

A CONTRIBUIÇÃO DA MODELAGEM FÍSICA DE FALHAS ASSOCIADAS À DISTENSÃO OBLÍQUA E ORTOGONAL EM BACIAS SEDIMENTARES

Rafaela Andraus Portugal¹,
Fernando César Alves da Silva^{1, 2,3},
Fabiano Jackson S. Oliveira²

1 Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica – PPGG. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, (rafaelageo@ig.com.br, fernando@geologia.ufrn.br).

2 Departamento de Geologia. Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN. (fabianojackson@hotmail.com)

3 Pesquisador do CNPq

RESUMO

A utilização de aparato do tipo “caixa-de-areia” para simular estruturas geológicas tem contribuído para melhorar o conhecimento de muitas bacias sedimentares (experimentos distensionais), bem como de faixas orogênicas (experimentos compressionais). A arquitetura de muitas bacias é função do desenvolvimento de falhas ao longo dos seus diversos estágios evolutivos. Nesse trabalho utilizamos a técnica da caixa-de-areia para estudar a nucleação e desenvolvimento de falhas durante a abertura de riftes ortogonais e oblíquos. Foi simulada a variação da nucleação e desenvolvimento de falhas considerando: a) mudança no mergulho da falha-mestra do embasamento; b) o ângulo entre a direção de distensão e o *trend* da falha-mestra (obliquidade do rifte). Em todos os modelos, verificou-se que as falhas crescem através da união de segmentos. Algumas diferenças são evidentes quando os diversos modelos são comparados. Nos modelos oblíquos algumas falhas exibem um claro componente de rejeito direcional, enquanto outras se tornam inativas com o crescente rifteamento. A taxa de crescimento (rápida ou lenta) das falhas nos primeiros estágios de deformação é claramente influenciada pelo mergulho da falha-mestra.

Palavras-chave: Falhas normais, riftes, modelagem em caixa-de-areia.

ABSTRACT

The use of sand box apparatus to simulate the development of geological features has improved the knowledge of many sedimentary basins as well as orogenic belts. The architecture of any sedimentary basins is function the development of faults along their evolutionary stages. Sand-box technique was used to study the nucleation and development of faults during both oblique and orthogonal rift opening. Simulation of the variation of fault nucleation and development was conducted under two conditions: a) changing the dip of a master fault in the basement; b) changing the obliquity between the distension direction and the master-fault trend. In all models, almost all faults have grown by segments linkage. Some differences however are evident when the several models are compared. In the oblique models some faults show a clear component of strike-slip, while others became inactive as rifting grows. The growth rate of the faults in the first stages of deformation is clearly influenced by the master-fault dip.

Keywords: Normal fault, rifts, sand box modelling.

INTRODUÇÃO

Na última década, a modelagem física de estruturas geológicas vem sendo bastante empregada como ferramenta para o estudo do desenvolvimento das diferentes estruturas que ocorrem em ambientes distensionais (Fossen & Gabrielsen 1996, Corti 2004) e compressionais (Casas *et al.* 2001, McClay & Bonora 2001, McClay & Whitehouse 2004).

O entendimento de como essas estruturas se desenvolvem, sua distribuição no tempo e espaço, além de sua cinemática, tem grande importância na definição de alvos prospectivos/exploratórios nos diversos ambientes geológicos. Particularmente, nos ambientes distensionais as estruturas relacionadas aos processos de rifteamento são objeto de crescente interesse econômico, principalmente com relação às ocorrências de hidrocarbonetos. Nesse contexto as falhas podem influenciar na migração e armazenamento de óleo e gás.

O presente trabalho expressa o resultado de simulações do desenvolvimento de estruturas frágeis em ambientes distensionais em resposta a duas variáveis principais: a) variação na obliquidade (α) entre uma descontinuidade principal, aqui denominada de falha-mestra e a direção de distensão; b) mudança da inclinação do mer-

gulho (q) dessa descontinuidade. Através da observação da nucleação e desenvolvimento das estruturas formadas após sucessivos incrementos de distensão superimpostos, elaborou-se o modelo geométrico e cinemático de formação dessas estruturas e sua distribuição espaço-temporal.

MÉTODO EXPERIMENTAL

Para a simulação de falhamentos distensionais, utilizou-se um aparato tipo “caixa-de-areia”, que se compõe de uma caixa de vidro retangular (52 x 39 x 20 cm, respectivamente, comprimento, largura e altura), com três paredes fixas e uma móvel. Esta última é acoplada a um motor elétrico que a movimenta com velocidade controlada (Fig. 1). Moldes de madeira foram adaptados geometricamente e utilizados para simular a superfície da falha-mestra. Tais moldes, posicionados na extremidade fixa do aparato, representam o muro e possuem diferentes ângulos de mergulho (q) e obliquidades (α). Uma película de borracha de espessura milimétrica é colocada na base da caixa e fixada na parede móvel para estimular a movimentação distensional da pilha sedimentar (teto da falha-mestra). Durante os experimentos, convencionou-se como EW a direção de distensão conforme mostrada na figura 1.

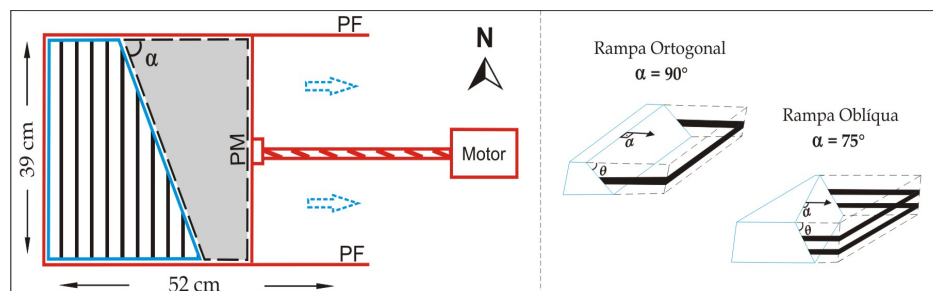


Figura 1 – Desenho esquemático ilustrando o aparato (em mapa). PF=Parede Fixa, PM=Parede Móvel. A área tracejada cinza representa a película de borracha e a área com listras verticais representa o bloco de madeira, ambos com geometria variável. As setas tracejadas indicam o sentido de distensão. Os blocos diagramas ilustram a configuração 3D dos modelos ortogonais e oblíquos. Os ângulos α e q denotam, respectivamente, a obliquidade e o mergulho da falha-mestra.

DESCRIÇÃO DOS MODELOS FÍSICOS

Nos experimentos realizados o pacote sedimentar possuiu espessura média total de 10 cm, composto por camadas centimétricas (~0,8 cm) de areia com coloração diferente, para facilitar a visualização das estruturas. A areia seca foi escolhida para simular os extratos sedimentares por ter um comportamento Navier-Coulomb e ângulo de fricção similares àqueles de rochas sedimentares (McClay 1990), simulando bem a reologia da crosta superior nessa escala de observação (Koyi *et al.* 2004, Eisenstadt & Sims 2005).

A descrição das estruturas desenvolvidas foi realizada de acordo com seu surgimento e desenvolvimento durante o processo de distensão. Apenas alguns estágios foram escolhidos como representativos dos três modelos descritos a seguir. As estruturas observadas constituem falhas normais e oblíquas, que serão descritas de acordo com uma ordem numérica, relacionada à ordem cronológica aproximada de sua nucleação. As falhas são formadas por segmentos e nesse texto usamos a nomenclatura F_n ($n = 1, 2, 3$, etc.) para a citação de tais estruturas.

Três tipos de rifteamento foram estudados, sendo dois oblíquos e um terceiro ortogonal. No modelo ortogonal a obliquidade do muro corresponde a $\alpha=90^\circ$ e o mergulho da falha-mestra é $q=45^\circ$. Para o rifteamento oblíquo foram configurados dois modelos distintos: i) $\alpha=75^\circ$ e $q=45^\circ$; ii) $\alpha=75^\circ$ e $q=30^\circ$. Os incrementos de distensão, dados em percentagem de acordo com o deslocamento, foram calculados em relação ao comprimento da base da camada inferior na extremidade norte do teto, que possui 12,5 cm de comprimento. A velocidade média da distensão foi $4,1 \times 10^{-2}$ cm/seg em todos os experimentos. O registro dos vários incrementos de distensão foi feito via filmagem e fotografias em perfis e em mapa.

RESULTADOS

Modelo I: distensão ortogonal ($\alpha=90^\circ$; $q=45^\circ$)

A evolução das estruturas relacionadas a esse tipo de distensão é aqui sumarizada pelo experimento ED17. O molde utilizado para simular a falha-mestra do embasamento (muro) apresenta *trend* NS, com $q=45^\circ$ (mergulho) e $\alpha=90^\circ$ (obliquidade), ou seja, a distensão (EW) é ortogonal ao *trend* da falha-mestra.

As primeiras falhas são nucleadas antes de 5,6% de distensão propagando-se da base para o topo. Essas falhas são normais, sintéticas (F_1 e F_2) e antitéticas (F_3) em relação à falha-mestra. A falha F_3 , mais importante nesse estágio, ocorre com traço curvilíneo composto de segmentos com *trend* variando de NW a NE. Com os próximos incrementos de distensão, F_1 , F_2 e F_3 continuam a se desenvolver e quando a distensão atinge 8,8%, uma nova falha normal, antitética (F_4) é nucleada a leste de F_3 (Fig. 2a). A acomodação das falhas F_1 , F_2 e F_3 definem um *graben* relativamente bem desenvolvido que, em planta, é evidenciado pelo rebaixamento topográfico da porção central do modelo.

Aos 13,6% de distensão, ressalta-se a propagação para norte de F_4 bem como o surgimento da falha F_5 , nucleada a oeste de F_3 na parte sul do modelo, com cinemática normal, sintética e paralela à falha-mestra. Quando a distensão atinge 16%, a propagação de F_5 ocorre em direção à porção norte, representada por segmentos neoformados de *trends* NNE, ligeiramente oblíquos à falha-mestra (Fig. 2b). As demais estruturas continuam a se desenvolver, com conseqüente aumento do rejeito. Entre 16% e 20% de distensão a deformação foi praticamente restrita ao desenvolvimento da falha F_5 , que continua a se propagar para norte, apresentando traço aproximadamente paralelo à falha-mestra.

Entre 20% e 24% de distensão houve apenas um aumento no rejeito das falhas

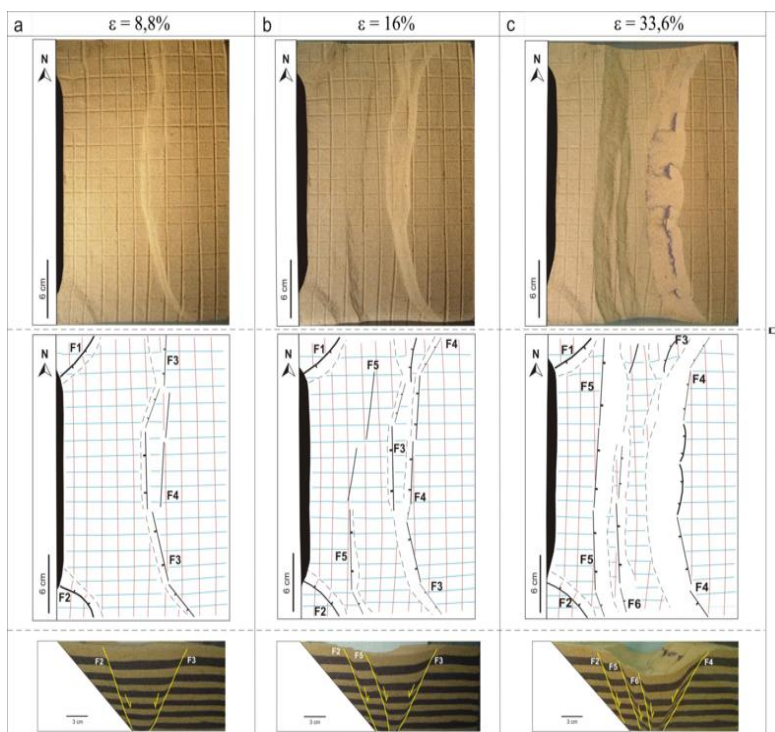


Figura 2 – Imagem fotográfica e sua respectiva interpretação em mapa e perfil (extremidade sul do modelo) ilustrando as estruturas desenvolvidas no Modelo I ($\alpha=90^\circ$; $q=45^\circ$) quando a distensão atinge (a) 8,8%, (b) 16% e (c) 33,6%. A seta indica o sentido de distensão (EW).

existentes. A configuração final do *graben*, com eixo NNE, é claramente observada como uma estrutura resultante do abatimento das camadas devido às falhas F5, a oeste, e F4, a leste. Uma nova estrutura só vai ser nucleada em torno de 30% de distensão. Trata-se de uma falha normal (F6), sintética e paralela à falha-mestra. Em 33,6% de distensão, F6 apresenta-se bem desenvolvida nas porções sul e central sem, entretanto, atingir a porção norte (Fig. 2c).

Modelo II: distensão oblíqua ($\alpha=75^\circ$; $q=45^\circ$)

Esse modelo é representado pelo experimento ED12, realizado com a falha-mestra tendo um mergulho (q) igual a 45° , uma obliquidade dada por $\alpha=75^\circ$ e direção N15°W, oblíqua ao sentido da distensão (EW).

As estruturas formadas com aproximadamente 4% de distensão são evidenciadas por uma discreta depressão topográfica no centro do modelo que denota o início do processo de rifteamento. Essa estrutura é originada por uma falha (F1), subparalela à falha-mestra, situada na porção centro-sul do modelo. F1 é antitética e oblíqua, apresentando um componente discreto de rejeito direcional de cinemática dextral. Duas outras falhas, F2 e F3, desenvolvem-se nas extremidades SW e NW, respectivamente, e constituem estruturas oblíquas à falha-mestra. Em torno de 8% de distensão duas novas falhas, F4 e F5, são nucleadas (Fig. 3a). A falha F4 tem caráter segmentado e inicia sua nucleação no centro do modelo, se propagando para as regiões N e S. Esta

falha é normal, antitética e subparalela à falha-mestra. Por sua vez, a falha F5 é oblíqua à falha-mestra, tem rejeito normal e truncada F1 no extremo SE do experimento. As falhas prévias F2 e F3 apresentam um incremento no rejeito oblíquo com cinemática dextral e sinistral, respectivamente.

Os segmentos da falha F4 coalescem, configurando um traço único e tortuoso em superfície, quando a distensão alcança 16% (Fig. 3b). O desenvolvimento da falha F5 envolve a porção sul da falha F1, que sofre erosão superficial. Pouco antes desse estágio

tem-se a nucleação de uma nova falha (F6) na porção central da bacia. Essa falha apresenta-se segmentada, de *trend* NE, sintética a falha-mestra e exibe rejeito normal. O *graben* principal é agora definido pelas falhas de borda F6 e F4 de *trend* NE e mergulhos para SE e SW, respectivamente. Com 24% de distensão, o *graben* existente apresenta um incremento no seu rebaixamento. A falha F4 apresenta acentuada erosão de suas escarpas.

Pouco antes de 32% de distensão, inicia-se a formação da falha F7, localizada na porção sul e central da zona do rifte, consti-

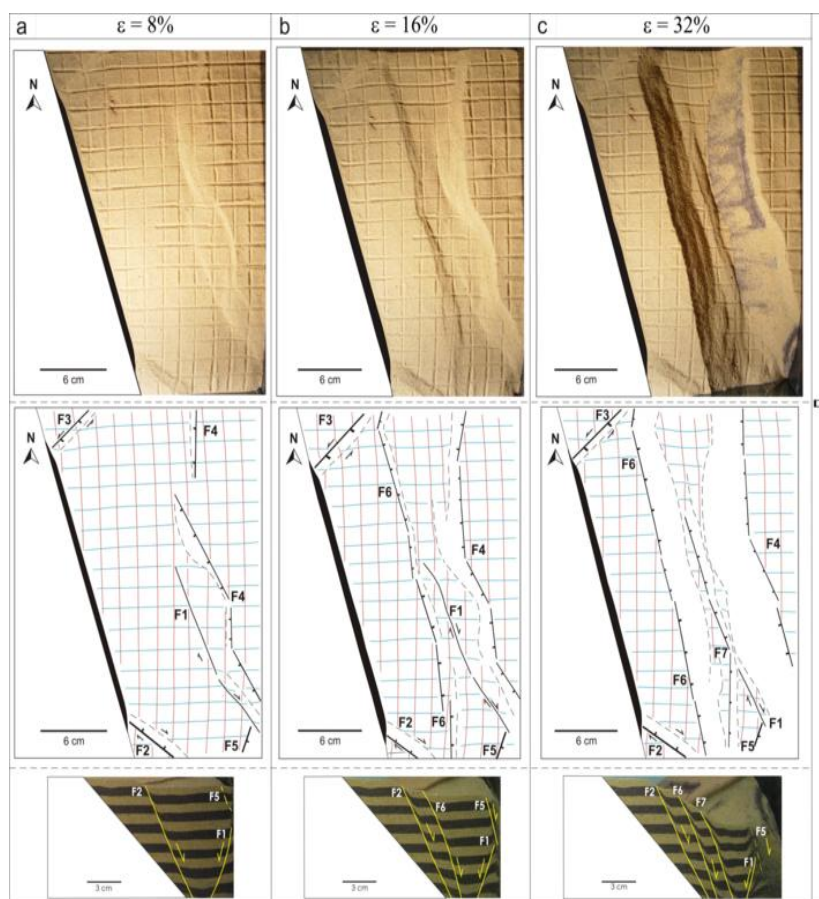


Figura 3 – Imagem fotográfica e sua respectiva interpretação em mapa e perfil (extremidade sul do modelo) ilustrando as estruturas desenvolvidas no Modelo II ($\alpha=75^\circ$; $q=45^\circ$) quando a distensão atinge (a)8%, (b)16% e (c)32%. A seta indica o sentido de distensão (EW).

tuindo depocentros da bacia. Essa falha, já bem desenvolvida no estágio de 32% de distensão, possui rejeito com componente oblíquo dextral, sendo sintética e com *trend* NE, paralelo à falha-mestra (Fig. 3c). A visualização da falha F1 restringe-se ao segmento SE, uma vez que o segmento mais central encontra-se obliterado pela “erosão/sedimentação” nas áreas das falhas adjacentes. Próximo dos 56% de distensão ocorre o desenvolvimento de duas novas falhas normais e sintéticas, F8 e F9, concomitante à propagação da falha F7 para a extremidade norte do modelo. A falha F8, na porção interna do *graben*, é paralela à falha-mestra, enquanto F9 é oblíqua e situa-se na porção NE do experimento, truncando F4. A visualização da falha F1 é obliterada por material oriundo das ombreiras do rifte. O rejeito de F4 apresenta incremento significativo, obliterando o traço (em mapa) de F5. A falha F6 aparece como um segmento único e retilíneo, paralelo à falha-mestra.

Modelo III: distensão oblíqua ($\alpha=75^\circ$; $q=30^\circ$)

A evolução desta modelagem é aqui sumarizada pelo experimento ED13. O molde utilizado para simular a falha-mestra do embasamento (muro) apresenta mergulho (q) de 30° e obliquidade $\alpha=75^\circ$, que determina para essa descontinuidade um *trend* N15°W, oblíquo ao sentido da distensão (EW).

Um fato peculiar a esse experimento é que o desenvolvimento das estruturas até 4% de distensão é muito mais rápido que nos modelos anteriores. Falhas normais F1 e F2, subparalelas a falha-mestra, delimitam a discreta depressão topográfica que marca o início do processo de rifteamento. A falha antitética F1 origina-se na porção leste do modelo, enquanto que F2 situa-se no centro e é sintética à falha-mestra. Ambas as falhas apresentam um traçado segmentado, com propagação de sul para norte. No extremo SE do experimento é nucleada a

falha F3, normal, sintética e oblíqua à falha-mestra. A zona do rifte é bem delineada ao atingir 8% de distensão (Fig. 4a). As falhas de borda ainda mostram claramente seu caráter segmentado, especialmente F2 cujos segmentos variam de NW a NS. A falha F3 tem evolução bastante discreta. A grande diferença deste para o estágio anterior é o rápido abatimento das camadas, reflexo do grande aumento no rejeito das falhas.

Duas falhas normais, uma sintética (F5) e outra antitética (F4), com pequenos rejeitos, são neoformadas na porção interna ao rifte, quando a distensão alcança 16% (Fig. 4b). A falha F4 tem caráter segmentado sendo nucleada na porção central do modelo. Por sua vez, F5, representada por um único segmento na porção norte do rifte, apresenta um discreto componente oblíquo dextral. O aumento da distensão para 32% é absorvido principalmente por um aumento de rejeito das falhas de bordas (aumentando a largura do rifte) e a propagação das falhas F4 e F5 leva a geração de um novo depocentro na porção central do rifte (Fig. 4c). O componente oblíquo dextral em F5 é mais evidente nos segmentos neoformados, na parte centro sul.

Quando a distensão ultrapassa os 50%, a principal consequência é o alargamento do rifte com o escorregamento (“erosão”) do material oriundo de suas ombreiras para o interior da bacia, dificulta a observação de seu assoalho. No geral a zona do rifte exhibe, em mapa, um aumento de 10% na sua largura média, em relação ao estágio anterior.

Influência do mergulho e da obliquidade na largura da bacia

A largura da bacia (w) desenvolvida nos modelos (nos quais se utilizou o bloco de madeira para simular a descontinuidade prévia) é mais influenciada pelo mergulho da descontinuidade do que pela obliquidade de distensão. Em geral, observou-se que

a largura da bacia é maior nos experimentos cuja falha-mestra apresenta menor mergulho (Fig. 5). Por exemplo, no *Modelo III* ($\alpha=75^\circ$, $q=30^\circ$) ocorre o desenvolvimento de um grande número de segmentos nos estágios iniciais de distensão, apresentando uma zona de rifteamento mais larga com falhas de borda bem definidas logo aos 4%. Em contrapartida, nos modelos cuja falha-mestra mergulha 45° (*I e II*) ocorre o desenvolvimento de falhas oblíquas que antecedem e retardam o estabelecimento da zona de rifteamento (aos 16% de distensão).

A obliquidade da distensão nos experimentos com descontinuidade prévia (blocos de madeira) influencia principalmente na nucleação das estruturas, que irão

originar as zonas de rifteamento. Em experimentos realizados sem a presença da descontinuidade prévia verificou-se que w possui também um grau de dependência da obliquidade da distensão. A Figura 6 mostra, embora com alguma alternância nos valores intermediários, que em linhas gerais, w é inversamente proporcional à obliquidade (α). Apesar da distribuição semelhante dos valores de w com a distensão, nota-se, em detalhe, que no estágio inicial de distensão (Fig. 6) w é maior no sistema ortogonal (*Modelo IV*) e menor quando a obliquidade é 45° (*Modelo VII*). Esta relação de w com α , apesar de não ser progressiva com a evolução da distensão, é ressaltada novamente no estágio final de disten-

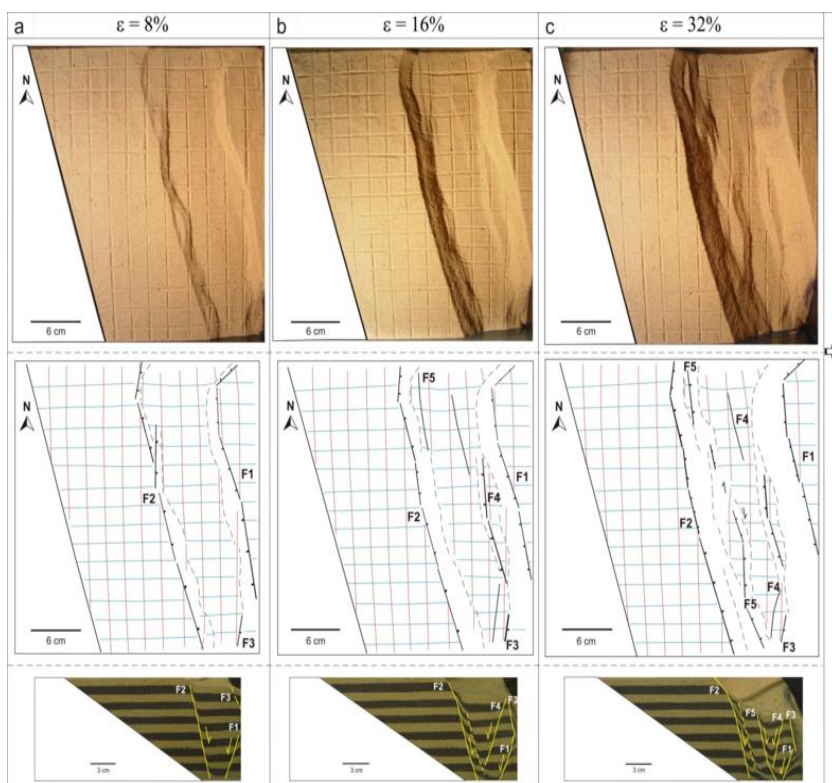


Figura 4 – Imagem fotográfica e sua respectiva interpretação em mapa e perfil (extremidade sul do modelo) ilustrando as estruturas desenvolvidas no *Modelo III* ($\alpha=75^\circ$; $q=30^\circ$) quando a distensão atinge (a)8%, (b)16% e (c)32%. A seta indica o sentido de distensão (EW).

são, onde as bacias mais largas desenvolvem-se nos modelos menos oblíquos (*Modelos IV e V*, respectivamente, 90° e 75°) e as mais estreitas nos mais oblíquos (*Modelos VI e VII*, respectivamente, 60° e 45°).

CONCLUSÕES

Os experimentos realizados demonstraram a importância do modelamento físico no auxílio ao entendimento da distribuição espaço-temporal (nucleação e de-

envolvimento) de falhamentos associados ao processo de rifteamento crustal. Tanto nos modelos oblíquos como no ortogonal, as falhas são nucleadas por segmentos, não necessariamente paralelos e coalescem. Algumas vezes a ligação entre segmentos maiores é feita por segmentos oblíquos menores. A nucleação e desenvolvimento das falhas ocorrem geralmente do centro para as bordas e da base para o topo dos modelos.

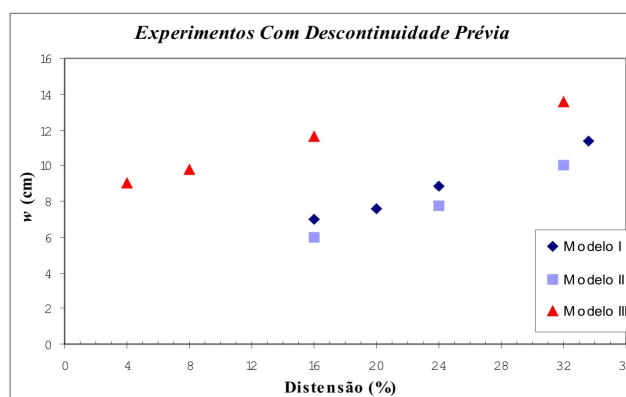


Figura 5 – Gráfico ilustrando a relação direta entre a largura da bacia (w) e a distensão para os Modelos I ($\alpha=90^\circ$, $q=45^\circ$), II ($\alpha=75^\circ$, $q=45^\circ$) e III ($\alpha=75^\circ$, $q=30^\circ$). Observar a influência do mergulho da descontinuidade na largura da bacia.

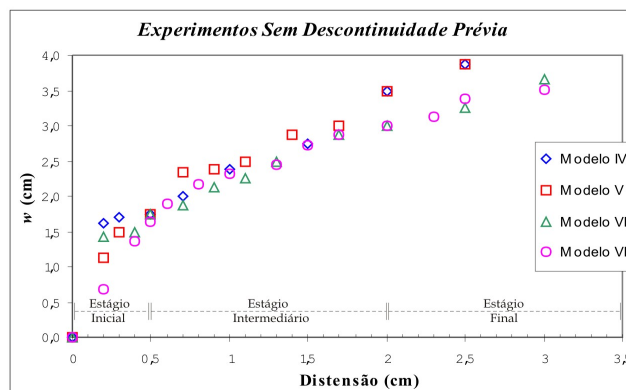


Figura 6 – Gráfico ilustrando a relação direta entre a largura da bacia (w) e a distensão variando-se o valor da obliquidade (α) para os Modelos IV ($\alpha=90^\circ$), V ($\alpha=75^\circ$), VI ($\alpha=60^\circ$) e VII ($\alpha=45^\circ$). Observar a influência da obliquidade da distensão na largura da bacia (w).

As falhas observadas têm caráter normal, podendo ser sintéticas ou antitéticas, paralelas (predominante em todos os experimentos) ou oblíquas à falha-mestra. Embora o componente vertical do rejeito seja predominante, uma contribuição do componente direcional é mapeada nos modelos oblíquos. No *Modelo II* ($\alpha=75^\circ$, $q=45^\circ$), o desenvolvimento de falhas com componente de rejeito oblíquo é relativamente precoce, embora elas se tornem inativas com o desenvolvimento das falhas de borda do rifte. O arranjo arquitetural destas bacias é controlado tanto pela direção de abertura do rifte (obliquidade de distensão) quanto pelo mergulho da descontinuidade prévia.

A arquitetura interna final dos riftes mostra o desenvolvimento de blocos altos e baixos mais intenso na porção oeste da bacia (próxima ao muro), que governam os depocentros. O desenvolvimento das falhas (bem como o modo como ocorrem), por sua vez, tem influência direta no desenvolvimento de condutos, barreiras e *traps* ao fluxo de fluidos, daí a importância de se modelar tais estruturas, com a finalidade de melhor conhecer sua disposição geométrica e evolução durante progressivos estágios de distensão.

Agradecimentos

Os autores externam seus agradecimentos a CAPES, ANP e ao CNPq pelas bolsas de mestrado, iniciação científica e produtividade em pesquisa, respectivamente. Agradecemos também as sugestões/comentários do revisor anônimo da Revista.

REFERÊNCIAS

Casas, A.M., Gapais, D., Nalpas, T., Besnard, K., Román-Berdiel T. 2001.

Analogue models of compressive systems. *Journal of Structural Geology*, 23:733-743.

Corti, G. 2004. Centrifuge modelling of the influence of crustal fabrics on the development of transfer zones: insights into the mechanics of continental rifting architecture. *Tectonophysics*, 384:191-208.

Eisenstadt, G., Sims, D. 2005. Evaluating sand and clay models: do rheological differences matter? *Journal of Structural Geology*, 27:1399-1412.

Fossen, H. & Gabrielsen, R.H. 1996. Experimental modeling of extensional fault systems by use of plaster. *Journal of Structural Geology*, 18:673-687.

Koyi, H.A., Sans, M., Teixell, A., Cotton, J., Zeyen, H. 2004. The significance of penetrative strain in the restoration of shortened layers from sand models and Spanish Pyrenees. In: McClay, K.R. (Ed.) Thrust tectonics and hydrocarbon systems. *AAPG Memoir* 82: 184-206.

McClay, K. & Bonora M. 2001. Analog models of restraining stepovers in strike-slip fault systems. *AAPG Bulletin*, 85:233-260.

McClay, K.R. 1990. Deformation mechanics in analogue models of extensional fault system. In: Knipe, R.J. & Rutter, H. (Eds.) Deformation mechanisms, rheology and tectonics. *Geological Society of London Special Publication*, 54:445-453.

McClay, K. & Whitehouse P.S. 2004. Analog modeling of doubly vergent thrust wedges. In: McClay K.R. (Ed.) Thrust tectonics and hydrocarbon systems. *AAPG Memoir* 82:184-206.