AFERIÇÃO MÚLTIPLA DE MODELOS GEOLÓGICO-ESTRUTURAIS POR MEIO DA MODELAGEM FÍSICA ANALÓGICA E DA MODELAGEM ESTRUTURAL TRIDIMENSIONAL: UM EXEMPLO DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO

CAROLINE JANETTE SOUZA GOMES¹, REGINALDO GOMES DA SILVA²,
ANDRÉ DANDERFER FILHO³, JOÃO FELIPE SAVIO DI ALMEIDA⁴ &
MARIA VERÔNICA PESSÔA⁵

Abstract VALIDATION OF GEOLOGIC DATA INTERPRETATION USING ANALOG MODELING AND A THREE-DIMENSIONAL ANALYSIS: AN EXAMPLE FROM THE QUADRILÁTERO FERRÍFERO In this paper we present sandbox modeling and geometric three-dimensional computer modeling as tools for validation of geologic data interpretation. Silva's (1999) tectonic model of the central-south Moeda Syncline, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, was simulated experimentally. Serial sections cut parallel to shortening direction were digitized to illustrate the three-dimensional variation of structures. The 2-D visualization of serial sandbox sections show basin shortening, inversion of the east border, reverse reactivation of normal faults and formation of thrust faults. All these features suggest displacement of the Bação Metamorphic Complex to the west, as a rigid backstop. The three-dimensional analysis demonstrates that the basin shortening and the east border inversion constitute minor features. These opposite results led to reinterpretation of structural data and new analysis of experimental model boundary conditions, which enabled the formulation of a feasible tectonic model.

Keywords: physical analogue modeling; geometric three-dimensional computer modeling; model validation; Moeda Syncline, Quadrilátero Ferrífero.

Resumo No presente trabalho são apresentados experimentos analógicos e uma modelagem geométrica tridimensional, como ferramentas de aferição múltipla de seções geológico-estruturais. Em um experimento de areia seca foi simulado o modelo tectônico de Silva (1999) para a região centro-sul do Sinclinal Moeda, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, posteriormente reconstruído em um arcabouço tridimensional, digital. A análise bidimensional das seções cortadas no experimento físico confirma o traslado para oeste do Complexo Metamórfico Bação, atuando como *backstop* rígido, durante o processo deformativo. Também endossa o encurtamento da bacia, a inversão de sua borda oriental e a reativação reversa de falhas normais bem como a formação de novas falhas de empurrão. O modelo gráfico tridimensional revelou que o estrangulamento da bacia e a inversão da sua borda leste constituem, na realidade, efeitos desprezíveis, com pouca influência na configuração global da megaestrutura. As interpretações opostas, encontradas neste trabalho, conduziram tanto a uma reinterpretação do modelo tectônico inicial quanto a uma nova análise das condições de contorno do modelo físico. Ao final, obteve-se um modelo de alta confiabilidade.

Palavras-chave: Modelagem Física Analógica; Modelagem Estrutural; Validação de Seções Geológicas; Sinclinal Moeda; Quadrilátero Ferrífero.

INTRODUÇÃO A construção de seções geológicas é conduzida por diversos procedimentos geométricos, entretanto passa a ser interpretativa e baseada na experiência do intérprete quando os dados de sub-superfície são escassos ou inexistentes. A modelagem física analógica, baseada na teoria de similaridade e adaptada às Geociências por Hubbert (1937), é hoje mundialmente empregada como uma ferramenta de avaliação de modelos tectônicos. No entanto, apesar de seu fundamento científico, representa uma simplificação da natureza. Assim, o uso de ferramentas adicionais de avaliação e validação geométrica de seções representa um importante passo no aperfeiçoamento da interpretação das estruturas em profundidade. A reconstituição gráfica tridimensional por meios eletrônicos, constitui uma técnica em desenvolvimento no mundo inteiro (por exemplo, Lindenbeck *et al.* 1998; Ebert & Hasui

1998 etc.). No entanto, esta técnica é ainda muito pouco utilizada no Brasil. Por meio dela é possível visualizar a geometria de camadas, falhas e demais estruturas em várias posições e de múltiplos ângulos de visada, constituindo um método eficiente para avaliar empiricamente modelos tectônicos e ratificar ou não a sua interpretação geométrica.

Na corrente pesquisa, escolheu-se a porção centro-sul do Sinclinal Moeda, Quadrilátero Ferrífero (Fig. 1), como área de estudo para aplicar as ferramentas de modelagem física analógica e estrutural e testar a validação de um modelo tectônico. Silva (1999) desenvolveu, nesta região, uma análise estrutural, com o objetivo de estudar a relação estrutural entre o Sinclinal Moeda e o Complexo Metamórfico Bação, a leste. Para o autor, o Sinclinal Moeda teria resultado da acomodação por flexão de rochas supracrustais,

1 - Professora-Pesquisadora do Grupo de Modelagem de Sistemas Tectônicos (Degeo/Ufop); e-mail: caroline@degeo.ufop.br.

2 - Mestrando do Programa de Pós-graduação em Evolução Crustal e Recursos Naturais – Área Geologia Estrutural/Tectônica

3 - Professor-Pesquisador do Grupo de Modelagem de Sistemas Tectônicos (Degeo/Ufop); e-mail: andré@degeo.ufop.br

4 - Bolsista de Iniciação Científica do Grupo de Modelagem de Sistemas Tectônicos (PIVIC/Ufop e FAPEMIG).

5 - Bolsista Iniciação Científica (PIP/Ufop)

previamente depositadas sobre o embasamento arqueano, em um graben extensional. Por sua vez, a curvatura em planta do flanco leste do sinclinal, com trajetória convexa polarizada para oeste, seria decorrente de um processo de inversão tectônica relacionada com o Evento Brasileiro. Dominado por regime compressivo, este evento teria causado o translado para oeste do bloco tectônico do Bação, materializado por rochas de médio a alto grau do complexo homônimo. O bloco teria agido como um anteparo rígido (um *backstop*, no sentido de Byrne *et al.* 1993) durante a deformação, resultando na amplificação do sinclinal, na inversão de seu flanco leste e na reativação reversa da Zona de Cisalhamento Moeda-Bonfim, no flanco oeste. Outras consequências seriam um escape lateral (por deformação transpressiva) a noroeste e a sudoeste do Bloco Bação de rochas reologicamente incompetentes, do Supergrupo Rio das Velhas, e uma extrusão vertical de rochas do Supergrupo Minas situadas no interior do sinclinal.

O presente trabalho apresenta os primeiros resultados sobre a aferição múltipla de interpretações geológico-estruturais em bacias sedimentares, a partir do uso de ferramentas de modelagem geológica. Outros estudos encontram-se em andamento, incluindo a restauração e o balanceamento estrutural de seções.

Neste estudo, avaliou-se o modelo tectônico de Silva (1999), inicialmente, por meio de uma modelagem física analógica. Os perfis cortados no modelo físico foram digitalizados, reconstruídos no programa GeoSec2D e, posteriormente, integrados no GeoSec3D (da Paradigm Geophysical) para gerar um modelo gráfico tridimensional do arcabouço estrutural da área-teste. O modelo tridimensional permitiu um exame do tipo tomografia completa do experimento físico associado a uma análise das estruturas de diferentes perspectivas, a partir da rotação espacial do mesmo, em torno de eixos vertical, horizontal e inclinado. Esta metodologia permitiu realizar uma nova análise crítica e complementar do modelo tectônico.

Todas as etapas de trabalho foram desenvolvidas no Departamento de Geologia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, nos laboratórios de Modelagem Física e de Modelagem Estrutural.

OSINCLINAL MOEDA O Sinclinal Moeda (Fig. 1) na porção oeste do Quadrilátero Ferrífero se estende por aproximadamente 40 km, na direção N-S. De acordo com Dorr (1969), constitui uma estrutura sinformal com vergência para oeste. Em planta, o flanco oriental exibe uma notável curvatura com convexidade voltada para oeste.

Evidências de um evento de rifteamento na região do Quadrilátero Ferrífero, com formação de uma bacia sedimentar, a "Bacia Minas", foram inicialmente relatadas por Marshak & Alkmim (1989), Chemale Jr. *et al.* (1994) e Renger *et al.* (1994). Com o desenvolvimento progressivo dos conhecimentos geológicos, vários eventos tectônicos de extensão vem sendo descritos no Quadrilátero Ferrífero, ratificando a hipótese genética para a Bacia Minas.

Alguns autores relacionam a curvatura do flanco leste do sinclinal a um cavalgamento do Bloco Bação sobre a megaestrutura sinformal (por exemplo, Chemale Jr. *et al.* 1994). Outros, consideram o bloco um alto estrutural preexistente que induziu a bacia a se moldar a sua forma (Gomes 1996; Endo 1997). Para Alkmim & Marshak (1998), os complexos metamórficos do Quadrilátero Ferrífero representam uma província de 'domos e quilhas', onde os 'domos' teriam se estabelecidos após a formação da Bacia Minas.

Com base em um levantamento estrutural, qualitativo e quantitativo, da região centro-sul do Sinclinal Moeda, Silva (1999) su-

gere uma evolução em três eventos deformacionais para a área. Ao primeiro evento, distensivo, o autor atribui a formação de uma calha, sob condições dúcteis a dúcteis-rúpteis. Neste evento teria se formada a megaestrutura, hoje denominada de Sinclinal Moeda, por meio da acomodação das supracrustais sobre um sistema de falhas extensionais. Este sistema é melhor visível no flanco oeste do sinclinal, no qual os metassedimentos do Supergrupo Minas fazem contato com as rochas do Complexo Metamórfico Bonfim por meio da Zona de Cisalhamento Moeda-Bonfim, de natureza dúctil-rúptil. No centro e na borda leste, a presença de zonas de cisalhamento normais é esporádica (Fig. 2), possivelmente devido à obliteração por estruturas mais novas. Foram, no entanto, também reconhecidas, em trabalho recente por Braga *et al.* (2005), no flanco leste da região centro-norte do sinclinal. O segundo evento deformacional, descrito pelo autor, seria de natureza compressiva e teria gerado dobras com vergência para norte, que redobram o sinclinal. É de pouca expressão no cenário tectônico. O último evento, também compressivo, estaria associado à inversão brasileira e teria causado a formação das principais estruturas da região, cuja magnitude de deformação decresce no sentido do Complexo Metamórfico Bonfim (Silva & Gomes 2001). No domínio leste, observam-se tanto zonas cisalhamento de empurrão quanto direcionais, e, na região oeste, a Zona de Cisalhamento Moeda-Bonfim caracteriza uma típica estrutura de inversão tectônica, com feições tanto distensivas quanto compressivas, já descritas por Endo & Nalini (1992) e Hippertt *et al.* (1992). A figura 3 mostra quatro perfis geológico-estruturais da área de trabalho com a interpretação do inventário estrutural da região centro-sul do Sinclinal Moeda.

A análise estrutural realizada por Gomes *et al.* (2003) na porção centro-norte do Sinclinal Moeda forneceu novos argumentos a favor da influência do Bloco Bação sobre a geometria do Sinclinal Moeda. Nessa região, observou-se o registro de uma compressão com polaridade no sentido NW, responsável por deformar as rochas do Supergrupo Rio das Velhas e modificar a geometria original da megaestrutura do Sinclinal Moeda. Além disto, no interior do sinclinal, a deformação decresce no sentido NW, enquanto que nas rochas do Supergrupo Rio das Velhas, registra-se a diminuição da deformação no setor norte. Os fatos sugerem que a compressão NW-SE seria o resultado da translação do Bloco Bação, para oeste.

METODOLOGIA DE TRABALHO O presente trabalho foi desenvolvido em duas etapas laboratoriais: uma envolvendo a modelagem física analógica, e, outra, a reconstrução gráfico-digital, tridimensional, do modelo experimental. Ao término de cada uma dessas etapas, procedeu-se à avaliação do modelo digital 3D e das condições de contorno iniciais do modelo físico. Tal procedimento conduziu a uma maior confiabilidade do modelo tectônico em teste, mas, exigiu uma reformulação global do modelo tectônico, para o domínio em estudo, assim como uma reavaliação dos conhecimentos teóricos sobre os processos geológicos.

Na etapa de modelagem física analógica, foram simulados em caixa de areia dois eventos deformacionais: um de natureza extensional, responsável pela configuração primitiva do Sinclinal Moeda; e, outro de caráter compressivo, que impôs uma inversão tectônica significativa ao arcabouço da Bacia Minas, causando a modificação da estrutura sinformal original. Ao final do experimento, o modelo foi umedecido com água e cortado em 15 seções, na direção do transporte tectônico, e com espaçamento de 2,0 cm. As seções do modelo físico foram fotografadas. Em seguida, utiliza-

Figura 1 - (A) Localização do Quadrilátero Ferrífero no Cráton São Francisco (CSF) e mapa geológico com as principais megaestruturas (mod. de Dorr 1969 e Hashizume 1998); CMB- Complexo Metamórfico Bação (também denominado de 'Bloco Bação'); CMBa - Complexo Metamórfico Bonfim; ZCBM - Zona de Cisalhamento Moeda-Bonfim. (B) Mapa geológico-estrutural do Sinclinal Moeda, na qual a área de trabalho está inserida (Dorr 1969).

Figura 2 - Mapa estrutural simplificado da área de trabalho (mod. de Silva 1999) com a posição dos perfis geológico-estruturais. CMB- Complexo Metamórfico Bação; CMBo - Complexo Metamórfico Bonfim.

Figura 3 - Seções geológico-estruturais da área de trabalho, ilustrando a arquitetura da porção centro-sul do Sinclinal Moeda (visada de sul para norte). Em preto, a formação ferrífera do Supergrupo Minas representando uma camada guia. CMB - Complexo Metamórfico Bação (Bloco Bação); CMBo - Complexo Metamórfico Bonfim (mod. de Silva 1999).

ram-se as fotografias para uma comparação visual crítica (análise de verossimilhança) entre o arcabouço estrutural do modelo físico e aquele representado nos perfis construídos por Silva (1999), a partir dos dados estruturais de campo (Fig. 3).

A segunda etapa envolveu a reconstrução gráfica digital de cada seção e, subsequentemente, a integração de todas elas em um arcabouço tridimensional, representando a geometria 3D do modelo tectônico em apreço; ao todo foram digitalizadas 15 seções transversais do experimento físico. Após esse procedimento, passou-se à análise do modelo digital 3D que, ao apresentar a continuidade das estruturas, tanto em profundidade como longitudinalmente, permitiu tecer novas considerações sobre a validade geométrica, cinemática e mecânica do modelo tectônico teórico.

A MODELAGEM FÍSICA ANALÓGICA A modelagem física analógica tem por objetivo simular eventos tectônicos e mecanismos deformacionais, em escalas reduzidas porém comparáveis, a partir do emprego de materiais analógicos apropriados. Permite testar a aplicabilidade geométrica, mecânica e cinemática de modelos tectônicos teóricos, ilustrar a evolução progressiva da deformação e indicar estruturas ainda não descobertas na natureza, assim como estudar mecanismos de deformação. Pela teoria da similaridade (Hubbert 1937), o coeficiente de proporcionalidade empregado para um parâmetro do experimento (comprimento, tempo, densidade, viscosidade e tensão/coesão) deve ser igual para todos.

Para a simulação da deformação na região centro-sul do Sinclinal Moeda empregou-se a areia seca, de comportamento rúptil, como principal material analógico. Trata-se, no caso, de uma simplificação das condições reais, pois não se considerou, por exemplo, que as principais zonas de cisalhamento da área constituem estruturas dúcteis ou dúcteis-rúpteis. Este fato, porém, não fere o princípio básico da modelagem física analógica, o de 'construir modelos que sejam tão próximos quanto possível aos seus equivalentes naturais', uma vez que o objetivo da modelagem era simular a arquitetura geral da bacia sem preocupação com o nível estrutural.

O enfoque do presente estudo compreende a análise da viabi-

lidade geométrica e cinemática da tese sobre o estrangulamento do Sinclinal Moeda, pelo traslado para oeste do Bloco Bação. A viabilidade mecânica foi testada em um estudo recente, por Gomes *et al.* (2003).

De acordo com Ramberg & Sjöström (1973), a coesão das rochas metamórficas e silicatadas, na crosta rúptil, situa-se em torno de 100 bar ($9,81 \times 10^7 \text{ dyn/cm}^2$). Considerando-se as densidades (d) médias da areia de quartzo e das rochas da crosta continental, respectivamente de $1,3 \text{ g/cm}^3$ e de $2,8 \text{ g/cm}^3$, e o coeficiente de proporcionalidade dos comprimentos $\lambda = 10^{-5}$, tem-se:

$$\delta = \frac{\delta_{\text{modelo}}}{\delta_{\text{protótipo}}} = 1,3 / 2,8 = 0,464.$$

lembrando que o fator da coesão corresponde a

$$\sigma = \text{coesão (modelo)} / \text{coesão (protótipo)} = \delta \times \lambda$$

então:

$$\begin{aligned} \text{coesão (modelo)} &= \text{coesão (protótipo)} \times \delta \times \lambda \\ &= 0,464 \times 10^{-5} \times 9,81 \times 10^7 \\ &= 455,464 \text{ dyn/cm}^2 = 0,000455464 \text{ bar.} \end{aligned}$$

Esse valor, muito próximo de zero, demonstra que a escolha da areia seca como material analógico é apropriado e satisfaz a similaridade das tensões (coesões).

Procedimento No Laboratório de Modelagem Física do Departamento de Geologia, a deformação no modelo analógico tem sido produzida por meio de um motor elétrico, que desloca uma ou mais paredes móveis da caixa do experimento a uma velocidade constante de 2 cm/h.

No presente experimento, foi montado em uma caixa de acrílico, transparente, sobre uma folha de papel-cartão, um pacote de areia seca diferenciada em diversas camadas coloridas de 60 x 30 x 5 cm (comprimento x largura x altura). A folha basal foi previamente cortada, seguindo uma linha levemente curva, a fim de simular o suposto traço da estruturação original da bacia em teste (vide indicação da 'linha de ruptura', na caixa do experimento, da figura 4). Cada metade da folha de papel-cartão foi presa a uma das paredes frontais móveis. Dessa maneira, durante o procedimento de extensão, o movimento das paredes induziu a formação de uma estrutura de abatimento em graben. Com a deformação progressiva, o espaço de acomodação originado foi preenchido com areia, em camadas de cores distintas. Ao final do experimento, soltou-se a folha de papel-cartão da parede móvel II (Fig. 4), que, a partir daí, não participou mais da deformação. Em seguida, sucedeu a inversão tectônica pelo movimento conjunto da parede II com o análogo do Bloco Bação, no sentido oeste e mantendo-se fixa a parede I (Fig. 4). O Bloco Bação foi reproduzido por um artefato rígido, de isopor, com o intuito de simular dois papéis: o comportamento passivo, durante o evento extensional, e o ativo, com embasamento envolvido, na inversão tectônica positiva.

Foi simulada uma extensão de 15%, na direção E-W (de 3,5 cm para oeste e 4,5 cm para leste), e uma compressão de 9% (5,0 cm), com polaridade dirigida para oeste. O modelo foi repetido duas vezes para a confirmação dos resultados.

A tabela 1 apresenta as espessuras das unidades geológicas, utilizadas no presente experimento com um fator escala, λ , de 10^{-5} , e a composição do material analógico. Cristais de mica foram misturados à areia seca, em volumes variáveis, com a finalidade de simular pequenas diferenças na competência do material que representa as unidades supracrustais. Gomes *et al.* (1998) demonstram que a mistura de cristais de mica na areia não causa mudanças significativas na coesão do material. Além disso, introduziram-se horizontes milimétricos de cristais de mica pura entre as camadas de areia, com o objetivo de simular uma anisotropia no interior das

Figura 4 - (A) Desenho da caixa do experimento, com vista em perspectiva de sul para norte. (B) Perfil vertical longitudinal através do centro da caixa. F1 e F2 = folhas de papel-cartão.

seqüências supracrustais do Supergrupo Minas, que na natureza é causada por camadas de xistos e/ou filitos.

Descrição dos resultados A posição dos cortes verticais efetuadas no modelo físico pode ser visualizada na figura 5, que também apresenta a sua localização aproximada em relação ao Sinclinal Moeda. A figura 6 mostra quatro fotografias de seções verticais, tomadas ao término do procedimento experimental, com eixo óptico perpendicular aos cortes no modelo e respectiva interpretação estrutural. Para as outras seções são apresentadas apenas as seções estruturais interpretadas (Fig. 7).

A seção D15 (Figs. 6A e 7), localizada no extremo norte da área simulada, revela feições apenas do primeiro evento deformacional, relacionadas com processos de extensão crustal. Observa-se que o depósito sinrift, originado nesse evento, acomodou-se ao substrato da bacia durante a deformação extensional, formando uma estruturação do tipo *horst and graben*. Na seqüência rift

Tabela 1 - Espessura e composição do material analógico para as três unidades geológicas envolvidas no experimento ($\lambda = 10^{-5}$)

Unidade geológica	Unidade, no modelo	Espessura	Material analógico	Cor
Supergrupo Minas	Seqüência rift	2,8 cm	Areia de quartzo com 50% de mica	Branca e cinza claro
Supergrupo Rio das Velhas	Embasamento da bacia	2,0 cm	Areia de quartzo com 10% de mica	Camadas cinza escuro alternando com camadas pretas
Complexos metamórficos		2,0 cm	Areia de quartzo pura	Camadas cinza claro alternando com camadas pretas

são originadas duas sinformes, configurando uma geometria em 'W'; o resultado foi favorecido pelo deslizamento das camadas de areia sobre os horizontes de cristais de mica. Esse processo simula o mecanismo de deslizamento flexural, proposto por Silva (1999) para a formação do Sinclinal Moeda, por meio da acomodação de camadas previamente depositadas no interior do graben extensional.

Sinais da compressão, superposta à deformação extensional

Figura 5 - (A) Representação em planta do modelo físico, com a localização das 15 seções; (B) mesmo esquema, ampliado e com a numeração dos perfis (D1 a D15). SM - calha do Sinclinal Moeda.

inicial, surgem a partir do perfil D14 (Fig. 7). As falhas normais da borda leste da bacia mostram reativação reversa (vide perfil D13, na figura 6B) com crescente rejeito no sentido sul. A partir da seção D10, a influência do Bloco Bação durante a inversão tectônica, como um *backstop* rígido, começa a aparecer. Nas fotografias das seções D9 e D7 (Figs. 6C e D) se observa que o translado do bloco causou a rotação anti-horária das falhas normais, internas, e espessamento da seção. O perfil D9 (Fig. 6C) mostra a formação de uma nova falha de empurrão (falha 6), que nasce na base do Bloco Bação. Essa falha secciona as estruturas preexistentes no perfil D7 (Fig. 6D), e em todas as seções do domínio frontal-oeste do complexo, gerando uma forte polaridade tectônica no sentido oeste. Emerge na margem oeste da bacia, representando a reativação reversa da falha de borda oeste, a Zona de Cisalhamento Moeda-Bonfim. As seções que simulam o domínio frontal-oeste do Bloco Bação mostram, ainda, a inversão da borda leste da bacia (o flanco leste do Sinclinal Moeda), quando essa é cortada pelo empurrão (falha 6).

Os perfis D4 e D3 (Fig. 7), situados no domínio sul, revelam progressivamente um decréscimo na magnitude da inversão tectônica; a falha de empurrão desaparece e a margem leste da bacia volta a assumir uma posição estratigráfica normal.

Figura 6 - Fotografias do modelo físico e respectivas interpretações estruturais: seções (A) D15, (B) D13, (C) D9 e (D) D7 (localização na figura 5). Nas seções estruturais, o preenchimento sinrifte da bacia é representado por hachura pontilhada, as seqüências supracrustais mais antigas e o embasamento, em branco, e o Bloco Bação (*backstop*, situado à direita), em cinza escuro. Os números representam a ordem de reativação das falhas geradas na segunda etapa de deformação durante a inversão tectônica.

Figura 7 - (A) Seções verticais do modelo físico, digitalizadas a partir de fotografias; o número seis nos perfis indica a posição da falha 6. As seções com fundo cinza claro representam o domínio frontal-oeste do Bloco Bação. (B) Localização dos perfis no centro-sul do Sinclinal Moeda. BBç – Bloco Bação.

Comparação de resultados (seções analógicas versus seções geológicas) A seção analógica D15 (Fig. 6A) se encontra em posição análoga à do perfil geológico, A-A' (Fig. 2), do domínio a noroeste do Complexo Metamórfico Bação. Em ambos, o efeito da inversão tectônica é ainda pouco percebido (Figs. 3 e 6A).

No domínio frontal-oeste do Complexo Metamórfico Bação, as seções analógicas D10 a D6 (Fig. 7) assemelham-se aos perfis geológicos representados nas linhas B-B', C-C' e D-D' (Fig. 3). Revelam encurtamento da bacia e vergência no sentido oeste. A extrusão vertical, descrito no modelo analógico aparece nos domínios central e oeste dos perfis geológicos C-C' e D-D'. No domínio central, a extrusão ocorre na forma de falhas reversas de alto ângulo e, na margem oeste, reativando a falha de borda da bacia. A inversão do flanco leste do Sinclinal Moeda, muito expressiva nos perfis C-C' e D-D', também sucede nas seções do modelo físico.

Zonas de cisalhamento direcionais, cuja formação teria precedido à extrusão vertical no interior da calha sinformal (Silva 1999), foram registradas nos perfis, mas não se formaram no experimento. A ausência dessas zonas no modelo pode ser explicada pela natureza do material analógico empregado no experimento, definido por um comportamento essencialmente rúptil. O escape lateral de material rochoso ocorreu em condições de deformação dúcteis, envolvendo, no cenário natural, até o estiramento de seixos de quartzo.

A MODELAGEM GRÁFICA TRIDIMENSIONAL Procedimento

As fotografias das seções longitudinais do modelo físico foram inicialmente digitalizadas no programa de computador coreldraw, todas rigorosamente na mesma escala. Em seguida foram exportados ao programa GeoSec2D. Neste, o trabalho se iniciou com o georeferenciamento dos perfis, isto é a sua representação em mapa. No programa GeoSec2D, as seções foram novamente digitalizadas e, então, adaptadas às características do programa. No próximo passo, as quinze seções foram exportadas ao programa GeoSec3D no qual gerou-se o modelo gráfico tridimensional, em um cubo. O agrupamento de todos os traços das estruturas e das camadas obteve-se pelo método da triangulação.

Descrição dos resultados As figuras 8A e B apresentam a bacia em 3D, em diferentes perspectivas e com estruturas distintas. O modelo da figura 8A mostra a falha de empurrão (falha 6) emergindo na borda oeste (do sinclinal) e revela a sua extensão lateral limitada. Além disto, mostra uma feição importante: a inversão da borda leste se limita às cotas mais baixas, sendo que a metade superior se encontra em posição estratigráfica normal. Esta é também a feição mais importante do modelo da figura 8B.

DISCUSSÃO Em princípio, a análise do experimento analógico mostra que as principais feições estruturais, o encurtamento da bacia, a inversão da borda leste, a reativação reversa das falhas normais assim como a formação de uma nova falha de empurrão, balizam a tese de Silva (1999) de que o Complexo Metamórfico Bação tenha agido como um *backstop* rígido durante a inversão tectônica, causando a estruturação da região centro-sul do Sinclinal Moeda.

O modelo gráfico tridimensional do experimento físico, no entanto, fornece um cenário mais amplo do modelo, pois permite ressaltar as feições de escala regional. Assim, percebe-se no modelo 3D que o encurtamento e o espessamento da bacia, no domínio frontal-oeste do Bloco Bação, apesar de nítidos no experimento (Figs. 6C e D) constituem feições com poucas implicações

deformacionais na configuração geométrica final da megaestrutura (Figs. 8A e B). A constatação se aplica, também, à inversão da borda leste da bacia (o flanco leste do Sinclinal Moeda).

A análise acima conduz a reflexões sobre a validade do modelo tectônico proposto, inicialmente, e das condições de contorno adotadas para a execução do experimento. Os pontos críticos são: a magnitude de deformação e a extensão areal do Sinclinal Moeda, transportado para o modelo físico.

No experimento, a inversão tectônica foi gerada sob baixa magnitude de deformação (9%), em função dos resultados da análise estrutural quantitativa levada a efeito nos metaconglomerados da Formação Moeda, base do Supergrupo Minas (Silva 1999). Gomes *et al.* (2003) desenvolveram experimentos físicos com uma magnitude de deformação mais elevada (27% de encurtamento), além de empregarem silicone, de comportamento viscoso, para a simulação das unidades supracrustais dos supergrupos Rio das Velhas e Minas (Fig. 9). A deformação das supracrustais em condições

Figura 8 - (A) Modelo gráfico tridimensional, simplificado, do modelo físico, apresentando as falhas normais de borda e a falha de empurrão (falha 6, em branco), com vista em perspectiva, de sul para norte. (B) Detalhe da figura anterior, acrescida de uma falha normal interna e sem a falha 6, vista de leste para oeste. Notar que o Bloco Bação, que não foi tratado na modelagem tridimensional, se encontra sempre do lado direito das figuras.

dúcteis se baseia na premissa de que a temperatura da crosta continental foi mais elevada nos tempos arqueanos/proterozóicos, diminuindo ao longo do tempo (Marshak 1999). Apesar de condições de contorno ligeiramente diferentes, especialmente no que diz respeito à forma original do Sinclinal Moeda, a comparação entre os modelos foi possível. A figura 9 mostra a deformação progressiva e revela que a curvatura do flanco leste do sinclinal também não aparece, naquele modelo, antes de 9% de encurtamento; ela é observada nas fotografias apenas a partir de 18% de deformação. Além disso, a figura 9 exibe um escape lateral das rochas do Supergrupo Rio das Velhas, corroborando a hipótese de Silva (1999) a cerca da deformação transpressiva, imposta aos domínios situados a noroeste e sudoeste do Complexo Metamórfico Bação.

Quanto à extensão areal do Sinclinal Moeda, esta se limitou, no presente experimento, ao domínio centro-sul por representar a área de influência do bloco tectônico que integra o Complexo Metamórfico Bação. No modelo gráfico tridimensional, reconstruído do experimento físico, tornou-se evidente que o Bloco Bação causou apenas uma inversão local no flanco leste do Sinclinal Moeda. Considerando-se, que essa inversão caracteriza toda a sua extensão (Fig. 1B), de norte a sul, percebe-se o papel secundário do Bloco Bação na deformação da cobertura, não podendo ser a ele atribuído a responsabilidade do efeito principal. O mesmo fato se aplica à reativação reversa da Zona de Cisalhamento Moeda-Bonfim, no flanco oeste do sinclinal.

As considerações levantadas mostram que o problema da aparente contradição dos resultados não reside nas condições de contorno adotadas no modelo físico, a magnitude da deformação, mas no modelo tectônico. Assim, propõe-se uma revisão deste modelo. Sugere-se para a formação do Sinclinal Moeda, ao invés de uma extensão acompanhada por um processo de acomodação das camadas do Supergrupo Minas previamente depositadas, em uma dobra por flexão (esforços verticais), um evento distensivo com formação de um graben extensional, o seu preenchimento e posterior dobramento em um evento compressivo. Este evento teria gerado a megaestrutura vergente para oeste, com o flanco leste invertido como também já sugerido por Dorr (1969). Durante a inversão brasileira, o Sinclinal Moeda teria sido afetado por nova deformação envolvendo o traslado para oeste do Complexo Metamórfico Bação.

CONCLUSÃO A discussão acima mostra como a combinação entre as modelagens física e gráfica-digital tridimensional, constitui um teste duplo de coerência do modelo tectônico teórico. A validação do experimento físico pelo modelo 3D diminui o fator subjetividade na interpretação da geometria das estruturas. Impe- de que detalhes estruturais sejam sobrelevados indevidamente, ou o contrário.

No caso da tese de Silva (1999), sobre a região centro-sul do Sinclinal Moeda, o experimento físico apresenta inúmeras feições que permitem confirmar o estrangulamento da megaestrutura, pela ação tectônica do Bloco Bação. A representação gráfica tridimensional do experimento realçou as estruturas verdadeiramente importantes do modelo físico: a deformação do Sinclinal Moeda no seu domínio centro-sul que se restringe à região frontal-oeste do Complexo Metamórfico Bação. Esse fato demonstrou que a tese da influência do Bloco Bação sobre a geometria do flanco leste do Sinclinal Moeda é apenas parcialmente verdadeira. Em adição, conduziu à reavaliação do modelo tectônico e das condições de contorno do experimento físico.

Figura 9 - Fotografias do modelo físico de Gomes et al. (2003), em planta, mostrando a simulação do traslado do Bloco Bação para oeste, com as supracrustais simuladas em condições dúcteis. (A) Modelo antes da deformação, mostrando as principais condições de contorno. (B) Cenários sucessivos de deformação progressiva, até atingir o encurtamento final de 27%. Círculos e elipses mostram o estado da deformação em diversos pontos, na interface superior das supracrustais.

Agradecimentos À FAPEMIG, pelo auxílio financeiro necessário para a realização dos trabalhos de campo e de laboratório, por meio dos projetos de pesquisa CEX 1279/97 e CRA 166/99. Agradecimentos especiais ao colega Wilson J. Guerra, coordenador do

Projeto Multicliente / Fundação Gorceix, que tornou possível a doação dos *softwares* GeoSec2D e 3D ao Departamento de Geologia da Universidade Federal de Ouro Preto, pela Paradigm Geophysical.

Referências

- Alkmim F.F. & Marshak S. 1998. Transamazonian Orogeny in the Southern São Francisco Craton Region, Minas Gerais, Brazil: evidence for Paleoproterozoic collision and collapse in the Quadrilátero Ferrífero. *Precamb. Res.*, **90**:29-58.
- Braga S.C.M., Gomes C.J.S., Barbosa M.S.C., Danderfer Filho A. 2005. A modelagem estrutural de dois perfis geológicos no Sinclinal Moeda, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. *Rev. Bras. Geol.* (submetido).
- Byrne D.E., Wang W., Davis M. 1993. Mechanical role of backstops in the growth of forearcs. *Tectonics*, **12**:123-144.
- Chemale Jr. F., Rosière C.A., Endo I. 1994. The tectonic evolution of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. *Prec. Res.*, **65**:25-64.
- Dorr J.V.N. 1969. Physiographic, stratigraphic and structural development of the Quadrilátero Ferrífero, Brazil. Washington, *USGS Prof. Paper*, **641**(A), 110p.
- Endo I. 1997. *Regimes tectônicos do Arqueano e Proterozóico no interior da Placa Sanfranciscana: Quadrilátero Ferrífero e áreas adjacentes, MG, Brasil*. Tese de Doutorado, IG/USP, p.221.
- Endo I. & Nalini H. 1992. Geometria e cinemática das estruturas extensionais e compressionais na borda oeste do Sinclinal Moeda, QF. In: SBG, Simp. Geol. Minas Gerais, 6, Anais, p.15-17.
- Ebert H.D. & Hasui Y. 1998. Transpressional tectonics and strain partitioning during oblique collision between three plates in the Precambrian of southeast Brazil. In: R.E. Holdsworth, R.A. Strachan, J.F. Dewey (eds) *Continental Transpressional and Transtensional Tectonics*. Geological Society, London, Special Publications, **135**: 231-252.
- Gomes C.J.S. 1996. A inversão tectônica nas Bacias Serra do Curral e Serra da Moeda, no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais - modelos físicos. *Rev. Esc. Minas*, **49**:52-59.
- Gomes, C. J. S., Vieira, J. F., Seabra Gomes, A.A. 1998. O ângulo de atrito interno da areia e de misturas de areia. In: SBG, Congr. Bras. Geol., **40**, *Bol. Resumos Expandidos*, p. 410.
- Gomes C.J.S., Braga S.C., Silva R.G., Candido A., Ferreira A., Avelar A., Correa E., Lemo G., Oliveira E., Oliveira H., Loutfi I., Fuccio J., Cota M., Jeronymo M., Benedito M.G., Toffolo R. 2003. A deformação do Sinclinal Moeda – novos dados estruturais. In: SBG, Simp. Geol. Minas Gerais, 12, Anais (*meio digital*).
- Hashizume B. K. 1998. *Texturas e microestruturas do minério de ferro da Mina de Brucutu, NE do Sinclinal de Gandarela (MG)*. Dissertação de Mestrado, IG/UFMG, 133 p.
- Hippert J.F., Borba R.P., Nalini H.A Jr. 1992. O contato Formação Moeda-Complexo Bonfim: Uma zona de cisalhamento normal na borda oeste do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. *Rev. Esc. Minas*, **45**:32-34.
- Hubbert M.K. 1937. Theory of scale models as applied to the study of geologic structures. *Bull. Geol. Soc. Am.*, **48**:1459-1520.
- Lindenbeck Ch., Ulmer H., Ebert H.D. 1997. Geometric modeling and visualization of a sandbox-experiment: Transpressional tectonics in the Precambrian Ribeira Belt (SE Brazil). *Zbl. Geol. Paläont.* **1**:707-719.
- Marshak S. & Alkmim F.F. 1989. Proterozoic Contraction/Extension Tectonics of the Southern São Francisco Region, Minas Gerais, Brazil. *Tectonics*, **8**:555-571.
- Marshak S. 1999. Deformation style way back when: thoughts on the contrast between Archean/Paleoproterozoic and contemporary orogens. *J. Struct. Geol.*, **21**:1175-1182.
- Ramberg H. & Sjöström H. 1973. Experimental geodynamical models relating to continental drift and orogenesis. In: E. Irving (ed.) *Mechanisms of Plate Tectonics*. *Tectonophys.*, **19**:105-132.
- Renger F.E., Noce C.M., Romano A.W., Machado N. 1994. Evolução sedimentar do Supergrupo Minas: 500Ma de registro geológico no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil. *Geonomos*, **2**:1-11.
- Silva R.G. 1999. *Análise Estrutural e Modelagem Tectônica da região centro-sul do Sinclinal da Moeda, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais*. Dissertação de Mestrado, UFOP, 154 p.
- Silva R.G. & Gomes C.J.S. 2001. Análise da deformação na porção centro-sul do Sinclinal Moeda, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. *Geo.br* **1**:1-23. <http://www.degeo.ufop.br/geobr>

Manuscrito A-1524

Recebido em 20 de maio de 2004

Revisão dos autores em 13 de setembro de 2005

Revisão aceita em 20 de setembro de 2005