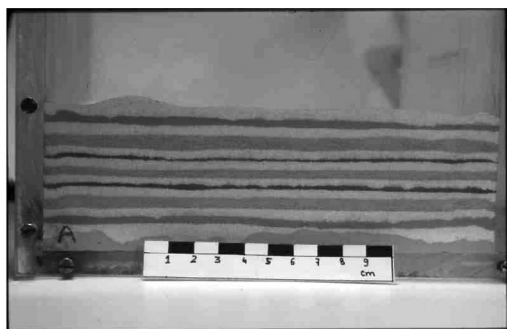


Fig. 3 – Los estratos de material más grueso no deben exceder los 2 centímetros. Los estratos finos de marcadores cinemáticos (polvo de cemento, azafrán y caril) no deben exceder los 2 milímetros. Los estratos deberán tener el aspecto más homogéneo y continuo posible. Imagen de la posición inicial, antes del inicio de la experiencia.

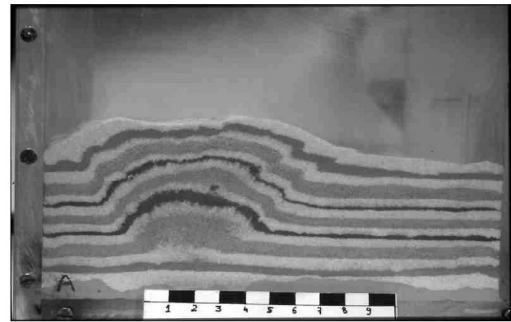


Fig. 4 – Primeros incrementos de aire en el globo. Desarrollo de pequeñas estructuras cabalgantes en la periferia de la zona de interferencia del globo. Simultáneamente tiene lugar el desarrollo de fallas normales (estructuras en graben), en la parte más elevada de la estructura como resultado del inicio del empuje (plegamiento de gran amplitud). Al continuar el hinchado del globo, las estructuras anteriores aumentan sus radios de curvatura, con el consiguiente aumento de la magnitud de los pliegues. De igual modo aumenta el desplazamiento a lo largo de las “fallas”, desarrolladas anteriormente. Nótese que los marcadores cinemáticos (polvos más finos) son extremadamente importantes en la cuantificación del movimiento, de la deformación y desarrollo de las estructuras frágiles (fallas).

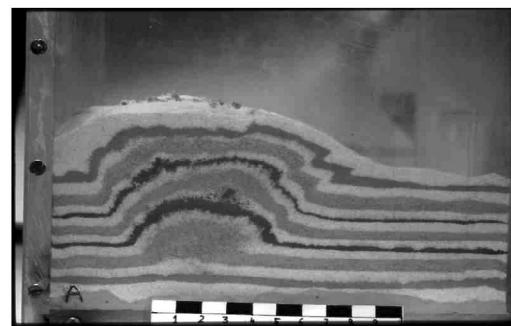


Fig. 5 – Continuando con el hinchado del globo por medio del tubo de plástico, se desarrollan cabalgamientos de alto y bajo ángulo en diversas zonas, dependiendo de la proximidad de la zona de empuje.

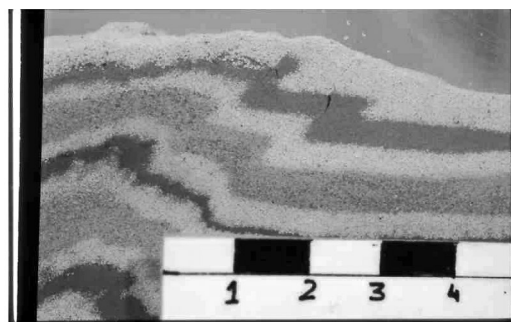


Fig. 6 – Detalle de la fotografía anterior mostrando los cabalgamientos de bajo ángulo, que se formarán en la zona más elevada de la estructura. Se observan también pliegues con engrosamiento de charnela y pliegues con el flanco inverso laminado por accidentes posteriores.



Fig. 7 – Vista superior del modelo. El empuje del “diapiro” (en la fase final) da lugar a una estructura circular en forma de domo. Debido a esta estructura los estratos superficiales se deslizan hacia las zonas más deprimidas. También se observa como los estratos más antiguos irrumpen en los más recientes.

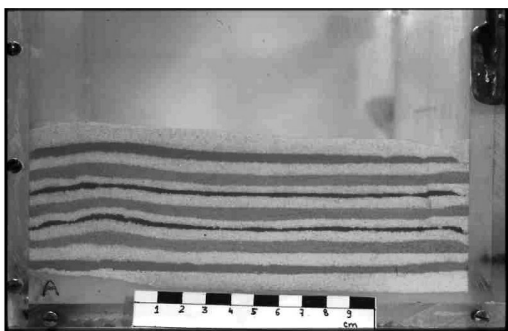


Fig. 8 – Esta figura y las siguientes muestran el segundo grupo de experimentos realizados, considerando las dos superficies de la caja (sup. A y B). Inicio de la experiencia con los estratos continuos y horizontales.

El número de estratos de arena y polvo de hematita y cemento no es fijo, pudiendo el modelo final presentar un número mayor o menor de estratos. Sin embargo, debe destacarse que un mayor número de estratos de arena y consecuentemente de polvos, permite una mejor observación de las estructuras resultantes de la ascensión del cuerpo diapírico. De la misma forma las modificaciones y variaciones de espesor producen variaciones en la deformación.

Después del montaje del modelo descrito anteriormente se comienza a inflar el globo de modo lento y continuo, observándose la evolución del experimento.

5. RESULTADOS OBTENIDOS Y DESCRIPCION DEL EXPERIMENTO PASO A PASO

En este trabajo se han realizado dos experimentos diferentes. Las anotaciones e imágenes

aquí expuestas están relacionadas con la existencia de estratos de espesor variable y con diferentes velocidades de llenado del globo .

En el estado inicial, los estratos están subhorizontales (Fig. 3 y 8). Durante los primeros impulsos ascensionales del diapiro, tiene lugar un desplazamiento de los estratos (Fig. 8 y 9) directamente sobre el globo, seguido por la la formación de pliegues de gran amplitud (Fig. 4). Con la continuación del proceso tiene lugar el desarrollo de estructuras frágiles discretas (concretas), tales como fallas normales e inversas (Fig. 5). Las fallas normales están relacionadas con la zona central del diapiro y las inversas se forman en la perifería (Fig. 6). Así mismo, las fallas inversas se desarrollan preferentemente formando sistemas de fallas paralelas entre si (Figs. 5-7, 10 y 11).

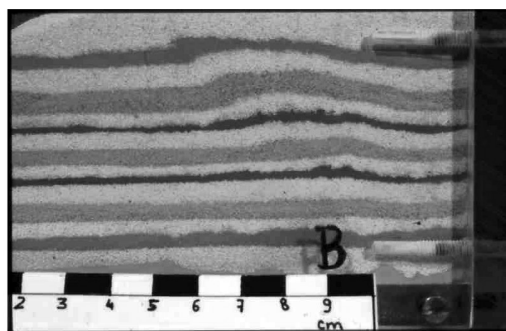


Fig. 9 – Superficie de observación B – Inicio de la deformación. Desarrollo de las primeras estructuras propias de deformación frágil, precursoras de la formación de la fallas posteriores. Desarrollo de un semi-horst, debido al comienzo del empuje hacia arriba. Las fallas desarrolladas en la zona inferior de la secuencia se propagan hacia la zona más elevada de los estratos.

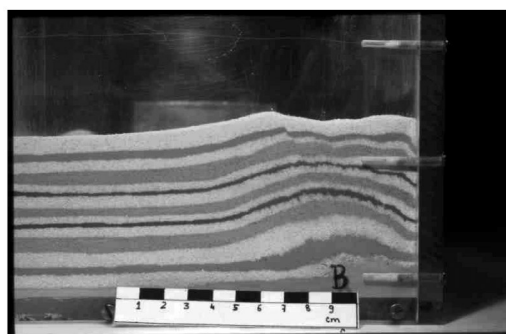


Fig. 10 – Continuación de la deformación, debida al empuje de la estructura. Nótese que mientras en la parte inferior de la caja dominan los pliegues, en la superior los estratos presentan fallas normales e inversas. Ésta es una oportunidad para introducir el concepto de piso estructural.

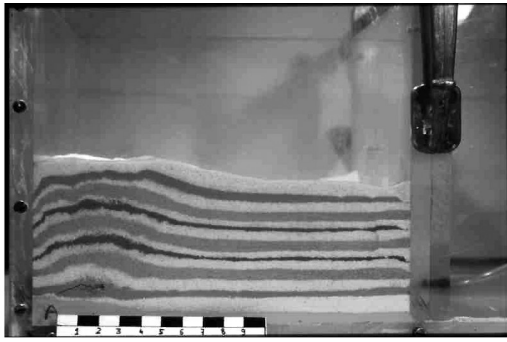


Fig. 11 – Se observa el desarrollo de pliegues con un elevado radio de curvatura en las proximidades de la intrusión y la fracturación y fallamiento en los estratos formados por polvos más finos (= estratos más resistentes). Se observa todavía el engrosamiento de algunos niveles de arenas en las secuencias sedimentarias inferiores.

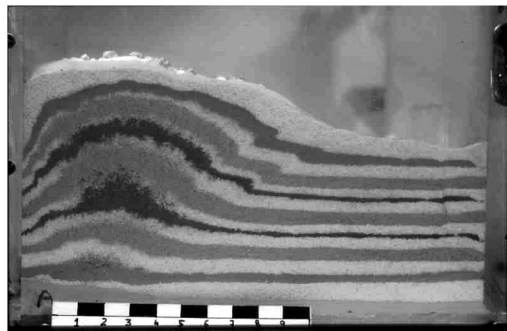


Fig. 12 – Es importante que la escala esté siempre presente para que se puedan obtener conclusiones para los trabajos de campo que se realizarán posteriormente a la fase experimental. Las dimensiones de los pliegues y problemas de escala deben ser discutidos con los alumnos. Una vez más se observan pliegues en las zonas más profundas y fallas en las zonas más superficiales del modelo.

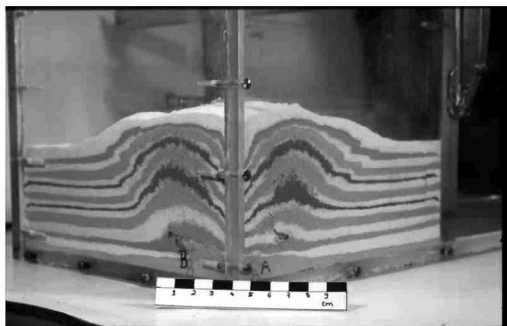


Fig. 13 – Aspecto de la experiencia observándose dos dimensiones en el espacio, secciones A y B. Vista tridimensional del módulo.

Durante la deformación progresiva de las rocas encajantes puede tener lugar la rotación de bloques a lo largo de los planos de falla, así como el desarrollo de estructuras más complejas, del tipo *horst* y *graben*, hacia el techo de la secuencia ascendente.

Debe destacarse que algunas de las fallas presentan pliegues asociados que pueden ser utilizados como ‘criterios cinemáticos’ para deducir su movimiento (ver, por ejemplo, Fig. 14). Las fallas se propagan hacia los estratos más superficiales, presentando en éstos un desplazamiento menor. Durante el proceso diapírico los estratos de la periferia del domo sufren un aumento de espesor, desarrollándose varias series de pliegues en profundidad (Figs. 12–15).

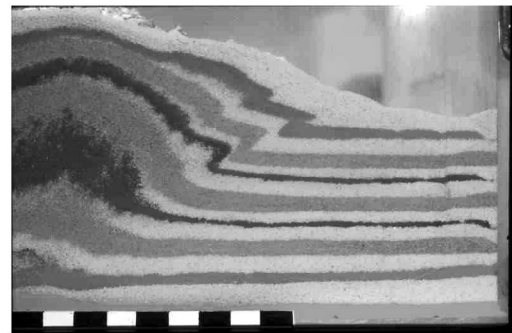


Fig. 14 – Detalle de la fase final de la experiencia con la formación de pliegues con numerosos flancos inversos, completamente laminados y transformados en cabalgamientos de bajo ángulo. También se observan engrosamientos de charnelas e incluso de algunos estratos.

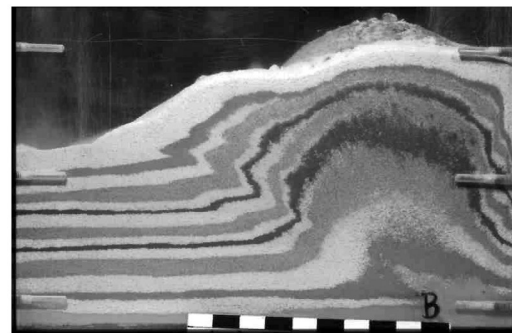


Fig. 15 – En la fase final de la experiencia se observa la irrupción final del globo en superficie a través de toda la secuencia ‘sedimentaria’ intensamente deformada.

Durante el experimento debe observarse cuidadosamente el desarrollo de los pliegues asociados a las fallas (para su utilización como ‘criterios cinemáticos’) y el desplazamiento de los estratos a un lado y otro del plano de falla. Debe destacarse

que las estructuras observadas en este modelo analógico son semejantes a las que los propios alumnos pueden encontrar en el campo.

De esta forma, consideramos que la tectónica experimental es una herramienta importante para comprender la formación de estructuras geológicas.

6. CONCLUSIONES

La realización de experimentos del tipo del aquí propuesto permite una participación activa de los estudiantes, surgiendo numerosas cuestiones a medida que el experimento progresa. Además, es importante que estos experimentos estén precedidos por la observación directa en el campo de estructuras desarrolladas en condiciones naturales. Los geólogos saben que en la gran mayoría de los casos los problemas surgen en el campo, donde se encuentran también las respuestas, pero pasando muchas veces por procesos de laboratorio y/o analíticos más o menos complejos. Consideramos que después de la realización del experimento y de la comprensión de todos sus aspectos, una nueva visita de campo a las localidades iniciales debe permitir una mejor valoración del significado de las estructuras, quedando ahora los alumnos preparados para poder responder a muchas de las preguntas que inicialmente tendrían una difícil explicación. De este modo y con materiales muy simples, se obtiene una fácil visualización, alcanzando buenos resultados y estimulando a los alumnos en la comprensión de las Ciencias de la Tierra. Además, experiencias de este tipo sustituyen con gran ventaja los modelos estáticos de pliegues y fallas, que son caros y difíciles de comprender.

AGRADECIMENTOS

Los autores desean agradecer la colaboración Patrícia Marta, Rui Rosado y Sérgio Santos, alumnos de la asignatura de Metodología de la Geología. Nuestros agradecimientos a Alberto Marcos por la revisión crítica y cuidada del manuscrito.

7. - BIBLIOGRAFIA

- Alves, C. A. M. (1964). Estudo Petrológico do Maciço de Sintra. *Rev. Fac. Ciênc. Univ. Lisboa*. 2ª Série, CV 12 (2), pp. 123-289.
- Kullberg, M. C. (1985). Controlo estrutural na instalação do Maciço de Sintra. *Boletim Soc. Geol. de Portugal*, XXIV, pp. 219-223.
- Kullberg, M. C. (1987). Emplacement mechanism for Sintra Diapir. *Int. Conference on Plate Tectonics and Deformation*, Oviedo, Spain, p. 86.
- Leal, N. (1990). O Maciço Eruptivo de Sintra. Novos dados de natureza petrográfica e geoquímica. Mst. Sc. Thesis, FCUL, 49 p..
- Reis, M. J. E. (1987). Estudos estruturais da Pedreira de Maria Dias (Algueirão-Sintra), B. Sc. Thesis, FCUL, 114 p..
- Ribeiro, A.; Kullberg, M. C.; Kullberg, J. C.; Mannuppella, G. y Phipps, S. (1990). A review of Alpine Tectonics in Portugal: Foreland detachment in basement and cover rocks. *Tectonophysics*, 184, pp. 357-366.
- Zbyszewski, G (1947). Éssai d'étude expérimentale sur les phénomènes "Tiphoniques". *Public. da Sociedade Geológica de Portugal, Anais da Fac. Cienc. da Univ. do Porto* vol. XXXI, Fasc. IV, pp. 5-59. ■