

“

MODELAÇÃO DE SISTEMAS GEOLOGICOS

Homenagem ao Professor Doutor Manuel Maria Godinho

”

L.J.P.F. NEVES, A.J.S.C. PEREIRA,
C.S.R. GOMES, L.C.G. PEREIRA,
A.O. TAVARES

IMPRESA DA UNIVERSIDADE DE COIMBRA
COIMBRA UNIVERSITY PRESS

MODELAÇÃO DE SISTEMAS GEOLÓGICOS

Homenagem ao Professor Manuel Maria Godinho

Modelação análoga de um episódio da Geologia de Portugal

Edite Bolacha¹; Helena Moita de Deus¹; Rui Dias^{3,4}; Paulo Fonseca^{1,2}

¹LabGExp- Laboratório de Geologia Experimental do Centro de Geologia da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, PORTUGAL; ebolacha@fc.ul.pt, hagmdd@gmail.com

²Departamento de Geologia da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, PORTUGAL, pefonseca@fc.ul.pt

³Departamento de Geociências e Laboratório de Investigação de Rochas Industriais e Ornamentais da Universidade de Évora, PORTUGAL.

⁴Centro de Geofísica de Évora, PORTUGAL, rdias@uevora.pt.

Palavras-chave: Modelação análoga, Geologia de Portugal, Zona Sul Portuguesa, Ensino da geologia

Resumo

A relação entre o que se observa no campo e o que se tenta reconstituir através da modelação análoga é uma tarefa antiga na construção do conhecimento geológico, que foi sendo aperfeiçoada desde há dois séculos até hoje. Por esta, e outras razões que apontamos, ela revela-se também importante como estratégia e metodologia em qualquer nível de Ensino (formal e não formal) da Geologia, permitindo reconstituir fenómenos e processos humanamente inacessíveis no Tempo e no Espaço, só inferidos a partir das estruturas e materiais geológicos. Propomos apresentar alguns (dos) resultados preliminares de experiências de modelação análoga na formação de cadeias de montanhas sob influência da subducção susceptíveis de serem utilizadas na Divulgação e no Ensino da Geologia. Estas experiências têm como finalidade a interpretação da formação e evolução, durante o Paleozóico superior, de um importante sector de uma zona paleogeográfica do território português – a Zona Sul Portuguesa. Nos trabalhos desenvolvidos testaram-se alguns parâmetros que influenciam o tipo de estruturas associadas a evolução dos prismas acrecionários, tais como o tipo de materiais, o ângulo de inclinação de parte da cadeia já formada ou a pressão litostática. A observação e compreensão das estruturas observadas no campo e a sua relação com o fenómeno a outra escala -a formação da cadeia de montanhas-, é algo que pode ser realizado por meio da modelação análoga, interrelacionando processos e estruturas que se desenvolvem ao mesmo tempo em escalas de observação distintas.

Key-words: *Analogue modelling, Geology of Portugal, South Portuguese Zone, Geology teaching*

Abstract

Establishing relations between what is observed in the field and what can be modelled, in an analogue fashion, in the laboratory, is a practice long applied in the construction of geologic knowledge. This methodology has been developed for the past two hundred years and, lately, it has evolved significantly. For this, and several other reasons, it is believed that analogue modelling could and should be used as a teaching strategy, in the field of Geology, whether it is used in a formal or informal setting. This teaching tool enhances the need to discuss time and space scales, as these issues become part of the discussion about the models limitations. Most of the time, in the field, the true dimension of these two variables can only be inferred from the geologic materials or phenomena under investigation. Early results obtained from analogue modelling of mountain formation, with subduction, are presented here. All these experiments are applicable to several school degrees, as well as in informal teaching environments. The objective behind these activities is to model the genesis and evolution, during the Upper Paleozoic, of an important sector of a portuguese paleogeographic area, called the "South Portuguese Zone". These experiments study several variables that influence the generation and evolution of an accretionary wedge, such as the nature of the materials, the angle of a pre-existing mountain range and the lithostatic pressure. Observing and understanding geological structures in the field, and establishing relations between them and the same phenomenon, at a different scale, is something that can be done through analogue modelling. This happens when connections are made between processes and structures that develop simultaneously, at distinct scales of observation.

Introdução

Saber Geologia ou Geociências, neste início de século é, não só, se algum dia foi, conhecer e classificar minerais, rochas e fósseis, mas algo muito mais exigente, essencialmente no que respeita aos Processos Geológicos. A Geologia é, hoje, uma ciência central e sintética (Frodeman, 2001), que congrega e interrelaciona as mais variadas áreas do conhecimento. Para além das múltiplas Geociências que se afirmaram e foram ramificando depois da Teoria da Tectónica de Placas, nos anos sessenta, outras áreas transversais surgiram, fruto das necessidades da Sociedade. São exemplos recentes a Geologia Forense, a Geologia Médica ou a Geoarqueologia. Hoje, equipas de geólogos de áreas distintas, publicam sistematicamente, artigos em conjunto nas revistas internacionais, com visões integradoras das Geociências. Estabeleceram-se e desenvolveram-se redes de conhecimento intra-, inter- e multidisciplinar para uma maior compreensão da dinâmica e evolução do planeta Terra. Este é abordado como megassistema constituído por diversos subsistemas, em geral, abertos, com capacidade de auto-regulação e evolução, regidos por uma multiplicidade de parâmetros que interactuam e variam ao longo do tempo.

Todavia, sectores da comunicação social e da opinião pública revelam ainda desconhecimento do funcionamento e da complexidade dos sistemas geológicos, caracterizando catástrofes naturais (*e.g.* queda de arribas no litoral algarvio ou derrocadas na ilha da Madeira) de forma linear, com relações causa-efeito simples entre um número muito limitado de variáveis (Herbert, 2006), sem uma visão, necessariamente holística. Subsiste uma visão mecânica da natureza que, tendencialmente, analisa o seu funcionamento como o dos sistemas de engenharia, necessariamente muito mais simples (Hamblin & Christiansen, 1998).

As abordagens sistémicas, evitando visões compartimentadas e muito hierarquizadas (Bolacha & Mateus, 2007), realçam as interacções entre os subsistemas terrestres, entre os diversos processos geológicos, internos e externos, entre os diversos materiais geológicos, incluindo as interacções com componente antropogénica. Por exemplo, o ciclo das rochas é frequentemente abordado nos manuais escolares pela forma tradicional, uniformitarista, em alternativa a uma correcta integração no espaço, realçando as diversas interacções, ocorridas ao longo do tempo (geológico profundo) no contexto da Tectónica de Placas. Os ciclos evolutivos de Wilson integram temporal e espacialmente o ciclo das rochas na referida Teoria global (Dias, 2007; Bolacha, 2008; Nicolas, 1999). Neste contexto, uma abordagem abrangente pode partir de um episódio da Geologia de Portugal, como a formação de montanhas por subducção e colisão dos continentes Avalónia e Ibéria (terrenos já acrecionados), durante o Paleozóico superior (Ribeiro *et al.*, 2007; 2009). Para além de realçar que as rochas/formações rochosas são o resultado directo da dinâmica dos processos geológicos complexos, evidencia que as diversas unidades, actualmente individualizadas no Mapa Geológico de Portugal, não podem ser verdadeiramente compreendidas se desligadas dos processos globais que continuamente ocorrem/ocorreram no nosso planeta.

Contudo, abordagens abrangentes, inter-, trans- ou multidisciplinares não implicam ignorar a própria essência das disciplinas e dos conteúdos (Wheelahan, 2010). Só conhecendo os seus métodos, técnicas e processos de construção do conhecimento, incluindo a sua evolução ao longo do tempo, se entendem as relações com outras áreas. A elaboração de propostas didácticas para qualquer nível de Ensino deve, assim, passar por estas duas vertentes: conteúdos e métodos de construção da Ciência. No caso da Geologia e, particularmente da Tectónica, a seguir à observação no campo, surgiu, em termos históricos, e complementarmente, a modelação análoga como apoio à compreensão dos fenómenos.

O trabalho que adiante se descreve centra-se nesta metodologia e inseriu-se no programa doutoral da primeira autora. Tem como finalidade a planificação de uma unidade didáctica cientificamente fundamentada, aplicável a diversos níveis e ambientes de aprendizagem.

A modelação análoga em Geologia

Os modelos físicos sempre tiveram uma particular importância nas Ciências e, por conseguinte, no Ensino das Ciências. Baseiam-se em teorias e em modelos conceptuais. Tal como as analogias, as imagens e a experimentação (Nersessian, 2008), ajudam os cientistas a construir conceitos e teorias, e a resolver problemas por meio de raciocínios causais. Na Divulgação científica e no Ensino, porque inevitavelmente simplificam a realidade, permitem que a Ciência chegue a quem não possui conhecimentos muito aprofundados. Mas também para os cientificamente letrados seria muito complicado, sem modelos, compreender conceitos tão abstractos como o átomo, a estrutura cristalina ou o sistema solar. Os objectos reais são, em geral, ou muito mais pequenos ou muito maiores, tornando-se essencial a aplicação de escalas para assegurar as proporções entre as grandezas do objecto e do modelo (Hubbert, 1937).

Os modelos científicos, como representações que são da realidade, sofrem modificações/evoluções ao longo do tempo. Estas modificações resultam, em parte, das alterações que vão sendo introduzidas nas teorias, como é o caso da Teoria da Tectónica de Placas. Esta teoria, que inicialmente, considerava as placas como blocos essencialmente rígidos distribuídos numa esfera, considera hoje que a formação e o arrefecimento das placas, assim como a sua subducção, originam forças que provocam a sua deriva e rotura (Anderson, 2006). As placas passaram a ser conceptualizadas como tendo um comportamento não tão rígido como na visão tradicional, encarando-se a possibilidade da deformação não estar condicionada às suas fronteiras mas acontecer também no seu interior (Ribeiro, 2002). Esta ideia de que modelos conceptuais e teorias vão sofrendo modificações ao longo do tempo não é com frequência transmitida por manuais escolares e/ou professores. Com efeito, o elevado poder que os modelos têm de ilustrar, demonstrar e explicar conteúdos científicos, pode ser afectado se não forem acompanhados de uma discussão profunda (fértil) sobre a realidade que pretendem representar, as relações dimensionais entre modelo e objecto, bem como o papel que os modelos têm tido na construção das teorias científicas.

A modelação (em geral) – planeamento e construção de modelos – é uma importante estratégia (e.g. Gilbert, 2004; Nersessian, 2008) na construção do conhecimento, quer para cientistas, quer para quem “apenas” aprende Ciência. Para estes últimos, a modelação é relevante como estratégia de aprendizagem, mas também na promoção do seu maior envolvimento. A modelação ou experimentação análoga em Geociências simula, representa e testa, parâmetros inerentes a fenómenos e processos geológicos, geralmente decorridos em unidades de espaço e de tempo de grandes dimensões. Insere-se na metodologia geológica dada a relevância de se reduzir esses fenómenos, impossíveis de serem presenciados, para escalas da dimensão humana (Bolacha, 2010). Sendo estes fenómenos normalmente inacessíveis e, apenas passíveis de reconstituição através da interpretação das transformações sofridas pelos materiais geológicos (minerais, rochas, fósseis) e da formação e evolução de estruturas (dobras, falhas, clivagem, xistosidade) e, tratando-se a analogia de uma importante base de explicação dos fenómenos, quer na investigação quer no seu ensino (Shumm, 1998; Fonseca *et al.*, 2001; Mateus, 2001; Barreiras *et al.*, 2006a; 2006b; Bolacha *et al.*, 2010), a sua compreensão será facilitada pela modelação análoga. Esta, com apoio ou não da modelação numérica, permite igualmente, fazer previsões sobre a evolução de paisagens e de processos geológicos, contemplando as consequências das intervenções antropogénicas nos sistemas naturais e possível mitigação dos riscos geológicos (Bolacha *et al.*, 2006; 2010). Permite muitas vezes perceber como um dado fenómeno evoluiu num determinado espaço geográfico, ao longo de um certo período de tempo (Bolacha, 2010).

A reconstituição dos fenómenos já decorridos exige a identificação prévia dos diversos parâmetros que os controlaram, as dimensões dos objectos envolvidos, as suas propriedades e a natureza dos materiais geológicos. A partir dos anos 80 do século XX, os modelos à escala tornaram-se numa poderosa ferramenta para o desenvolvimento e entendimento da geometria e da cinemática de estruturas tridimensionais, apesar de não simularem, ou apenas parcialmente, todos os factores que intervêm no fenómeno real (McClay & Bonora, 2001). A experimentação análoga terá, no entanto, surgido muito antes, no início do séc. XIX, “inventada” e desenvolvida por James Hall (Oreskes, 2007; Ranalli, 2001), o primeiro que terá utilizado prensas, mais tarde denominadas “caixas de areia”, utilizadas e, continuamente aperfeiçoadas até aos dias de hoje. Era necessário reconstituir estruturas observadas no campo, para testar hipóteses e estabelecer relações causa-efeito. Do século XIX até hoje, aperfeiçoaram-se mecanismos, procuraram-se e testaram-se materiais tradicionais (e.g.

areia, argila, parafina, plasticina, pós de pedra), fabricaram-se novos materiais (e.g. silicones, microsferas) para simular processos crustais, litosféricos, ou que abrangem a litosfera e a astenosfera (Schellart, 2002). Porém, as desconfianças face a esta metodologia foram persistindo, essencialmente, por duas razões: as rochas são rígidas e coesas ao contrário dos materiais análogos; os fenómenos modelados demoram milhões de anos, enquanto no laboratório demoram horas ou minutos (Hubbert, 1937; Ranalli, 2001). Torna-se essencial aproximar o mais possível a simulação da realidade, ou seja, do fenómeno e objectos reais. Tudo será mais fácil se o fenómeno em causa é visível e está a decorrer, complicando-se no caso de um fenómeno já decorrido, cujas dimensões dos objectos transformados são desconhecidas ou difíceis de estabelecer ou delimitar (Bolacha, 2010).

Apesar das limitações inerentes à modelação análoga em Geologia, a situação torna-se mais favorável quando o objectivo é a sua utilização no Ensino e na Divulgação (Ensino não formal). Com efeito, nestes casos, exige-se uma maior simplificação na abordagem dos processos geológicos, de que resulta uma menor exigência no controlo rigoroso das diversas variáveis envolvidas. O poder de visualização da evolução dos processos, inerente tanto à modelação análoga como à numérica, é uma poderosa mais-valia para a compreensão dos processos reais. Isto não justifica o abandono dos cuidados a ter na forma como os conhecimentos são transmitidos, tendo sempre em conta o nível de conhecimentos do público-alvo. Com este propósito pretende-se evitar a assumpção da ideia que a extrema complexidade dos processos geológicos simulados esteja plenamente representada na modelação análoga.

Enquadramento geológico

Perguntar “porque estão tão deformadas, por dobras e falhas, as rochas do Paleozóico superior que se observam no litoral SW de Portugal (Sudoeste Alentejano e Costa Vicentina)?” pode ser um ponto de partida para uma abordagem global da História Geológica de uma região do planeta, neste caso, de um pequeno sector da Ibéria. No final do Paleozóico inferior, o Oceano *Rheic* terá entrado em subducção (Ribeiro *et al.*, 2007) levando à colisão, inicialmente das margens continentais, seguida dos sectores mais internos de vários continentes, normalmente resultantes de processos orogénicos anteriores. Do fecho do *Rheic* e dos oceanos com ele relacionados terá resultado a cadeia Varisca. O que se observa no litoral SW português corresponde aos últimos incrementos da orogenia varisca, em que

os materiais, que foram sendo sucessivamente deformados, são o resultado da erosão das zonas mais internas do orógeno.

Os mecanismos que conduzem à formação de dobramentos e falhas em cadeias orogénicas e prismas acrecionários, localizados em limites compressivos de placas, foram considerados análogos a um prisma de solo ou neve pressionado por um bulldozer (Davis *et al.*, 1983). Na realidade, os prismas acrecionários formam-se quando, sedimentos turbidíticos e alguns pelágicos se acumulam numa zona de convergência de placas, não sendo subductados, mas sujeitos a deformação. A forma geral que os prismas adquirem é a de uma cunha, forma que pressupõe o movimento do prisma como um todo, tendo como comportamento o critério de fracturação de Coulomb (*idem*). Pressionado contra uma superfície sob a acção de forças tectónicas, a cadeia deforma-se globalmente através de falhas inversas imbricadas e/ou de deformação interna (Merle, 1998). O ângulo de inclinação da sua superfície é determinado pela interacção entre a resistência ao deslizamento na base e a resistência das rochas constituintes do prisma, aumentando até que o prisma atinja a geometria crítica (Davis *et al.*, 1983). A erosão é também um importante parâmetro pois provoca a transferência do material dentro do prisma (Malavieille, 2010).

No caso do *Flysch* do Baixo Alentejo (normalmente conhecido por Culm), parte do prisma acrecionário da Zona Sul Portuguesa, a deformação foi decrescendo para Sudoeste (Ribeiro & Silva, 1983; Silva, 1989; Fonseca, 1995). Como a subducção, localizada a Norte, foi continuada no tempo, a cadeia já formada foi sendo erodida, originando outros sedimentos que, simultaneamente, foram sendo deformados. Esta deformação progressiva que se desenvolveu, acima de um descolamento basal (Ribeiro *et al.*, 1979; Ribeiro & Silva, 1983), revela-se no conjunto de estruturas espectaculares, que se observam no Sudoeste Alentejano e Costa Vicentina, imbricadas para Sudoeste.

Metodologia

Os trabalhos preliminares da investigação em curso, cujos resultados aqui se revelam, tiveram como objectivo principal, a procura de materiais análogos e a testagem de diversas variáveis que determinam a evolução e deformação associada a uma cadeia de montanhas durante a colisão continental decorrente da subducção, na perspectiva da sua aplicação em Divulgação e no Ensino. As experiências em curso, com vista à caracterização mais detalhada de alguns dos factores que condicionaram a génese de algumas

das estruturas observadas no litoral SW de Portugal caem, por aquela razão, fora deste âmbito, razão por que não serão aqui abordadas.

O modelo análogo construído (Figura 1) teve por base os equipamentos descritos pela equipa de Montpellier (*e.g.* Malavieille & Trullenque, 2009) e, como fim, interpretar a progressão e evolução da cadeia Varisca na zona referida, assentando não só em argumentos científicos mas, simultaneamente, didácticos (Bolacha, 2010). Os modelos análogos de prismas acrecionários permitem interpretar zonas de instabilidade tectónica e fornecer informação adicional sobre os processos associados e as estruturas tectónicas (Malavieille, 2010). Para além de estudarem o crescimento das cadeias de montanhas associadas a zonas de subducção, podem ainda integrar processos de erosão e sedimentação, permitindo caracterizar o impacto dos processos externos na estrutura e evolução dos prismas acrecionários (*idem*).

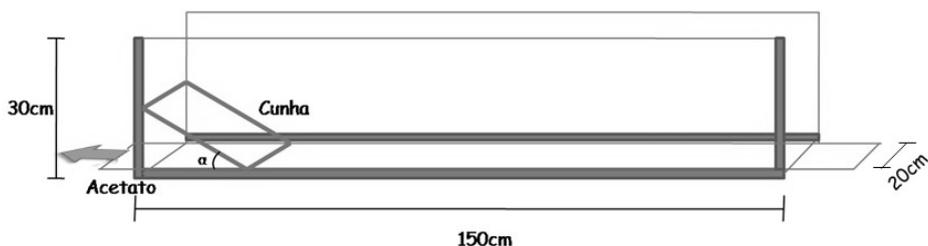


Figura 1. Esquema do modelo construído (adaptado de Bolacha, 2010).

A escala utilizada para estabelecer a dimensão do modelo foi de 1: 100 000 (*i.e.* 1cm:1 km). A cunha em acrílico, não deformável, funciona como análogo da Zona de Ossa Morena ou da zona - interna da cadeia - já formada, opção tomada em diversos estudos desta índole (*e. g.* Davis *et al.*, 1983, Malavieille & Trullenque, 2009) (figura 1). O deslocamento do acetato sob a cunha simula o processo de subducção da Zona Sul Portuguesa sob a de Ossa Morena (*e. g.* Ribeiro *et al.*, 2007), induzindo a deformação da pilha de materiais granulares colocados sobre o acetato, que serão os análogos dos metassedimentos da Zona Sul Portuguesa – Domínio do Pulo do Lobo e do Grupo do *Flysch* do Baixo Alentejo – (Ribeiro *et al.*, 1979; Tomás Oliveira *et al.*, 2006). Este processo de simulação dos processos de subducção, em modelação análoga, tem sido utilizado frequentemente por diversas equipas de cientistas (*e.g.* Davis *et al.*, 1983; MacClay *et al.*, 2004; Malavieille, 2010; Luján *et al.*, 2003).

Partiu-se do pressuposto que, apenas as rochas supracrustais sofreram na realidade deformação, uma opção que se adapta aos objectivos

estabelecidos por diversos motivos: *i*) não se pretendia simular a deformação da placa superior, isto é, da Zona de Ossa Morena; *ii*) a deformação observada nos metassedimentos da Zona Sul Portuguesa tem sido considerada do tipo “thin-skinned” (pelicular ou pele fina, em português), pressupondo a existência de um nível de descolamento em profundidade, sustentado em argumentos estruturais, geofísicos e, também pela inexistência, mesmo nos núcleos dos anticlinais principais, de formações mais antigas que o Devónico superior (*e.g.* Ribeiro *et al.*, 1979; Ribeiro & Silva, 1983; Silva, 1989); *iii*) é uma metodologia consagrada na modelação análoga de situações geológicas semelhantes às existentes no sector em estudo (*e.g.* Kukowski *et al.*, 1994; Malavieille, 2010; Luján *et al.*, 2003).

Como se pretendia simular a deformação em níveis supracrustais, utilizou-se materiais granulares em toda a coluna de sedimentos (materiais análogos). A areia é considerada um material apropriado para simular o comportamento frágil das rochas sedimentares da crosta superior (*e.g.* McClay *et al.*, 2004; Bonini *et al.*, 2000; Malavieille & Trullenque, 2009). Utilizou-se areia de várias cores para evidenciar as estruturas formadas, com grãos de elevado grau de arredondamento, diâmetro inferior a 0.25 mm e ângulo de atrito interno de 30° (referência SIFRACO_NE_34). Para aumentar o contraste visual entre os leitos a deformar, intercalou-se alguns níveis de materiais de granularidade mais fina (gesso e cimento). Esta opção justifica-se dado que as experiências desenvolvidas têm por fim a adaptação, de simulações realizadas em investigação científica, a situações de Divulgação e Ensino. Com efeito, as propriedades físicas de gesso e cimento podem não ser consideradas como análogas das propriedades das rochas da crosta superior que determinam a sua deformação. Por exemplo, o ângulo de atrito interno do gesso e do cimento, medido de forma expedita é de cerca de 45°, o limite máximo do ângulo de atrito interno das rochas sedimentares terrestres, que varia entre os 28° e 45°, quando o dos sedimentos não ultrapassa, em geral, os 30° (Atmaoui, 2005). Para processos compressivos são normalmente, utilizadas areias com ângulos de atrito por volta dos 30° (*e.g.* McClay *et al.*, 2004; Bonini *et al.*, 2000).

No que diz respeito ao deslocamento do acetato, este foi puxado lentamente à mão, assumindo-se, no parâmetro velocidade, uma escala qualitativa, da ordem de alguns centímetros por minuto no modelo, a que corresponderia uma velocidade real de alguns quilómetros por milhão de anos. Em qualquer modelo deste tipo, são menosprezados a flexura da placa e o conseqüente reajuste isostático, bem como o papel dos fluidos na deformação (*e.g.* Luján *et al.*, 2003).

Para averiguar a influência de diversos parâmetros no desenvolvimento da cadeia e estruturas associadas, realizaram-se duas experiências em que se fez variar, o ângulo de inclinação da cunha, a espessura total da multicamada, a relação entre as espessuras dos leitos de areias e pós de pedra, a compactação dos leitos e a ocorrência de erosão induzida.

Os materiais foram polvilhados sobre o acetato, em toda a extensão do modelo, camada sobre camada. Na 1ª experiência foram compactados após cada camada depositada, contrariamente à segunda experiência. Nesta, procedeu-se à erosão das camadas superiores a partir do momento em que a tracção do acetato deixou de produzir encurtamento da multicamada. O ângulo da cunha foi de 20° e a espessura total da multicamada foi de 3 cm, na 1ª experiência. Na 2ª, o ângulo da cunha foi aumentado para 30° e a espessura da multicamada para cerca de 4 cm.

Quanto à alternância dos leitos, na 1ª experiência depositaram-se seis camadas alternadas de pó de pedra (gesso e cimento) e areia, cada uma com cerca de 0,5 cm de espessura, sendo a primeira de areia azul, a segunda de gesso, a terceira de areia vermelha, a quarta de cimento, a quinta de areia azul e a última, de gesso. Na 2ª experiência, as camadas de gesso foram apenas duas e tinham uma espessura praticamente desprezável. A areia de cada camada atingiu uma espessura aproximada de 0,5 cm. Iniciou-se a deposição por duas camadas, uma de areia azul e outra vermelha, a que se seguiu uma de gesso, uma de areia vermelha, uma de areia branca, uma de areia azul. A esta seguiu-se uma de gesso, uma de areia vermelha, terminando com uma de areia azul. A multicamada ficou com uma espessura total aproximada de 4 cm.

Nas duas experiências, como referido anteriormente, o acetato foi puxado muito lentamente, à mão. Os resultados foram sendo registados regularmente, em intervalos de cerca de 10 a 20 cm de encurtamento.

Resultados

Os resultados que a seguir se descrevem foram observados e fotografados nas três dimensões do modelo, de ambos os lados e por cima. Como esta modelação pretende simular a formação de parte da Zona Sul Portuguesa, adoptou-se como orientação do modelo, a análoga do processo de subducção ocorrido. Assim estipulou-se que o sentido da cunha seria o Norte, enquanto o oposto, que representaria a zona externa da cadeia, o Sul. Por esta razão, as imagens obtidas estão referenciadas com a direcção Norte-Sul.

1ª Experiência

Iniciado o encurtamento da pilha de areias e pós, formou-se uma estrutura em anticlinal junto à cunha e falhas inversas e dobramentos com vergência para Sul, considerando o processo real e as coordenadas actuais (Figura 2.A). Formaram-se falhas nos pós, e dobramentos nas areias (Figura 2.B). À medida que novos incrementos de encurtamento foram sendo induzidos, a deformação progredia por aumento da deformação nas estruturas já formadas, com o espessamento das charneiras das dobras (areias) e, conseqüente laminação das camadas de pós, provocando ruptura nos pós, cavalgamentos e *piggy backs* à superfície (Figura 2.B). No final do encurtamento, o prisma apresentava socalcos, da zona externa para a interna (Figura 2.C). Nas zonas mais internas observava-se uma mistura de materiais, inicialmente pertencentes a distintos "andares estruturais", reveladora de uma "longa história" de deformação. A "cadeia" final apresentava homogeneidade estrutural e imbricação das estruturas para Sul (Bolacha, 2010).

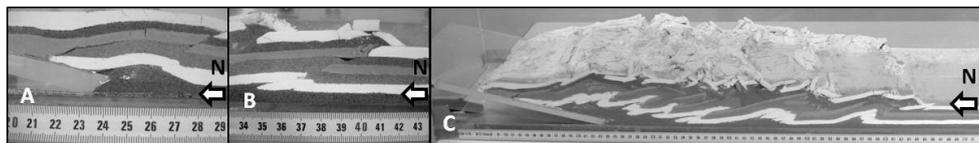


Figura 2. Primeira experiência. A - primeiro incremento com formação de anticlinal e falha. B - segundo incremento com aumento do rejeito nos cavalgamentos e formação de *piggy backs* à superfície. C - Prisma final com estruturação imbricada para Sul.

2ª Experiência

A deformação iniciou-se, de forma muito insípida, junto à cunha com uma pequena dobra, progredindo de seguida para Sul através de dobras apertadas (Figura 3.A). Nos incrementos seguintes, formaram-se “dobras em caixa” com *kinks* associados, vergentes em sentido oposto ao da deformação inicial. Estas zonas ficaram separadas por zonas menos deformadas. As dobras vergentes para Sul apresentavam maior inclinação dos seus planos axiais (Figura 3.B).

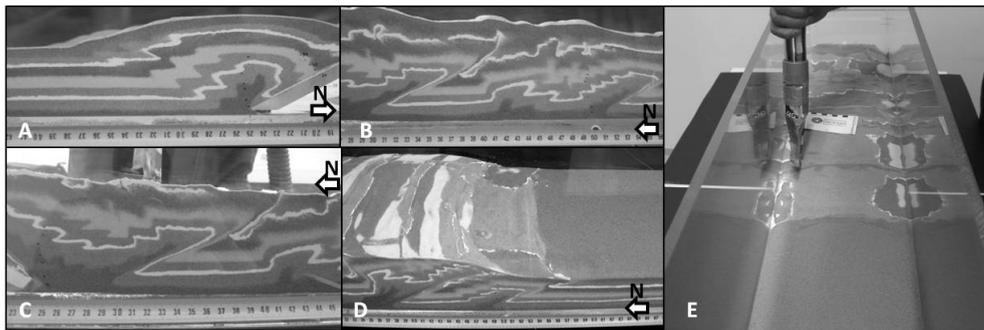


Figura 3. Segunda experiência. A – Início da deformação. B - Estádio final de deformação antes da erosão. C - Prisma erodido. D - Cavalgamentos formados após erosão e retoma do encurtamento. E- Erosão induzida.

As falhas eram visíveis apenas à superfície - ruptura superficial – com umas intersectando outras. O avanço do prisma produziu-se também por estiramento (no sentido de diminuição de espessura) das camadas, particularmente nos flancos inversos das dobras (Bolacha, 2010).

O encurtamento deu-se por terminado perto dos 50 cm (38.5%), restando uma área de cerca de 23 cm de comprimento não deformada (sensivelmente semelhante ao que acontecera na 1ª experiência). Seguiu-se a erosão induzida por aspiração (Figura 3. E), diminuindo a inclinação da superfície do prisma (Malavieille, 2010). O reinício da tracção do acetato suscitou o reatar do encurtamento, realizado principalmente à custa da ruptura dos flancos curtos, de duas grandes dobras, já laminados, levando à formação de dois carreamentos com alguma expressão à escala do modelo (Figuras 3. C e D).

Interpretação de resultados

Em comum, nas duas experiências, a evolução do prisma deu-se à custa da deformação interna – fracturação e dobramentos - até atingir uma geometria crítica, determinante para o bloqueio do encurtamento, i.e. a impossibilidade do prosseguimento da deformação à custa da tracção do acetato.

O tipo de deformação interna depende de factores como a resistência dos materiais que, por sua vez, é influenciada por características intrínsecas como as suas densidade e coesão; mas também de factores como a pressão litostática (espessura da coluna de sedimentos) e a pressão dos fluidos (negligenciada neste tipo de modelação). A coesão depende do ângulo de atrito interno das partículas, por sua vez, variável com o grau de arredondamento dos grãos, compactação e densidade dos materiais. Assim,

o tipo de estruturas formadas entre as duas experiências variou essencialmente, com os materiais utilizados – pós de pedra ou areias – a pressão litostática, influenciada pela altura da coluna e pelo grau de compactação dos materiais, bem como a inclinação da cunha. A heterogeneidade vertical de padrões estruturais, mais evidente na 2ª experiência, terá dependido da pressão litostática mas, essencialmente, da inclinação da cunha. Este parâmetro parece ser determinante para a formação de prismas mono ou bivergentes, influenciando a formação de dobras em ambos os sentidos, os cavalgamentos e retrocavalgamentos, confirmada, por exemplo, pelos resultados de Bonini *et al.* (1999). Na 1ª experiência, com uma inclinação da cunha claramente inferior ao ângulo de atrito das areias, formou-se um prisma monovergente, enquanto na 2ª experiência, com ângulo de inclinação da cunha semelhante ao do ângulo de atrito interno das areias, formou-se um prisma bivergente, com uma zona central, tipo *pop-up*, separando as duas orientações do prisma.

A erosão produzida artificialmente na 2ª experiência, terá tido o efeito de alívio litostático, facilitando o retomar do encurtamento, a ruptura e a formação de alguns cavalgamentos (Bolacha, 2010). Na realidade, processos internos e externos são simultâneos, o que torna a formação e evolução da cadeia dependente da transferência de materiais da própria cadeia, produzida por erosão e sedimentação.

Conclusões

A modelação análoga é uma metodologia que permite a compreensão e estudo de diversos processos geológicos a diversas escalas e graus de complexidade.

Os prismas produzidos e estruturas associadas, nas experiências descritas, permitiram aferir o tipo de materiais que deve ser utilizado neste tipo de modelação, para que se produzam estruturas semelhantes às observadas no campo. Confirma-se que existe um conjunto muito variado de factores que influencia os resultados e que pode ser associado e estudado em cada experiência. A interacção, entre a Tectónica (incluindo a subducção) e a Geodinâmica Externa, determina, como esperado (Graveleau & Dominguez, 2008), estruturas e relevos, ideia que deve ser transmitida a alunos de qualquer nível de ensino de modo a colocar em destaque a ideia de um planeta que vai evoluindo pelo contributo de diversos parâmetros e processos.

Por fim, o aperfeiçoamento do modelo e a testagem de outras variáveis, ou alterações nas já testadas, pode vir a dar alguns contributos

para a compreensão de diversos aspectos da formação e evolução de parte da Zona Sul Portuguesa, cujos resultados virão a ser oportunamente revelados.

Nota: Pretende-se deste modo homenagear o Professor Manuel Maria Godinho, particularmente as suas qualidades humanas, científicas e pedagógicas, que o tornaram uma referência para muitos alunos (incluindo a primeira autora deste trabalho) do Ramo Científico da Licenciatura em Geologia da Universidade de Coimbra.

Agradecimentos

Este trabalho beneficiou da bolsa de doutoramento SFRH/BD/43297/2008 atribuída pela FCT. Agradece-se à professora Conceição Freitas o espaço para o funcionamento do LabGExp.

Bibliografia

- Allègre, C. (1999) - *L'écume de la Terre*. Fayard.
- Anderson, D. L. (2006) - Plate Tectonics; the general theory: Complex Earth is simpler than you think. Geological Society of America. In Manduca, C. A. & Mogk, D. W. eds. *Earth and Mind: How Geologists Think and Learn about the Earth*: Geological Society of America. Special Paper; 413, 29-38.
- Atmaoui, N. (2005) - *Development of Pull-Apart Basins and Associated Structures By The Riedel Shear Mechanism: Insight From Scaled Clay Analogue Models*. (Tese de Doutoramento). Der Fakultät für Geowissenschaften der Ruhr-Universität Bochum.
- Barreiras, S., Silva, H., Vasconcelos, C., Fonseca, P. E. (2006a) - *Tectónica Experimental: actividades de simulación – Ponencias, conferencias y talleres del XIV Simposio sobre Enseñanza de la Geología, Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*; 14 (1), 82-85. (Barcelona, Espanha).
- Barreiras, S., Vasconcelos, C., Fonseca, P. E. (2006b) - *La Tectónica Experimental en la Enseñanza de la Geología: importancia de los diarios de clase en la reflexión-acción*. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*; 13 (2), 146-155. (Barcelona, Espanha - <http://www.aepect.org/revista/13-2.htm>).
- Bolacha, E. (2008) - *Elementos sobre Epistemologia da Geologia: uma contribuição no Ano Internacional do Planeta Terra*. *E-Terra*; 6 (2), 16 p. http://e-terra.geopor.pt/eng/index_en1.html (17-11-2010).
- Bolacha, E. (2010) - *Modelação Análoga da Zona Sul Portuguesa e Aplicações Didácticas*. Seminário de Pós-Graduação II (relatório não publicado). Departamento de Geologia da FCUL.
- Bolacha, E., Mateus, A. (2007) - *Novos curricula de Geologia no Ensino Secundário português: contributos da Associação Portuguesa de Geólogos*. *Geonovas*; 21, 75-86.
- Bolacha, E., Moita de Deus, H. A., Caranova, R., Silva, S., Costa, A. M., Vicente, J., Fonseca, P. E. (2006) - *Uma Experiência na Formação de Professores: Modelação Analógica de Fenómenos Geológicos – A Geologia no Laboratório*. In *Geonovas*; 20, 33-56.
- Bolacha, E., Moita de Deus, H., Fonseca, P. E. (2010) - *Modelação Análoga: Actividades práticas de Geologia em sala de aula*. In J. Neiva, A. Ribeiro, Victor, L.; Noronha, F. & Ramalho, M.

- (Coord.), Ciências Geológicas – Ensino e Investigação e sua História, Lisboa; Volume I, APG, 563-572.
- Bonini, M., Sokoutis, D., Talbot, C., Bocaletti, M. (1999) - Indenter growth in analogue models of Alpine-type deformation. *Tectonics*; 18 (1), 119-128.
- Bonini, M., Sokoutis, D., Mulugeta, G., Katrivanos, E. (2000) - Modelling hanging wall accommodation above rigid thrust ramps. *Journal of Structural Geology*; 22, 1165-1179.
- Davis, D., Suppe, J.; Dahlen, F. A. (1983) - Mechanics of Fold-and-Thrust Belts and Accretionary Wedges. In *Journal of Geophysical Research*; 88 (B2), 1153-1172.
- Dias, R. (2007) - Evolução, Portugal de Antes da História, Associação Centro Ciência Viva de Estremoz, Estremoz.
- Fonseca, P. E. (1995) - Estudo da Sutura Varisca no SW ibérico nas regiões de Serpa-Beja-Torrão e Alvito-Viana do Alentejo. Tese de Doutoramento, Departamento de Geologia, FCUL.
- Fonseca, P. E., Ribeiro, L. P., Caranova, R.; Filipe, P. (2001) - Experimentación analógica sobre el desarrollo de un diapiro y la deformación producida en las rocas encajantes. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*; vol. 9.3, 270-276.
- Frodeman, R. (2001) - A Epistemologia das Geociências, In: Marques, L. & Praia, J. (Eds.), *Geociências nos Currículos dos Ensinos Básico e Secundário*. Departamento de Didáctica e Tecnologia Educativa, Universidade de Aveiro, 39-57.
- Gilbert, J. (2004) - Models and Modelling: Routes to More authentic Science Education. *International Journal of Science and Mathematics Education*; 2, 115-130.
- Graveleau, F. & Dominguez, S. (2008) - Analogue modelling of the interaction between tectonics, erosion and sedimentation in foreland thrust belts. *C. R. Geoscience*; 34, 324-333.
- Hamblin, W., Christiansen, E. (1998) - *Earth's Dynamics Systems*, Prentice Hall.
- Herbert, B. (2006) - Student understanding of complex earth systems. In Manduca, C.A. & Mogk, D. W. eds. *Earth and Mind: How Geologists Think and Learn about the Earth*: Geological Society of America, Special Paper; 413, 95-104.
- Hubbert, M. K. (1937) - Theory of scale models as applied to the study of geological structures. *Bull. Geol. Soc. Am*; 48, 1459-1520.
- Luján, M., Storti, F., Balanyá, J-C., Crespo-Blanc, A., Rossetti, F. (2003) - Role of décollement material with different rheological properties in the structure of Aljibe thrust imbricate (Flysch Trough, Gibraltar Arc): an analogue modelling approach. *Journal of Structural Geology*; 25, 867-881.
- Kukowski, N., Huene, R., Malavieille, J., Lallemand, S. (1994) - Sediment accretion against a buttress beneath the Peruvian continental margin at 12 ° S as simulated with sandbox modeling. *Geol Rundsch*; 83, 822-831.
- Malavieille, J. (2010) - Impact or erosion, sedimentation, and structural heritage on the structure and kinematics of orogenic wedges: Analog models and case studies. *GSA Today*; 20(1): 4 – 10.
- Malavieille, J., Trullenque, G. (2009) - Consequences of continental subduction on forearc basin and accretionary wedge deformation in SE Taiwan: Insights from analogue modelling, *Tectonophysics*; 466, 377-394.
- Mateus, A. (2001) - Perspectivas actuais da Geologia; sua importância educativa. in *O Ensino Experimental das Ciências – (Re)pensar o Ensino das Ciências III*. Ministério da Educação, 107-128.
- McClay, K., Bonora, M. (2001) - Analog models of restraining stepovers in strike-slip fault systems. *AAPG Bulletin*; 85 (2), 233–260.
- McClay, K., Whitehouse, P., Dooley, T., Richards, M. (2004) - 3D evolution of fold and thrust belts formed by oblique convergence. *Elsevier- Marine and Petroleum Geology*; 21, 857–877.
- Merle, O. (1998) - *Emplacements Mechanisms of Nappes and Thrusts Sheets*. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht.
- Nersessian, N. (2008) - *Creating Scientific Concepts*. MIT Press.
- Nicolas, A. (1999) - *Les montagnes sous la mer*. Editions BRGM, Orléans.
- Oreskes, N. (2007) - Science without laws. *Model Systems, Cases, Exemplary Narratives*, In Creager, A.; Lunbeck, E.; Wise, M. N. Duke University Press. Durham, London.

- Ranalli, G. (2001) - Experimental tectonics: from Sir James Hall to the present. *Journal of Geodynamics*; 32, 65-76.
- Ribeiro, A. (2002) - *Soft Plates and Impact Tectonics*. Springer.
- Ribeiro, A., Silva, J. B. (1983) - Structure of the South Portuguese Zone, In Lemos de Sousa, J. & Oliveira, J. T. (Eds.) *The Carboniferous of Portugal*. *Memórias dos Serviços Geológicos de Portugal*; 29, 83-89.
- Ribeiro, A., Antunes, M. T., Ferreira, M. P., Rocha, R. B., Soares, A. F., Zbyszewski, G., Moitinho de Almeida, F., Carvalho, D., Monteiro, J. H. (1979) - *Introduction à la Géologie Générale du Portugal*. *Serviços Geológicos de Portugal*, Lisboa.
- Ribeiro, A., Munhá, J., Dias, R., Mateus, A., Pereira, E., Ribeiro, L., Fonseca, P., Araújo, A., Oliveira, T., Jomão, J., Chaminé, H., Coke, C., Pedro, J. (2007) - Geodynamic evolution of the SW Europe Variscides. *Tectonics*, 26, TC6009.
- Ribeiro, A., Munhá, J., Fonseca, P. E., Araújo, A., Pedro, J., Mateus, A., Tassinari, C., Machado, G., Jesus, A. (2009) - Variscan Ophiolite Belts in the Ossa-Morena Zone (Southwest Iberia): geological characterization and geodynamic significance. IGCP Project 497, *Ocean Rheid Special Volume, Gondwana Research*, doi: 10.1016/j.gr.2009.09.005.
- Schellart, W. (2002) - Analogue modelling of large-scale tectonic processes: an introduction, In (Eds.) Schellart, W. e Passchier, C. W. *Analogue modelling of large-scale tectonic processes*. *Journal of Virtual Explorer*, 7. <http://virtualexplorer.com.au/article/2002/45/analogue-modelling-of-tectonic-processes> (08-10-2010).
- Shumm, S. (1998) - *To interpret the Earth: Ten Ways to be Wrong*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Silva, J. B. (1989) - *Estrutura de uma Geotransversal da Faixa Piritosa: zona do Vale do Guadiana. Estudo da Tectónica pelicular em regime de deformação não coaxial*. Tese de doutoramento, Universidade de Lisboa.
- Tomás Oliveira, J., Relvas, J., Pereira, Z., Matos, J., Rosa, C., Rosa, D., Munhá, J., Jorge, R., Pinto, A. (2006) - O Complexo Vulcano-Sedimentar da Faixa Piritosa: Estratigrafia, Vulcanismo, Mineralizações Associadas e Evolução Tectono-Estratigráfica no Contexto da Zona Sul Portuguesa, In Dias, R.; Araújo, A.; Terrinha, P.; Kullberg, J. C. (Eds.). *Geologia de Portugal no contexto da Ibéria*, Univ. Évora. Évora, 207-244.
- Wheelahan, L. (2010) - *Why Knowledge Matters in Curriculum. A social realist argument*. Routledge, New York.