

## Modelagem física da deformação pós-sal em bacias invertidas

*Physical modelling of post-salt deformations in inverted basins*

Gisela Miranda de Souza Almeida<sup>1</sup> , Caroline Janette Souza Gomes<sup>1</sup> 

<sup>1</sup>Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP, Departamento de Geologia, Morro do Cruzeiro, CEP 35400000, Ouro Preto, MG, BR (giselamiranda624@yahoo.com.br; caroline.janette@gmail.com)

Recebido em 9 de maio de 2019; aceito em 9 de dezembro de 2019

### Resumo

Este estudo analisou, em modelos físicos, uma inversão tectônica positiva de bacias com uma camada de sal na sequência pós-rifte. O intuito foi examinar a influência da variação da resistência à deformação da camada dúctil sobre a estruturação da sobrecarga, variando-se as espessuras do silicone (simulando sal) e da sobrecarga, e a velocidade de inversão. Os ensaios foram montados em caixas de areia com dimensões de 35 × 23,4 cm (comprimento × largura), nos quais o embasamento (a sequência pré-rifte) foi simulado por um pacote de areia. Após a fase de distensão e subsequente preenchimento da bacia recém-formada, depositou-se a sequência pós-rifte: um substrato de areia, uma camada de silicone e uma sobrecarga, também de areia. Cortes efetuados nos modelos úmidos após a deformação final de inversão revelaram que o número de falhas na sobrecarga variou significativamente em decorrência da variação da resistência à deformação tanto da camada dúctil quanto da sobrecarga rúptil. No caso da camada dúctil, de silicone, a resistência à deformação cresceu com o aumento da velocidade de deformação, enquanto para a sequência rúptil, de areia, a resistência cresceu quando se elevou a espessura da sobrecarga. Por outro lado, o aumento da espessura da camada dúctil produziu um decréscimo em sua resistência à deformação e acomodou por fluxo a deformação, internamente. A formação de estruturas rúpteis na sobrecarga foi associada ao desenvolvimento de falhas compressivas no pré- e sin-rifte, nucleadas durante a inversão. A reativação de falhas normais somente gerou falhas na sobrecarga quando caracterizadas por alto rejeito. Feições similares ocorrem na Bacia de Tucumán (Argentina).

**Palavras-chave:** Modelagem física; Inversão tectônica de bacias; Deformação do pós-sal; Resistência à deformação rúptil e dúctil.

### Abstract

This study analyzed in physical models, a positive tectonic inversion of basins with a salt layer in the post-rift sequence. The aim was to examine the influence of the strength variation of a ductile layer on the overburden deformation, varying the silicone putty (simulating salt) and the overburden thickness, and the inversion velocity. The trials were mounted on 35 × 23.4 cm (length × width) sandboxes, in which the basement (the pre-rift sequence) was simulated by a sandbox. After the distention phase and subsequent filling of the newly formed basin, the post-rift sequence was deposited: a sand substrate, a silicon layer and a sand overload. Cuts made on wet models after the final inversion deformation revealed that the number of overload failures varied significantly due to the variation of the tensile strength of both the ductile layer and the brittle overload. In the case of the silicone ductile layer, the creep resistance increased with increasing creep velocity while for the brittle sand sequence the creep resistance increased as the thickness of the overload increased. On the other hand, the increase in the thickness of the ductile layer produced a decrease in its creep resistance and accommodated the creep internally. The formation of ruptile structures in overload was associated with the development of pre- and sin-rift compressive failures, nucleated during inversion. Reactivation of normal failures only generated overload failures when characterized by high rejection. Similar features occur in the Tucumán Basin (Argentina).

**Keywords:** Physical modelling; Tectonic inversion of basins; Post-salt deformation; Resistance to brittle and ductile deformation.

## INTRODUÇÃO

O sal é encontrado em uma grande diversidade de contextos geológicos que incluem as bacias extensionais, intracratônicas, sin-riftes e margens passivas bem como os regimes contracionais, as zonas de colisão continentais e as bacias de antepaís. Em função de sua relação com as grandes províncias de petróleo (Golfo do México, Golfo Pérsico, Mar do Norte, bacias da Margem Atlântica Brasileira, entre outras), existem inúmeros trabalhos acadêmicos que estudam o comportamento do sal, que difere da maioria das rochas pela sua capacidade de fluir sob taxas de deformação geológicas comuns. Dessa forma, as bacias que contêm sal sofrem deformações mais intensas e desenvolvem maior complexidade estrutural do que aquelas nas quais o sal não ocorre.

Para as pesquisas em geologia estrutural e tectônica, o emprego da modelagem física analógica é útil como uma ferramenta de análise de um determinado processo deformacional. Assim sendo, os modelos físicos podem ilustrar a evolução de uma deformação e contribuir, por exemplo, ao entendimento da tectônica de bacias sedimentares distensionais cujo reconhecimento é feito, sobretudo, pelos métodos indiretos da geofísica. São incontáveis os estudos sistemáticos, em caixas de areia ou centrífugas, que sugerem a forte influência do sal sobre a geometria e a cinemática de estruturas distensivas, compressivas e de inversão tectônica — Vendeville e Jackson (1992); Koyi e Petersen (1993); Jackson e Vendeville (1994); Nalpas et al. (1995); Vendeville et al. (1995); Brun e Nalpas (1996); Withjack e Callaway (2000); Dooley et al. (2005); Del Ventisette et al. (2006); Soto et al. (2007); Bonini et al. (2012); Dooley et al. (2015); Ferrer et al. (2016); entre outros. Tais autores, que analisaram o sal em bacias distensionais, consideraram-no inserido em uma sequência sin-rifte. Por consequência, reconheceram uma estreita relação entre a estruturação das bacias e a resistência à deformação do sal, controlada, por sua vez, por sua própria espessura, pela da cobertura rúptil e também pela velocidade de deformação.

Dooley et al. (2003), Gabrielsen et al. (2016, 2019) e Carvalho (2017) realizaram modelagens físicas com uma camada dúctil submetida a duas fases distensivas, mas apenas Carvalho (2017) analisou o análogo ao sal inserido em uma

sequência pós-rifte. O presente estudo também considerou essa posição estratigráfica pós-rifte e evoluiu para modelagens de inversão tectônica positiva analisando, em riftes simétricos, a resistência à deformação de uma camada de silicone, dúctil (sal), bem como a estruturação da sobrecarga, testando, nas modelagens, diferentes espessuras das duas unidades, do silicone e da sobrecarga, e velocidades de deformação.

## O MÉTODO EXPERIMENTAL

### Os materiais analógicos e a escala

As deformações simuladas em laboratório se desenvolvem em intervalos de tempo e de tensões inferiores aos que ocorrem na natureza. Assim, para comparações entre modelos analógicos e exemplos naturais, aplicam-se os parâmetros físicos e temporais conforme os princípios fundamentais de Hubbert (1937) e que foram adaptados para o presente trabalho (Tabela 1).

Nos 12 experimentos a areia de quartzo representou as unidades rúpteis do pré-, sin e pós-rifte da bacia, e o silicone (polydimethylsiloxane) simulou a camada de sal. A areia tem grãos subangulares, granulometria menor que 0,21 mm, um ângulo de atrito interno,  $\Phi = 41,47^\circ$  ( $\mu = 0,88$ ), e densidade,  $\rho = 1,58 \text{ g/cm}^3$ . Além disso, a areia rompe de acordo com o critério de Coulomb-Mohr, independe da taxa de deformação e tem baixa coesão (McClay e Ellis, 1987; Vendeville et al., 1987). O silicone, produzido pela firma americana Clearco Products Co Inc., tem viscosidade  $\eta = 1,95 \times 10^4 \text{ Pa s}$ , comportamento newtoniano quase perfeito e densidade  $\rho = 0,979 \text{ g/cm}^3$ .

Em todos os experimentos, trabalhou-se com o mesmo silicone, mas, para simular diferentes resistências à deformação ( $\tau_d$ ) do sal, variaram-se as velocidades de deformação, de 1, 2 e 3 cm/h. Nalpas e Brun (1993), Weijermars et al. (1993), Luján et al. (2006), entre outros mostraram que a velocidade de deformação influencia a resistência à deformação dos materiais viscosos, cuja magnitude pode ser calculada a partir da Equação 1:

$$\tau_d = \eta v / l_d \quad (1)$$

**Tabela 1.** Principais parâmetros físicos com os respectivos fatores de escala.

Parâmetro	Valores do modelo	Valores da natureza (crosta superior)	Razão modelo/natureza
Comprimento (m)	0,01	$10^3$	$L^* = 10^{-5}$
Densidade ( $\rho_1$ ): pré-, sin- e pós-rifte ( $\text{kg m}^{-3}$ )	1.580	2.300	$\rho_1^* = 0,69$
Densidade ( $\rho_2$ ): evaporitos ( $\text{kg m}^{-3}$ )	979	2.200	$\rho_2^* \sim 0,45$
Gravidade ( $\text{m s}^{-2}$ )	9,81	9,81	$g^* \sim 1$
Viscosidade (Pa s) ( $\mu = \sigma / \epsilon$ )	$1,95 \times 10^4$	$1,7 \times 10^{17 \text{ a } 19}^*$	$\eta^* \sim 1,15 \times 10^{-13 \text{ a } (-15)}$

\*Conforme propõem Pichot e Nalpas (2009).

Em que:

$\eta$  = a viscosidade;

$v$  = a velocidade de deformação;

$l_d$  = a espessura do silicone;

$v/l_d$  = a taxa de deformação ( $\epsilon$ ).

Assim, a resistência à deformação ( $\tau_d$ ) não depende apenas da velocidade de deformação, mas também da espessura da camada de silicone e de sua viscosidade.

No caso da areia, de comportamento rúptil, a resistência à deformação ( $\tau_r$ ) depende do ângulo de atrito interno e da densidade do material assim como da espessura do pacote em deformação. Assim, a resistência à deformação da areia cresce com a profundidade  $e$ , segundo Bonini (2001), que desconsidera a coesão interna da areia (que é mínima), pode ser calculada a partir da Equação 2:

$$\tau_r = 4,06 \rho_r g l_r \mu \quad (2)$$

Na qual:

$\rho_r$  = densidade;

$g$  = a aceleração da gravidade;

$l_r$  = a espessura da areia;

$\mu = \text{tg } \phi$  ( $\phi$  = ângulo de atrito interno).

As Tabelas 1 e 2 apresentam os principais parâmetros usados no presente estudo com os fatores de escala geométricos e dinâmicos bem como o cálculo das variáveis mais importantes, respectivamente.

## Os modelos experimentais

Um aparelho elétrico serviu para a realização dos ensaios (Figuras 1 e 2). As dimensões das caixas montadas no aparelho eram sempre de  $35 \times 23,4 \times 10$  cm (comprimento  $\times$  largura  $\times$  altura). O Modelo 1 reproduziu apenas a primeira fase de deformação distensiva, comum a todos os experimentos. A distensão (simétrica), realizada com acionamento de duas paredes móveis, produziu progressivamente em um pacote de areia basal (denominada sequência pré-distensão) uma bacia que foi preenchida por areia de cores diferentes. Designou-se o preenchimento da bacia como sequência sin-distensão. Nos demais experimentos, além da deformação por estiramento (simétrica), provocou-se uma segunda fase de formação por compressão, neste caso com o acionamento de apenas uma parede móvel. A inversão positiva produzida nos Modelos 2 a 12 ocorreu após a deposição de uma sequência pós-distensão (simulando um pós-rifte) sobre a bacia recém-preenchida. A sequência pós-distensão era constituída por três unidades: um substrato de areia, uma camada de silicone e uma sobrecarga de areia (Figura 2). Em todos os experimentos, mantiveram-se constantes os seguintes parâmetros: o comprimento inicial do modelo (antes do rifteamento), igual a 35 cm, a largura, de 23,4 cm, a distensão, de 6 cm (3 cm para cada lado), e a espessura da sequência pré-distensão, igual a 3 cm.

Dois folhas de plástico rígidas, com dimensões de  $17,5 \times 23,4$  cm (Figura 1), fixadas junto à base de cada parede móvel atuaram como descolamento na fase de distensão e posicionaram o rifte ao centro da caixa de ensaios. Com o

**Tabela 2.** Os Modelos 2 a 12 e suas variáveis mais importantes.

Série	Modelo	$v$ ( $m s^{-1}$ )	$l_d$ (m)	$l_r$ (m)	$\tau_d$ (Pa)	$\tau_r$ (Pa)	$\epsilon = v/l_d$
1	2, 3 e 4	$5,55 \times 10^{-6}$ (2 cm/h)	0,002	0,01	54,1	553,8	$2,8 \times 10^{-3}$
		$2,77 \times 10^{-6}$ (1 cm/h)	0,002	0,01	27	553,8	$1,4 \times 10^{-3}$
		$8,33 \times 10^{-6}$ (3 cm/h)	0,002	0,01	81,2	553,8	$4,2 \times 10^{-3}$
2	7	$2,77 \times 10^{-6}$ (1 cm/h)	0,005	0,01	10,8	553,8	$0,6 \times 10^{-3}$
		$8,33 \times 10^{-6}$ (3 cm/h)	0,005	0,01	32,5	553,8	$1,7 \times 10^{-3}$
		$2,77 \times 10^{-6}$ (1 cm/h)	0,002	0,02	27	1.107,6	$1,4 \times 10^{-3}$
3	10	$8,33 \times 10^{-6}$ (3 cm/h)	0,002	0,02	81,2	1.107,6	$4,2 \times 10^{-3}$
		$2,77 \times 10^{-6}$ (1 cm/h)	0,005	0,02	10,8	1.107,6	$0,6 \times 10^{-3}$
		$8,33 \times 10^{-6}$ (3 cm/h)	0,005	0,02	32,5	1.107,6	$1,7 \times 10^{-3}$

v: velocidade de inversão;  $l$ : espessura das camadas de silicone e pós-silicone;  $\tau$ : resistência à deformação das camadas de silicone e sobrecarga; índices d e r: dúctil e rúptil.

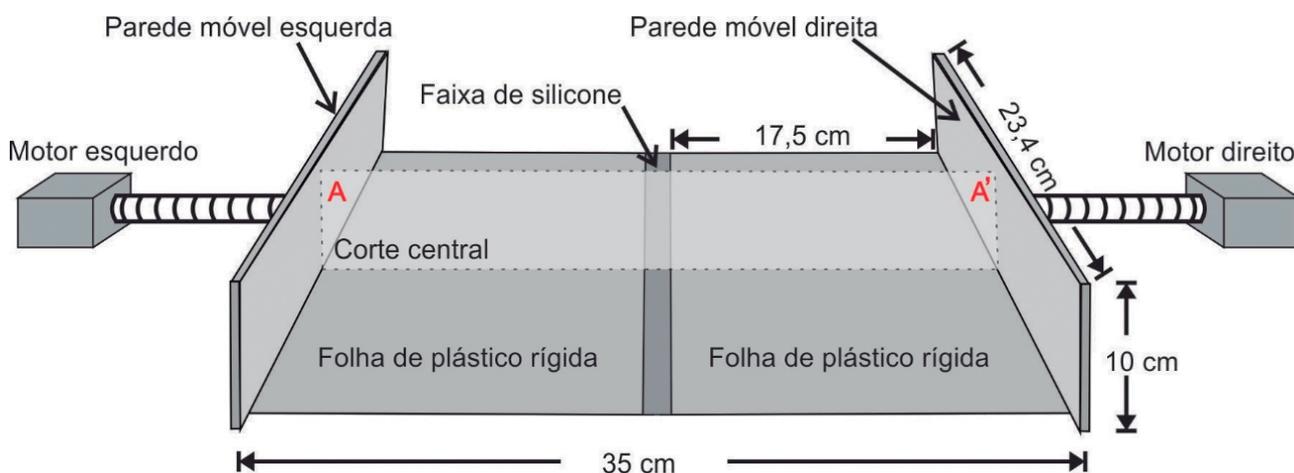
intuito de amenizar o efeito produzido pelas bordas das folhas de plástico rígidas em que se estabelecem descontinuidades de movimento sob a deformação da areia, depositou-se sobre tais bordas uma faixa de silicone de ca. 1,5 cm de largura e 0,2 cm de altura (Figura 1).

Os parâmetros analisados permitiram agrupar os Modelos 2 a 12 em séries (Tabela 2). A Série 1 (Modelos 2, 3 e 4) examinou uma progressão da inversão ao diferenciar a magnitude do encurtamento em 1,5, 3 e 5,5 cm (25, 50 e 91%,

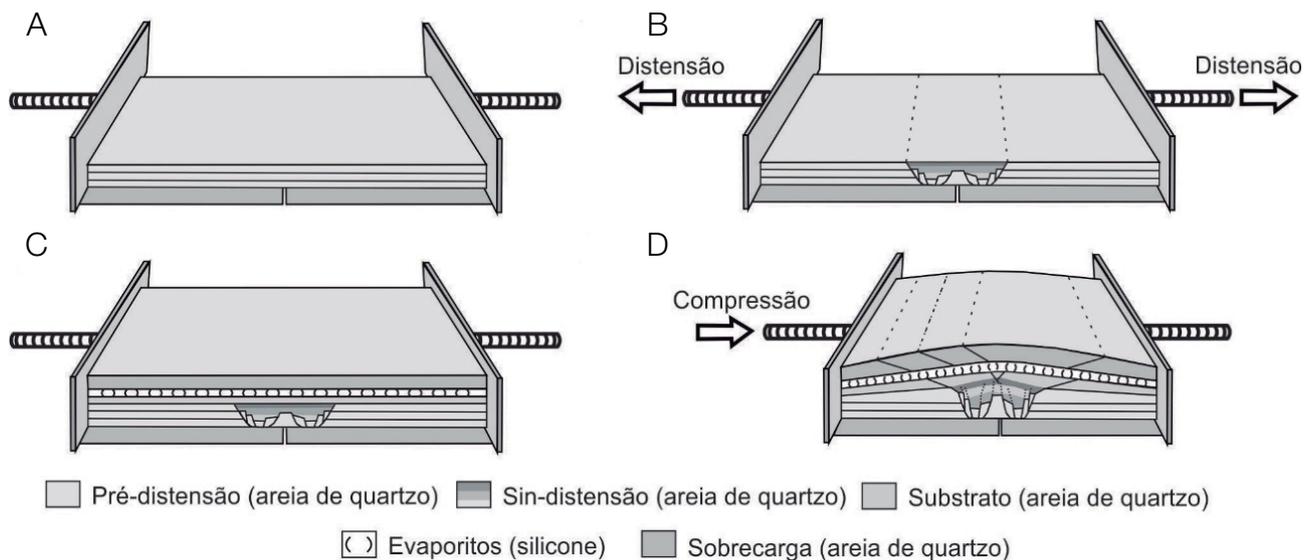
em relação à magnitude de distensão, de 6 cm, respectivamente). Nas Séries 2 (Modelos 5, 6, 7 e 8) e 3 (Modelos 9, 10, 11 e 12), estudou-se a variação das espessuras da camada de silicone e da unidade pós-distensão, assim como a velocidade de inversão.

A repetição de algumas modelagens permitiu a confirmação dos resultados.

Fotografou-se a deformação progressiva no aparelho em intervalos regulares e também, ao final do ensaio, em



**Figura 1.** Desenho esquemático, em perspectiva, da caixa de experimentos, mostrando as posições dos motores, das paredes móveis, das placas basais (folhas de plástico rígidas), as dimensões da caixa e a posição do corte central AA'.



**Figura 2.** Desenhos esquemáticos das etapas de montagem e deformação dos modelos experimentais. (A) Situação inicial da sequência pré-distensão; (B) a deformação distensiva com o preenchimento sin-distensão da bacia; (C) sequência pós-distensão recobrendo a bacia recém-formada; (D) a deformação compressiva. As setas indicam o sentido de acionamento das paredes móveis.

seções cortadas interna e paralelamente ao transporte tectônico, após umedecer o experimento. Analisaram-se todas as seções, mas descreveu-se apenas o corte central.

Ao final de cada experimento, realizaram-se medidas da base e da altura da flexura antiformal em três cortes nos modelos (central e dois adjacentes), conforme representação na Figura 3. O intuito era obter mais dados sobre o encurtamento da bacia, para a comparação entre os experimentos.

### Limitações dos modelos

Os modelos da presente pesquisa apresentam uma série de simplificações, frequentemente aceitas na modelagem física analógica. A principal delas diz respeito às folhas de plástico rígidas empregadas para facilitar a distensão e a inversão nos modelos. As folhas rígidas causaram a formação de falhas adicionais durante a inversão, especialmente retroempurrões que provavelmente inexistem na natureza. Considerando-se que a concepção dos modelos primou pela análise da transmissão da deformação rúptil à sobrecarga, e não pela simples inversão positiva da bacia, o maior número de falhas observadas na sequência pré-distensão aumentou o inventário estrutural a ser analisado.

Outras simplificações deste estudo compreendem a omissão de heterogeneidades e anisotropias naturais, tais como variações na espessura da camada de sal assim como na reologia de pacotes rochosos em função da profundidade e da temperatura, fatores que podem afetar a deformação. Apesar das simplificações destacadas, a simulação da inversão positiva de uma bacia com uma camada dúctil no interior da sequência pós-distensão permitiu testar alguns fatores que controlam a deformação da sobrecarga.

## RESULTADOS

### A fase de distensão: Modelo 1

O Modelo 1 mostra a primeira fase de deformação, de distensão, que rompe a sequência pré-distensão e permite a

deposição da sequência sin-distensão. Comum a todos os experimentos, desenvolveu uma geometria representativa caracterizada por uma bacia com um *horst* central bordado por duas sub-bacias (Figura 4), observada com variações não significativas nos demais modelos. As sub-bacias apresentam estruturas ligeiramente diferentes entre si, variando tanto no número de falhas intrarrifte quanto nos respectivos sentidos de mergulho. É interessante observar o elevado rejeito das falhas normais de borda, resultando em forte abatimento da sequência pré-distensão, feição possivelmente causada pelas descontinuidades de movimento.

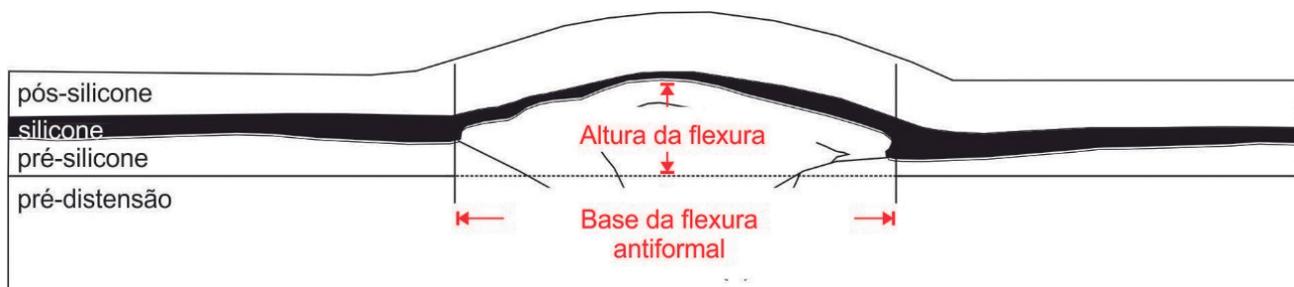
### A inversão – Série 1: Modelos 2, 3 e 4

Na Série 1, analisou-se a inversão positiva com diferentes magnitudes de compressão, espessuras delgadas das camadas de silicone e sobrecarga e velocidade de inversão intermediária (2 cm/h).

No Modelo 2, de menor magnitude de encurtamento (Figura 5A), não há nenhum indício de uma reativação de falhas normais ou de formação de novas falhas compressivas.

A inversão de 3 cm (Modelo 3), no entanto, já mostra uma série de feições causadas pelo encurtamento e consequente ejeção do material na vertical (Figura 5B). Na porção superior da bacia, a ejeção da sequência sin-distensão é acomodada por duas falhas compressivas (R1 e E1) de vergências opostas, caracterizando uma sutil estrutura *pop-up*. Pode-se notar que o empurrão E1 promoveu uma pequena ascensão da bacia no sentido de sua margem direita acarretando uma leve rotação horária de falhas normais. As falhas E1 e R1 estendem-se até a camada basal da sequência pós-distensão, a qual, no entanto, não cortam por completo. Adicionalmente, uma reativação de falhas normais pode ser caracterizada na falha de borda da margem esquerda assim como na região central, pela ascensão de um estreito bloco limitado por falhas. Além das feições de caráter rúptil, ocorreram um espessamento da sequência pré-distensão posicionada sob a bacia e um ligeiro arqueamento do pacote pós-distensão.

O Modelo 4, submetido à compressão de 5,5 cm (Figura 5C), revela feições relevantes de inversão. Notáveis são



**Figura 3.** Desenho esquemático de um modelo experimental com indicação de base e altura da flexura antiformal que se formou sobre a bacia e seu entorno.

a ocorrência de estruturas rúpteis na sobrecarga e o forte encurtamento da sequência pré-distensão sob a bacia (área destacada por linha tracejada azul) entre as falhas de compressão, promovendo o arqueamento antiforme da bacia e de seu entorno. Destaca-se mais um par de falhas, de empurrão (E2) e de retroempurrão (R2), ambas posicionadas abaixo das respectivas falhas E1 e R1, o que contribuiu para a ejeção da bacia. À semelhança do Modelo 3, a falha de borda da margem esquerda mostra uma sutil reativação. O mesmo não acontece com a falha de borda da margem oposta. Percebem-se, outra vez, a ejeção de um bloco falhado na região central da sequência sin-distensão e, adicionalmente, uma estrutura *pop-up*, secundária, de pequeno porte, na extremidade superior de uma das falhas reativadas.

### A inversão — Série 2: Modelos 5, 6, 7 e 8

Na Série 2, analisou-se a inversão positiva com sobrecarga delgada e com variação da velocidade de inversão e da espessura da camada de silicone.

Em todos os experimentos dessa série (Figura 6), a deformação rúptil abaixo da camada de silicone se assemelha àquela do Modelo 4, anteriormente descrito.

A deformação da sequência pós-distensão, no entanto, mudou com a variação da velocidade de inversão. O aumento da velocidade de deformação observado entre os Modelos 5, 4 e 6 imprime gradual redução no número de falhas na sobrecarga. Assim, no Modelo 5 (Figura 6A) (1 cm/h),

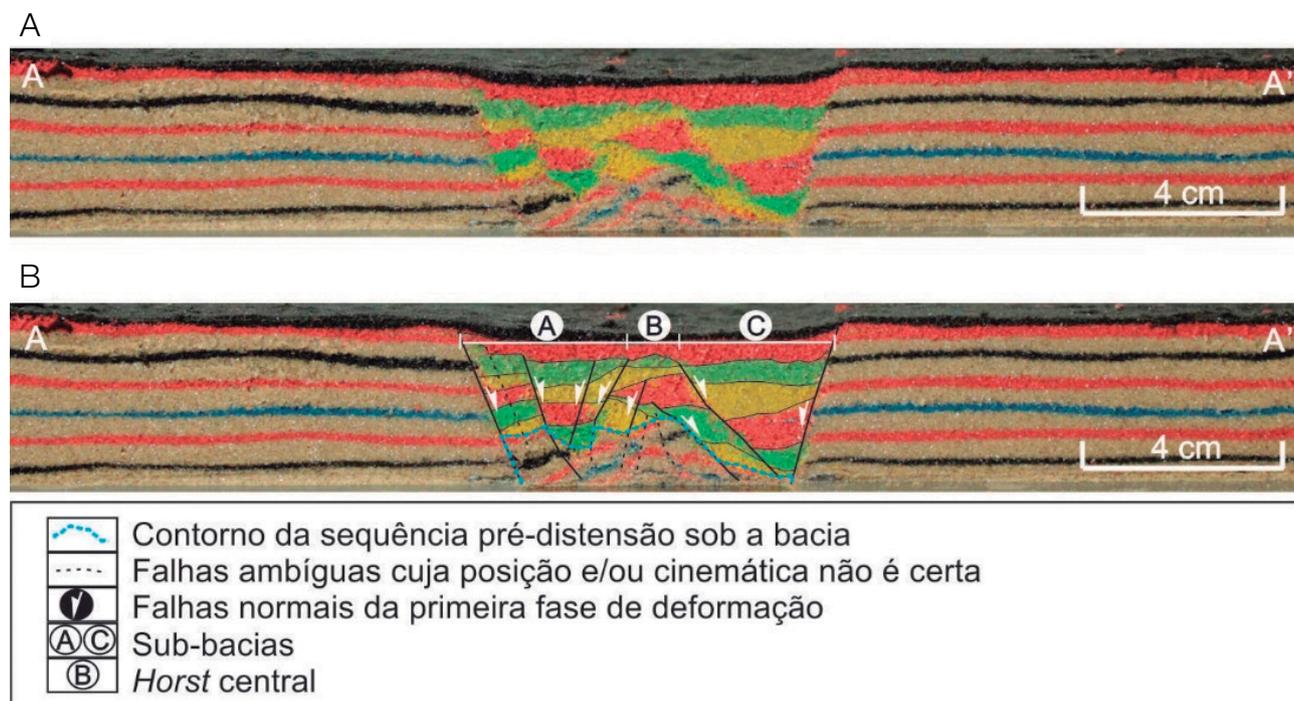
formaram-se seis falhas na sobrecarga, isto é, duas relacionadas a cada um dos retroempurrões (R1 e R2) e uma aos dois empurrões (E1 e E2). No Modelo 4 (vide Figura 5C), a velocidade de deformação de 2 cm/h gerou quatro falhas na cobertura: uma para cada um dos dois retroempurrões da margem esquerda da bacia, uma visível na região central e mais uma para os dois empurrões E1 e E2. Finalmente, no Modelo 6 (Figura 6B) (3 cm/h), formaram-se somente duas falhas na sobrecarga, ambas constituindo o prolongamento de retroempurrão e empurrão de maiores rejeitos, R2 e E2.

O aumento da espessura da camada de silicone promovido nos pares de modelos, do 5 para o 7 e do 6 para o 8, também reduziu o número de falhas na sobrecarga. Do Modelo 5 para o 7 (Figuras 6A e 6C) (1 cm/h) há redução de seis para apenas uma falha, esta relacionada ao retroempurrão R2. Da mesma forma, ocorre redução do Modelo 6 para o 8 (Figuras 6B e 6D) (3 cm/h), em que nenhuma deformação rúptil é observada.

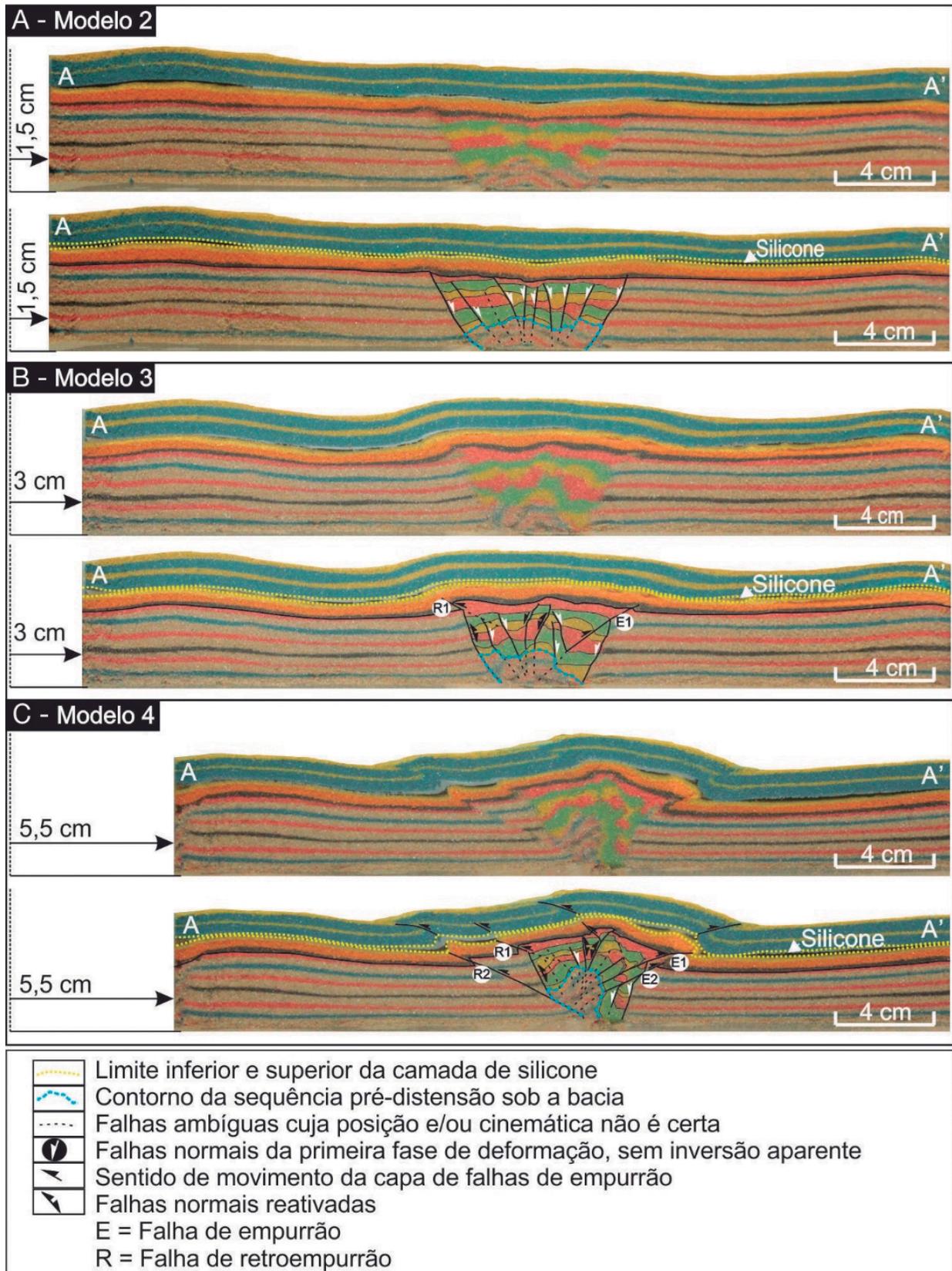
### A inversão — Série 3: Modelos 9, 10, 11 e 12

Na Série 3, analisou-se a inversão positiva com sobrecarga espessa aumentando a espessura da camada de silicone dos Modelos 9 e 10 para os Modelos 11 e 12, bem como aumentando a velocidade de inversão dos Modelos 9 e 11 para os Modelos 10 e 12 (Figura 7).

A deformação rúptil abaixo da camada de silicone na Série 3 foi, outra vez, semelhante àquela do Modelo 4, no entanto a maior resistência à deformação da sobrecarga mais espessa



**Figura 4.** Fotografia da seção central do Modelo 1, (A) sem e (B) com interpretação.

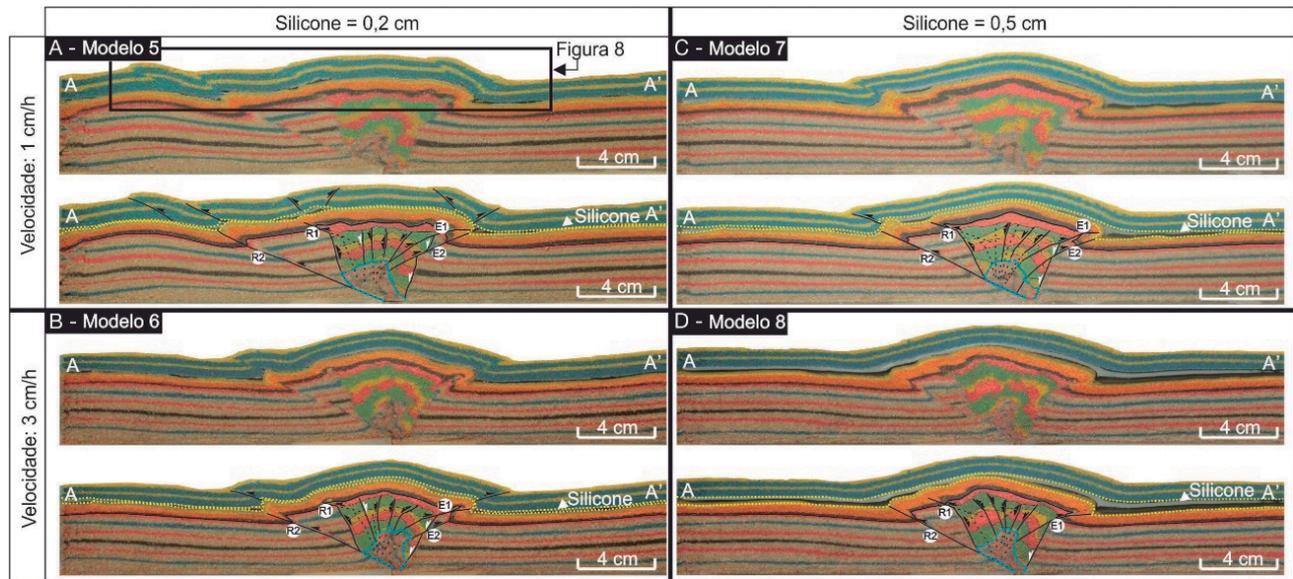


**Figura 5.** Seções centrais dos modelos da Série 1, com diferentes magnitudes de inversão: (A) 1,5 cm, (B) 3 cm e (C) 5,5 cm, sem e com interpretação.

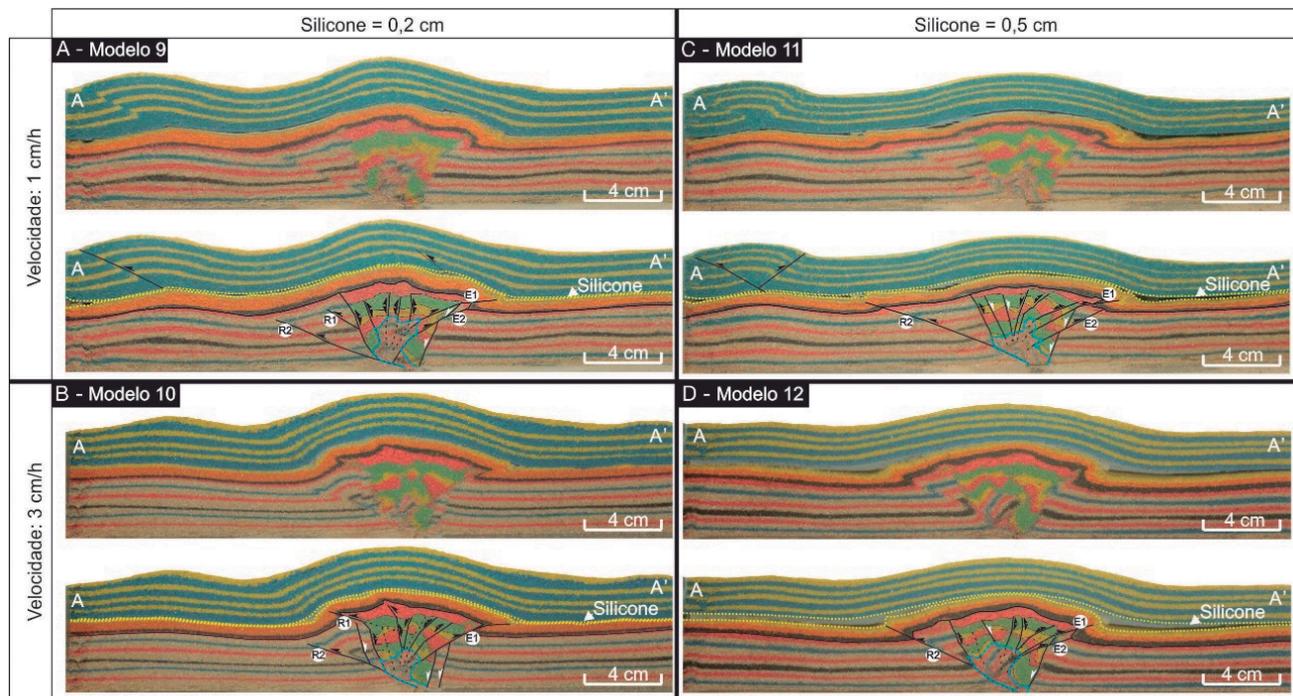
causou, no geral, um menor rejeito das falhas, especialmente do retroempurrão R2. Tal fato é bem visível nos modelos de menor espessura dúctil (Figuras 7A e 7B), nos quais R2 não chega nem à base da camada de silicone. No Modelo 9, o retroempurrão R1 se formou junto à extremidade superior da falha

de borda, como nos outros modelos, mas em uma cota inferior. O aumento da espessura da camada de silicone significou a ausência da falha R1 nos Modelos 11 e 12 (Figuras 7C e 7D).

A deformação rúptil na sobrecarga é sutil e se manifesta apenas nos dois modelos de baixa velocidade de reativação



**Figura 6.** Seções centrais dos modelos da Série 2, de sobrecarga delgada, sem e com interpretação, nos quais se compara a velocidade de deformação, menores nos modelos 5 e 7 e maiores em 6 e 8, e a variação da espessura da camada de silicone menores nos modelos 5 e 6 e maiores em 7 e 8. Legendas iguais às da Figura 5.



**Figura 7.** Seções centrais dos modelos da Série 3, de sobrecarga espessa, sem e com interpretação, nos quais se compara a velocidade de deformação, menores nos modelos 9 e 11 e maiores em 10 e 12, e a variação da espessura da camada de silicone, menores em 9 e 10 e maiores em 11 e 12. Legendas iguais às da Figura 5.

(1 cm/h, Modelos 9 e 11). Nota-se que, nos dois casos, a principal deformação rúptil se manifesta por um empurrão com vergência contrária ao esforço compressivo, que se formou junto à parede móvel, portanto distante da deformação distensiva.

## DISCUSSÃO

### A deformação de todas as unidades

Nos experimentos de 4 a 12, a inversão positiva de 5,5 cm (91%) gerou forte encurtamento das sequências pré- e sin-distensão com transmissão variável à sobrecarga. No interior da bacia, formaram-se novas falhas compressivas e espessamento de camadas por fluxo de grãos, como descrito, por exemplo, por Koyi (1995), Adam et al. (2005) e Gomes (2013). O processo de espessamento acarretou a reativação de falhas normais de alto ângulo, mais evidente naquelas da porção central da bacia, e consequente ejeção da bacia na vertical.

Brun e Nalpas (1996) mostraram experimentalmente que, em compressões ortogonais, falhas normais não são reativadas e a deformação é acomodada por falhas reversas. A reativação só ocorreria em compressões oblíquas. Diferentemente desses autores, Del Ventisette et al. (2006) produziram a reativação de falhas, em uma inversão ortogonal, propondo que esta depende do tipo de montagem do experimento. Os Modelos 4 a 12 confirmam tal sugestão, possivelmente, em função da alta magnitude de inversão que acarretou uma leve deformação rúptil-dúctil.

Na sobrecarga dos Modelos 4 a 12 se formaram flexões antiformalis associadas ou não a falhas compressivas. O número de falhas variou significativamente em decorrência da variação da resistência à deformação tanto da camada dúctil, de silicone, quanto da sobrecarga rúptil.

Como descrito na literatura (por exemplo, Nalpas e Brun, 1993; Nalpas et al., 1995; Weijermars, 1993; Bonini, 2001; Smit et al., 2003; Luján et al., 2006; Bonini et al., 2012; Ruh et al., 2012), a resistência à deformação de uma camada dúctil aumenta com a velocidade de deformação, mas diminui com o aumento de sua espessura (Equação 1). Por outro lado, a resistência à deformação de uma camada rúptil aumenta com o incremento de sua espessura (Equação 2).

Assim, a elevação da velocidade aumenta a resistência à deformação na camada de silicone (Tabela 2), que responde de forma mais rígida. Esse fato fica claro nos modelos da Série 2 (Figura 6). Nos Modelos 6 e 8, submetidos a uma maior velocidade de deformação, a camada de silicone mais resistente é inibida de acomodar ductilmente a deformação. O aumento de sua rigidez aproxima seu comportamento reológico ao da sobrecarga e a deformação se resolve em um sistema mais coeso e uniforme. Assim, os Modelos 6 e 8 produzem menos rupturas do que os Modelos 5 e 7.

As medições dos comprimentos de base e altura do arqueamento antiformal sobre a bacia e o seu entorno (Figura 3) revelam que o comprimento da base é maior no Modelo 5 (menor velocidade de encurtamento) do que no Modelo 6 (Tabela 3). Apesar de a altura do arqueamento variar pouco, esta apresenta a relação inversa. De forma mais sutil, registra-se o mesmo fato nos Modelos 7 e 8.

Uma vez que o comprimento da base do arqueamento antiformal é menor nos Modelos 6 e 8, de maior velocidade de encurtamento, tais modelos transferiram a deformação para as unidades sotopostas ao silicone ampliando-lhes a altura da flexura; no entanto, a maior rigidez do silicone ampliou a coesão com a sobrecarga e inibiu a propagação das falhas.

Nalpas et al. (1995), Smit et al. (2003) e Luján et al. (2006) mostraram que uma velocidade de encurtamento maior ( $v = 10$  cm/h) torna o fluxo do material viscoso (silicone) mais difícil, o que, segundo Nalpas et al. (1995), pode até conduzir à supressão da deformação rúptil na sobrecarga, uma vez que a coesão do sistema aumenta. Nos modelos de Nalpas et al. (1995), uma velocidade de deformação alta causou a flexão da sobrecarga sobre a falha de borda da bacia, ao contrário dos modelos de velocidade menor, nos quais inúmeras falhas normais e reversas caracterizaram um forte desacoplamento entre substrato e sobrecarga.

Como descrito matematicamente por Bonini et al. (2012), o aumento de espessura da camada de silicone reduz sua resistência à deformação e a torna mais susceptível ao fluxo. Quando a espessura da camada de silicone passa de  $l_d = 0,2$  para  $l_d = 0,5$  cm nos modelos da Série 2 (Figura 6), observa-se a diminuição da deformação rúptil, na sobrecarga. Resultado similar obtiveram Withjack e Callaway (2000) em modelos nos quais a camada de silicone estava posicionada na base da sequência rifte. Sugere-se que isso aconteceu porque a camada de silicone mais espessa acomodou por fluxo a deformação internamente. Dessa forma, a transmissão dos esforços para a sobrecarga foi desacoplada, desconectando a deformação rúptil acima e abaixo da camada de silicone.

**Tabela 3.** Medidas do comprimento da base e da altura da flexura antiformal dos Modelos 5 a 12.

Série	Modelo	Base da flexura antiformal (cm)	Altura da flexura antiformal (cm)
2	5	13,21	2,06
	6	11,02	2,36
	7	11,37	2,54
	8	10,86	2,57
3	9	12,11	2,36
	10	10,49	2,37
	11	13,7	1,83
	12	11,24	2,64

Harvey e Stewart (1998) descreveram a influência da espessura da camada de sal na deformação de sedimentos pós-sal na porção centro-norte da Bacia Channel (sul do Reino Unido). A bacia é constituída por falhas extensionais jurássico-cretáceas reativadas durante compressões do Paleógeno/Neógeno (Lake e Karner, 1987; Chadwick, 1993). Dados sísmicos e mapas estruturais mostram que a espessura do sal cresce de leste para oeste e que pequenas sub-bacias (região Poxwell, Baía Weymouth e Baía Lyme) têm diferentes estilos estruturais relacionados à variação da espessura do sal e, conseqüentemente, ao grau de acoplamento entre as estruturas do substrato e da sobrecarga.

Como já mencionado, a resistência à deformação da sobrecarga varia com a sua espessura. O espessamento explica a redução e a posição das falhas na sobrecarga dos Modelos 9 e 11 da Série 3. As falhas nos Modelos 5 e 7 da Série 2 estão acopladas à bacia invertida. Tal observação não se repete nos modelos da Série 3, na qual somente no Modelo 9 aparece uma falha pequena e de baixo rejeito na região do arqueamento antiformal.

As medições apresentadas na Tabela 3 corroboram a discussão. Os comprimentos da base da flexura antiformal menores nos Modelos 7 e 8 (Série 2) sugerem que a resistência à deformação da sobrecarga permitiu, ali, um maior fechamento da flexura do que nos Modelos 11 e 12 (Série 3) — que apresentam maiores comprimentos sob uma sobrecarga mais espessa. O mesmo não se constata na comparação entre os Modelos 5 e 6 (Série 2) e os Modelos 9 e 10 (Série 3), nos quais a espessura da camada de silicone é de 0,2 cm. É possível que essa menor espessura dúctil tenha inibido a transmissão da deformação ao longo da camada dúctil e favorecido a deformação rúptil positiva, contida pela maior resistência à deformação da sobrecarga.

Na análise dos modelos da Série 3 interpreta-se que a espessa sobrecarga exerce forte influência sobre a deformação do silicone. Ocorre que o aumento da tensão normal nos modelos da Série 3 impossibilitou a propagação da deformação rúptil na sobrecarga e, por conseqüência, provocou um fluxo de escape do silicone para fora da estrutura antiforme e esse deslocamento dentro da camada dúctil transmitiu a

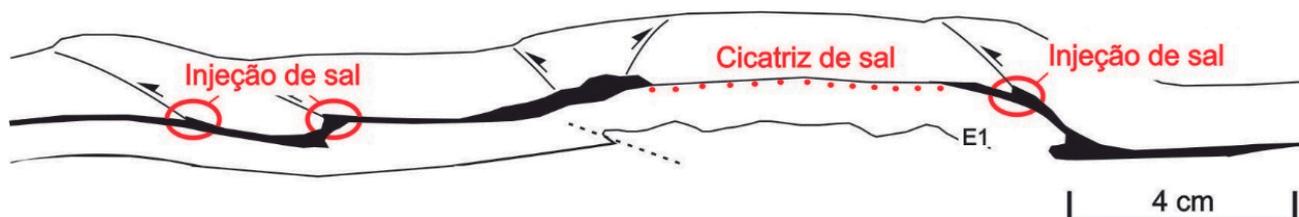
deformação horizontalmente, possibilitando a formação de uma falha reversa nas proximidades da parede móvel (lado esquerdo do modelo), aparentemente desacoplada da deformação na bacia invertida. Withjack e Callaway (2000) descreveram um efeito similar em experimentos de distensão. Para as autoras, os pequenos riftes desacoplados, distais (também formados junto à parede móvel), acomodam parte da distensão associada ao deslocamento que ocorreu ao longo da falha de borda da bacia.

Os resultados dos presentes experimentos confirmam o estudo realizado por Nalpas et al. (1995), apesar das diferenças intrínsecas aos modelos. Naqueles experimentos, nos quais o silicone preexistia à fase de distensão, os autores mostraram que em modelos com sobrecarga espessa, de alta resistência à deformação, é difícil ocorrer o acoplamento da deformação, ao contrário do que acontece em modelos de sobrecarga delgada. Também revelaram que modelos com elevada espessura da camada de silicone acarretam o desacoplamento da sobrecarga.

### A deformação da camada de silicone

Os experimentos do presente estudo mostram que o soerguimento da bacia e de seu entorno conduziu a um fluxo do silicone no sentido descendente, resultando no afinamento da camada viscosa na crista antiformal e no espessamento nas charneiras. Acarretou, também, uma ligeira injeção do silicone ao longo de superfícies de falhas compressivas (Figura 8) resultando em estruturas denominadas de “diápiros intrusivos” por Del Ventisette et al. (2005). A magnitude de cada um desses processos foi influenciada pelas variáveis aqui examinadas, especialmente pelas espessuras da camada de silicone e da sobrecarga.

Os modelos de inversão tectônica de Del Ventisette et al. (2005) mostram uma injeção de silicone ao longo de falhas normais invertidas mais intensa do que nos presentes experimentos. Vale observar que a camada dúctil estava posicionada no interior da sequência sin-distensão e o silicone mais próximo à borda da bacia acumulou volume suficientemente para ser capturado e ejetado durante a inversão, de forma expressiva na sobrecarga.



**Figura 8.** Desenho esquemático das unidades pós-distensão do Modelo 5, exemplificando a ocorrência de uma cicatriz de sal e de pequenas injeções de sal ao longo de falhas compressivas.

## Exemplo natural

### Bacia de Tucumán (Argentina)

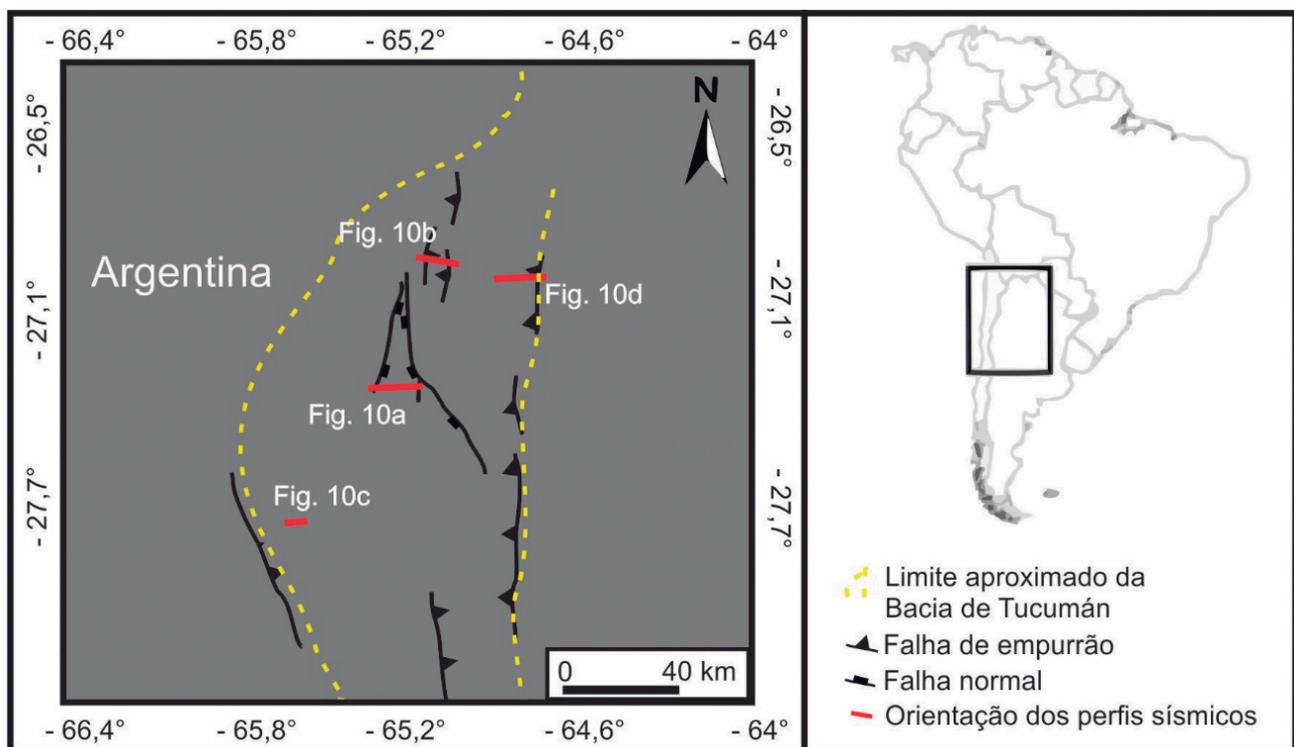
A Bacia de Tucumán, interpretada por Iaffa et al. (2011), ilustra feições rúpteis associadas à inversão de uma sequência contendo evaporitos (Figuras 9 e 10), similares naturais dos modelos físicos analisados no presente artigo.

A Bacia de Tucumán localiza-se na porção noroeste da Argentina (Figura 9), local onde a inversão positiva está correlacionada com a subducção da Placa de Nazca, na Placa Sul-Americana (Jordan et al., 1983; Grier et al., 1991). A formação da bacia envolveu distensão crustal durante o Cretáceo, na direção W-E, resultando em falhas extensionais com um *trend* predominante N-S. Durante o Mioceno-Quaternário ocorreram, na região, compressões, com reativações de falhas normais em alto ângulo, e formação de outras de empurrão, com um *trend* predominante N-S (Grier et al., 1991; Iaffa et al., 2011; Kley et al., 2005; Monaldi et al., 2008).

Segundo Iaffa et al. (2011), a estratigrafia da bacia envolve uma sequência sin-rifte (Cretácea), composta de rochas sedimentares e vulcânicas seguido por uma sequência pós-rifte (Cretácea-Paleógena), composta de rochas sedimentares. Os evaporitos ocorrem em um subgrupo na base da sequência pós-rifte. Durante o Paleógeno-Neógeno

a bacia foi sobreposta por outras sequências siliciclásticas (Marquillas et al., 2005; Iaffa et al., 2011).

A região central da bacia (Figura 10A) coincide com o depocentro da sedimentação pós-rifte, que inclui os evaporitos do Subgrupo Balbuena (Iaffa et al., 2011). Nota-se que o arcabouço estrutural da região é controlado por falhas normais do embasamento e que o espesso conjunto de sequências do pós-rifte não apresenta qualquer deformação rúptil. Diferente do que ocorre nos Modelos 9, 10, 11 e 12 da Série 3, a região central da Bacia de Tucumán não apresenta falhas normais reativadas ou falhas compressivas, nem tampouco flexão antiformal. Pelo contrário, a deformação no perfil se assemelha com a baixa magnitude de deformação do Modelo 2. As falhas (reversas, normais invertidas e normais), observadas na porção centro-norte e nas margens oeste e leste da bacia (Figuras 10B, 10C e 10D), sugerem que o perfil em discussão (Figura 10A) foi mais resistente à deformação, posto que se configura como a região de maior espessura de sobrecarga da bacia (Figura 9). Além disso, presume-se que os esforços relacionados à inversão tectônica, vergentes para leste, decresceram no sentido do centro da bacia. Dessa forma, somar-se-iam, ali, uma provável menor magnitude de deformação e uma maior espessura da sobrecarga, de forma a explicar a ausência de estruturas de inversão nas sequências pós-rifte da bacia.



Fonte: modificado de Iaffa et al. (2011).

**Figura 9.** Mapa geológico simplificado da Bacia de Tucumán com a localização das seções sísmicas interpretadas.

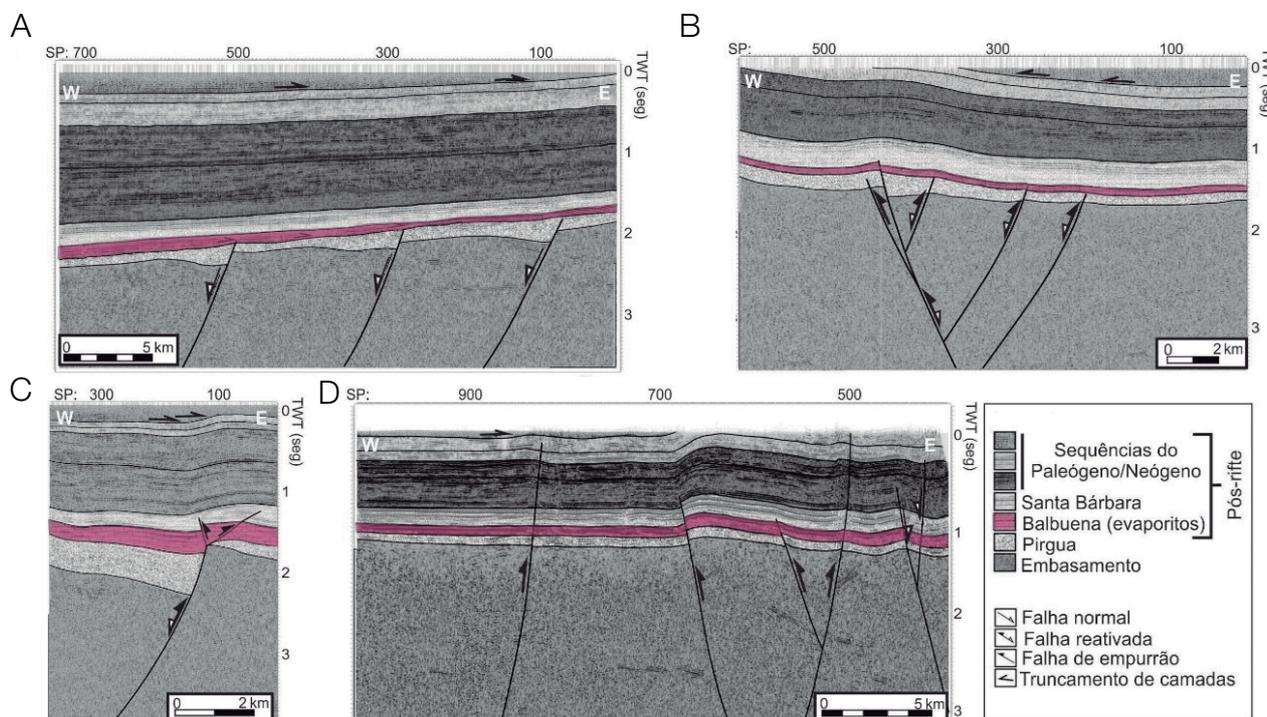
Iaffa et al. (2011) sugerem pouca variação de espessura das unidades do pós-rifte, na região centro-norte e na margem oeste da bacia (Figuras 10B e 10C), e diminuição relativa dessa espessura na margem leste (Figura 10D). As falhas distensionais reativadas e as falhas reversas observadas nos dois primeiros perfis (Figuras 10B e 10C) pouco penetram nas unidades sotopostas aos evaporitos, enquanto na margem leste (Figura 10D) várias falhas de empurrão cortam até as sequências pós-rifte da bacia.

Nos modelos, a elevada magnitude de deformação (91%) causou arqueamento de toda a bacia. Tal feição não ocorre regionalmente na Bacia de Tucumán, na qual se percebe apenas um leve arqueamento local acima das falhas reativadas ou reversas (Figuras 10B, 10C e 10D), fato que pode refletir uma menor magnitude de deformação na bacia do que nos modelos. Apesar das diferenças, é possível relacionar a penetrabilidade das estruturas de inversão da região centro-norte e da margem oeste da bacia à espessura maior das unidades do pós-rifte, à semelhança do que se observou, por exemplo, nos modelos da Série 3. As falhas normais invertidas cortando até as sequências pós-rifte exibidas no perfil da margem leste da bacia, como contraponto, refletem uma menor resistência à deformação também notada nos modelos da Série 2 e lá relacionadas à espessura menor da sobrecarga.

## CONCLUSÕES

Os experimentos de inversão tectônica desenvolvidos no presente estudo mostram que a resistência à deformação tanto de uma camada de silicone, dúctil, quanto da sobrecarga, rúptil, ambas inseridas em uma sequência pós-distensão, a depender das relações de espessura bem como da velocidade e da intensidade da deformação, controlam o arranjo de estruturas após a inversão do sistema distendido.

A resistência à deformação do silicone foi maior quando submetido a uma maior velocidade de deformação, tornando-se mais rígida nos modelos invertidos a  $v = 3$  cm/h do que a  $v = 1$  cm/h. O silicone se mostrou mais rígido nos modelos em que inibiu a transmissão contígua das estruturas à sobrecarga, caracterizados por uma relativa dissociação de movimento entre as falhas normais reativadas e compressivas novas (por exemplo, nos Modelos 5 e 6). Com uma maior espessura da camada dúctil (de 0,2 cm para 0,5 cm), a resistência à deformação do silicone diminuiu. Neste caso, o silicone acomodou a deformação por fluxo, internamente, o que, novamente, dificultou a transmissão dos esforços diretamente à sobrecarga (por exemplo, nos Modelos 5 e 7), na qual o número de estruturas rúpteis diminuiu. Finalmente, a resistência à deformação da sobrecarga foi maior quando sua espessura também foi maior. O aumento de 1,0 para 2,0 cm significou um crescimento



Fonte: modificado de Iaffa et al. (2011).

**Figura 10.** Seções sísmicas da Bacia de Tucumán interpretadas por Iaffa et al. (2011): (A) região central; (B) porção centro-norte; (C) margem oeste; e (D) margem leste. A sequência delimitada em rosa, representa aquela que compreende os evaporitos do pós-rifte.

de sua tensão normal de ruptura. Com a sobrecarga mais resistente, nenhuma falha foi capaz de rompê-la de base a topo, na região da bacia invertida.

Os modelos testaram a velocidade de deformação, a espessura da camada de silicone e da sobrecarga e os resultados foram coerentes com estudos anteriores, como os de Vendeville et al. (1995) e Withjack e Callaway (2000). No entanto, os autores analisaram a estruturação de bacias com a camada viscosa posicionada no interior da sequência sin-distensão. Com o arqueamento positivo da bacia durante a inversão tectônica, o diferencial reológico da camada dúctil promoveu o escape viscoso e desarmônico de material do alto axial em direção aos baixos periféricos. Do fluxo, resultaram no afinamento da camada de silicone nas porções mais elevadas e, localmente, a injeção do material viscoso ao longo de falhas reversas na sobrecarga.

No presente estudo, a inversão da bacia formou novas falhas compressivas e reativou falhas normais em seu interior. Feições similares observadas na Bacia de Tucumán (Argentina) permitiram discutir os resultados obtidos dentro do contexto de evolução do exemplo natural.

## AGRADECIMENTOS

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), a concessão da bolsa de mestrado; e ao Departamento de Geologia da UFOP, o apoio e suporte técnico à realização dos estudos.

## REFERÊNCIAS

- Adam, J., Urai J. L., Wieneke, B., Oncken, O., Pfeiffer, K., Kukowski, N., Lohrmann, J., Hoth, S., Van der Zee, Y., Schmatz, J. (2005). Shear localisation and strain distribution during tectonic faulting—new insights from granular-flow experiments and high-resolution optical image correlation techniques. *Journal of Structural Geology*, 27(2), 283-301. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2004.08.008>
- Bonini, M. (2001). Passive roof thrusting and forelandward fold propagation in scaled brittle-ductile physical models of thrust wedges. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 106(B2), 2291-2311. <https://doi.org/10.1029/2000JB900310>
- Bonini, M., Sani F., Antonielli, B. (2012). Basin inversion and contractional reactivation of inherited normal faults. *Tectonophysics*, 522, 55-88. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2011.11.014>
- Brun, J. P., Nalpas, T. (1996). Graben inversion in nature and experiments. *Tectonics*, 15(3), 677-687. <https://doi.org/10.1029/95TC03853>
- Carvalho, T. S. (2017). *Cinemática e Geometria de Camadas Rúpteis e Dúcteis Sobre Sistema de Falhas Normais Reativado: Observações a Partir de Modelos Físicos de Caixa de Areia*. Dissertação (Mestrado). Minas Gerais: Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP.
- Chadwick, R. A. (1993). Aspects of basin inversion in southern Britain. *Journal of the Geological Society*, 150(2), 311-322. <https://doi.org/10.1144/gsjgs.150.2.0311>
- Del Ventisette, C., Montanari, D., Bonini, M., Sani, F. (2005). Positive fault inversion triggering “intrusive diapirism”: an analogue modelling perspective. *Terra Nova*, 17(5), 478-485. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3121.2005.00637.x>
- Del Ventisette, C., Montanari, D., Sani, F., Bonini, M. (2006). Basin inversion and fault reactivation in laboratory experiments. *Journal of Structural Geology*, 28(11), 2067-2083. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2006.07.012>
- Dooley, T. P., Jackson, M. P. A., Jackson, C. A. L., Hudec, M. R., Rodriguez, C. R. (2015). Enigmatic structures within salt walls of the Santos Basin Part 2: Mechanical explanation from physical modelling. *Journal of Structural Geology*, 75, 163-187. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2015.01.009>
- Dooley, T. P., McClay K. R., Hempton, M., Smit, D. (2005). Salt tectonics above complex basement extensional fault systems: results from analogue modelling. *Geological Society, London, Petroleum Geology Conference series*, 6, 1631-1648. <https://doi.org/10.1144/0061631>
- Dooley, T., McClay, K. R., Pascoe, R. (2003). 3D analogue models of variable displacement extensional faults: applications to the Revfallet Fault system, offshore mid-Norway. *Geological Society, London, Special Publications*, 212, 151-167. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.2003.212.01.10>
- Ferrer, O., McClay, K. R., Sellier, N. C. (2016). Influence of fault geometries and mechanical anisotropies on the growth and inversion of hanging-wall synclinal basins: insights from sandbox models and natural examples. *Geological Society, London, Special Publications*, 439, 487-509. <https://doi.org/10.1144/SP439.8>
- Gabrielsen, R. H., Sokoutis, D., Willingshofer, E., Faleide, J. I. (2016). Fault linkage across weak layers during extension: an experimental approach with reference to the Hoop Fault Complex of the SW Barents Sea. *Petroleum Geoscience*, 22, 123-135. <https://doi.org/10.1144/petgeo2015-029>

- Gabrielsen, R. H., Zalmstra, H., Sokoutis, D., Willingshofer, E., Faleide, J. I., Braut, H. L. (2019). The influence of mechanically weak layers in controlling fault kinematics and graben configurations: Examples from analog experiments and the Norwegian continental margin. *AAPG Bulletin*, 103(5), 1097-1110. <https://doi.org/10.1306/10261817077>
- Gomes, C. J. S. (2013). Investigating new materials in the context of analog-physical models. *Journal of Structural Geology*, 46, 158-166. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2012.09.013>
- Grier, M. E., Salfity, J. A., Allmendinger, R. W. (1991). Andean reactivation of the Cretaceous Salta rift, northwestern Argentina. *Journal of South American Earth Sciences*, 4(4), 351-372. [https://doi.org/10.1016/0895-9811\(91\)90007-8](https://doi.org/10.1016/0895-9811(91)90007-8)
- Harvey, M. J., Stewart, S. A. (1998). Influence of salt on the structural evolution of the Channel Basin. *Geological Society, London, Special Publications*, 133(1), 241-266. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1998.133.01.11>
- Hubbert, M. K. (1937). Theory of scale as applied to the study of geologic structures. *Bulletin of the Geological Society of America*, 48(10), 1459-1520. <https://doi.org/10.1130/GSAB-48-1459>
- Iaffa, D. N., Sàbat, F., Bello, D., Ferrer, O., Mon, R., Gutierrez, A. A. (2011). Tectonic inversion in a segmented foreland basin from extensional to piggy back settings: The Tucumán basin in NW Argentina. *Journal of South American Earth Sciences*, 31(4), 457-474. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2011.02.009>
- Jackson, M. P. A., Vendeville, B. C. (1994). Regional extension as a geologic trigger for diapirism. *Geological Society of America Bulletin*, 106(1), 57-73. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1994\)106<0057:REAAGT>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1994)106<0057:REAAGT>2.3.CO;2)
- Jordan, T. E., Isacks, B. L., Allmendinger, R. W., Brewer, J. A., Ramos, V. A., Ando, C. J. (1983). Andean tectonics related to geometry of subducted Nazca plate. *Geological Society of America Bulletin*, 94(3), 341-361. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1983\)94<341:ATRTGO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1983)94<341:ATRTGO>2.0.CO;2)
- Kley, J., Rossello, E. A., Monaldi, C. R., Habighorst, B. (2005). Seismic and field evidence for selective inversion of Cretaceous normal faults, Salta rift, northwest Argentina. *Tectonophysics*, 399(1-4), 155-172. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2004.12.020>
- Koyi, H. A. (1995). Mode of internal deformation in sand wedges. *Journal of Structural Geology*, 17(2), 293-300. [https://doi.org/10.1016/0191-8141\(94\)00050-A](https://doi.org/10.1016/0191-8141(94)00050-A)
- Koyi, H. A., Petersen, K. (1993). Influence of basement faults on the development of salt structures in the Danish Basin. *Marine and Petroleum Geology*, 10(2), 82-94. [https://doi.org/10.1016/0264-8172\(93\)90015-K](https://doi.org/10.1016/0264-8172(93)90015-K)
- Lake, S. D., Karner, G. D. (1987). The structure and evolution of the Wessex Basin, southern England: an example of inversion tectonics. *Tectonophysics*, 137(1-4), 347-378. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(87\)90328-3](https://doi.org/10.1016/0040-1951(87)90328-3)
- Luján, M., Storti, F., Rossetti, F., Crespo-Blanc, A. (2006). Extrusion vs. accretion at the frictional-viscous decollement transition in experimental thrust wedges: the role of convergence velocity. *Terra Nova*, 18(4), 241-247. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3121.2006.00685.x>
- Marquillas, R. A., Papa, C., Sabino, I. F. (2005). Sedimentary aspects and paleoenvironmental evolution of a rift basin: Salta Group (Cretaceous-Paleogene), northwestern Argentina. *International Journal of Earth Sciences*, 94(1), 94-113. <https://doi.org/10.1007/s00531-004-0443-2>
- McClay, K. R., Ellis P. G. (1987). Analogue models of extensional faults geometries. *Geological Society, London, Special Publication*, 28(1), 109-125. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1987.028.01.09>
- Monaldi, C. R., Salfity, J. A., Kley, J. (2008). Preserved extensional structures in an inverted Cretaceous rift basin, northwestern Argentina: Outcrop examples and implications for fault reactivation. *Tectonics*, 27(1), 1-21. <https://doi.org/10.1029/2006TC001993>
- Nalpas, T., Brun, J. P. (1993). Salt flow and diapirism related to extension at crustal scale. *Tectonophysics*, 228(3-4), 349-362. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(93\)90348-N](https://doi.org/10.1016/0040-1951(93)90348-N)
- Nalpas, T., Douaran, S. L., Brun, J. P., Unternehr, P., Richert, J. P. (1995). Inversion of the Broad Fourteens Basin (offshore Netherlands), a small-scale model investigation. *Sedimentary Geology*, 95(3-4), 237-250. [https://doi.org/10.1016/0037-0738\(94\)00113-9](https://doi.org/10.1016/0037-0738(94)00113-9)
- Pichot, T., Nalpas, T. (2009). Influence of synkinematic sedimentation in a thrust system with two decollement levels: analogue modelling. *Tectonophysics*, 473(3-4), 466-475. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2009.04.003>

- Ruh, J. B., Kaus, B. J., Burg, J. P. (2012). Numerical investigation of deformation mechanics in fold-and-thrust belts: Influence of rheology of single and multiple décollements. *Tectonics*, 31(3), TC3005. <http://doi.org/10.1029/2011TC003047>
- Smit, J. H. W., Brun, J. P., Sokoutis, D. (2003). Deformation of brittle-ductile thrust wedges in experiments and nature. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 108(B10), 2480. <https://doi.org/10.1029/2002JB002190>
- Soto, R., Casas-Sainz, A. M., Del Río, P. (2007). Geometry of half-grabens containing amid-level viscous décollement. *Basin Research*, 19(3), 437-450. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2117.2007.00328.x>
- Vendeville, B. C., Cobbold, P. R., Davy, P., Choukroune, P., Brun, J. P. (1987). Physical models of extensional tectonics at various scales. *Geological Society, London, Special Publication*, 28(1), 95-107. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1987.028.01.08>
- Vendeville, B. C., Ge, H., Jackson, M. P. A. (1995). Scale models of salt tectonics during basement-involved extension. *Petroleum Geoscience*, 1(2), 179-183. <https://doi.org/10.1144/petgeo.1.2.179>
- Vendeville, B. C., Jackson, M. P. A. (1992). The fall of diapirs during thin-skinned extension. *Marine and Petroleum Geology*, 9(4), 354-371. [https://doi.org/10.1016/0264-8172\(92\)90048-J](https://doi.org/10.1016/0264-8172(92)90048-J)
- Weijermars, R., Jackson, M. P. A., Vendeville, B. C. (1993). Rheological and tectonic modeling of salt provinces. *Tectonophysics*, 217(1-2), 143-174. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(93\)90208-2](https://doi.org/10.1016/0040-1951(93)90208-2)
- Withjack, M. O., Callaway, S. (2000). Active Normal Faulting Beneath a Salt Layer: An Experimental Study of Deformation Patterns in the Cover Sequence. *AAPG Bulletin*, 84(5), 627-651. <https://doi.org/10.1306/C9EBCE73-1735-11D7-8645000102C1865D>