

MODELOS FÍSICOS DE SISTEMAS POLIFÁSICOS: ENCURTAMENTO FRONTAL E CONVERGÊNCIA OBLÍQUA

CAROLINE JANETTE SOUZA GOMES, SILVIA CAROLINA BRAGA¹ & MARIA VERÔNICA PESSÔA¹

Abstract *PHYSICAL MODELS OF POLYPHASE DEFORMATION: FRONTAL SHORTENING FOLLOWED BY OBLIQUE CONVERGENCE* Sandbox experiments were carried out to analyze overprinting on structures in transpressional thrust systems. Two-phase deformation models were set up to investigate simple transpression at different angles of convergence, basal velocity discontinuities, and increasing of deformation magnitude. In these models positive flower structures were not formed. Instead, pop-up systems with fore- and backthrusts were developed. Reactivation of pre-existing thrusts occurred in the foreland of the velocity discontinuity. High angle thrust systems, such as those described in several polideformed terranes, were formed in the high deformation experiment and in the models with a short basal discontinuity which simulates the axial zone of contractional systems. In these models, fore- and backthrusts rotated progressively into the vertical.

Keywords: physical models, transpression, polyphase deformation, positive flower structure, pop-up system.

Resumo Em modelos físicos de areia é analisada a reativação, por transpressão, de cinturões convergentes. Os sistemas polideformados foram investigados sob diferentes condições de contorno: a transpressão sobrepondo-se a estruturas compressivas, com diferentes ângulos de convergência; com variadas formas da descontinuidade basal de velocidade; e com o aumento da magnitude de deformação. Constatou-se que estruturas em flor positiva não se desenvolvem em sistemas polideformados (compressivo/transpressivo). Nestes, se formam estruturas em *pop-up*, constituídas por empurrões e retroempurrões. Foi possível demonstrar que as estruturas transpressivas reaproveitam a trajetória dos cavalgamentos mais antigos situados no antepaís da descontinuidade basal. Sistemas de empurrões verticalizados, como os que caracterizam a convergência oblíqua em muitos terrenos polideformados, se desenvolvem, nos experimentos, por rotação progressiva das falhas que compõem o sistema em *pop-up*. Sob baixa magnitude de deformação, ocorre rotação à vertical das falhas quando um *backstop* rígido interfere na deformação.

Palavras-chave: modelos físicos, transpressão, sistemas polifásicos, estrutura em flor positiva, estrutura em *pop-up*.

INTRODUÇÃO A deformação transpressiva é descrita no mundo inteiro em cinturões direcionais simples ou polideformados. Estruturas em flor positiva (Harding 1974) representam as feições mais evidentes da transpressão, em sistemas simples, e foram inicialmente reconhecidas em seções sísmicas. No campo, lineações oblíquas em falhas transcorrentes ou de empurrão sugerem movimentos simultaneamente direcionais e compressivos. Investigações detalhadas sobre as estruturas transpressivas são encontradas em Wilcox *et al.* (1973), Sylvester & Smith (1976), Bürgmann (1991), Dooley & McClay (1996) e Ebert & Hasui (1998), dentre outros.

Existe hoje farto material bibliográfico sobre o modelamento numérico de zonas transpressivas simples (monofásicas) (Sanderson & Marchini 1984, Fossen & Tikoff 1993, Fossen *et al.* 1994, Robin & Cruden 1994, Dutton 1997, Jones *et al.* 1997, Passchier 1998, Teyssier & Tikoff 1999 etc.) que versam sobre as quase infinitas possibilidades da deformação, no espaço, e da cinemática envolvida. Produzem resultados a partir da variação sistemática de parâmetros preestabelecidos e conseguem prever a atitude das estruturas planares e lineares de zonas de cisalhamento. Modelos analógicos de estruturas transpressivas também foram apresentados em grande número (Wilcox *et al.* 1973, Naylor *et al.* 1986, Richard 1991, Richard *et al.* 1991, Pinet & Cobbold 1992, Haq & Davis 1997, Keller *et al.* 1997, Tikoff & Peterson 1998, Casas *et al.* 2001). Ilustram a deformação, em 2 e 3D, e buscam a confirmação de modelos tectônicos teóricos ou a caracterização de estruturas previamente desconhecidas.

Terrenos polideformados com feições compressivas/trans-

pressivas são descritos de inúmeros cinturões orogênicos como, por exemplo, da Faixa Ribeira, sudeste do Brasil, por Hackspacher (1994); do Cinturão Varístico, do oeste da Europa, por Dias & Ribeiro (1995) e Onézime *et al.* (2002); dos sistemas Santa Teresa e Rio Maranhão, um cinturão de dobras e falhas na porção Setentrional da Faixa Brasília, por Fonseca *et al.* (1995); do Sistema Seridó, na Província Borborema, por Hackspacher *et al.* (1997); e da Península de Eyre, sul da Austrália, por Vassallo & Wilson (2002). Ao contrário do que se registra na literatura sobre a modelagem física analógica de duas fases de deformação envolvendo os processos da inversão tectônica, inexistem referências sobre simulações de sistemas polideformados, causados por campos de tensões similares, do tipo compressão/transpressão. Nestes sistemas é difícil discernir entre as estruturas da primeira e da segunda fase, isto é reconhecer as falhas novas das reativadas e, assim, estabelecer a história geológica. Na natureza, análises macro e microestruturais das falhas auxiliam nas interpretações, mas, apesar disto, perfis geológico-estruturais de sistemas polideformados são comumente substituídos por *cartoons* esquemáticos.

No presente estudo, modelos físicos foram empregados para a análise da transpressão superposta a sistemas compressivos preexistentes, com o objetivo de melhor compreender a evolução da deformação em terrenos polideformados. Uma superfície de discordância foi gerada nos experimentos, entre as duas fases de deformação, constituindo a chave para o discernimento entre as estruturas do sistema polifásico. O estudo ilustra por meio de experimentos físicos a superposição, compressão + transpressão, e discute a influência de variáveis do tipo: ângulo de convergên-

1 - Bolsistas de Iniciação Científica (PIBIC/CNPq/UFOP). Departamento de Geologia, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Morro do Cruzeiro, s/n. 35.400-000 Ouro Preto – MG - E-mails: caroline@degeo.ufop.br., silviabraga@hotmail.com.br, kinha7@mailbr.com.br. Tel: (31) 3559 1600

cia, geometria da descontinuidade basal de velocidade e magnitude da deformação. Pretende-se, com este trabalho de modelagem experimental, contribuir ao conhecimento dos mecanismos de deformação em terrenos polideformados, cuja análise convencional se baseia em hipóteses geológicas, regras empíricas e conceitos teóricos.

PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL A modelagem física analógica fundamenta-se na teoria da similaridade, que permite a comparação entre a estrutura geológica e o experimento. Provem da Análise Dimensional, desenvolvida no início do século vinte, e adaptada às Geociências por Hubbert (1937). Atualmente, incontáveis pesquisas geológicas balizam as suas conclusões em simulações físicas o que demonstra a sua validade como instrumento de pesquisa científica (McClay 1990, Allemand & Brun 1991, Tron & Brun 1991, Huiqi *et al.* 1992, Higgins & Harris 1997, Nalpas *et al.* 1995, Brun & Nalpas 1996, Cotton & Koyi 2000 etc.).

Em estudos clássicos de modelagem física analógica, Vendeville *et al.* (1987) e McClay & Ellis (1987) entre outros, demonstram a utilidade da areia seca como material analógico rúptil, para simular a crosta superior. A areia de quartzo rompe de acordo com o critério de Coulomb-Mohr, independe da taxa de deformação e possui baixa coesão e ângulo de atrito interno em torno de 30°.

As modelagens de presente trabalho foram efetuadas no Laboratório de Modelagem Tectônica do Departamento de Geologia, em caixas de experimentos, de dimensões centimétricas. As caixas têm uma das quatro paredes laterais, móvel, e esta, acoplada ao motor elétrico do aparelho de deformação, gera a deformação nos experimentos, a uma velocidade constante de 2,0 cm/h. Como material analógico utilizou-se areia de quartzo, seca e peneirada na faixa granulométrica de 200 mm a 300 mm. A areia foi posteriormente tingida com acrílex em um procedimento rotineiro no Laboratório de Modelagem Tectônica. Os modelos, montados com camadas coloridas, permitem a visualização da deformação.

O fator escala utilizado no presente trabalho foi o normalmente empregado em modelos físicos analógicos. Utilizou-se $1 = 0,5 \times 10^{-5}$ (1:200.000), de modo que o pacote de material analógico nos experimentos, de 3 cm de espessura, representa 6 km de crosta rúptil.

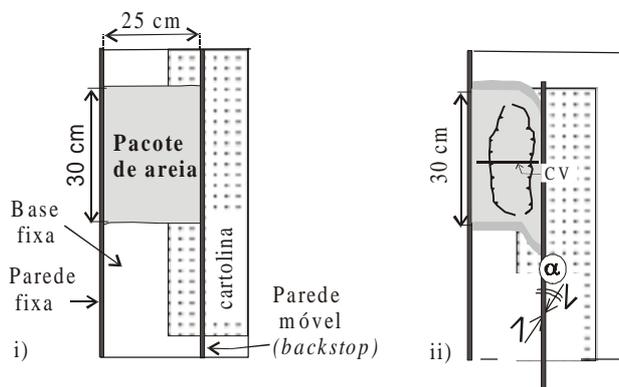


Figura 1 - Desenhos esquemáticos, em planta, da caixa do modelo Transpressão Simples, i) o modelo antes da deformação e ii) após a transpressão. As setas indicam o sentido do movimento transpressivo, e, α , o ângulo de convergência. CV – corte vertical executado no experimento, ao final da deformação.

Foram desenvolvidas três seqüências de modelos. A primeira, simulou uma única fase de deformação transpressiva (Fig. 1) e visava mostrar as estruturas em cinturões monocíclicos, sob diferentes ângulos de convergência. Serviu de comparação aos modelos mais complexos, de duas fases de deformação. Nas duas outras seqüências (Fig. 2), a transpressão se sobrepõe a um sistema compressivo. Vários ângulos de convergência foram simulados na segunda seqüência, todos com o mesmo deslocamento oblíquo, de 10 cm. Na terceira seqüência testaram-se variações no comprimento e na altura da descontinuidade basal de velocidade assim como um aumento na magnitude da deformação. A descontinuidade, na base do modelo, representa o segmento crustal causador da transpressão, que, quando curto, simulava a condição de uma zona axial de cinturões convergentes oblíquos e, quando espesso, uma transpressão induzida por um bloco alto do embasamento.

Os experimentos são denominados, na ordem acima, de Transpressão Simples (modelos TRP-S), Transpressão sobre Compressão (modelos TRP-TC) e Transpressão sobre Compressão –

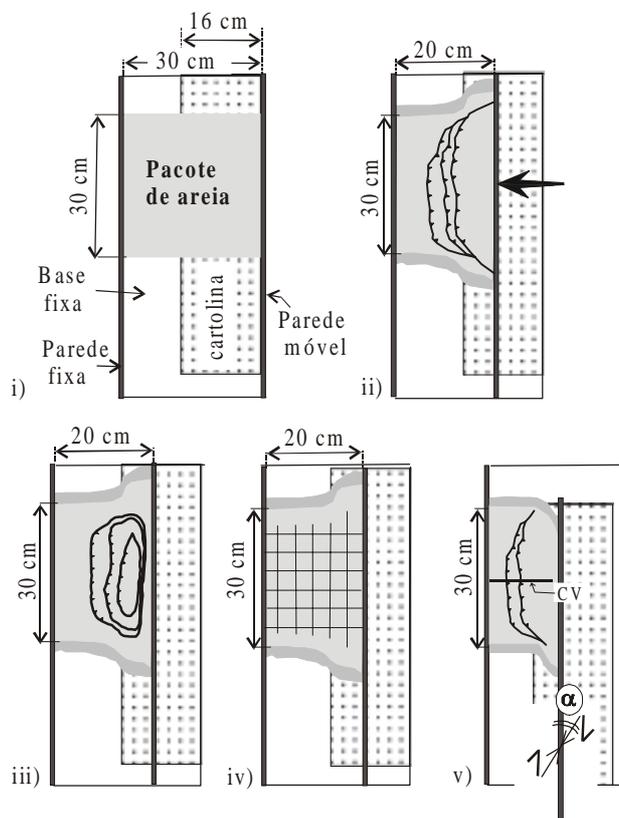


Figura 2 - Desenhos esquemáticos, em planta, da caixa dos modelos Transpressão sobre Compressão e Transpressão sobre Compressão – Modelos Adicionais, i) o modelo antes da deformação, ii) o modelo após compressão (a primeira fase de deformação), iii) mesma situação de ii) após a erosão do relevo, iv) mesma situação de iii) após a deposição do pacote II, mostrando a malha quadrada, desenhada sobre a superfície de topo do modelo, v) o modelo após transpressão (a segunda fase de deformação). Em ii) a seta indica a direção do movimento compressivo, e, em v) as setas duplas, o sentido do movimento transpressivo e α o ângulo de convergência. CV – corte vertical executado no experimento, ao final da deformação.

Modelos Adicionais (modelos TRP-TC-A).

Utilizou-se em todos os experimentos um pacote de areia de 4 cm de altura e 30 cm de comprimento; a largura era de 25 cm. Na primeira seqüência, que simulou uma única fase deformacional, de 30 cm, na segunda seqüência, de duas fases. Conforme mostram as figuras 1 e 2, os modelos eram abertos nas laterais e fechados por uma parede fixa e outra móvel (o *backstop*), nas regiões c/ antepaís e pós-país, respectivamente. Metade do pacote de areia foi montada sobre uma folha de cartolina rígida, de 2 mm de espessura (e sobre uma placa de isopor, de 0,5 cm de altura, nos modelos TRP-TC-A). Na primeira fase, de deformação compressiva, a folha de cartolina (placa de isopor) era mantida fixa, sobre a base da caixa de experimento, e não entrava no processo deformacional. Presa à parede móvel da caixa, na segunda fase, a cartolina transmitia o movimento oblíquo, dextral, à segunda metade do pacote de areia, agindo, desta forma, como uma descontinuidade basal de velocidade.

Ao final da deformação, os experimentos foram umedecidos com água, e, cortados e fotografados ao longo de seções normais ao domínio transpressivo. Todos os perfis apresentados, em presente trabalho, representam cortes verticais efetuados no centro dos modelos. Para a verificação dos resultados os experimentos foram repetidos pelo menos duas vezes.

Na seqüência *Transpressão Simples* (modelos TRP-S) o bloco móvel foi deslocado obliquamente, num total de 6 cm (Fig. 1). Efetuaram-se cinco modelos com diferentes ângulos de convergência ($\alpha = 15^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 35^\circ$ e 60°), doravante denominados TRP-S15, TRP-S20, TRP-S30, TRP-S35 e TRP-S60. Nestes experimentos, o movimento lateral foi monitorado por meio de uma malha quadrada, desenhada sobre a superfície de topo do modelo.

Nos modelos de *Transpressão sobre Compressão*, da segunda seqüência de experimentos, o deslocamento do bloco móvel foi de 10 cm em ambas as fases deformacionais, de encurtamento e de transpressão (Fig. 2). Foram realizados cinco modelos com diferentes ângulos de convergência, de 10° (não apresentado), $15^\circ, 30^\circ, 60^\circ$ e 90° (modelos TRP-TC15, TRP-TC30, TRP-TC60 e TRP-TC90). Para a distinção entre as estruturas compressivas e transpressivas simulou-se, entre as duas fases de deformação, uma superfície de discordância, no pacote I. Gerou-se a erosão do relevo estrutural por meio de um aspirador de pó, que nivelou o modelo de areia, em 3 cm de altura (a altura original do experimento). Sobre a superfície de erosão depositou-se uma nova unidade litológica (o pacote II, Fig. 3), cuja função era registrar as estruturas ativas na fase 2, de transpressão.

Foram desenvolvidos quatro experimentos na seqüência *transpressão sobre compressão – modelos adicionais* (modelos TRP-TC-A). Os modelos TRP-TC-A1, A2 e A3 repetiram o modelo TRP-TC60°, com variações na geometria da descontinuidade basal. Em TRP-TC-A1, esta descontinuidade era curta, de 2 cm de largura, e fina (de 0,2 cm), em TRP-TC-A2, curta e espessa (com 1,0 cm de altura), e, em TRP-TC-A3, longa (de 6 cm) e espessa. Nos experimentos TRP-TC-A2 e A3, introduziu-se um novo pacote de areia, o pacote III, de 1,0 cm de espessura, para compensar o degraú no embasamento (Figs. 7B e 7C). O experimento TRP-TC-A4 repetiu o modelo TRP-TC30 com uma transpressão de magnitude mais elevada do que aquela do modelo original (de 16 cm ao invés de 10 cm, ou 39% ao invés de 24% de encurtamento, calculado para a componente compressiva do movimento oblíquo, com $\alpha = 30^\circ$).

DESCRIÇÃO DOS EXPERIMENTOS A seqüência ‘Transpressão Simples’ (modelos TRP-S) Todos os modelos

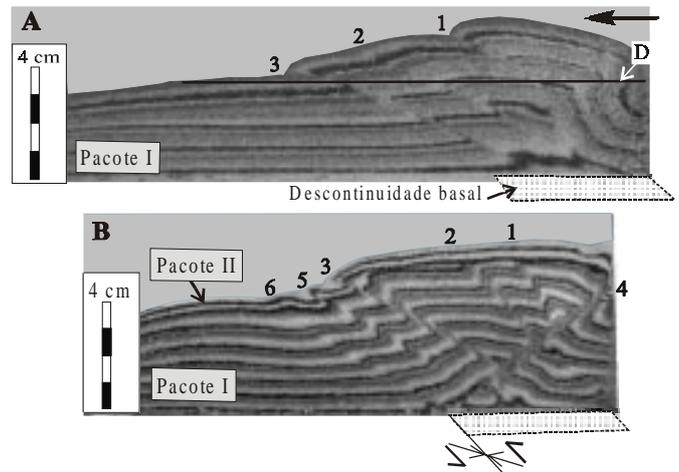


Figura 3 - Fotografias de dois perfis de um dos modelos da Transpressão sobre Compressão para a ilustração da metodologia de trabalho. A) Perfil mostrando a deformação após a fase 1, compressiva, a qual produziu três empurrões no pacote I; a linha horizontal (D) indica a posição na qual será gerada a superfície de discordância, por erosão do relevo (na próxima etapa de trabalho) e a seta o sentido da compressão. Os números fornecem a ordem de formação das falhas. B) Perfil da deformação final, após a erosão do relevo, a deposição do segundo pacote de areia (pacote II) e a transpressão. As setas duplas, em planta, mostram o sentido do movimento transpressivo. Observar que, este perfil permite definir a evolução das falhas. Os empurrões 3, 4, 5 e 6 cortam o pacote II, mais novo, enquanto que as falhas 1 e 2 não o cortam. Como a falha 3 foi gerada na fase 1, esta caracteriza uma reativação.

TRP-S geraram durante a transpressão uma ascensão oblíqua do material analógico, ao longo da descontinuidade basal (da falha preexistente). A ascensão do material cresceu, progressivamente, em altura e largura, com o aumento do ângulo de convergência do modelo.

A figura 4 mostra os experimentos em perfil e nota-se que todas as falhas se nucleam na borda da descontinuidade basal (falhas 1, 2 e 3). Além disto, registra-se, nos experimentos TRP-S15 e TRP-S20 (Figs. 4A e B), estruturas com geometria diferente daquelas formadas nos modelos TRP-S30, TRP-S35 e TRP-S60. O modelo TRP-S15 apresenta duas falhas de alto ângulo de mergulho, transcorrências com movimento oblíquo, e, o conjunto, constitui uma típica estrutura em flor positiva. A mesma estrutura se formou no experimento TRP-S20 que, no entanto, já exibe uma leve vergência no sentido do bloco móvel (a falha 1).

Os modelos TRP-S30, TRP-S35 e TRP-S60 caracterizam uma estrutura em *pop-up*, assimétrica, formada por empurrão e retroempurrão, com vergência contrária ao sentido do encurtamento. Todos os empurrões sobem ao longo do único retroempurrão formado e revelam, com o aumento do ângulo de convergência, crescente rejeito.

Fraturas Riedel são observadas nos experimentos de baixo ângulo α (modelos TRP-S15, 20 e 30) (Fig. 5) que se manifestam, no entanto, apenas na superfície dos modelos e que desaparecem por completo no experimento TRP-S60, de alto ângulo α .

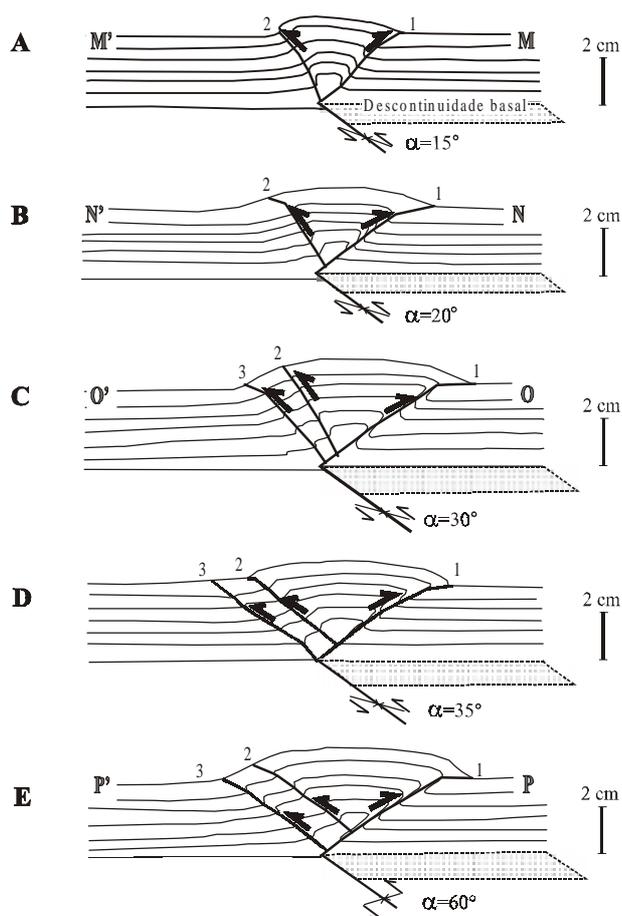


Figura 4 - Os modelos da Transpressão Simples, em perfil. (A) Modelo TRP-S15; (B) Modelo TRP-S20; (C) Modelo TRP-S30; (D) Modelo TRP-S35; e (E) Modelo TRP-S60. O bloco em movimento é o do lado direito. Os números, nas figuras, indicam a ordem de formação das falhas; as setas, no plano horizontal, o sentido do movimento e α o ângulo de convergência. As letras N'N, M'M, O'O e P'P permitem localizar cada perfil nos respectivos, modelos, em planta, da figura 5.

A seqüência 'Transpressão sobre Compressão' (modelos TRP-TC) As seções longitudinais da seqüência TRP-TC são apresentadas na figura 6. Observa-se que os quatro modelos são muito parecidos entre si. Formaram-se estruturas em *pop-up* constituídas por retroempurrões e empurrões que, da mesma forma como na seqüência anterior, se nucleam na terminação da descontinuidade basal. Em nenhum modelo aparece uma estrutura em flor positiva.

Em todos os modelos, o empurrão 3 ocorre como a única falha reativada. Trata-se do empurrão mais novo, da primeira etapa de deformação, que se formou no antepaís da descontinuidade basal. As duas outras falhas (falhas 1 e 2), posicionadas em cima da descontinuidade, foram cortadas pelo retroempurrão mais novo e empurradas em direção ao *backstop*. Durante a ascensão, estas falhas sofreram rotação horária e conseqüente aumento no seu ângulo de mergulho.

No modelo TRP-TC15 (Fig. 6A) a deformação, de caráter fortemente direcional, é acomodada sobre falhas de empurrão e

sobre uma fratura subvertical de movimentação oblíqua, do tipo Riedel. No modelo TRP-TC30, fraturas Riedel se manifestam em geral apenas na superfície dos experimentos e desaparecem por completo nos modelos de $\alpha \geq 60^\circ$.

Até o modelo TRP-TC30 (Fig. 6B) nenhuma nova falha de empurrão se formou durante a etapa 2, de transpressão. Estas falhas aparecem apenas nos experimentos TRP-TC60 (falhas 5 e 6) (Fig. 6C) e TRP-TC90 (falhas 5, 6 e 7) (Fig. 6D). É interessante notar que, da mesma forma como na seqüência anterior, todas as falhas de empurrão (de ambas as etapas de deformação) sobem ao longo do único retroempurrão formado. Também, neste experimento, o rejeito das falhas, assim como a ascensão do domínio transpressivo, crescem com o aumento do ângulo de convergência.

A seqüência 'Transpressão sobre Compressão - Modelos Adicio-

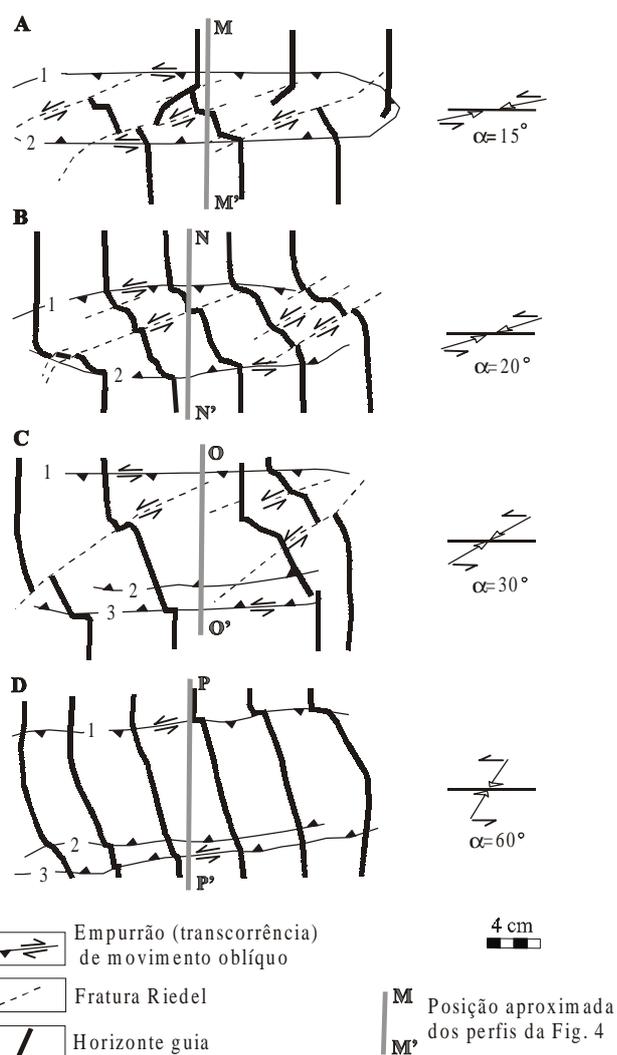


Figura 5 - Os experimentos da Transpressão Simples, em planta, mostrando os traços das falhas de empurrão de movimento oblíquo (transcorrências) e das fraturas Riedel. (A) Modelo TRP-S15; (B) Modelo TRP-S20; (C) Modelo TRP-S30; e (D) Modelo TRP-S60. Os números indicam a ordem de formação das falhas. Os esquemas, na lateral, fornecem para cada modelo, o sentido do movimento e o ângulo de convergência α .

nais' (modelos TRP-TC-A) EXPERIMENTO COM DESCONTINUIDADE BASAL CURTA E FINA (2,0 X 0,2 CM), $\alpha = 60^\circ$ (MODELO TRP-TC-A1) A figura 7A apresenta o perfil do modelo TRP-TC-A1. Observa-se, neste experimento, que, quando a descontinuidade basal é curta, o *backstop* (a parede móvel da caixa de experimentos) interfere no desenvolvimento da deformação. Causa, no pós-país do sistema compressivo, a rotação no sentido anti-horário da falha 4 e conseqüente geração de mais dois retroempurrões (falhas 5 e 6). Estes também são rotacionados adquirindo alto ângulo de mergulho. Em todos os experimentos

anteriores, o baixo ângulo de mergulho do retroempurrão conduzia à ascensão das falhas de empurrão no sentido oposto ao transporte tectônico. Neste modelo, o alto ângulo de mergulho do retroempurrão (falha 4) causou o inverso, a subida dos retroempurrões sobre os empurrões da primeira etapa de deformação: as falhas 1, 4 e 5 sobem sobre os empurrões 2 e 3. A comparação entre as figuras 6C e 7A revela, no entanto, que, apesar de acomodar a deformação de forma distinta, os dois modelos não diferem nem no número de falhas de empurrão aflorantes nem nas dimensões (altura e largura) do domínio deformado.

No modelo TRP-TC-A1 observa-se, ainda, a reativação da falha 2, durante a etapa de transpressão, que foi parcialmente empurrada sobre a falha 3.

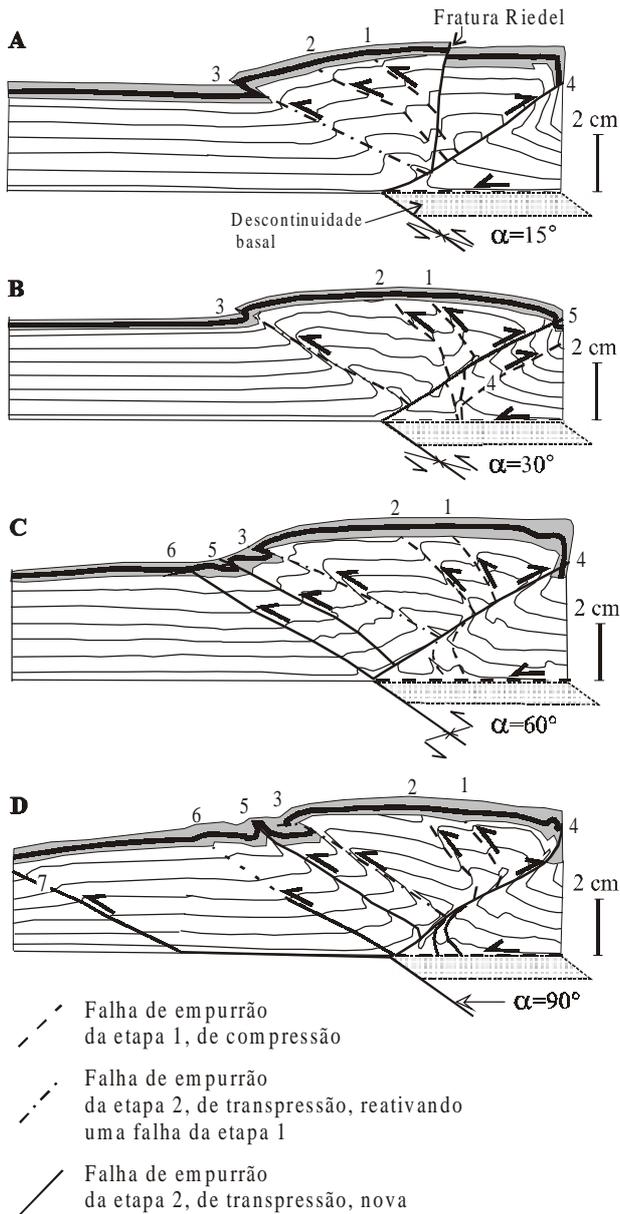


Figura 6 - Os modelos da 'Transpressão sobre Compressão, em perfil. (A) Modelo TRP-TC15; (B) Modelo TRP-TC30; (C) Modelo TRP-TC60; e (D) Modelo TRP-TC90. O bloco em movimento é o do lado direito. Os números, nas figuras, indicam a ordem de formação das falhas; as setas, no plano horizontal, o sentido do movimento e α o ângulo de convergência.

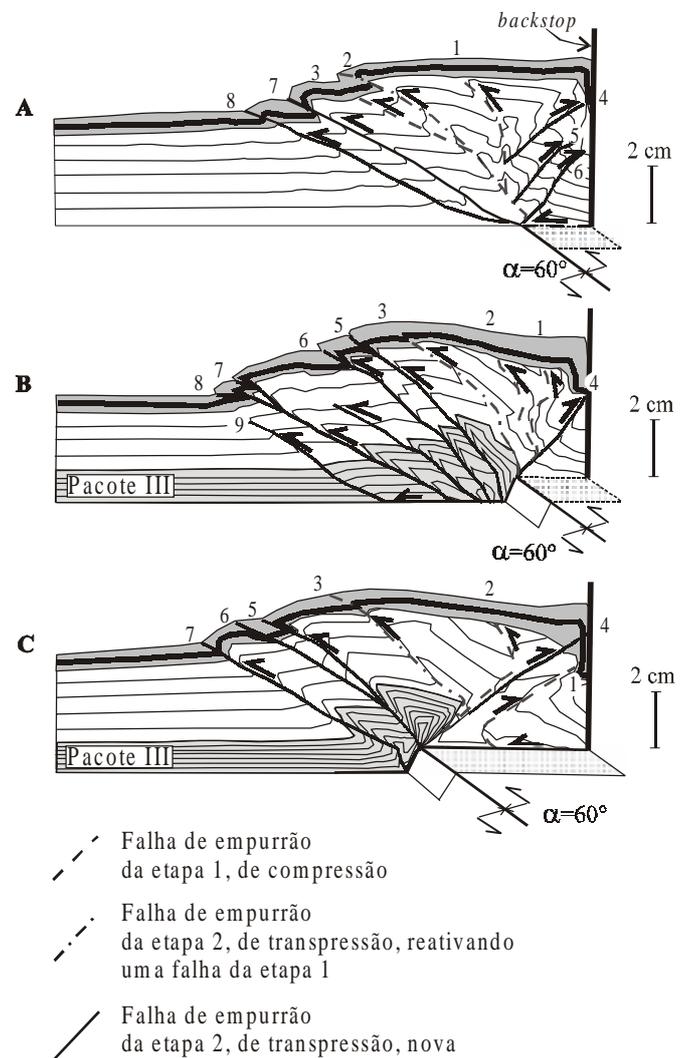


Figura 7 - Os modelos da 'Transpressão sobre Compressão - Modelos Adicionais, em perfil. (A) Modelo TRP-TC-A4, com descontinuidade basal curta e fina (2,0 x 0,2 cm); (B) Modelo TRP-TC-A2, com descontinuidade basal curta e em degrau (2,0 x 1,0 cm); e (C) Modelo TRP-TC-A3, com descontinuidade basal larga e em degrau (6,0 x 1,0 cm). O bloco em movimento é o do lado direito. Os números, nas figuras, indicam a ordem de formação das falhas; as setas, no plano horizontal, o sentido do movimento e α o ângulo de convergência.

EXPERIMENTO COM DESCONTINUIDADE BASAL CURTA E EM DEGRAU (2,0 x 1,0 cm), $\alpha = 60^\circ$ (MODELO TRP-TC-A2) A deformação no experimento TRP-TC-A2 (Fig. 7B) é diferente daquela descrita no modelo anterior (experimento TRP-TC-A1) mas se assemelha novamente à dos modelos TRP-S e TRP-TC. O degrau, na descontinuidade basal curta, age como um *indenter*. Causa a formação de um retroempurrão (falha 4), e, apesar do alto ângulo de mergulho deste, a ascensão dos empurrões 1, 2 e 3 sobre o mesmo. Observa-se, além disto, a reativação da falha 3 e a geração de cinco novos empurrões (falhas 5 a 9).

EXPERIMENTO COM DESCONTINUIDADE BASAL LARGA E EM DEGRAU (2,0 x 1,0 cm), $\alpha = 60^\circ$ (MODELO TRP-TC-A3) Este modelo (Fig. 7C) mostra feições parecidas com as dos modelos TRP-TC30, 60 e 90 (modelos com a descontinuidade basal larga e fina) (Figs. 6B, C e D). Tem-se, a reativação da falha mais nova, da fase 1, de compressão (a falha 3), a ascensão das falhas de empurrão 2 e 3 sobre o retroempurrão (falha 4), da etapa transpressiva, e a formação de uma estrutura *pop-up*. A diferença entre este experimento e o modelo TRP-TC60 (sem degrau) (Fig. 6C) consiste no ângulo de mergulho mais alto das falhas 2 e 3 e no número maior de falhas de empurrão geradas na etapa de transpressão.

EXPERIMENTO COM DESCONTINUIDADE BASAL LARGA E FINA (6,0 x 0,2 cm) E ALTA MAGNITUDE DE DEFORMAÇÃO; $\alpha = 30^\circ$ (MODELO TRP-TC-A4) A comparação entre os experimentos TRP-TC30 (Fig. 6B) e TRP-TC-A4 (Fig. 8), de 10 cm e de 16 cm de deformação na segunda etapa, respectivamente, revela uma grande diferença no encurtamento do domínio transpressivo. O maior espessamento, no modelo TRP-TC-A4, foi causado por forte rotação à vertical das falhas assim como por um deslocamento significativo dos empurrões 1, 2 e 3 sobre o retroempurrão (falha 5). Além disto, se desenvolveram mais um retrocavalgamento (falha 6) e duas novas falhas de empurrão (falhas 7 e 8), inexistentes no modelo TRP-TC30.

DISCUSSÃO E CONCLUSÃO Os experimentos físicos desenvolvidos em presente trabalho mostram que a transpressão gera estruturas em flor positiva (falhas reversas, subverticais, com movimentação oblíqua) apenas nos modelos de uma única fase de deformação, e, entre estes, somente nos modelos de baixo ângulo de convergência ($\alpha = 15^\circ$ e $\alpha = 20^\circ$). Este fato já foi demonstrado por Casas *et al.* (2001), que simularam sistemas transpressivos utilizando silicone, de comportamento viscoso, sob as camadas de areia. Os autores demonstraram que as estruturas em flor positiva se formam quando $\alpha \leq 20^\circ$, o domínio da transpressão dominada por cisalhamento simples, e estruturas em *pop-up*, quando $\alpha > 20^\circ$, o domínio da transpressão dominada por cisalhamento puro (Fossen & Tikoff 1993, Fossen *et al.* 1994).

Em sistemas estruturais polifásicos, os modelos revelaram que a transpressão, quando deforma um sistema de estruturas compressivas, preexistente, gera estruturas em *pop-up*, constituídas por falhas de empurrão e retroempurrão. Além disto, os modelos demonstraram que a descontinuidade basal de velocidade (o segmento crustal que produz a transpressão), exerce forte influência sobre a reativação das estruturas mais antigas. Este fato acontece porque, no modelo, a descontinuidade basal age como um *indenter*. Assim, apenas os empurrões situados no antepaís da descontinuidade basal sofrem reativação enquanto que as falhas situadas sobre a mesma são deformadas. Neste domínio, retrocavalgamentos (um ou mais) controlam a deformação:

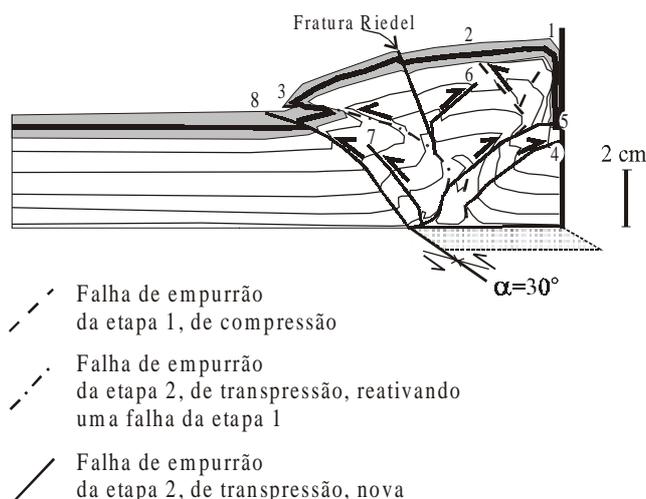


Figura 8 - O Modelo TRP-TC-A4, com descontinuidade basal larga e fina (6,0 x 0,2 cm) e alta magnitude de deformação, $\alpha = 30^\circ$; em perfil. O bloco em movimento é do lado direito. Os números indicam a ordem de formação das falhas; as setas, no plano horizontal, o sentido do movimento e α o ângulo de convergência.

as falhas mais antigas são cortadas e empurradas no sentido contrário à polaridade tectônica. Durante a deformação transpressiva, o aumento no ângulo de convergência e as variações na geometria da descontinuidade basal não produzem mudanças expressivas no conjunto das estruturas (sob mesmas condições de magnitude de deformação). Alteram, no antepaís, o número de empurrões, e, no pós-país, a magnitude do rejeito das falhas mais antigas e, em pequeno grau, o ângulo de rotação das estruturas. Ambos os fatores conduzem ao aumento em largura e altura do domínio transpressivo.

A análise dos modelos da seqüência 'Transpressão sobre Compressão - Modelos Adicionais' permite sugerir que a deformação progressiva constitui a principal causa do elevado ângulo de mergulho das falhas, em sistemas polideformados do tipo compressão + transpressão. Somente os experimentos TRP-TC-A1 e TRP-TC-A2 produziram, sob baixa magnitude de deformação, um alto ângulo de mergulho das falhas. Estes modelos, montados com a descontinuidade basal curta (de 2 cm) constituem, no entanto, casos particulares. A verticalização das falhas mais antigas em função do aumento gradativo da deformação representa um processo comum em sistemas compressivos simples, como já demonstraram Mulgueta & Koyi (1987), em experimentos de caixas de areia.

Os inúmeros cinturões de dobramentos e falhamentos brasileiros, constituídos por sistemas compressivos que, durante a sua história polifásica, evoluíram para sistemas de convergência oblíqua (Hackspacher 1994, Heilbron *et al.* 1995, D'el Rey Silva 1995, Jardim de Sá *et al.* 1995, Fonseca *et al.* 1995, Hackspacher *et al.* 1997 dentre outros) caracterizam falhas de cavalgamentos (oblíquos) de alto ângulo de mergulho. Um exemplo é mostrado na figura 9, descrito por Heilbron *et al.* (1995), do segmento central da Faixa Ribeira. Os autores propõem, para a região, durante a Deformação Principal da Orogênese Brasileira, uma fase inicial de encurtamento frontal com vergência para o Cráton São Francisco

seguida por uma fase de colisão oblíqua com componente direcional dextral. Neste estudo, assim como na grande maioria dos trabalhos que versam sobre o assunto, não se discute o problema da interferência das estruturas transpressivas sobre as mais antigas, compressivas. A pesquisa, aqui desenvolvida, em caixas de areia, demonstra que o efeito não é desprezível. Durante a transpressão, o movimento oblíquo é acomodado somente sobre falhas de empurrão, reativadas ou novas. Apesar de simularem uma tectônica simplificada, os experimentos permitem sugerir para as estruturas descritas na literatura processos similares: reativação/nucleação de falhas de baixo ângulo e posterior rotação à vertical com o aumento gradativo da deformação. O trabalho de Heilbron *et al.* (1995) confirma esta tese. Os autores não fazem menção a uma análise quantitativa da deformação, mas o conjunto de estruturas descritas para os domínios alóctonos, médio e inferior, ambos afetados pela convergência oblíqua (dobras apertadas a isoclinais, lineação mineral/estiramento, foliação milonítica e dobras em bainha) indicam uma deformação de média a alta.

Retrocavalgamentos, embora descritos na literatura, não constituem feições tão comuns na natureza quanto nos modelos físicos. Este problema está relacionado em parte com o material utilizado para simular a descontinuidade basal de velocidade e o *backstop* (cartolina, isopor ou madeira), muito rígido em comparação com as propriedades mecânicas da areia seca (Gomes 1996). O fato não invalida os resultados aqui apresentados, uma vez que pesquisas experimentais envolvendo anisotropias de rochas já demonstraram que estas podem causar variações na orientação, no mergulho e no número das falhas (Donath 1961, Morley 1999).

A formação de retroempurrões, em modelos físicos, rúpteis, foi analisada por Bonini *et al.* (1999) que demonstraram que, em sistemas de cavalgamento, um *indenter* rígido deforma um pacote de areia, com vergência contrária ao sentido da compressão, se a sua face frontal possuir ângulo de inclinação $\leq 45^\circ$. *Indenters*, com face frontal maior que 45° , geram sistemas compressivos com polaridade tectônica para o antepaís. Em presentes modelos, a descontinuidade basal também constitui um *indenter* rígido, no entanto, diferente dos experimentos de Bonini *et al.* (1999), este não aflora. Observou-se que, nesta condição, empurrões e retroempurrões se formam simultaneamente, independente da geometria do *indenter*.

A análise das fraturas Riedel, nos experimentos, revelou que

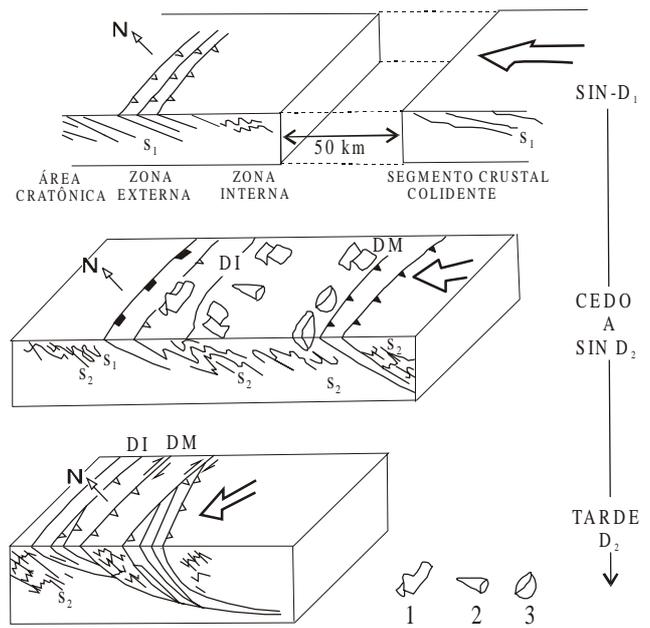


Figura 9 - Blocos-diagrama que ilustram de forma esquemática as estruturas produzidas por uma fase de deformação inicial de encurtamento frontal seguido por uma colisão oblíqua, no segmento central da Faixa Ribeira (modificado de Heilbron *et al.* 1995). A seta grande indica o sentido de compressão e transpressão. DM-Domínio alóctono médio; DI-Domínio alóctono inferior; 1-Dobras em bainha; 2-Dobras tubulares; 3-Boudinagem.

estas se formam sob baixo ângulo de convergência tanto sob condições simples da deformação transpressiva, quanto em sistemas polifásicos.

Agradecimentos C.J.S. Gomes agradece ao CNPq pela bolsa de produtividade (processo 300487/89-4), e S.C. Braga e M. V. Pessôa ao CNPq e à UFOP respectivamente, pelas bolsas de Iniciação Científicas PIBIC e PIP. Aos revisores da RBG pelas sugestões ao manuscrito.

Referências

- Allemand P. & Brun J.P. 1991. Width of continental rifts and rheological layering of the lithosphere. *Tectonophys.*, **188**:63-69.
- Bonini M., Sokoutis D., Talbot C.J., Boccaletti M. 1999. Indenter growth in analogue models of Alpine-type deformation. *Tectonics*, **18**:119-128.
- Brun J.P. & Nalpas T. 1996. Graben inversion in nature and experiments. *Tectonics*, **15**:677-687.
- Bürgmann R. 1991. Transpression along the southern San Andreas Fault, Durmid Hill, California. *Tectonics* **10**:1152-1163.
- Casas A.M., Gapais D., Nalpas T., Besnard, K., Román-Berdiel T. 2001. Analogue models of transpressive systems. *Jour. Struct. Geol.*, **23**:733-743.
- Cotton J.T. & Koyi H. A. 2000. Modeling of thrust fronts above ductile and frictional detachments: Application to structures in the Salt Range and Potwar Plateau, Pakistan. *Geol. Soc. Am. Bull.*, **112**:351-363.
- D'el Rey Silva L.J.H. 1995. Tectonic evolution of the Sergipano Belt, NE do Brazil. *Rev. Bras. Geoc.*, **25**:315 - 332.
- Dias R. & Ribeiro A. 1995. The Ibero-Armorican Arc: A collision effect against an irregular continent? *Tectonophys.*, **246**:113-128.
- Donath F.A. 1961. Experimental study of shear failure in anisotropic rocks. *Geol. Soc. Am. Bull.*, **72**:985-990.
- Dooley T.P. & McClay K.R. 1996. Strike-slip deformation in the Confidence Hills, southern Death Valley fault zone, eastern California, USA. *Jour. Geol. Soc., London*, **153**:375-387.
- Dutton B.J. 1997. Finite strains in transpression zones with no boundary slip. *Jour. Struct. Geol.*, **19**:1189-1200.
- 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*. *Geol. Soc. Lond., Spec. Publ.*, **135**:231-252.
- Fonseca M.A., Dardenne M.A., Uhlein A 1995. Faixa Brasília setor setentrional: estilos estruturais e arcabouço tectônico. *Rev. Bras. Geoc.*, **25**:267-278.
- Fossen H. & Tikoff B. 1993. The deformation matrix for simultaneous simple shearing, pure shearing and volume change, and its application to transpression-transension tectonics. *Jour. Struct. Geol.*, **15**:413-422.
- Fossen H., Tikoff B., Teyssier C. 1994. Strain modeling of transpressional and transtensional deformation. *Norsk Geol. Tids.*, **74**:134-145.
- Gomes C.J.S. 1996. O papel do anteparo na modelagem física de cinturões compressivos - um estudo aplicado a um duplex do tipo pilha antiformal. *Geonomos*, **4**:51-60.
- Hackspacher P.C. 1994. *Tectônica transtensiva/transpressiva e alojamento de rochas plutônicas, a exemplo da folha Cabreúva (SP) 1: 50.000*. Instituto de Geociências e Ciências Exatas. Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, Tese de Pós-Doutorado, 202p.
- Hackspacher P.C., Dantas E.L., Brito Neves B.B., Legrand J.M. 1997. Northwest overthrusting and related lateral escape during the Brasiliano Orogeny north of the Patos Lineament, Borborema Province, Northeast Brazil. *Intern. Geol. Rev.*, **39**:609-620.
- Haq S.S. & Davis D.M. 1997. Oblique convergence and the lobate mountain belts of western Pakistan. *Geology*, **25**:23-26.
- Harding T.P. 1974. Petroleum traps associated with wrench faults. *AAPG Bull.*, **58**:1290-1304.
- Heilbron M., Valeriano C.M., Valladares C.S., Machado N. 1995. A orogênese brasileira no segmento central da Faixa Ribeira, Brasil. *Rev. Bras. Geoc.*, **25**:249-266.
- Higgins R.I. & Harris L.B. 1997. The effect of cover composition on extensional faulting above re-activated basement faults: results from analogue modelling. *Jour. Struct. Geol.*, **19**:89-98.
- Hubbert M.K. 1937. Theory of scale models as applied to the study of geologic structures. *Geol. Soc. Am. Bull.*, **48**: 459-1520.
- Huiqi L., McClay K.R., Powell D. 1992. Physical models of thrust wedges. In: McClay (ed.), *Thrust Tectonics*, London, Chapman & Hall, 71-81.
- Jardim de Sá E.F., Fuck R.A., Macedo M.H.F., Peucat J.J., Kawashita K., Souza Z.S., Bertrand J.M. 1995. Pre-Brasiliano orogenic evolution in the Seridó Belt, NE Brazil: conflicting geochronological and structural data. *Rev. Bras. Geoc.* **25**:307-314.
- Jones R.R., Holdsworth R.E., Wayne B. 1997. Lateral extrusion in transpression zones: the importance of boundary conditions. *Jour. Struct. Geol.*, **19**:1201-1217.
- Keller J.V.A., Hall S.H., McClay K. 1997. Shear fracture pattern and microstructural evolution in transpressional fault zones from field and laboratory studies. *Jour. Struct. Geol.*, **19**:1173-1187
- Naylor M.A., Mandl G., Sijpesteijn C.H.K. 1986. Fault geometries in basement-induced wrench faulting under different initial stress states. *Jour. Struct. Geol.*, **8**:737-752.
- McClay K.R. & Ellis P.G. 1987a. Analogue models of extensional fault geometries. In: M.P. Coward, J.F. Dewey & P.L. Hancock (eds.) *Continental Extensional Tectonics*, *Geol. Soc. Lond., Spec. Publ.*, **28**:109-125.
- McClay K.R. 1990. Extensional fault systems in sedimentary basins: a review of analogue model studies. *Mar. Petrol. Geol.*, **7**:206-233.
- Morley C. K. 1999. How successful are analogue models in addressing the influence of pre-existing fabrics on rift structure? *Jour. Struct. Geol.*, **21**:1267-1274.
- Mulugeta G. & Koyi H. 1992. Episodic accretion and partitioning in a model sand wedge. *Tectonophys.*, **202**:319-333.
- Nalpas T., Le Douaran S., Brun J.P., Unternehr P., Richert J.P. 1995. Inversion of the Broad Fourteens Basin (offshore Netherlands), a small-scale model investigation. *Sed. Geol.*, **95**:237-250.
- Naylor M.A., Mandl G., Sijpesteijn C.H.K. 1986. Fault geometries in basement-induced wrench faulting under different initial stress states. *Jour. Struct. Geol.*, **8**:737-752.
- Onézime J., Charvet J., Faure M., Chauvet A, Panis D. 2002. Structural evolution of the southernmost segment of the West European Variscides: the South Portuguese zone (SW Iberia). *Jour. Struct. Geol.*, **24**:451-468.
- Passchier C. W. 1998. Monoclinic model shear zones. *Jour. Struct. Geol.*, **20**:1121-1137.
- Pinet N. & Cobbold P.R. 1992. Experimental insights into the partitioning of motion within zones of oblique subduction. *Tectonophys.*, **206**:371-388.
- Richard P. 1991. Experiments on faulting in a two-layer cover sequence overlying a reactivated basement fault with oblique-slip. *Jour. Struct. Geol.*, **13**:459-469.
- Richard P., Mocquet B., Cobbold P.R. 1991. Experiments on simultaneous faulting and folding above a basement wrench fault. *Tectonophys.*, **188**:133-141.
- Robin P.Y.F. & Cruden A.R. 1994. Strain and vorticity patterns in ideally ductile transpression zones. *Jour. Struct. Geol.*, **16**:447-466.
- Sanderson D. & Marchini R.D. 1984. Transpression. *Jour. Struct. Geol.*, **6**:449-458.
- Sylvester R.A & Smith R.R. 1976. Tectonic transpression and basement-controlled deformation in San Andreas Fault Zone, Salton Trough, California. *AAPG Bull.*, **60**:2081-2102.
- Teyssier C. & Tikoff B. 1999. Fabric stability in oblique convergence and divergence. *Jour. Struct. Geol.*, **21**:969-974.
- Tikoff B. & Peterson K. 1998. Physical experiments of transpressional folding. *Jour. Struct. Geol.*, **20**:661-672.
- Tron V. & Brun J.-P. 1991. Experiments on oblique rifting in brittle-ductile systems. *Tectonophys.*, **188**:71-84.
- Vassallo J.J. & Wilson C.J.L. 2002. Paleoproterozoic regional-scale non-coaxial deformation: an example from eastern Eyre Peninsula, South Australia. *Jour. Struct. Geol.*, **24**:1-24.
- Vendeville B., Cobbold P.R., Davy P., Brun J.P., Choukroune P. 1987. Physical models of extensional tectonics at various scales. In: M. P. Coward, J. F. Dewey & P.L. Hancock (eds.) *Continental Extensional Tectonics*, *Geol. Soc. Lond., Spec. Publ.*, **28**:95-107.
- Wilcox R.E., Harding T.P., Seely D.R. 1973. Basic wrench tectonics. *AAPG Bull.*, **57**:74-96.

Manuscrito A-1358

Recebido em 04 de julho de 2002

Revisão dos autores em 10 de abril de 2004

Revisão aceita em 25 de abril de 2004