

# **APLICAÇÃO DE MODELOS ANALÓGICOS EM REGIME FRÁGIL NO DOMÍNIO DA GEOLOGIA APLICADA: EXPERIÊNCIAS RECORRENDO A CAIXA DE DEFORMAÇÃO DE AREIAS**

## **USING ANALOGICAL BRITTLE MODELING EXPERIMENTS ON APPLIED GEOLOGY: EXPERIMENTS WITH THE DEFORMATION SAND BOX**

Fonseca, Paulo E., *Dep. de Geologia (LATTEX), FCUL, Lisboa, Portugal, petfons@fc.ul.pt*  
Caranova, Ricardo, *LATTEX, FCUL, Lisboa, Portugal*  
Pinto Ribeiro, Luisa, *LATTEX, FCUL, Lisboa, Portugal*  
Chaminé, Helder I., *Dep. de Engenharia Geotécnica, ISEP, Porto; e CMIA, Aveiro, Portugal*  
Almeida, Pedro Gabriel, *Dep. de Engenharia Civil, UBI, Covilhã, Portugal*  
Espinha Marques, Jorge, *Dep. de Geologia (CGUP), FCUP, Porto, Portugal*  
Afonso, Maria José C., *Dep. de Engenharia Geotécnica, ISEP, Porto; e CMIA, Aveiro, Portugal*  
Gomes, Alberto, *Dep. de Geografia (GEDES), FLUP, Porto, Portugal*  
Teixeira, José, *Dep. de Geociências (CMIA), UA, Aveiro, Portugal*  
Araújo, Maria Assunção, *Dep. de Geografia (GEDES), FLUP, Porto, Portugal*  
Marques, José Manuel, *Dep. de Engenharia de Minas (LAMPIS), IST, Lisboa, Portugal*  
Pinto de Jesus, Ary, *Dep. de Geologia (CGUP), FCUP, Porto, Portugal*  
Gama Pereira, L. C., *Dep. de Ciências da Terra (GMSG), FCTUC, Coimbra, Portugal*  
Rocha, Fernando T., *Dep. de Geociências (CMIA), UA, Aveiro, Portugal*  
Carvalho, José Martins, *Dep. de Geociências, UE, Évora; e CGUP, Porto, Portugal*  
Sodré Borges, Frederico, *Dep. de Geologia (CGUP), FCUP, Porto, Portugal*

### **RESUMO**

O presente trabalho descreve uma actividade experimental tendo como objecto de estudo de problemas geológicos reais em maciços fracturados sujeitos a acções tectónicas. Para o efeito, foi realizada uma série de experiências, em laboratório, com o intuito de apresentar as potencialidades do desenvolvimento de modelos analógicos no ensino da geologia aplicada. O modelo analógico utilizado é uma ferramenta de grande utilidade didáctica pois, para além do seu fácil manuseamento, permitiu uma observação global dos fenómenos geológicos em estudo.

### **ABSTRACT**

The paper describes an experimental activity in order to study real geological problems in fractured rock masses under the influence of tectonic movements. A set of laboratory experiments was carried out in order to present the advantages of the use of analogic models in applied geology teaching. This model provides useful educational tools due, not only to their easy use, but mainly to the possibility of understanding of large scale geological phenomena.

### **1. INTRODUÇÃO**

Em Geociências, a realização de experiências laboratoriais que permitam conhecer melhor — e explicar — processos físicos intervenientes na litosfera, passa pela elaboração de modelos analógicos, ou seja, na redução da dimensão real, que corresponderá, necessariamente, a uma redução temporal (Prost [1]). As primeiras experiências centraram-se em de procedimentos de realização simples e de baixo custo através das quais era possível simular fenómenos

geológicos. Contudo, convém não esquecer outros pressupostos igualmente importantes fundamentais para a construção de modelos, tais como, os factores da dimensão e da escala de representação.

Na aplicação de modelos analógicos a um regime frágil e distensivo para a geologia aplicada devem ser tidos certos cuidados na execução, observação e análise dadas as limitações intrínsecas dos processos de experimentação analógica. Entre essas limitações, há a destacar a humidade do ar, a força e a velocidade aplicada na placa móvel e a espessura das camadas. É, do mesmo modo, extremamente importante que, antes e durante a experiência, os problemas de escala sejam analisados e discutidos, tendo como ponto de comparação a realidade natural a simular. No entanto, chama-se a atenção para o facto de, na natureza, com frequência, os factores de auto-semelhança serem comuns. Por exemplo, dobras e/ou falhas à escala meso- e macroscópica, podem ocorrer inseridas em estruturas semelhantes, mas à escala regional.

Foi realizada uma série de experiências no Laboratório de Tectonofísica e Tectónica Experimental (LATTEX), com o intuito de apresentar as potencialidades do desenvolvimento de modelos analógicos (simples e complexos) em contextos geológicos aplicados. Foram utilizados materiais (e.g., areia e pó) que apresentam comportamentos reológicos susceptíveis de reproduzir as estruturas observadas na natureza. Deve ter-se em linha de conta que as dimensões e os padrões de resistência dos materiais analógicos seleccionados devem reproduzir e mimetizar, tanto quanto possível, as relações reais e, por esse motivo, serem susceptíveis de poderem criar-se modelos conceptuais à escala.

## 2. PROTOCOLO DA EXPERIÊNCIA

Para efectuar a experiência é necessária uma caixa de acrílico transparente e rectangular. O material a utilizar deve constar de placas de acrílico transparente (*plexiglass*, figura 1). A caixa é constituída por: i) 3 placas, de 1,5cm de espessura, com as seguintes dimensões: 90 x 15 cm; ii) 2 placas em “L” com 12x8cm, e 15x8cm; iii) membrana de borracha (câmara de ar de bicicleta ou de motorizada), com, pelo menos, 75x15cm; iv) materiais diversos (areia de praia, fita adesiva transparente, x-acto, colher ou espátula, pincel, parafusos, chave de fendas e berbequim).

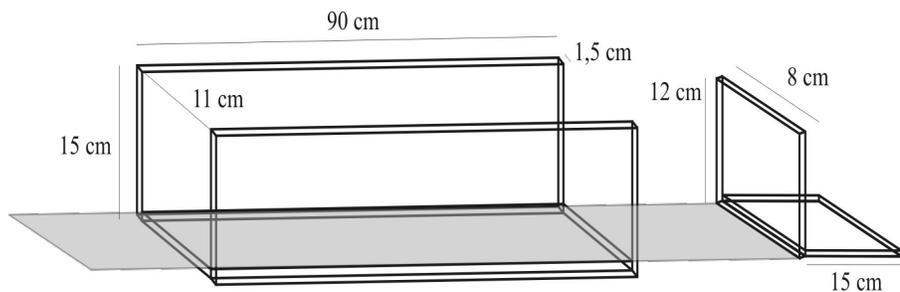


Figura 1 – Esquema de construção e dimensões da caixa de acrílico transparente.

As dimensões referidas anteriormente podem variar de acordo com a quantidade de material utilizado e/ou com o aspecto das estruturas que se pretende mostrar. Estas dimensões da caixa condicionam, igualmente, a quantidade de estruturas que se formam, bem como o seu pormenor; o comprimento é o factor que mais influencia o resultado final. As paredes laterais

móveis são formadas por duas placas montadas em forma de “L” que se ajustam à caixa principal e permitem realizar a distensão.

No fundo da caixa (figura 2A) é colocada uma faixa rectangular de material elástico de borracha. Esta membrana deve preencher o fundo da caixa e estar ligada às paredes laterais “L” de forma a transmitir adequadamente as tensões ao modelo durante a experiência. A largura da faixa da membrana deve ser igual à largura do fundo da caixa de forma a que este fique completamente coberto.

As areias utilizadas podem ser areias de praia e deverão ser de granulometria fina; alternativamente, pode-se adquirir areia embalada (figura 2B). Para aumentar a coerência da areia dever-se-á adicionar pó de gesso (ou de cimento, ou de hematite), permitindo, assim, que os grãos se movimentem em conjunto e não individualmente. Esta mistura pode conter entre 10 e 20% de pó. A utilização de marcadores entre os leitos de areia serve para uma melhor visualização das estruturas formadas e da respectiva cinemática. Estes marcadores são formados por finos leitos de pós coloridos de natureza diversa (de gesso, de cimento, de chocolate, de caril, de colorau, de canela, etc.).

Para a montagem da experiência, começa-se por prender firmemente a faixa da membrana de borracha às paredes móveis de forma a que, quando for exercida a tensão, não se desprenda das paredes. Depois de unida a faixa da membrana de borracha às placas, coloca-se o conjunto no fundo da caixa tendo o cuidado de verificar se está perfeitamente ajustado.

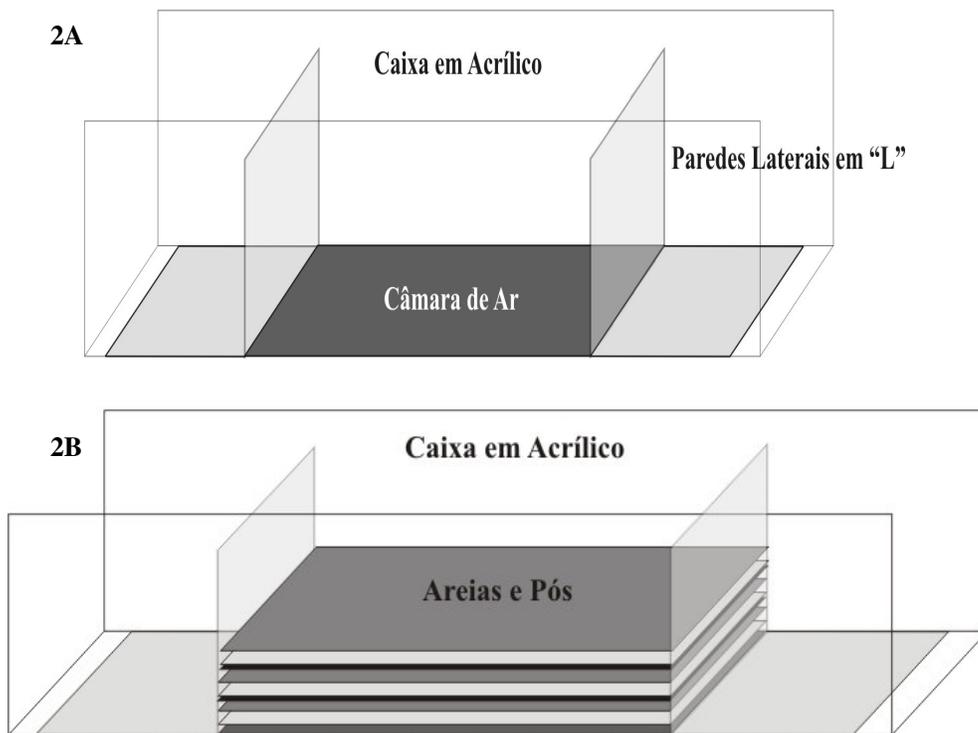


Figura 2 – Esquemas da caixa de deformação de areias, na fase preparatória da experiência.

Durante a montagem da experiência é necessário fixar as paredes móveis à caixa principal com grampos, de forma que não ocorram movimentos laterais. Após a fixação da membrana de borracha coloca-se a primeira camada de areia que deverá ter, aproximadamente, 1cm de espessura. As camadas de areia seguintes deverão ter 0,5cm de espessura. Entre cada leito de areia deverá colocar-se um fino leito de pó colorido (que será utilizado como marcador cinemático), cuja espessura não deverá exceder 0,2cm. Para tornar a experiência mais simples, bastará colocar os leitos de pó junto ao bordo da caixa onde se irá observar a experiência.

Para que os leitos, quer da areia quer do pó, se mantenham planos e de espessura constante, é necessário alisar a respectiva superfície, evitando assim irregularidades durante a montagem do modelo.

Poderão ser realizadas outras experiências com o mesmo dispositivo, mas com finalidades específicas. Por exemplo, poderá partir-se do estágio final da experiência descrita e, em regime compressivo, reactivar as falhas que passarão a funcionar como falhas inversas ou cavalgantes. De uma forma muito sintética e em resultado da deformação provocada pela extensão (distensão) dos topos móveis da caixa, as areias e os marcadores, começam a evidenciar a geração de discontinuidades. Estes planos de ruptura tornam-se mais evidentes através dos deslocamentos impressos nos níveis guia (de coloração mais marcante) e que nos mostram o valor relativo da movimentação de uns blocos em relação aos blocos vizinhos, valor este que aumenta à medida que os bordos da caixa se vão afastando.

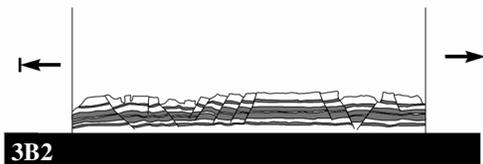
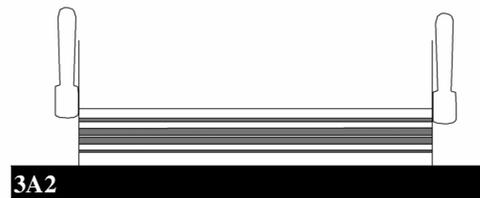
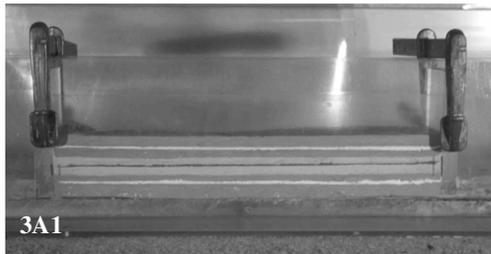


Figura 3 – (3A1, 3A2) Foto e esquema representativo do estágio inicial da experiência de distensão, com sobreposição de leitos de areia (leitos mais espessos) e de pó (leitos mais finos). Os leitos de pó servem como marcadores cinemáticos; (3B1, 3B2) Foto e respectivo esquema do estágio final da experiência. A formação de planos de discontinuidades, representando falhas normais, podem, no seu conjunto, delimitar blocos menos ou mais abatidos, originando, respectivamente, “horsts” e “grabens”.

### **3. INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS: CONSIDERAÇÕES SOBRE UM MODELO NATURAL**

A compartimentação morfoestrutural do Maciço Hespérico, já em tempos mais ou menos recentes (Alpinos) é interpretada, essencialmente, como uma sucessão de falhas regionais profundas (lítricas) que, em regime distensivo, delimitam e desenham sectores com alinhamentos morfoestruturais que constituem “horsts” (blocos tectonicamente elevados) e “grabens” (blocos deprimidos). É possível observar esta compartimentação, por exemplo, na região do Maciço Central e bordaduras (Serra da Estrela, Cova da Beira e Bacia do Vouga). A tectónica distensiva e a arquitectura intrínseca das falhas geradas, particularmente em regime normal, é de grande importância em estudos de geotecnia e geofísica (Hoek [2]) e de hidrogeologia e de geotermia (Fetter [3]). Os estudos de natureza ambiental associados, quer à pesquisa e captação de recursos hídricos, hidrominerais e geotérmicos, quer à monitorização e estudo de percolação de águas associadas a aterros sanitários, não são indiferentes a aplicações de índole mais científica, directamente correlacionáveis com a formação e a compartimentação de maciços rochosos por falhas normais desenvolvidas em regime distensivo.

A análise dinâmica, em geotectónica, baseia-se na interpretação macroscópica da deformação e da mecânica a que os materiais estão ou estiveram sujeitos e que dão ou deram origem às estruturas geológicas (Ramsay e Huber [4,5]; Davis e Reynolds [6]). Para que estas análises tenham significado têm, forçosamente, de retratar e explicar em pormenor, as características físicas e geométricas das estruturas geológicas presentes (McClay e Scott [7], McClay et al. [8]). Assim, estas estruturas resultam dos movimentos das partículas (cinemática) e das relações (dinâmica) dos materiais geológicos (Ramsay e Huber [4]).

A rede de descontinuidades, particularmente as falhas (geradas em regime de distensão-extensão) à escala do maciço rochoso, representa estruturas planares preferenciais. Estas superfícies de anisotropia (incluindo zonas de cisalhamento que representam o seu prolongamento em profundidade) funcionam como importantes “canais” de circulação de paleofluidos em meios rochosos fissurados (Ingebritsen e Sanford [9]). Além disso, são potenciais zonas de recarga e/ou ascensão de fluidos de sistemas hidrominerais e geotérmicos, dos grandes aquíferos a nível crustal e, também, de circulação de fluidos mantélicos (Ingebritsen e Sanford [9]). Estas estruturas são por isso as que, em contacto com a atmosfera e a biosfera, canalizam para a profundidade as águas meteóricas de infiltração directa ou que apresentem uma forte componente de escoamento superficial.

### **4. CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Em suma, as descontinuidades geradas em regime de distensão-extensão são superfícies de grande importância, que devem ser compreendidas e analisadas, mas que, pela sua dimensão regional e pela complexidade dos fenómenos envolvidos, são dificilmente integradas num modelo unificador. Os modelos analógicos podem prestar um grande contributo para os estudos físico-naturais, ao nível da compartimentação de meios fissurados.

O padrão geral da experiência apresentada neste trabalho evidencia uma sucessão extensa de estruturas de ruptura, comparáveis a falhas normais, de geometria de tipo lítrico, i.e., as falhas não se apresentam como superfícies planas, mas sim, como superfícies curvas com a concavidade voltada para cima. A sucessão destes planos de descontinuidade (que, analogamente, representam “falhas”) sugere uma sucessão de blocos que representam “horsts” e “grabens”. A experiência simula, de modo simples e didáctico, ao nível do ensino médio/superior (universitário, politécnico e secundário), uma situação geológica real, por exemplo, observável num perfil com orientação média NW–SE (figura 4), desde a região da

bacia do rio Vouga (Aveiro) até à região de Castelo Branco–Idanha-a-Nova, atravessando em diagonal o limite ocidental do Maciço Central da Serra da Estrela (Ribeiro [10], Sequeira et al. [11]).

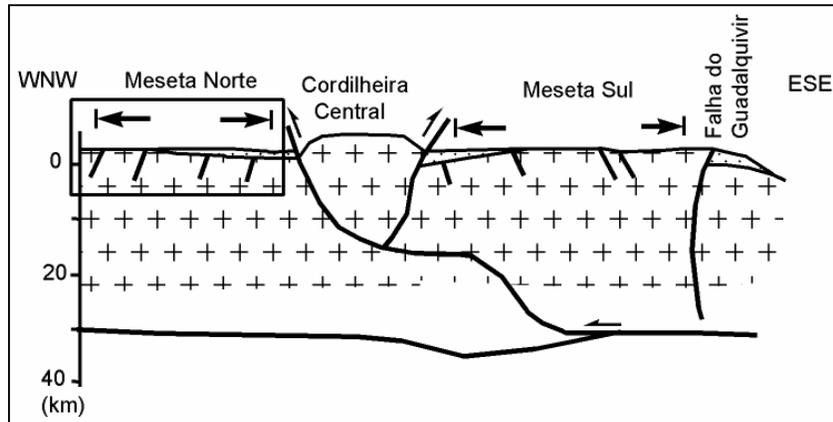


Figura 4 – Esquema da reactivação Alpina do substrato Varisco Ibérico (adaptado de Ribeiro [10]): perfil interpretativo, destacando a zona distensiva da Meseta Norte, cuja estrutura se pretende apresentar com fins didácticos.

## AGRADECIMENTOS

Este estudo recebeu apoio parcial do projecto MODELIB/FCT (POCTI/35630/CTA/2000-FEDER).

## REFERÊNCIAS

- [1] Prost, A. La Terre: 50 expériences pour découvrir notre planète, Éditions Belin, Paris. (1999), 127 pp.
- [2] Hoek, E., Practical rock engineering, RocScience: Hoek's Corner, (2000), 313 pp.
- [3] Fetter, C. W., Applied hydrogeology, 3<sup>rd</sup> Edition, Prentice Hall, New Jersey, (1994), 691 pp.
- [4] Ramsay, J. R. e Huber, M. I., The techniques of modern structural geology. Vol 1: Strain analysis, Academic Press Limited, London, (1983), 307 pp.
- [5] Ramsay, J. R. e Huber, M. I., The techniques of modern structural geology. Vol 2: Folds and fractures, Academic Press Limited, London, (1987), 700 pp.
- [6] Davis, G. H. e Reynolds, S. J., Structural Geology of rocks and regions, John Wiley & Sons, Inc., (1996), 776 pp.
- [7] McClay, K. R. e Scott, A. D., Experimental models of hangingwall deformation in ramp-flat listric extensional fault systems. Tectonophysics, vol. 188, ( 1991), pp. 85-96.
- [8] McClay, K. R., Waltham, D. A., Scott, A. D. e Abousetta, A., Physical and seismic modelling of listric normal fault geometries. The geometry of normal faults. Geological Society of London Special Publication, vol. 56, (1991), pp. 231-239.
- [9] Ingebritsen, S. e Sanford, W. E., Groundwater in geologic processes, Cambridge University Press, (1998), 341 pp.
- [10] Ribeiro, A. A tectónica Alpina em Portugal. Geonovas, Lisboa, 10, (1988), pp. 9-11.
- [11] Sequeira, A. J. D., Cunha, P. P. e Sousa, M. B., Reactivação compressiva de falhas na região de Lousã–Caramulo (Portugal Central), a partir de finais do Cenozóico. Actas e Comunicações do XIV Reunião de Geologia do Oeste Peninsular, Vila Real, (1997), pp. 225-230.