



Desenvolvimento, geometria e cinemática de falhas associadas à distensão oblíqua e ortogonal em bacias sedimentares: a contribuição do modelamento físico

R.A. Portugal, F.C. Alves da Silva & F.J.S. Oliveira

Universidade Federal do Rio Grande do Norte

Abstract The use of sand box apparatus to simulate distensional deformation has improved the knowledge of many sedimentary basins as well orogenic belts. The architecture of any sedimentary basins is a function of faults development along their several evolutionary stages. Additionally the arrangement, geometry and kinematics of the brittle features can be at least partially drive by the distension mode of the rifting process. Thus, once such fault could play a role during hydrocarbon migration and entrapments they are the focus of many recent researches. We used the sand-box technique to study the nucleation and development of faults during both oblique and orthogonal rift opening. We simulated the variation of fault nucleation and development under two conditions: i) changing in the dip of a master fault in the basement; ii) the obliquity between the distension direction and the master-fault trend. In all models, almost all faults grown by segments linkage. Some differences however are evident when we compare the several models. In the oblique models some faults exhibit a clear component of strike-slip, but some became inactive as rifting grows. The growth rate (fast or slow) of the faults in the first stages of deformation is clearly influenced by the master-fault dip.

Keywords: Normal fault, graben, sand box modeling.

INTRODUÇÃO Na última década, o modelamento físico de estruturas geológicas vem sendo bastante empregado 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.

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 mergulho (θ) dessa descontinuidade. Por meio 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, utilizamos um aparato tipo “caixa-de-areia”, que se compõe de uma caixa de vidro retangular (52 x 39 x 20 cm, comprimento, largura e altura, respectivamente), com três paredes fixas e uma móvel. Essa 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 bloco *footwall* e possuem diferentes ângulos de mergulho (θ) 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 extensional da pilha sedimentar (bloco *hangingwall* da falha-mestra). Durante os experimentos, convencionou-se como EW a direção de distensão conforme mostrada na figura 1.

O pacote sedimentar em nossos experimentos 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 similar àqueles de rochas sedimentares (McClay 1990), simulando bem a reologia da crosta superior nessa escala de observação (Koyi *et al.* 2004, Eisenstadt & Sims 2005).

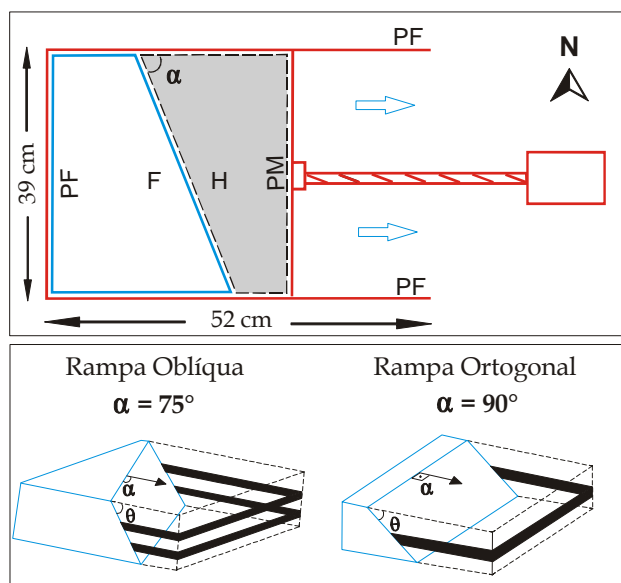


Figura 1. Desenho esquemático ilustrando o aparato (em mapa) utilizado na realização dos experimentos. PF=Parede Fixa, PM=Parede Móvel, F=Footwall, H=Hangingwall. As setas azuis indicam o sentido de distensão. Os blocos diagramas ilustram a configuração 3D dos modelos oblíquos e ortogonais. Os ângulos α e θ denotam, respectivamente, a obliquidade e o mergulho da falha-mestra

Três tipos de rifteamento foram estudados, sendo dois oblíquos e um terceiro ortogonal. No modelo ortogonal a obliquidade do *footwall* corresponde a $\alpha = 90^\circ$ e o mergulho $\theta = 45^\circ$. Para o rifteamento oblíquo foram configurados dois modelos distintos: i) $\alpha = 75^\circ$ e $\theta = 45^\circ$; ii) $\alpha = 75^\circ$ e $\theta = 30^\circ$. 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 *hangingwall*, que possui 12,5 cm de comprimento. A velocidade média da distensão foi 0,41 mm/s em todos os experimentos.

DESCRIÇÃO DOS MODELOS FÍSICOS A descrição das estruturas foi realizada de acordo com seu surgimento e desenvolvimento durante o processo de distensão. O registro dos vários incrementos de distensão foi feito via filmagem e fotografias em perfis e em mapa. Apenas alguns estágios foram escolhidos como representativos dos diversos modelos descritos a seguir. As estruturas observadas constituem falhas normais *sensu stricto* e normais com componentes oblíquos, 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 ($n = 1, 2, 3, \dots$, etc.) para as falhas e L_n (A, B, C, ..., etc.) para os segmentos.

Modelo 1: Distensão ortogonal ($\alpha = 90^\circ$; $\theta = 45^\circ$) 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 (*footwall*) apresenta *trend* NS, com $\theta = 45^\circ$ (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 (F1 e F2) e antitéticas (F3) em relação à falha-mestra. A falha F3, mais importante nesse estágio, ocorre com traço curvilíneo composto de segmentos com *trend* variando de NW a NE.

Com os próximos incrementos de distensão, F1, F2 e F3 continuam a se desenvolver e em 8,8%, uma nova falha normal, antitética (F4) é nucleada a leste de F3. A acomodação das falhas F1, F2 e F3 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 F4 e o surgimento de F5, nucleada a leste de F3 na parte sul do modelo, representada por falha normal, sintética e paralela à falha-mestra.

Quando a distensão atinge 16%, a propagação de F5 ocorre em direção à porção norte, representada por segmentos neoformados de *trends* NNE, ligeiramente oblíquos à falha-mestra. 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 de F5, que continua a se propagar para norte, apresentando traço aproximadamente paralelo à falha-mestra.

Até os 24% de distensão houve apenas um aumento no rejeito das falhas 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 (F7), sintética e paralela à falha-mestra. Em 33,6% de distensão, F7 apresenta-se bem desenvolvida nas porções sul e central sem, entretanto, atingir a porção norte (Fig. 2).

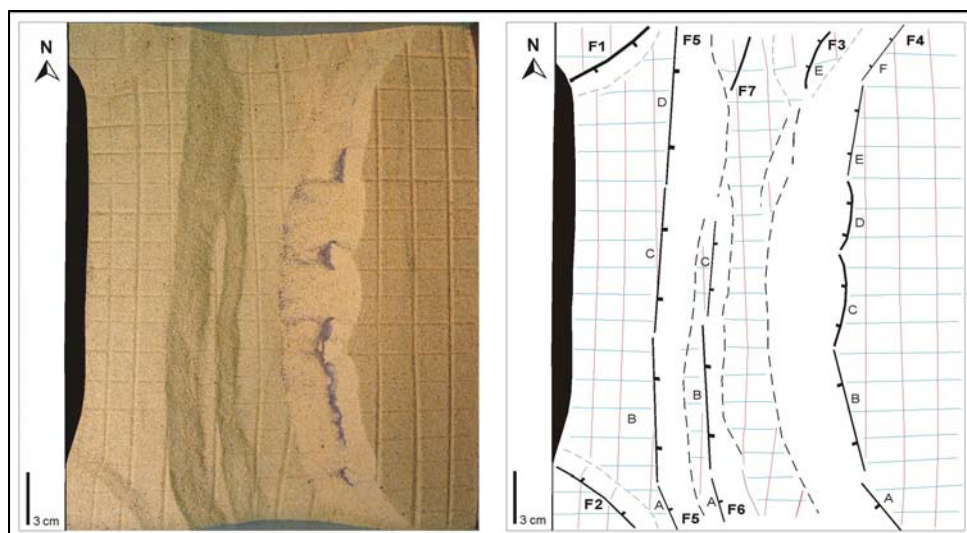


Figura 2. Imagem fotográfica e sua respectiva interpretação em mapa ilustrando as estruturas desenvolvidas no modelo ortogonal ($\alpha = 90^\circ$; $\theta = 45^\circ$) quando a distensão atinge 33,6%. A seta indica o sentido de distensão

Modelo 2: Distensão oblíqua ($\alpha = 75^\circ$; $\theta = 45^\circ$) Esse modelo é representado pelo experimento ED12, realizado com a falha-mestra tendo um mergulho (θ) 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, oblíqua e apresenta um componente de rejeito normal (predominante) com um discreto componente 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.

Duas novas falhas, F4 e F5, são nucleadas em torno de 8% de distensão. A falha F4 tem caráter segmentado e inicia sua nucleação no centro do modelo, se propagando para as regiões N e S. Essa falha é normal, antitética e subparalela à falha-mestra. Por sua vez, a falha F5 é oblíqua à falha-mestra, tem rejeito normal e trunca 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%. 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, segmentada, de *trend* NE, apresentando

rejeito normal e sintético a falha-mestra. 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. Os segmentos da falha F6 apresentam aumento do rejeito, agora desenvolvendo componentes direcionais dextral e sinistral nas extremidades N e S, respectivamente.

Pouco antes de 32% de distensão, inicia-se a formação da falha F7, localizada na porção sul e central da zona do rifte, constituindo um *semi-graben*. Essa falha, já bem desenvolvida no estágio de 32% de distensão, é normal, com um componente oblíquo dextral, sintética e de *trend* NE, paralela àquela da falha-mestra (Fig. 3). A visualização da falha F1 restringe-se ao segmento SE, uma vez que o segmento mais central encontra-se obliterado pela “sedimentação” advinda das falhas adjacentes.

O último incremento no deslocamento proporciona distensão de 56%. Nesse estágio, o *graben* já está bastante desenvolvido. A falha F7 se propaga até atingir a extremidade norte do modelo, concomitante ao desenvolvimento de duas novas falhas normais e sintéticas, F8 e F9. 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.

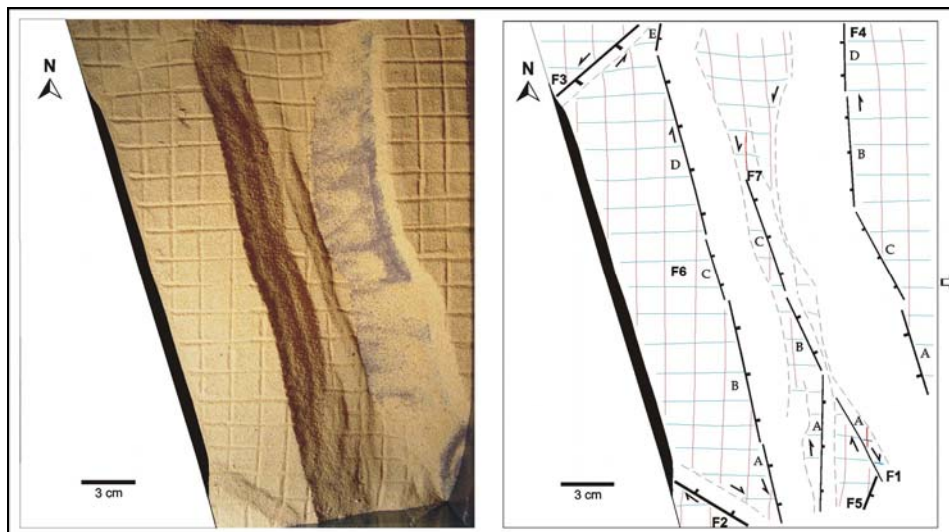


Figura 3. Imagem fotográfica e sua respectiva interpretação em mapa ilustrando as estruturas desenvolvidas no modelo oblíquo ($\alpha = 75^\circ$; $\theta = 45^\circ$) quando a distensão atinge 32%. A seta indica o sentido de distensão

Modelo 3: Distensão oblíqua ($\alpha = 75^\circ$; $\theta = 30^\circ$) A evolução desse modelamento é aqui sumarizada pelo experimento ED13. O molde utilizado para simular a falha-mestra do embasamento (*footwall*) apresenta mergulho (θ) de 30° e obliquidade $\alpha = 75^\circ$, que determina para essa descontinuidade um *trend* N15°W, oblíquo ao sentido da distensão (EW). 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. 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 desse 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%. A falha F4 tem caráter segmentado sendo nucleada na porção central do modelo. Por sua vez, F5, representada por um único segmento na porção centro-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 *graben* na porção central do rifte, constituindo novo depocentro (Fig. 4). 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 exibe, em mapa, um aumento de 10% na sua largura média, em relação ao estágio anterior.

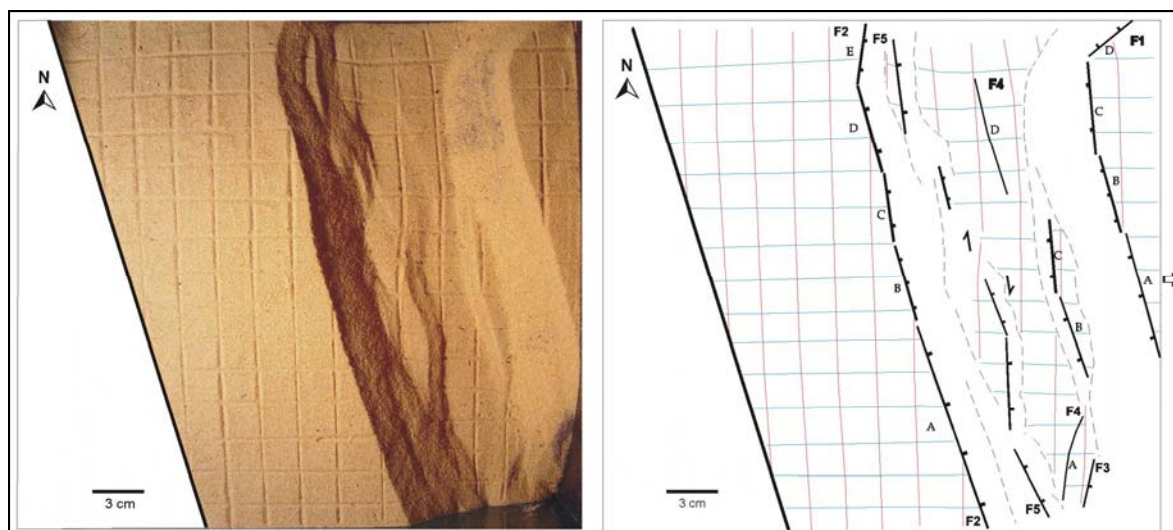


Figura 4. Imagem fotográfica e sua respectiva interpretação em mapa ilustrando as estruturas desenvolvidas no modelo oblíquo ($\alpha = 75^\circ$; $\theta = 30^\circ$) quando a distensão atinge 32%. A seta indica o sentido de distensão

DISCUSSÕES / CONCLUSÕES Os experimentos realizados demonstraram a importância do modelamento físico no auxílio ao entendimento da distribuição espaço-temporal (nucleação e desenvolvimento) 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.

As falhas observadas têm caráter normal, podendo ser sintéticas ou antitéticas, paralelas (mais abundantes 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 3 ($\alpha = 75^\circ$, $\theta = 30^\circ$), 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. Outra característica desse modelo é o desenvolvimento de um grande número de estruturas nos estágios iniciais de distensão.

A arquitetura interna final dos riftes mostra o desenvolvimento de blocos altos e baixos (*grabens* e *semi-grabens*), mais intenso na porção oeste da bacia (próxima ao *footwall*), que governam os depocentros. O arranjo arquitetural dessas bacias é controlado pela direção de abertura do rifte (distensão) e podem desempenhar um papel fundamental no desenvolvimento de condutos, barreiras e *traps* ao fluxo de fluidos.

Referências

- CASAS A.M., GAPAIS D., NALPAS T., BESNARD K., ROMÁN-BERDIEL T. 2001. Analogue models of transpressive systems. *Jour. Struc. Geol.* **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?. *Jour. Struc. Geol.*, **27**: 1399-1412.
- FOSSEN H. & GABRIELSEN R.H. 1996. Experimental modeling of extensional fault systems by use of plaster. *Jour. Struc. Geol.* **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, p. 207-222. 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*, **2**: 233-260.
- MCCLAY K.R. 1990 Deformation mechanics in analogue models of extensional fault system. In R.J. KNIPE & H. RUTTER (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.