



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
CENTRO DE CIÊNCIAS MATEMÁTICAS E DA NATUREZA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA

MANUELLA VIRGOLINO MAFIA

MODELAGEM FÍSICA DE ESTRUTURAS GERADAS NO *HANGING*
***WALL* DE FALHAS LÍSTRICAS**

Rio de Janeiro

2018

MANUELLA VIRGOLINO MAFIA

**MODELAGEM FÍSICA DE ESTRUTURAS GERADAS NO *HANGING*
WALL DE FALHAS LÍSTRICAS**

Trabalho Final de Curso de Graduação em Geologia do
Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio
de Janeiro – UFRJ, apresentado como requisito necessário
para obtenção do grau de Geóloga.

Orientador:

Prof. Dr. André Ribeiro – Depto. Geologia/UFRJ
MSc. Fernanda Silva Lourenço – Petrobras/CENPES

Rio de Janeiro

2018

MAFIA, MANUELLA VIRGOLINO

Modelagem física de estruturas geradas no *hanging wall* de falhas lítricas /
Manuella Virgolino Mafía – Rio de Janeiro: UFRJ, Instituto de Geociências, 2018.

xii, 35 p.

Trabalho Final de Curso: Graduação em Geologia – Universidade Federal do
Rio de Janeiro – UFRJ, Instituto de Geociências, Departamento de Geologia, 2018

Orientadores: Andre Ribeiro; Fernanda Silva Lourenço

1. Estruturas no *Hanging wall* 2. Falhas Lítricas 3. Modelagem Física

MANUELLA VIRGOLINO MAFIA

**MODELAGEM FÍSICA DE ESTRUTURAS GERADAS
NO *HANGING WALL* DE FALHAS LÍSTRICAS**

Trabalho Final de Curso de Graduação em Geologia do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, apresentado como requisito necessário para obtenção do grau de Geóloga.

Orientadores:

Prof. Dr. Andre Ribeiro – Depto. Geologia/UFRJ
MSc. Fernanda Silva Lourenço – Petrobras/CENPES

Aprovado em: ___/___/___

Por:

Prof. Dr. Andre Ribeiro (Departamento de Geologia – IGEO/UFRJ)

Dr. Debora Barros Nascimento (Departamento de Geologia – IGEO/UFRJ)

Geóloga *Msc.* Silvia Cristina Barroso Negrão (Petrobras/CENPES)

*A meu pai, a minha irmã e a
minha mãe por toda confiança e
carinho durante minha jornada.*

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer ao Andre Ribeiro e a Fernanda Lourenço pela orientação do trabalho.

A PETROBRAS pela bolsa de estágio e uso do Laboratório de Modelagem Física.

Ao Felipe Nepomuceno cuja orientação ao longo da faculdade foi fundamental à minha formação acadêmica e que me ensinou a amar geologia.

Ao Diogo Reste pela revisão do trabalho e pelo companheirismo durante praticamente toda a graduação.

Ao Gustavo Pires pela revisão minuciosa do trabalho.

A Mathieu Morris que auxiliou de forma simples e descontraída a elaboração de modelos tridimensionais.

A equipe da GEOTEC em especial ao Bruno Carvalho, Silvia Negrão, Paulo Santarém e Leonardo Fonseca cujas discussões de geologia estrutural foram fundamentais à confecção deste trabalho.

Aos amigos da turma de Geologia de 2014, em especial ao Chico e à Mariah, pela parceria e ensinamentos a respeito da vida.

RESUMO

MAFIA, Manuella V. Rio de Janeiro, 2018. 35 p. Trabalho Final de Curso (Geologia) - Departamento de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

O trabalho consistiu em três experimentos físicos em caixa de areia com objetivo de analisar as estruturas formadas no *hanging wall* de falhas lítricas extensionais do tipo rampa-plataforma. Três blocos rígidos, um de madeira e dois de espuma fenólica, simularam o *footwall* estático, que não foi deformado durante os ensaios. No bloco de madeira já existia uma superfície com rampa e plataforma planares. Em um dos blocos de espuma foram escavadas rampas curvas côncavas para o topo e duas plataformas horizontais; no outro uma rampa curva côncava que passa convexa e uma plataforma horizontal. Nos três experimentos foi sobreposto ao relevo escavado nos blocos rígidos uma folha de acetato e sobre ela os sedimentos que simularam a sucessão pré-tectônica. Para gerar extensão, a folha de acetato foi puxada por um motor nos dois primeiros ensaios, com velocidades de 198,72 mm/h e 275, 61 mm/h, respectivamente. No terceiro ensaio a folha foi puxada manualmente a uma velocidade variada entre 190 e 270 mm/h. A medida que depocentros eram formados, estes eram manualmente preenchidos por areia colorida, para simular a sucessão sin-tectônica. As estruturas geradas no primeiro experimento foram: falha lítrica mestra, *rollover* e falha de empurrão sobre a rampa, além de falhas normais sintéticas e antitéticas sobre a plataforma. No segundo experimento, formaram-se falha lítrica mestra, *rollover* e falha de empurrão sobre a rampa superior, e falhas normais sintéticas e antitéticas sobre a plataforma superior. Sobre a rampa côncava inferior, ocorreu um arqueamento das sucessões pré- e sin-tectônicas e falhas antitéticas reversas. No terceiro experimento formaram-se falha mestra lítrica com *rollover* nas camadas pré-tectônicas e grábens de colapso nas sin-tectônicas sobre a rampa côncava. Formou também um sinformal acima da transição rampa convexa para plataforma. As estruturas nos três experimentos foram geradas devido ao relevo pré-existente no *footwall*. Na natureza relevos similares ocorrem, por exemplo, em paredes de domos de sal e taludes em bordas de bacias. As estruturas geradas nos experimentos são similares às que aparecem em seções sísmicas que mostram falhas lítricas de crescimento e outras estruturas, como no Golfo do México e na Bacia Joana D'Arc em Newfoundland. Nestas e outras bacias o *rollover* é a principal armadilha para o óleo e gás. Assim, os experimentos constituem uma ferramenta auxiliar no entendimento da gênese de estruturas extensionais comuns em bacias que contêm sistemas petrolíferos.

Palavras-Chave: Estruturas no *hanging wall*; Falhas lítricas; Modelagem física.

ABSTRACT

MAFIA, Manuella V. Rio de Janeiro, 2018. 35 p. Trabalho Final de Curso (Geologia) - Departamento de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Three physical experiments were carried out in order to understand major structures generated in the hanging wall of growth listric faults. Three rigid blocks, one made of wood and two of foam simulated a static footwall undeformed during the experiments. The surface carved in the wood block simulates a fault with planar concave-upward ramps and flat platforms. On top of one of the foam block listric concave-upward ramps separated by horizontal flats simulates the fault. In the other foam block a concave upward ramp followed by a convex upward ramp and flat segments constitute the fault surface. The surface of the rigid blocks was overlain by an acetate sheet. The box is then filled with white and black sand to simulate the pre-tectonic layers. Deformation is achieved in two first experiments by moving the right wall of the apparatus by means of a motor that gives a displacement rate of 198.72 mm/h and of 275.61 mm/h. In the third experiment the movement of the acetate sheet was manually moved reaching a displacement rate between 190 mm/h and 270 mm/h. During each experiment, layers of orange and blue sand were incrementally added to simulate the syn-tectonic sedimentation. The first experiment produced a rollover anticline and thrust fault above the ramp and synthetic and antithetic faults above the flat platform. The second experiment also produced rollover beside a thrust fault above the upper ramp and synthetic and antithetic faults above the upper platform. Reverse antithetic reverse faults and a flexure of the successions occurred above the lower platform. The third experiment produced rollover in pre-tectonic succession and a collapse graben in the syn-tectonic succession above ramp. A ramp syncline was formed in the convex ramp - platform transition. The structures originated due to the preexisting relief carved in the footwall. Similar geometry is found, for example, in the steep walls of salt domes and in basin margin slopes. The structures generated in the experiments are similar to those found in seismic sections that show growth listric faults and other structures as in the Gulf of Mexico and in the Joanne D'Arc Basin, Newfoundland. In these and other basins the rollover is considered as the main oil and gas trap. Therefore, the experiments constitute a good tool to the understanding the genesis of extensional structures very frequent in basins with hydrocarbon systems.

Key-words: Hanging wall structures; Listric faults; Physical modelling

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1** – Classificação de falhas quanto ao critério cinemático: a) normal quando o *hanging wall* desce em relação ao *footwall*, b) transcorrente quando a movimentação entre o *hanging wall* e o *footwall* é lateral e, c) reversa quando o *hanging wall* sobe em relação ao *footwall*. Adaptado de Fossen (2010)._____ 05
- Figura 2** – Ilustração de falha lítrica, uma estrutura onde o segmento de alto ângulo de mergulho se horizontaliza em profundidade. Adaptado de Fossen (2010)._____ 05
- Figura 3** – Estruturas formadas em regime extensional: a) *horst*, b) *graben* e, c) falha mestra com falhas sintética e antitética associadas. Adaptado de Fossen (2010)._____ 06
- Figura 4** – Estrutura *rollover* e falhas antitéticas associadas em uma falha lítrica, segundo Hambling (1965).__ 07
- Figura 5** – Rollover em uma falha com segmentos planares separados por uma inflexão côncava para o topo, assumindo basculamento das camadas em direção a falha. Se as rochas fossem muito resistentes seria criado um espaço vazio (a). Como isso não ocorre, forma-se no *hanging wall* um monoclinal limitado por duas superfícies paralelas, as superfícies axiais ativa e inativa, que limitam a zona basculada (b). As camadas basculadas entre estas duas superfícies constituem o rollover. Modelo segundo Xiao e Suppe (1992)_____ 07
- Figura 6** – Relações entre a geometria do *rollover*, taxa de sedimentação sin-tectônica e movimentação ao longo de uma falha. Camadas cinzentas representam os depósitos pré-tectônicos, camadas brancas e pretas o sedimento sin-tectônico. Mantendo-se a geometria da falha (a-h) com a taxa de sedimentação constante, quanto maior a taxa de movimentação tectônica maior será o espaçamento entre as superfícies axiais do *rollover*. Note que no caso de bacia faminta (h) será formada uma discordância angular entre os sedimentos cedo sin-tectônicos e tardi-tectônicos. Modelos de Xiao e Suppe (1992)._____ 08
- Figura 7** – Tipos de inflexões em falhas lítricas: côncava para o topo a) abrupta e b) suave; convexa para o topo c) abrupta e d) suave. Falha com inflexão côncava que passa convexa e) abruptas e f) suaves. Zheng *et al.* (2015)._____ 09
- Figura 8** – Mergulhos antitéticos e sintéticos de camadas sin-tectônicas em relação a falha mestra devidos à inflexão pontiaguda côncava (a) e convexa (b). A superfície axial de crescimento conecta as superfícies axiais ativa e inativa e as três superfícies limitam o *rollover*. Modelos de Xiao e Suppe (1992)_____ 09
- Figura 9** – Esquema simplificado ilustrando as estruturas formadas no *hanging wall* de falha lítrica com geometria rampa-plataforma, conforme Ellis & McClay (1988)._____ 10
- Figura 10** – Configuração da caixa de areia do experimento 1: 1- bloco rígido com geometria rampas concavas planares separadas por plataformas, 2- folha de acetato, 3- placa de vidro, 4- placa de acrílico, 5- placa de acrílico basal, 6- haste do motor e 7- parede do motor._____ 12
- Figura 11** – Configuração da caixa de areia do experimento 2 com (1) bloco rígido com geometria rampas concavas e plataforma, (2) folha de acetato, (3) placa de vidro, (4) bloco de isopor, (5) placa de acrílico basal, (6) haste do motor, (7) parede do motor._____ 12
- Figura 12** – Configuração da caixa de areia do experimento 3 com (1) bloco rígido com geometria rampa concava que passa a convexa e plataforma, (2) folha de acetato, (3) placa de vidro, (4) bloco de isopor, (5) placa de acrílico basal, (6) haste do motor, (7) parede do motor._____ 13

- Figura 13** – Exemplo de fotografias importadas do software MOVE com coordenadas baseadas na dimensão da caixa de areia do experimento 3. Os valores de largura, altura e comprimento em cada corte foram multiplicados por 1000 para serem utilizados no programa. _____ 14
- Figura 14** – Interpretação das falhas no software MOVE 2015 com base em fotografias de cortes com o material umedecido. _____ 15
- Figura 15** – Interpretação das sucessões pré e sin-tectônicas no software MOVE 2015 com base em fotografias de cada corte com o material umedecido. _____ 15
- Figura 16** – Superfícies de falhas formadas no experimento 3 com interpolação das linhas traçadas em cada seção no *software Skua* 2015. _____ 16
- Figura 17** – Superfícies de falhas lítrica, sintéticas, antitéticas e de empurrão e camadas pré e sin-tectônicas do experimento 3 geradas no *software Skua*. _____ 16
- Figura 18** – Seção típica do experimento 1 mostrando falha mestra com 1- segmento superior íngreme, 2- brusca inflexão côncava para o topo e 3- segmento horizontal; falhas planares 4- sintéticas e 5- antitéticas; 6- falha de empurrão; 7- antiformal *rollover* e 8- falha antitética com segmento inferior convexo. Escala = 6 cm. _____ 18
- Figura 19** – Estruturas formadas no experimento 1: com o decorrer da extensão a falha mestra, inicialmente íngreme (a) passa a horizontal em profundidade. O mergulho das falhas sintéticas torna-se mais suave, uma falha reversa se forma (b) e falhas normais de alto ângulo truncam as camadas sin-tectônicas (c) Ilustrações baseadas em fotografias da sucessão colada à parede da caixa de areia. _____ 19
- Figura 20** – A geometria das falhas mestra (1), falhas sintéticas e antitéticas associadas, e a falha de empurrão (2) geradas no experimento 1. Modelo 3D elaborado no *Software Skua* 2015. _____ 20
- Figura 21** – A geometria das falhas e sucessões no experimento 1, conforme modelo 3D elaborado no *Software Skua* 2015. O *rollover* acentuado na sucessão pré-tectônica gera discordância e espessamento da sucessão sin-tectônica. Falhas 1- lítrica mestra, 2- empurrão, 3- sintéticas e 4- antitéticas. _____ 20
- Figura 22** – Seção tipo do experimento 2 mostrando: rampas 1- superior e 3- inferior; plataformas 2- superior e 4- inferior; 5- rollover; falhas planares secundárias 6- sintéticas e 7- antitéticas; 8 e 9 - falhas reversas. _____ 21
- Figura 23** – Estruturas formadas no experimento 2: com o decorrer da extensão a falha mestra, inicialmente íngreme (a) passa a horizontal em profundidade. O mergulho das falhas sintéticas torna-se mais suave, uma falha reversa se forma; falhas normais de alto ângulo truncam as camadas sin-tectônica (b). Outra falha reversa se forma sobre rampa inferior (c) Ilustrações baseadas em fotografias da parede lateral do experimento. _____ 22
- Figura 24** – A geometria das falhas mestra (1), sintéticas e antitéticas associadas e falhas reversas (2) geradas no experimento 2. Modelo 3D elaborado no *Software Skua* 2015. _____ 23
- Figura 25** – A geometria das falhas e sucessões no experimento 2 conforme modelo 3D elaborado no *Software Skua* 2015. Falhas 1- lítrica mestra, 2- reversa, 3- sintéticas normais e 4- antitéticas reversas. _____ 23

- Figura 26** – Seção tipo do experimento 3 mostrando: rampas 1- côncava e 2- convexa; 3- plataforma; 4- *rollover*; 5- *graben* de colapso; 6- sinformal; falhas sintéticas 7- normal e 9-reversa; falhas antitéticas 8- planar e 10- convexa. _____ 24
- Figura 27** – A geometria das falhas mestra, sintéticas e antitéticas associadas geradas no experimento 3. Modelo 3D elaborado no *Software* Skua 2015. _____ 25
- Figura 28** – A geometria das falhas e sucessões no experimento 3, conforme modelo 3D elaborado no *Software* Skua 2015. Falhas 1- lítrica mestra, 2- sintéticas, 3- antitéticas e dobras 4- *rollover* e 5- sinformal. Setas brancas mostram diferença de espessura das camadas sin-tectônicas. _____ 25
- Figura 29** - Configuração do experimento 1, mostrando a geometria rampa-plataforma planar no bloco rígido de madeira. O retângulo vermelho define a região de rampa e plataforma superior analisada no final do experimento. _____ 27
- Figura 30** – Modelo esquemático baseado em experimento em caixa de areia de falhas lítricas simples mostrando a diferença de rotação das camadas em direção à falhas mestra. (a) com alta taxa de rotação, as camadas inferiores apresentam maior basculamento em relação às superiores e b) com baixa taxa de rotação não há tanta variação de mergulho entre as camadas. Fonte: Mauduit and Brun (1998). _____ 27
- Figura 31** - Interpretação de seção sísmica mostrando 1- falha lítrica de crescimento, 2- *rollover* e *grabens* limitados por falhas 3- sintéticas e 4- antitéticas. Compare com estruturas semelhantes obtidas no experimento 1 (Figura 32). Seção sísmica da Falha Corsair extraída de Waltham *et al.* (1994). _____ 28
- Figura 32** – Seção tipo do experimento 1 mostrando estruturas semelhantes às que ocorrem em seção sísmica da Falha Corsair no Golfo do Mexico: 1- falha lítrica mestra, 2- antiformal *rollover* e *grabens* limitados por falhas 3- sintéticas e 4- antitéticas. _____ 28
- Figura 33** – Configuração do experimento 2, mostrando a geometria de rampas curvas côncavas separadas por plataforma horizontal, assinalada pelo retângulo vermelho. _____ 29
- Figura 34** – Interpretação de seção sísmica de um trecho Falha Corsair: 1- falha lítrica de crescimento com inflexões côncavas, 2- *rollover*, 3- arqueamento sobre a rampa inferior, 4- falhas 4- sintéticas e 5- antitéticas, e 6- depocentro. Compare com as estruturas geradas no experimento 2 (Figura35). Imagem extraída Waltham *et al.*, 1994 _____ 30
- Figura 35** – Seção tipo do experimento 2 mostrando: 1- falha lítrica mestra com rampas côncavas, 2- *rollover*, 3- arqueamento de camadas pré- e sin-tectônicas acima da rampa inferior, 4- falhas sintéticas, 5- falhas antitéticas e 6- depocentro associado à porção inferior da falha mestra. Estruturas semelhantes ocorrem no *hanging wall* da Falha Corsair (Figura 34). _____ 30
- Figura 36** – Configuração do experimento 3, mostrando a transição da rampa côncava a convexa da superfície esculpida no bloco rígido, delimitada pelo retângulo vermelho. _____ 31

Figura 37 – Interpretação de imagem de seção sísmica da Falha de Murre, Bacia Joanna D’Arc, Mesozóico, Newfoundland. Hanging wall com: 1- falha lítrica, 2- antiformal rollover, 3- grabens associados, 4- sinformal e falhas 5- sintética e 6- antitética. Imagem extraída de Waltham *et al.*, 1994. _____ 32

Figura 38 – Seção tipo do experimento 3 mostrando: 1- falha lítrica, 2- antiformal rollover, 3- graben de colapso, 4- sinformal, falhas 5- sintética e 6- antitética. Estruturas semelhantes ocorrem no *hanging wall* da Falha Murre (Figura 37) _____ 32

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dimensões iniciais da caixa de areia sendo: largura a distância entre as paredes laterais de vidro, altura inicial a espessura das camadas pré-tectônicas e comprimento a distância do início do bloco rígido até a parede do motor. _____	13
Tabela 2 – Espessura das camadas pré e sin-tectônicas _____	13

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	01
2. OBJETIVOS	01
3. BASE CONCEITUAL	02
3.1. MODELAGEM FÍSICA	02
3.1.1 <i>Materiais Análogos e Fatores de Escala</i>	03
3.2. DEFORMAÇÃO RÚPTIL	04
4. METODOLOGIA	10
4.1 DESCRIÇÃO DOS EXPERIMENTOS	10
5. RESULTADOS	17
5.1 EXPERIMENTO 1: RAMPA CÔNCAVA	17
5.2 EXPERIMENTO 2: RAMPAS CÔNCAVAS SEPARADAS POR PLATAFORMA	21
5.3 EXPERIMENTO 3: RAMPA CÔNCAVA QUE PASSA A CONVEXA	24
6. DISCUSSÕES	26
6.1 EXPERIMENTO 1: RAMPA CÔNCAVA	26
6.2 EXPERIMENTO 2: RAMPAS CÔNCAVAS SEPARADAS POR PLATAFORMA	29
6.3 EXPERIMENTO 3: RAMPA CÔNCAVA QUE PASSA A CONVEXA	31
7. CONCLUSÕES	33
8. BIBLIOGRAFIA	34

1 INTRODUÇÃO

Regimes tectônicos extensionais são responsáveis pela geração de conjuntos de falhas não-rotacionais, rotacionais e lítricas simples e do tipo rampa-plataforma. As falhas não rotacionais, normalmente, mostram pouco rejeito e ocorrem em regiões com baixa taxa de extensão. Em falhas rotacionais os blocos movimentam-se simultaneamente e com a mesma taxa de rotação. Um exemplo são as falhas no estilo dominó ou *tilted-fault-block* como as que ocorrem na depressão de Afar, Etiópia (Morton e Black, 1975). Nas falhas lítricas (Wernicke e Burchfiel 1982; Gibbs 1983) ocorre translação seguida de colapso da *hanging wall* que gera diversas estruturas incluindo *rollover* (Hamblin, 1965). Nas falhas lítricas com geometria rampa-plataforma podem ocorrer rampas convexas ou côncavas para o topo separadas por segmentos horizontais, como em diversas bacias rifte (Nunn, 1991).

A modelagem física em caixas de areia é uma técnica amplamente utilizada na geologia estrutural uma vez que reproduz em escala centimétrica a geometria de estruturas observadas no campo e em seções sísmicas. Estes experimentos são complementares à modelagem cinemática e geométrica quando obedecem à teoria da similaridade de Hubbert (1937) e assim passam a ser válidos para comparações com casos reais. A técnica de modelagem física permite reproduzir e analisar a geometria e a gênese de estruturas análogas geológicas, em escala de tempo compatível com a observação humana. Materiais que simulam sedimentos e rochas possibilitam investigar processos de deformação similares aos que ocorrem na litosfera. As simulações em caixa de areia ajudam a compreender processos tectônicos relacionados à abertura e evolução de bacias sedimentação e, em consequência, auxilia a interpretação da gênese de sistemas petrolíferos.

2 OBJETIVOS

O objetivo do trabalho é compreender as estruturas formadas no *hanging wall* de falhas normais do tipo rampa-plataforma com base em três experimentos em caixa de areia. Com base nas interpretações das estruturas geradas nos experimentos foram feitos modelos tridimensionais no *software Skua*, para observar a continuidade das estruturas ao longo do *strike* e comparações com falhas em seções sísmicas no Golfo do México e na Bacia Joana D'Arc, em Newfoundland, Canadá.

3 BASE CONCEITUAL

3.1 MODELAGEM FÍSICA

Os primeiros experimentos de modelagem física surgiram em meados do século XIX e foram realizados por Sir James Hall que tentou modelar estruturas compressivas (Koyi 1997). Seu primeiro experimento foi bastante rudimentar, sendo os materiais utilizados tecido e madeira. O mesmo tentou confinar o tecido de modo a comprimi-lo horizontalmente utilizando duas placas de madeira diametralmente opostas para comprimir. Este experimento foi bastante rudimentar e posteriormente, ele utilizou ao invés de placa de madeira, pistão para comprimir camadas de argila. Neste experimento, ele conseguiu observar a geometria de dobras e conseguiu correlacionar a tensão horizontal dominante como gerador destas estruturas (Graveleau *et al.* 2012). Ao final do século XIX, experimentos físicos deixaram de usar apenas argila e passaram a empregar parafina, cera e gesso. A areia seca começou a ser utilizada em meados do século XX. Contemporaneamente, Hubbert (1937) desenvolveu princípios de escala que permitiam experimentos físicos serem comparáveis à realidade. A modelagem física obteve grande salto a partir da década de 80 quando os experimentos passaram a incorporar variados processos geológicos como exemplo a halocinese e magmatismo (Koyi 1997). Apesar de terem existido experimentos extensionais na década de 60 com experimentos de Cloos, apenas na década de 90, sucessivos experimentos deste tipo foram recorrentes. Na década de 90 a indústria petrolífera interessou-se pelas modelagens experimentais a fim de entender a formação de trapas estruturais e compreender o processo evolutivo de estruturas rúpteis. Dessa maneira, diversos experimentos analisando a deformação do *hanging wall* devido à geometria de falhas extensionais têm sido realizados (eg. McClay 1990; McClay 1991; Cobbold *et al.* 2001) e até comparados com seções sísmicas (McClay 1990).

A técnica de modelagem física consegue reproduzir processos de geração de estruturas. No entanto, existem limitações, como por exemplo reproduzir taxa de subsidência mais rápida que a de extensão e não considerar a influência da compactação e da isostasia (Barr, 1987).

3.1.1 *Materiais Análogos e Fatores de Escala*

Para realizar experimentos que representem deformação na crosta superior é necessário utilizar materiais que permitam simular a reologia rúptil de corpos competentes e viscosa menos competentes como camadas de evaporitos. Para representar corpos com reologia rúptil é necessário utilizar materiais que se adequam ao critério de ruptura de Mohr-Coulomb, ou seja, que tenham comportamento semelhante ao de rochas naturais, mas que possuam ângulo de atrito interno entre 25° - 45°; baixas coesão (10 - 500 Pa) e densidade (1.3 - 1.7 g.cm-3), sendo sua deformação independente da taxa de deformação (Graveleau *et al.*, 2012). Além destes critérios, para Hubbert (1937), experimentos em caixa de areia devem seguir fatores de escala, permitindo que o experimento apresente similaridade geométrica, cinemática e dinâmica ao fenômeno geológico análogo. O fator escala é expresso pela relação:

$$\mathbf{X} = \mathbf{XMODELO} / \mathbf{XORIGINAL} \quad (1)$$

onde X é um parâmetro físico dimensional ou temporal.

A similaridade geométrica baseia-se na relação entre comprimento (2), área (3) e volume (4). É expressa nas equações abaixo onde l_m é o comprimento do modelo e l_o o comprimento da rocha original:

$$l = l_m / l_o \quad (2)$$

$$l^2 = (l_m)^2 / (l_o)^2 \quad (3)$$

$$l^3 = (l_m)^3 / (l_o)^3 \quad (4)$$

A similaridade cinemática relaciona o tempo (5), velocidade (6) e aceleração (7) do experimento: sendo t_m o tempo de duração da deformação do modelo e t_o a duração do evento deformacional do original.

$$t = t_m / t_o \quad (5)$$

$$h = l \times (t)^{-1} \quad (6)$$

$$g = l \times (t)^{-2} \quad (7)$$

Além destes fatores representados por equações de proporcionalidade, existe uma outra equação (8) importante que rege os experimentos de deformação rúptil (Hubbert, 1937). Esta equação relaciona os fatores de escala de coesão (resistência à deformação; *strength*; σ_r), aos fatores da gravidade (valor 1 na equação por ser a mesma para o experimento e para o protótipo) das densidades (δ) e das dimensões lineares (λ), expressa na fórmula por:

$$\sigma_r = \delta \times \lambda \quad (8)$$

3.2 DEFORMAÇÃO RÚPTIL

Em regime rúptil a deformação ocorre quando as rochas atingem seu limite de resistência à ruptura. Dessa maneira, formam-se discontinuidades como fraturas e falhas. As fraturas podem ser de cisalhamento ou extensionais (Fossen 2010). Nas falhas não verticais podem ser identificadas duas feições o *hangingwall* e *footwall* (Figura 1). Em relação aos critérios cinemáticos, quando o *hangingwall* desce em relação ao *footwall*, a falha é classificada como normal (Figura 1a), quando sobe em relação ao *footwall*, é a falha considerada reversa (Figura 1c). Se a movimentação é lateral, no plano horizontal, a falha é considerada transcorrente (Figura 1b). Quando o ângulo de mergulho da falha é menor do que 30°, esta é considerada de baixo-ângulo, quando maiores do que 60° de alto ângulo. Quando o mergulho da falha se horizontaliza em profundidade, esta é chamada de lítrica (Figura 2). Uma falha lítrica pode ser complexa, apresentando segmentos de rampa e plataforma. Quando duas falhas normais mergulham uma em direção a outra gera-se um bloco abatido chamado *graben* (Figura 3b); quando mergulham em sentidos opostos forma-se um bloco alto chamado de *horst* (Figura 3a). Falhas com grande extensão são chamadas de falhas mestras. Falhas associadas de menor escala podem ser antitéticas quando mergulham em direção à falha mestra ou sintéticas quando mergulham na mesma direção que a falha mestra (Figura 3c).

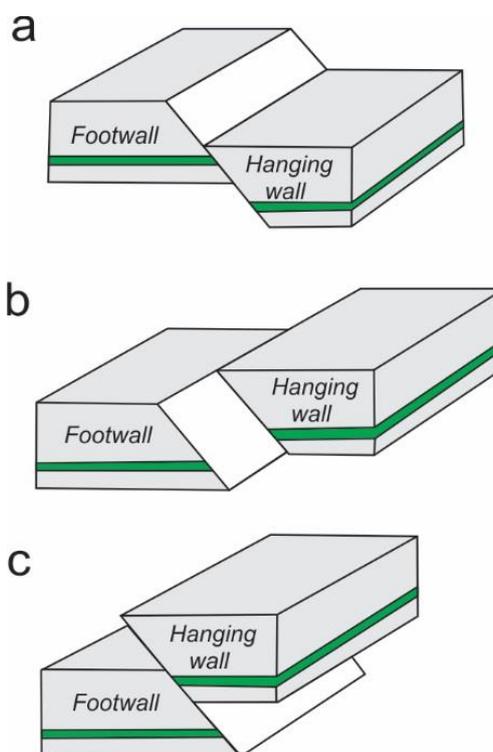


Figura. 1: Classificação de falhas quanto ao critério cinemático: a) normal quando o *hanging wall* desce em relação ao *footwall*, b) transcorrente quando a movimentação entre o *hanging wall* e o *footwall* é lateral e, c) reversa quando o *hanging wall* sobe em relação ao *footwall*. Adaptado de Fossen (2010).

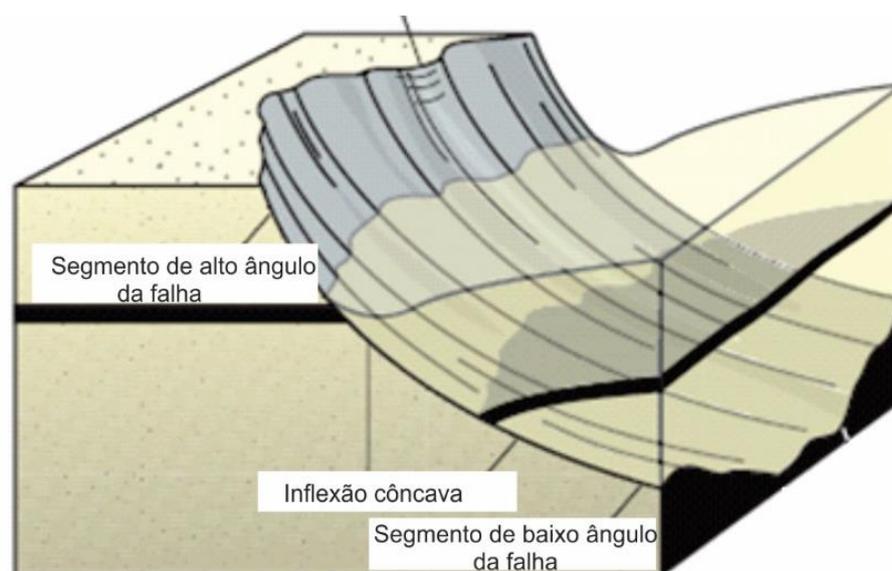


Figura. 2: Ilustração de falha lístrica, uma estrutura onde o segmento de alto ângulo de mergulho se horizontaliza em profundidade. Adaptado de Fossen (2010).

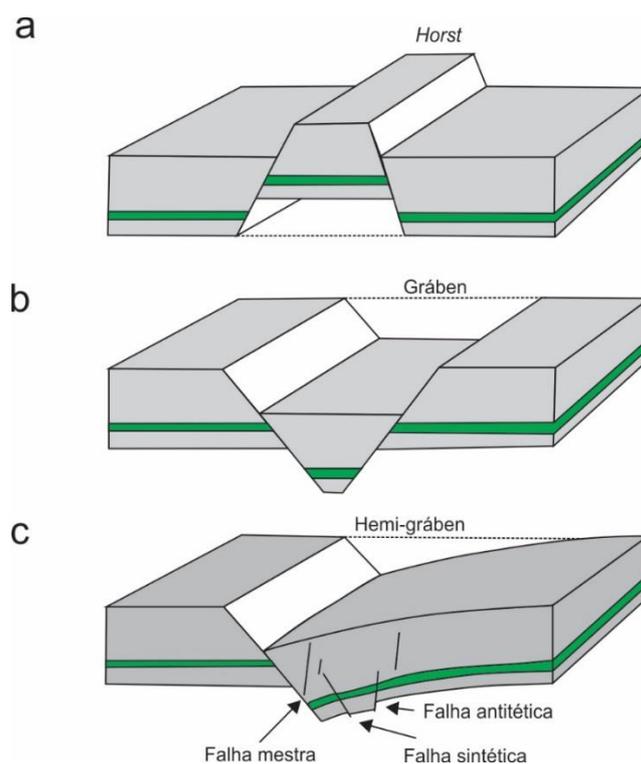


Figura. 3: Estruturas formadas em regime extensional: a) *horst*, b) *graben* e, c) falha mestra com falhas sintética e antitética associadas. Adaptado de Fossen (2010).

Em modelos de falhamento extensional em rochas isotrópicas sob *stress* vertical (σ_1) maior que horizontal (σ_3) se formam falhas normais com alto ângulo de mergulho, *ca.* 60°. Entretanto, na natureza, tanto em rochas isotrópicas como anisotrópicas, é comum a ocorrência de falhas normais com geometria complexa, incluindo segmentos de alto e baixo ângulo e segmentos horizontais, como nas falhas curvas ou lítricas.

A deformação no *hanging wall* de falhas lítricas gera falhas antitéticas, sintéticas e *rollover*. Esta última é uma estrutura monoclinial definida por Hamblin (1965) como resultada da movimentação da falha mestra e falhas antitéticas (Figura 4). O *rollover* resolve o problema de espaço criado durante a movimentação do *hanging wall* (Figura 5). As dobras *rollover* e outras estruturas geradas no *hanging wall* são controladas, principalmente, pela relação entre as taxas de extensão e de sedimentação sin-tectônica e pelas inflexões ao longo da falha (Xiao e Suppe, 1992; Figura 6). Podem ocorrer inflexões côncavas ou convexas para o topo, suaves ou bruscas e pontiagudas (Figura 7). Durante o colapso do *hanging wall* as inflexões côncavas geram mergulho antitético e as convexas mergulho sintético das camadas em relação a falha mestra (Figura 8). Dessa forma, em falhas com múltiplas inflexões são geradas distintas estruturas no *hanging wall* ou *rollovers* (Figura 9). Ellis & McClay (1988) realizaram experimentos de modelagem física em caixa de areia simulando falhas lítricas

com geometria rampa-plataforma. Utilizaram materiais com diferentes competências, rampas e plataformas com distintos comprimentos e mergulho, além de variar a taxa de extensão. Com todas estas variáveis se formam estruturas similares no *hanging wall*. As principais estruturas são antiformais *roll-over* na direção do segmento côncavo e grábens de colapso na plataforma, sinformal relacionado a rampa convexa, e grábens de colapso na porção horizontal da superfície de falha. Além destas estruturas foram geradas falhas reversas acima do segmento convexo para o topo, apesar dos modelos terem sido resultados de experimento extensional (Figura 9).

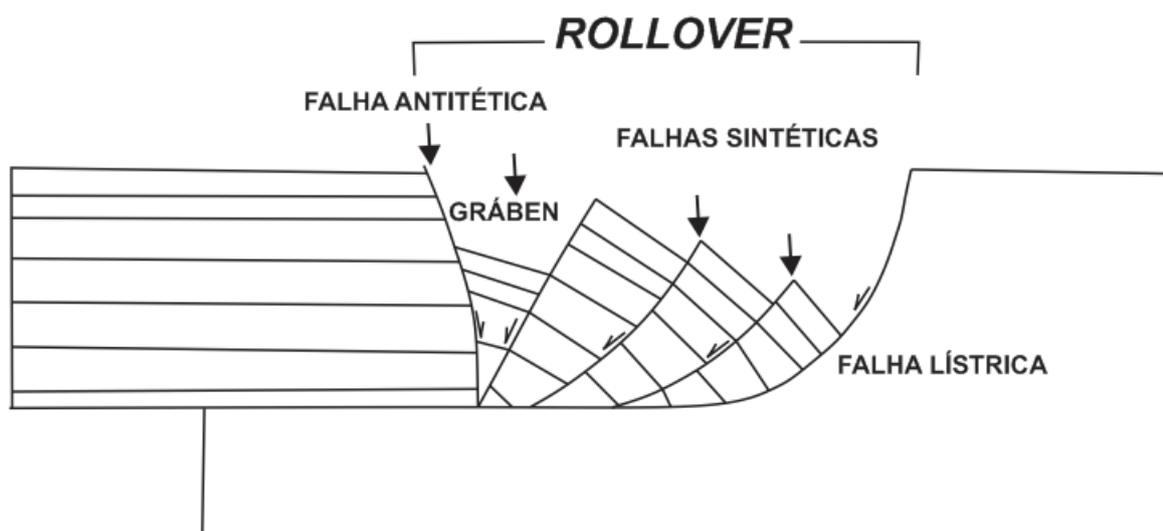


Figura 4: A estrutura *rollover* e falhas antitéticas associadas em uma falha lístrica, segundo Hambling (1965).

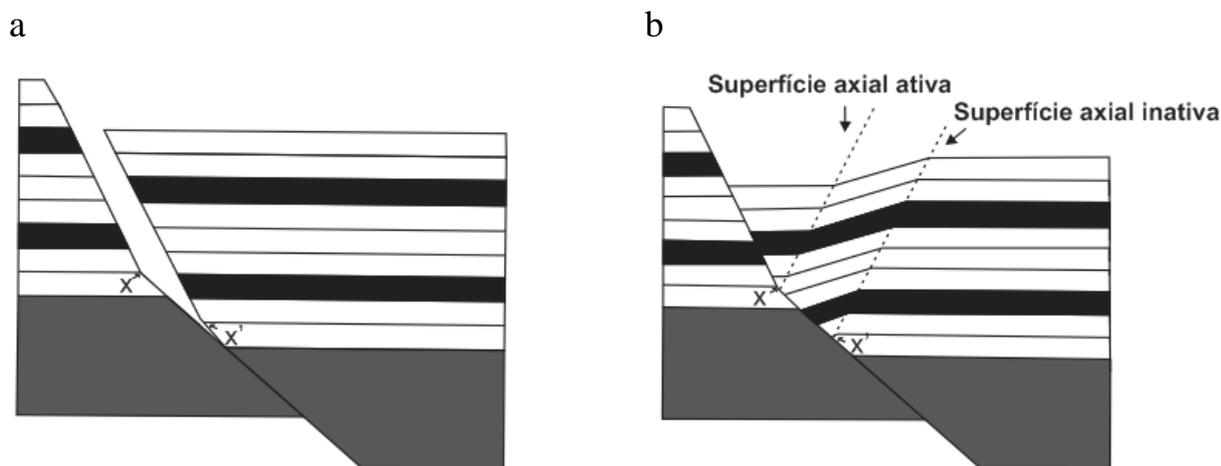


Figura 5: *Rollover* em uma falha com segmentos planares separados por uma inflexão côncava para o topo, assumindo basculamento das camadas em direção a falha. Se as rochas fossem muito resistentes seria criado um espaço vazio (a). Como isso não ocorre, forma-se no *hanging wall* um monoclinial limitado por duas superfícies paralelas, as superfícies axiais ativa e inativa, que limitam a zona basculada (b). As camadas basculadas entre estas duas superfícies constituem o *rollover*. Modelo segundo Xiao e Suppe (1992).

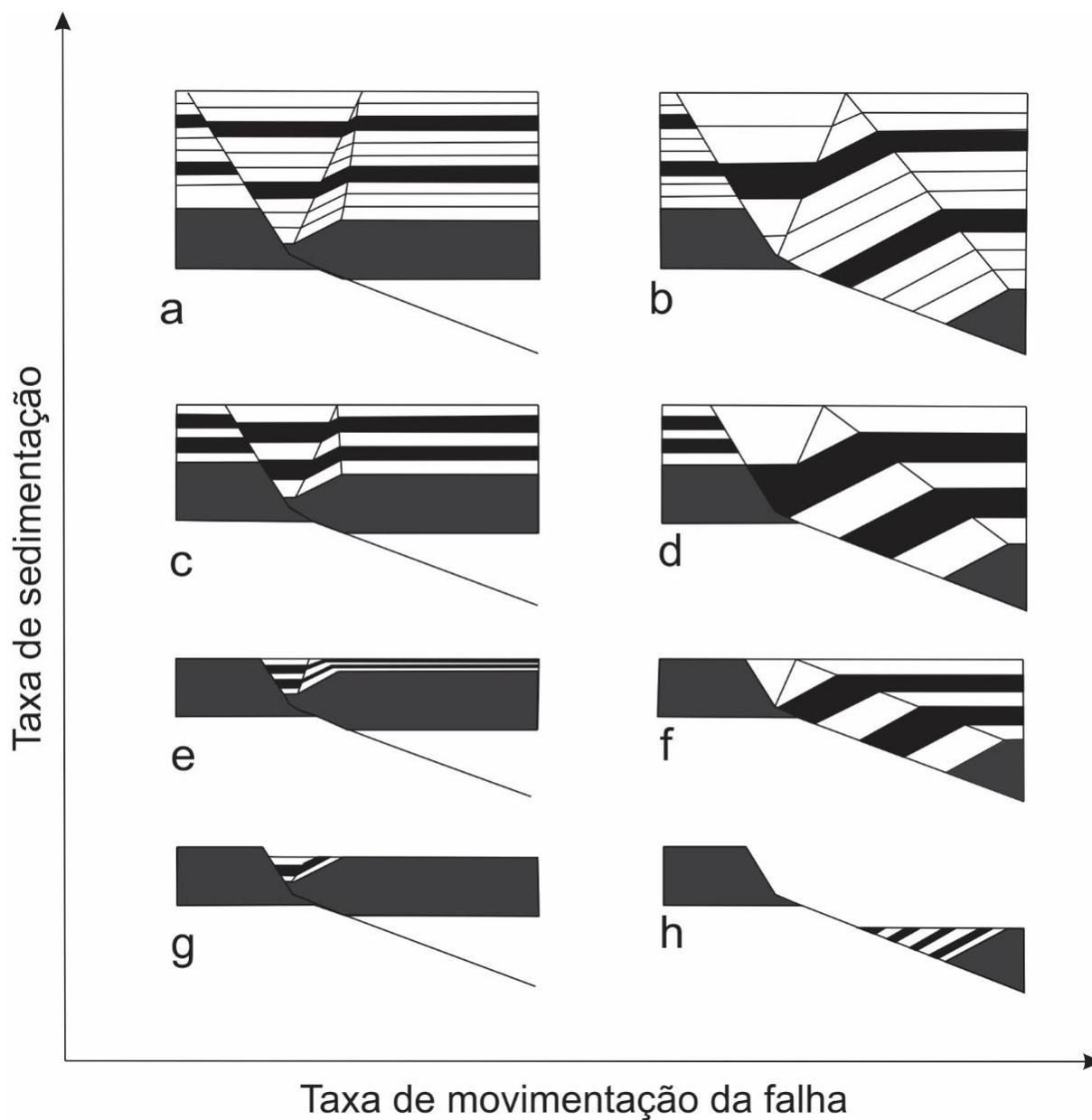


Figura 6: Relações entre a geometria do *rollover*, taxa de sedimentação sin-tectônica e movimentação ao longo de uma falha. Camadas cinzentas representam os depósitos pré-tectônicos, camadas brancas e pretas o sedimento sin-tectônico. Mantendo-se a geometria da falha (a-h) com a taxa de sedimentação constante, quanto maior a taxa de movimentação tectônica maior será o espaçamento entre as superfícies axiais do *rollover*. Note que no caso de bacia faminta (h) será formada uma discordância angular entre os sedimentos cedo sin-tectônicos e tardi-tectônicos. Modelos de Xiao e Suppe (1992).

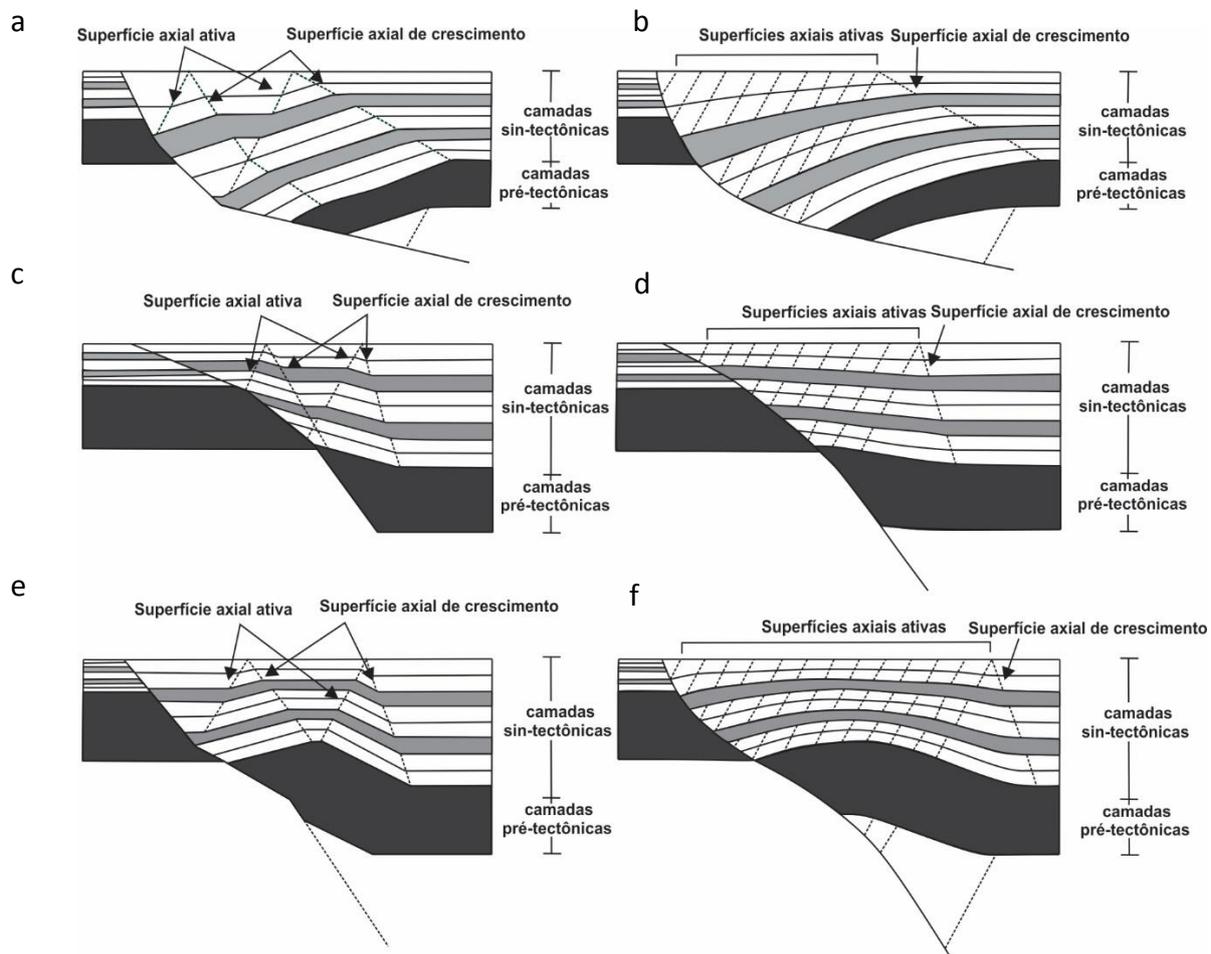


Figura 7: Tipos de inflexões em falhas lístricas: côncava para o topo a) abrupta e b) suave; convexa para o topo c) abrupta e d) suave. Falha com inflexão côncava que passa convexa e) abruptas e f) suaves. Modelos de Zheng *et al.* (2015).

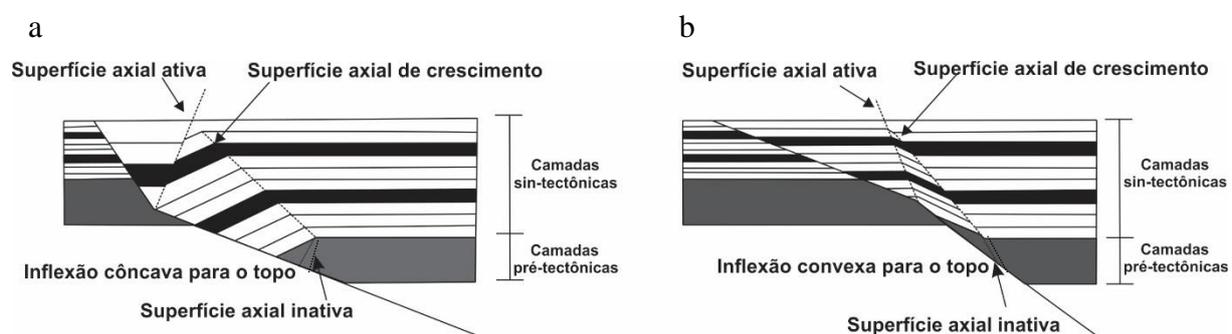


Figura 8: Mergulhos antitéticos e sintéticos de camadas sin-tectônicas em relação a falha mestra devidos à inflexão pontiaguda côncava (a) e convexa (b), respectivamente. A superfície axial de crescimento conecta as superfícies axiais ativa e inativa e as três superfícies limitam o *rollover*. Modelos de Xiao e Suppe (1992).

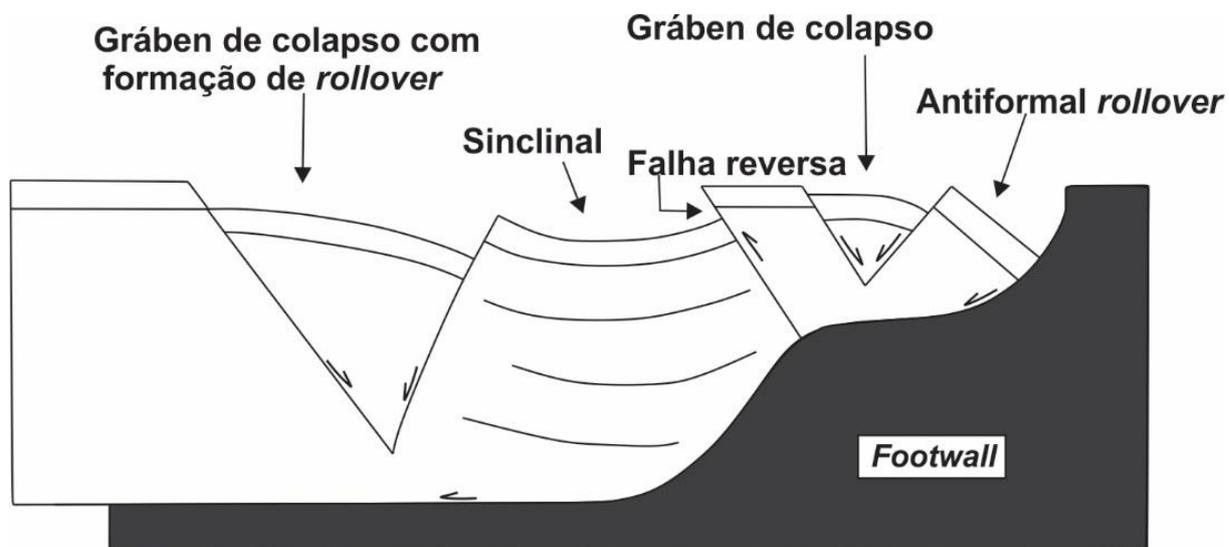


Figura 9: Esquema simplificado ilustrando as estruturas formadas no *hanging wall* de falha lútrica com geometria rampa-plataforma, conforme Ellis & McClay (1988).

4 METODOLOGIA

O trabalho foi baseado em modelagem física em caixas de areia e interpretação das estruturas geradas. Estas estruturas foram desenhadas no *software MOVE 2015.2* com a finalidade de elaborar modelos tridimensionais no *software Skua 2015*. Seções típicas de cada experimento foram também comparadas com seções sísmicas do Golfo do México e da Bacia Joana D'Arc, em Newfoundland, Canadá.

4.1 DESCRIÇÃO DOS EXPERIMENTOS

Os experimentos em caixa de areia foram feitos no Laboratório de Modelagem Física de Processos Geológicos Peter Szatmari no CENPES, Petrobras, Rio de Janeiro. Foi realizada a montagem das próprias caixas de areia e deformação do material utilizado, conforme os passos descritos a seguir. Na etapa inicial foram escavados em blocos rígidos as superfícies que simulam as rampas e plataformas das falhas. O *footwall* das falhas permaneceu como um bloco fixo pois o objetivo foi entender a deformação no *hanging wall*.

Foram três experimentos, em um deles foi utilizado um bloco de madeira com superfícies rampa e plataforma planares, que já existia no laboratório (Figura 10). Nos outros

dois experimentos as superfícies foram escavadas em blocos de espuma fenólica (Figuras 11 e 12). Em um dos blocos de espuma foi escavada uma superfície com rampas lítricas concavas para o topo e plataformas planas (Figura 11). No outro bloco de espuma foi escavada uma superfície côncava para o topo que passa convexa e, finalmente, a uma superfície plana horizontal (Figura 12). Sobre cada bloco, com *footwall* fixo, foi sobreposta uma folha de acetato que se amolda ao relevo e apresenta baixa resistência à movimentação. Esta folha foi fixada em uma parede acoplada a um motor por quatro hastes (Figuras 10, 11 e 12). O conjunto foi então colocado sobre uma placa basal de acrílico e delimitado lateralmente por paredes de vidro fixadas a placa basal. O resultado é a denominada “caixa de areia”, cujas dimensões iniciais aparecem na Tabela 1. Um bloco de isopor foi colocado temporariamente à frente do motor para permitir a deposição de areia nos experimentos 2 e 3. Depois de removida esta parede foi feito o experimento. A deformação na areia se deu durante movimentação da folha de acetato puxada pelo motor nos dois primeiros experimentos, um com bloco de madeira e outro com espuma. No terceiro experimento, com bloco de espuma, o acetato foi puxado manualmente porque o acetato se despreendeu da parede do motor nas etapas iniciais de extensão. O sedimento utilizado foi areia quartzosa média e arredondada, previamente tingida de branco, preto, laranja e azul. Uma sucessão com camadas de areia branca e preta representou a unidade pré-tectônica e outra sucessão com areia azul e laranja a unidade sin-tectônica, em relação à extensão. A sucessão pré-tectônica foi montada com 2 cm de areia branca e 0,5 cm de areia preta. A espessura mostrada na tabela 2 inclui tanto a sucessão pré-tectônica como as camadas sin-tectônicas (azul e laranja) em cada experimento. Durante os experimentos foram sendo adicionadas manualmente e com auxílio de peneira com abertura de 425 μm , areia azul e laranja de modo simular a deposição sin-tectônica cuja espessura é mostrada na Tabela 2. A cada minuto foram feitas fotografias paralelas à direção de extensão. As estruturas formadas são estudadas nos cortes feitos no centro da caixa, depois de umedecida a areia. As estruturas formadas na borda da caixa são descartadas devido ao atrito com a parede de vidro.

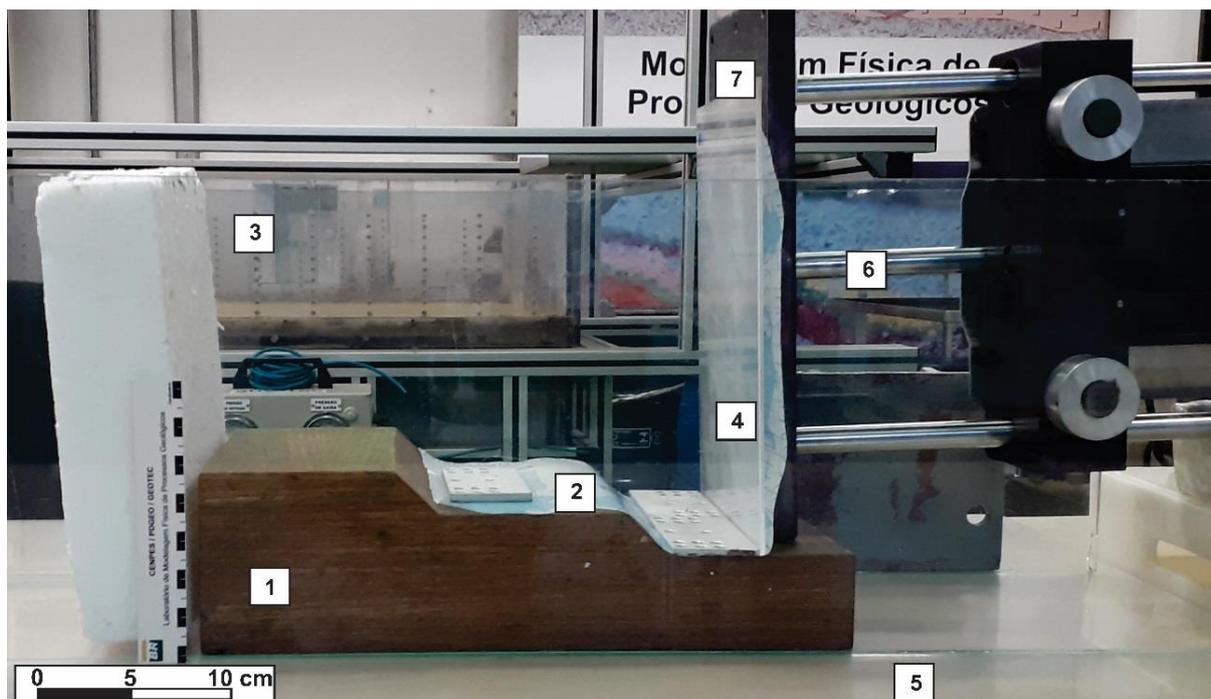


Figura 10: Configuração da caixa de areia do experimento 1: 1- bloco rígido com geometria rampas concavas planares separadas por plataformas, 2- folha de acetato, 3- placa de vidro, 4- placa de acrílico, 5- placa de acrílico basal, 6- haste do motor e 7- parede do motor.

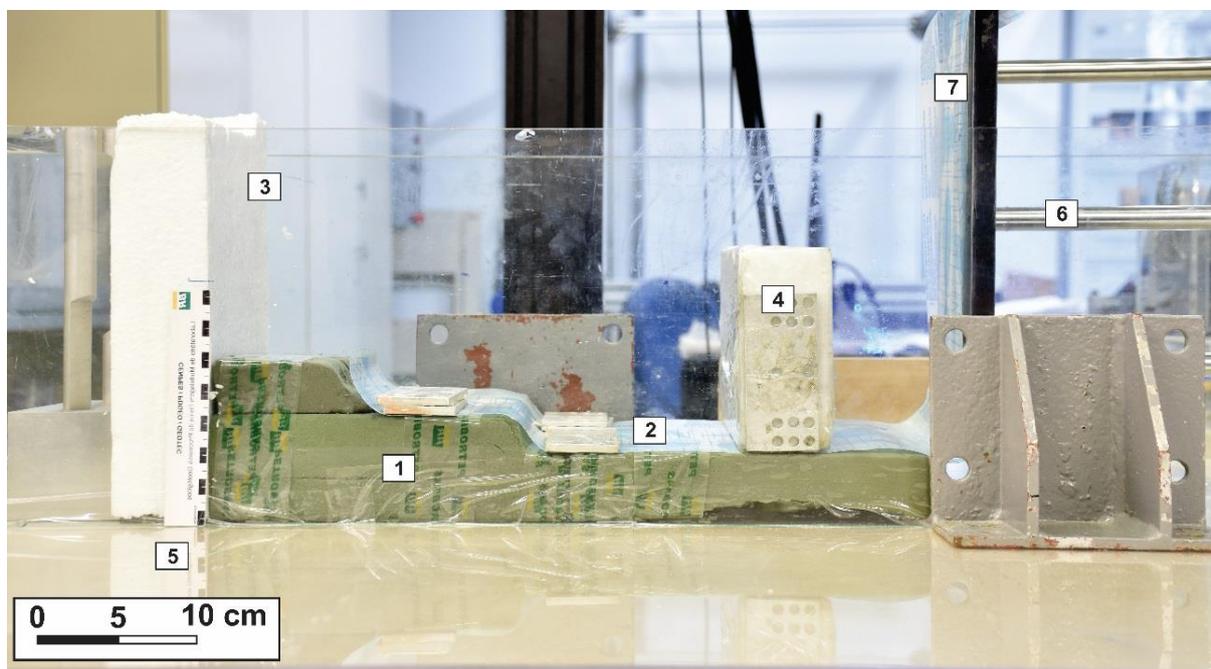


Figura 11: Configuração da caixa de areia do experimento 2 com (1) bloco rígido com geometria rampas concavas e plataforma, (2) folha de acetato, (3) placa de vidro, (4) bloco de isopor, (5) placa de acrílico basal, (6) haste do motor, (7) parede do motor.

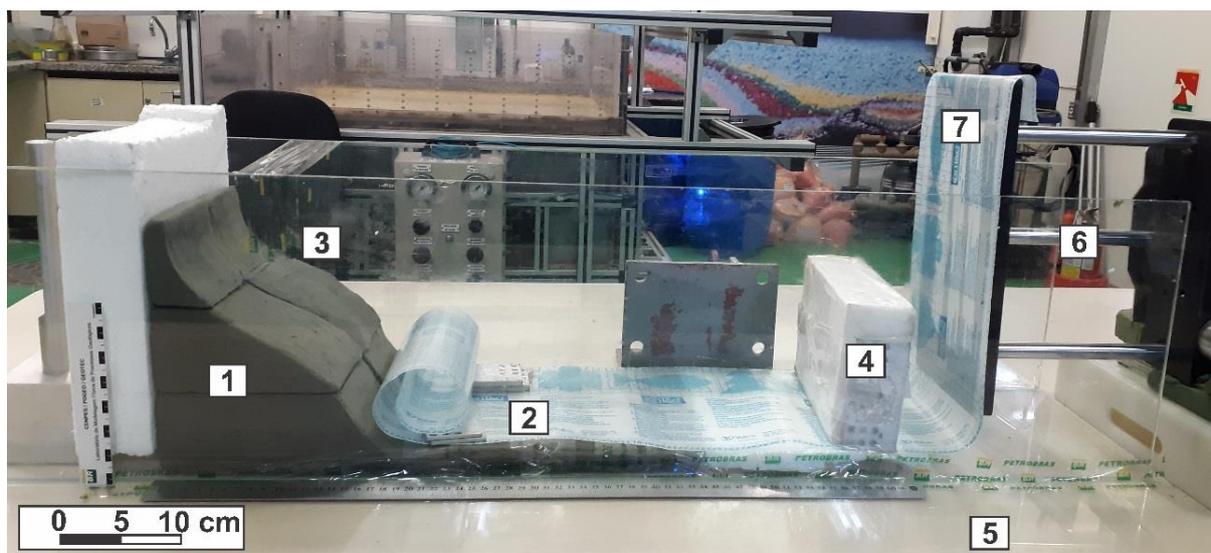


Figura 12: Configuração da caixa de areia do experimento 3 com (1) bloco rígido com geometria rampa concava que passa a convexa e plataforma, (2) folha de acetato, (3) placa de vidro, (4) bloco de isopor, (5) placa de acrílico basal, (6) haste do motor, (7) parede do motor.

Tabela 1: Dimensões iniciais da caixa de areia sendo: largura a distância entre as paredes laterais de vidro, altura inicial a espessura das camadas pré-tectônicas e comprimento a distância do início do bloco rígido até a parede do motor.

Experimento	Largura (cm)	Altura inicial (cm)	Comprimento inicial (cm)
1	19,8	15,4	25,7
2	21,5	14	45,5
3	21,3	17	70

Tabela 2: Espessura das camadas pré e sin-tectônicas.

Experimento	Espessura das camadas pré-tectônicas (cm)	Espessura camadas sin-tectônicas (cm)
1	10	3,5
2	9,5	2
3	15,5	3,5

No primeiro experimento o acetato foi puxado a uma velocidade constante de 198,72 mm/h, durante 21 minutos, resultando em um deslocamento total de 7,0 cm de extensão que equivale aproximadamente 27% de extensão. Neste ensaio, o acetato não se amoldou

perfeitamente ao bloco rígido basal na rampa inferior, desta forma, a interpretação feita das estruturas foi delimitada na rampa e plataforma superiores. No segundo, a uma velocidade constante de 275,61mm/h durante 17 minutos, ocorreu um deslocamento total de 7,8 cm equivalente a aproximadamente 17% de extensão. No terceiro experimento o acetato foi puxado manualmente com velocidade variada, entre 198,72 mm/h e 275,61mm/h, calculada com base em fotografias tiradas a cada minuto. Resultou um deslocamento total de 7,5 cm equivalente a aproximadamente 11% de extensão.

Ao final de cada experimento, depois da deformação, a areia foi umedecida com água para poder ser cortada em seções verticais paralelas à direção de extensão. Foram feitos 17 cortes na primeira caixa, 19 na segunda e 15 na terceira mostrando as estruturas formadas. Estes cortes foram fotografados para posterior interpretação utilizando o *software MOVE*. As fotografias foram referenciadas com coordenadas x,y,z a largura da caixa, comprimento de cada seção e altura final do experimento, respectivamente (Figura 13). As medidas equivalentes à dimensão da caixa de areia foram multiplicada por 1000 para poderem serem incorporadas no *software*. Após o desenho das camadas (Figura 15) e das falhas (Figura 14), foi feita a interpolação destas linhas (Figuras 16 e 17) em um ambiente tridimensional, no *software Skua* da Paradigm. O objetivo foi obter uma visão tridimensional para melhor entendimento das estruturas ao longo do *strike*.

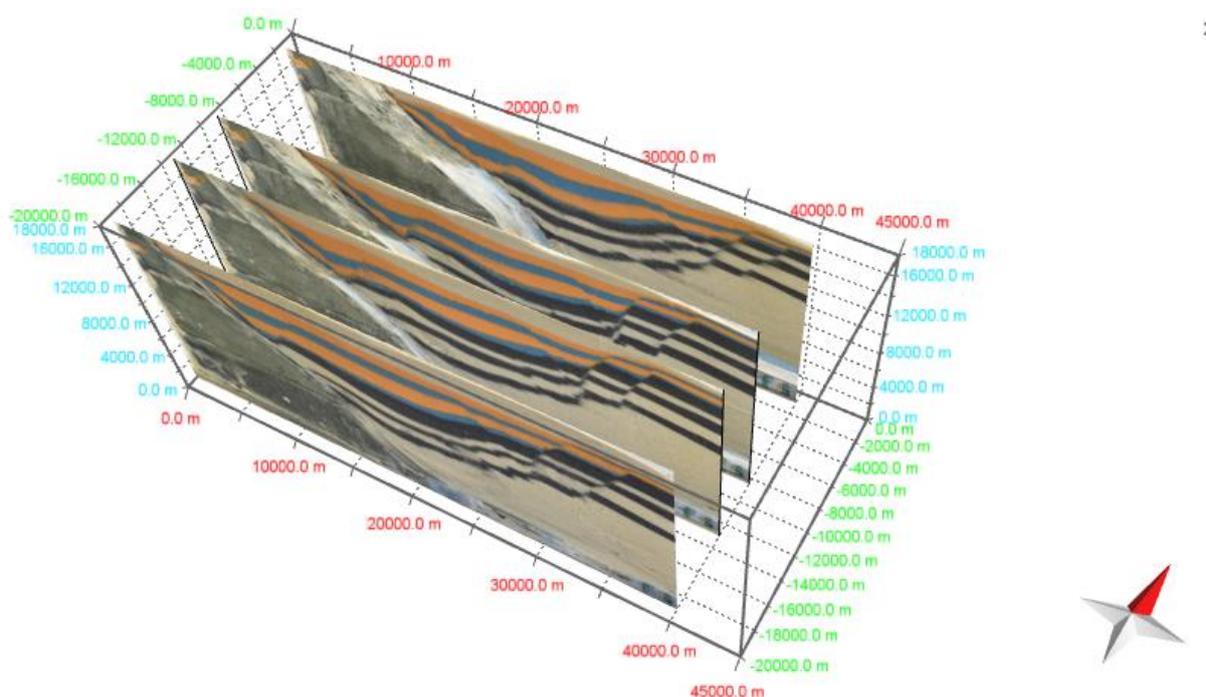


Figura 13: Exemplo de fotografias importadas do *software MOVE* com coordenadas baseadas na dimensão da caixa de areia do experimento 3.

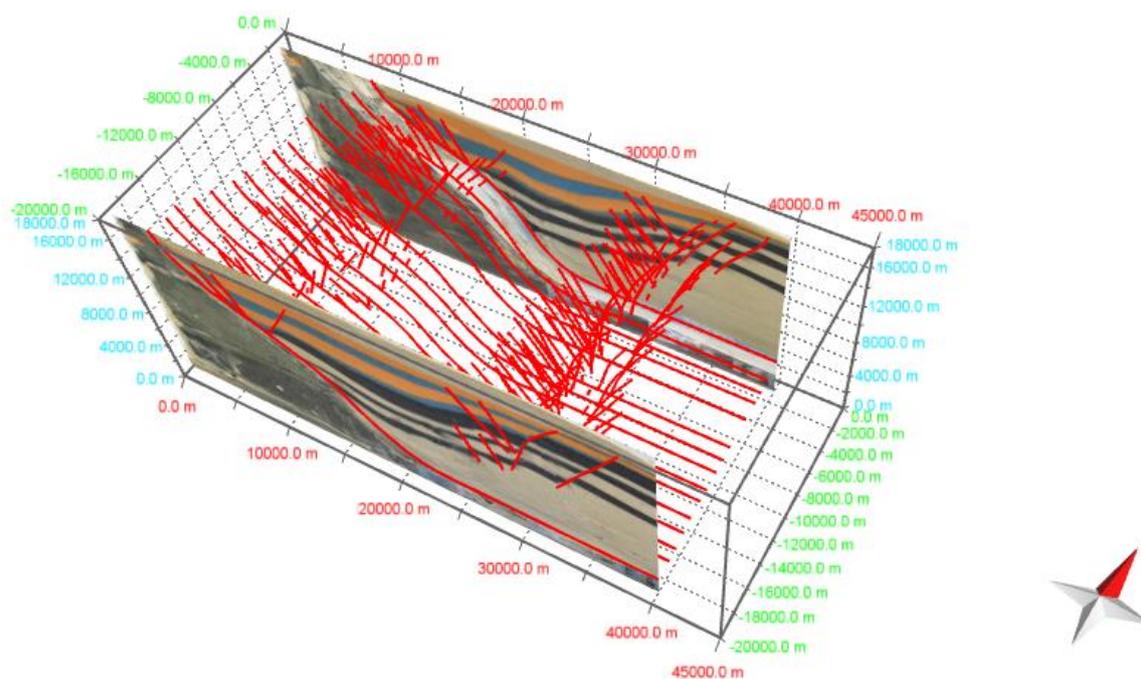


Figura 14: Interpretação das falhas no software MOVE 2015 com base em fotografias de cortes com o material umedecido.

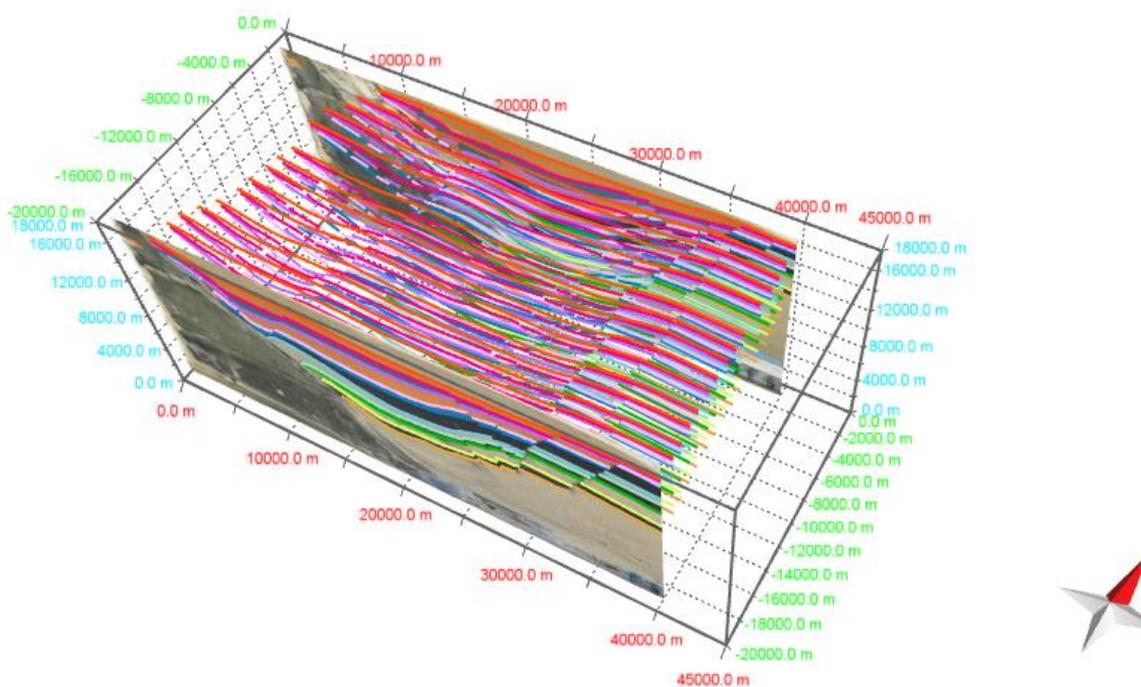


Figura 15: Interpretação das sucessões pré e sin-tectônicas no *software* MOVE 2015 com base em fotografias de cada corte com o material umedecido.

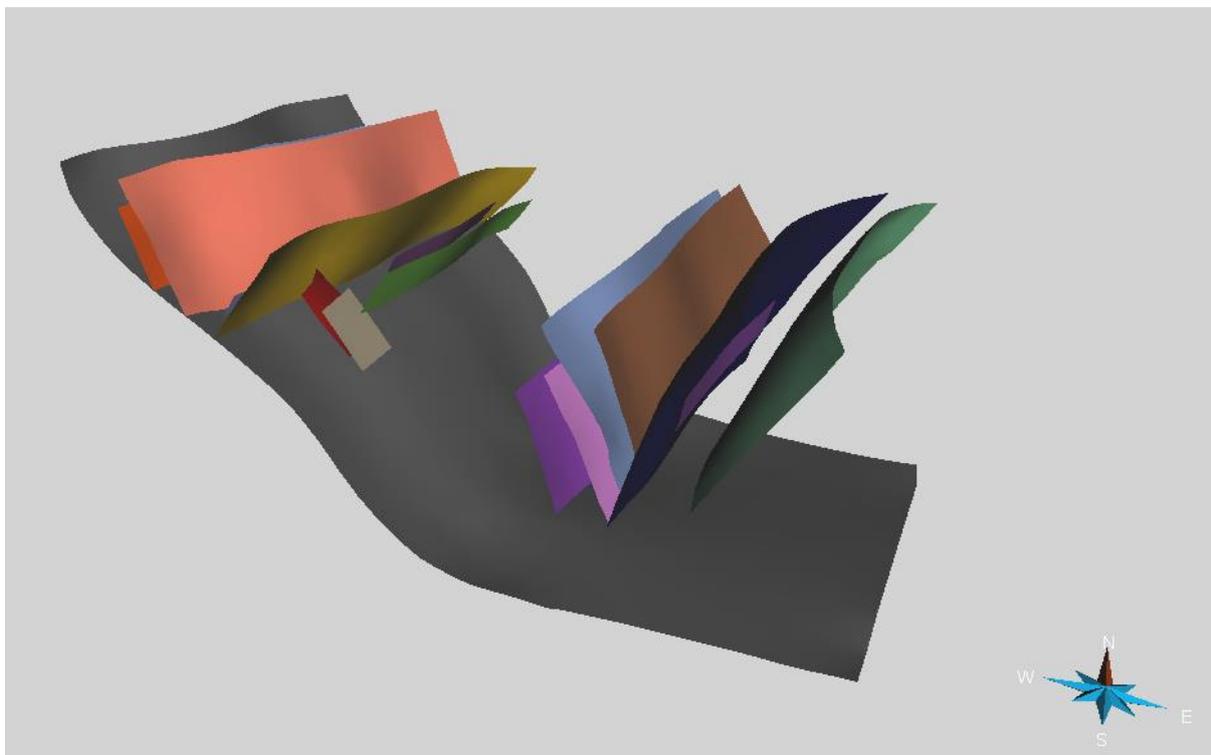


Figura 16: Superfícies de falhas lístrica, sintéticas, antitéticas e de empurrão do experimento 3 geradas no *software* Skua 2015.

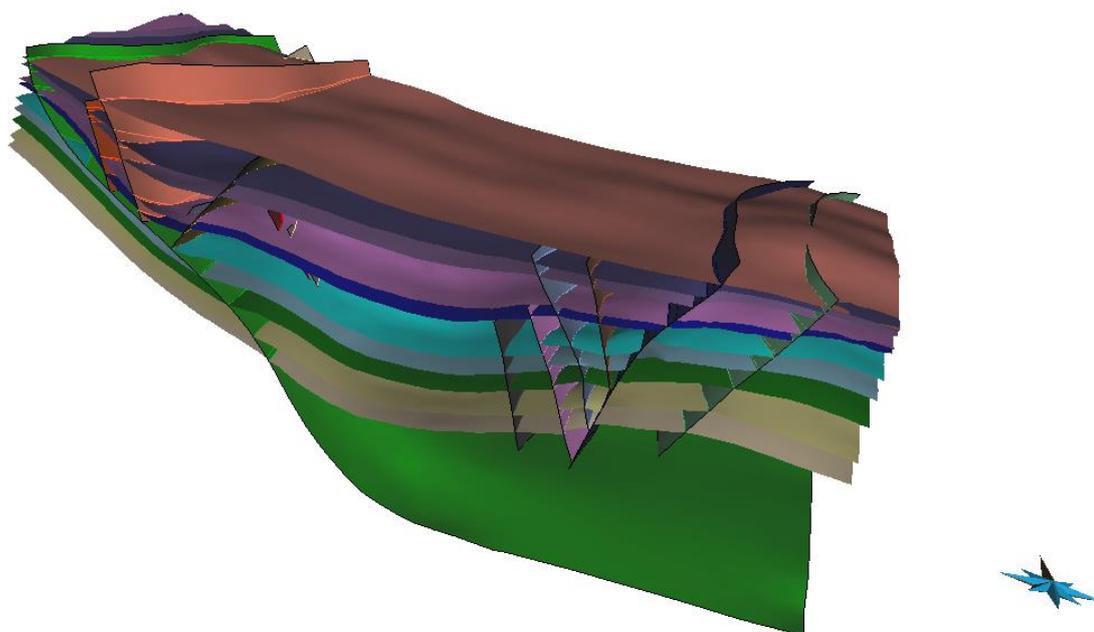


Figura 17: Superfícies de falhas lístrica, sintéticas, antitéticas e de empurrão e camadas pré e sin-tectônicas do experimento 3 geradas no *software* Skua.

5 RESULTADOS

Nos três experimentos foram geradas falha lítrica mestra, falhas normais antitéticas, sintéticas e reversas associadas. Nos ensaios foi possível observar o aumento de espessura dos sedimentos sin-tectônicos nos depocentros, fato comumente observado em sucessões fósseis. O modelo tridimensional também mostra falhas que se desenvolveram nas camadas sin-tectônicas, outras restritas à sucessão pré-tectônica e, falhas que deslocam ambas sucessões, pré e sin tectônica.

5.1 EXPERIMENTO 1: RAMPA CÔNCAVA

Neste experimento a geração da falha mestra (1,2,3; Figura 18) se deu logo acima da rampa planar superior e as falhas normais, sintéticas e antitéticas sobre a zona de plataforma (4 e 5, Figura 18). Uma pequena falha de empurrão (6, Figura 18) foi formada logo acima da transição da plataforma pré-rampa a própria rampa. A falha mestra tem um mergulho final íngreme ($\geq 70^\circ$) sobre a rampa pré-existente passando a horizontal na região da plataforma. O mergulho final das falhas normais sintéticas é de até cerca de 50° e das antitéticas de até cerca de 60° . No *rollover* resultante as camadas mostram mergulhos entre 10° e cerca de 30° (7, Figura 18). O experimento mostra a variação do mergulho da falha mestra, que passa de íngreme para suave com o prosseguimento da extensão.

À medida que a falha mestra se desenvolvia, as camadas pré-tectônicas rotacionavam em direção a ela, atingindo mergulho de até 30° no final do experimento (Figura 19c). Esta rotação gerou um *rollover* segmentado por falhas sintéticas secundárias cujos ângulos de mergulho variaram de 60° no início até 45° de mergulho ao final do experimento (Figura 19c). Duas falhas antitéticas foram formadas contemporaneamente às falhas sintéticas, porém não produziram rotação das camadas pré-tectônicas (Figura 19a). Uma destas falhas tem geometria plana e seu mergulho íngreme, de 55° , ficou praticamente constante ao longo do experimento. A outra falha antitética, inicialmente planar, foi tornando-se convexa no segmento inferior até atingir mergulho de 70° ao final do experimento (8, Figura 18).

Neste primeiro experimento a folha de acetato não se amoldou perfeitamente ao bloco rígido basal na rampa inferior, desta forma, a interpretação foi feita apenas com os dados obtidos acima da rampa e plataforma superiores.

O modelo 3D mostra a continuidade e geometria das falhas e os deslocamentos gerados por elas nas sucessões pré e sin-tectônicas (Figura 20, Figura 21).

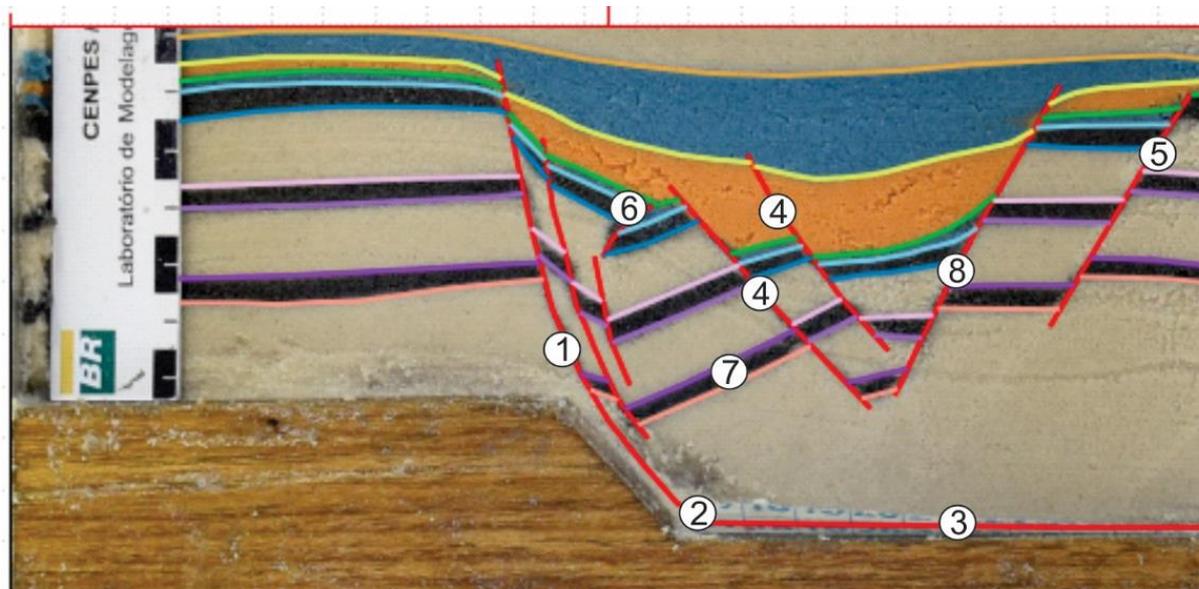
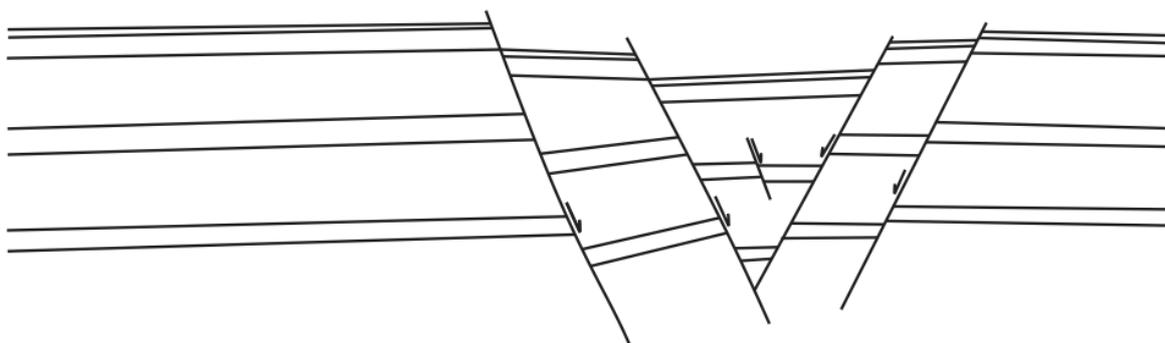
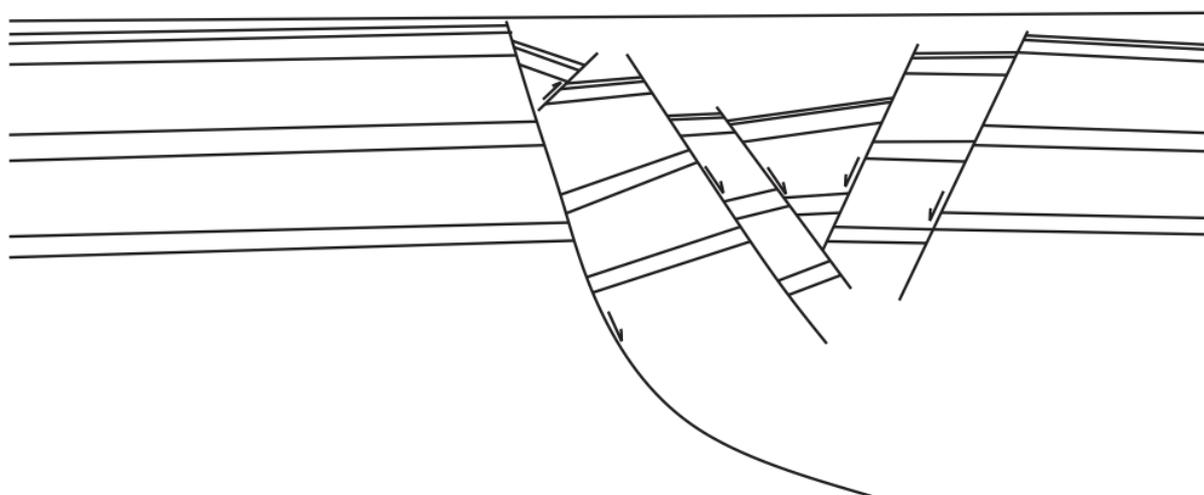


Figura 18: Seção típica do experimento 1 mostrando falha mestra com 1- segmento superior íngreme, 2- brusca inflexão côncava para o topo e 3- segmento horizontal; falhas planares 4- sintéticas e 5- antitéticas; 6- falha de empurrão; 7- rollover segmentado por falhas sintéticas e 8- falha antitética com segmento inferior convexo. Escala = 6 cm.

a) T1



b) T2



c) T3

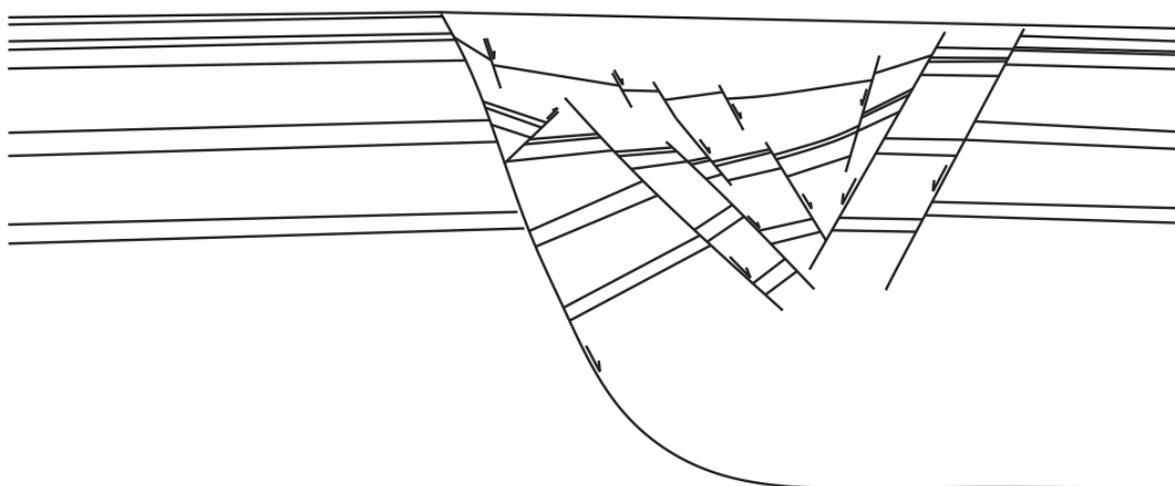


Figura 19: Evolução das estruturas formadas no experimento 1 em três intervalos de tempo: com o decorrer da extensão a falha mestra, inicialmente íngreme (a) passa a horizontal em profundidade. O mergulho das falhas sintéticas torna-se mais suave, uma falha reversa se forma (b) e falhas normais de alto ângulo truncam as camadas sin-tectônicas (c). Ilustrações baseadas em fotografias da sucessão colada à parede da caixa de areia.

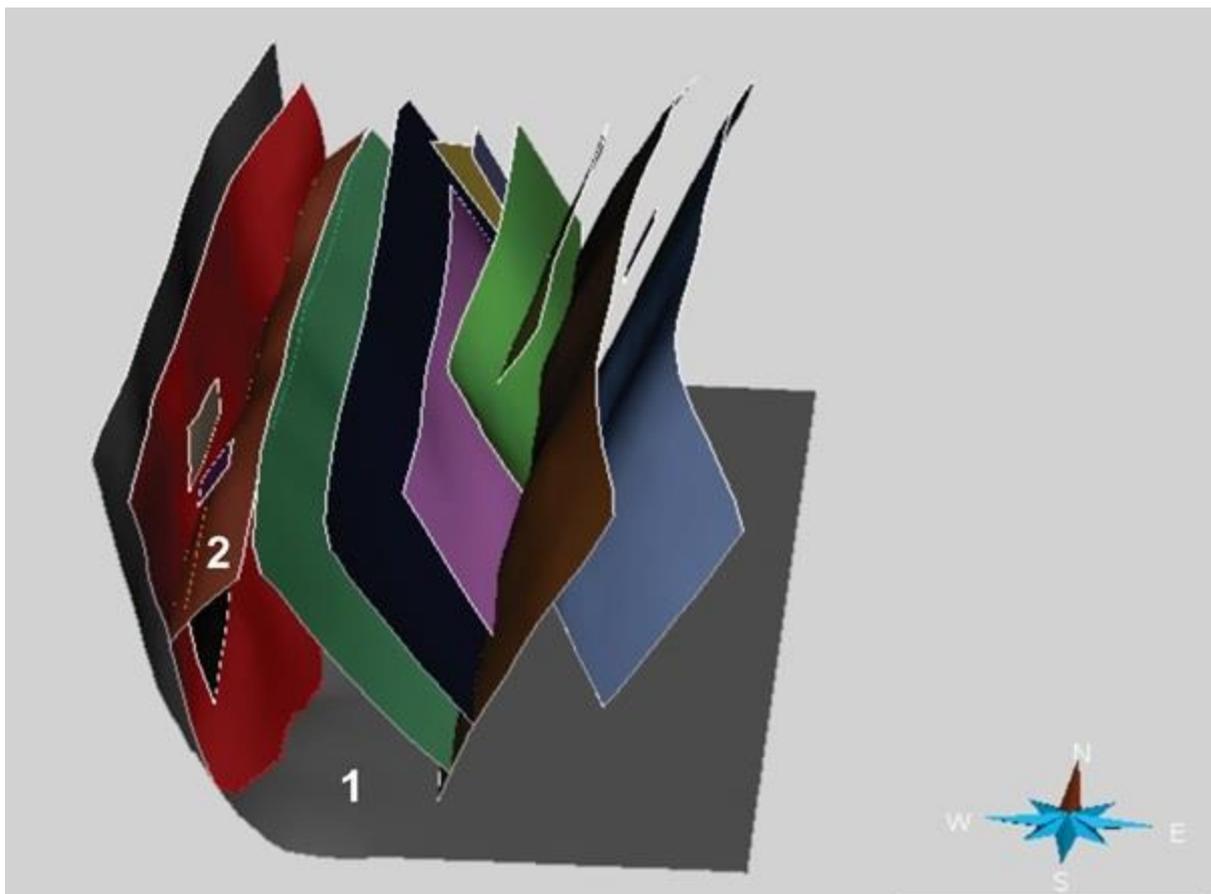


Figura 20: A geometria das falhas mestra (1), falhas sintéticas e antitéticas associadas, e a falha de empurrão (2) geradas no experimento 1. Modelo 3D elaborado no *Software Skua 2015*.

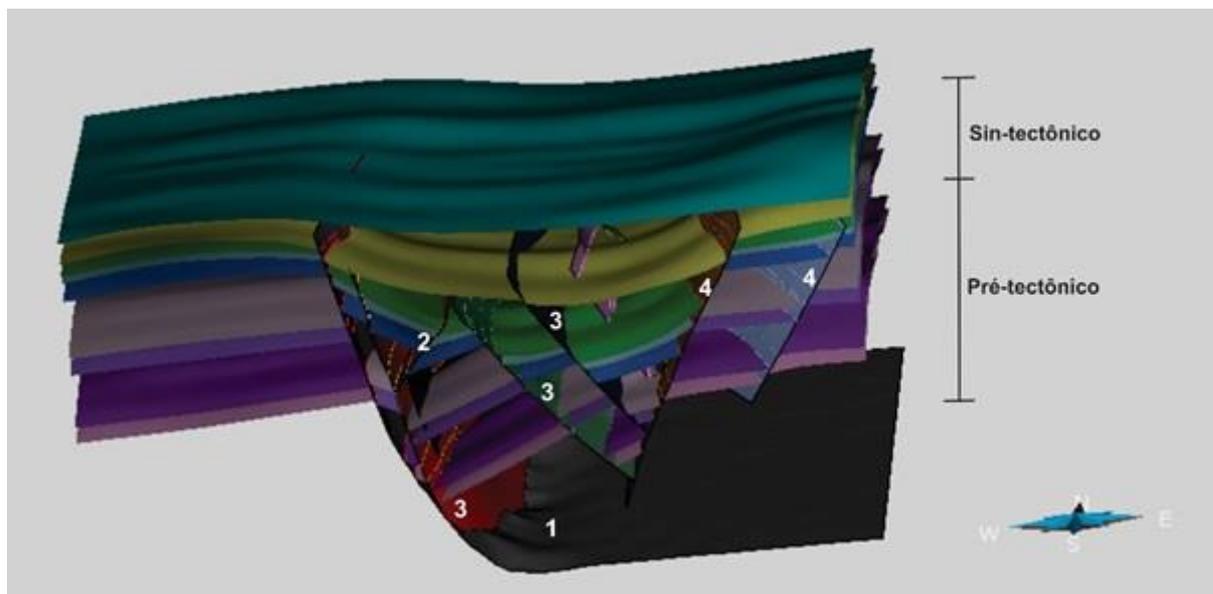


Figura 21: A geometria das falhas e sucessões no experimento 1, conforme modelo 3D elaborado no *Software Skua 2015*. O *rollover* acentuado na sucessão pré-tectônica gera discordância e espessamento da sucessão sin-tectônica. Falhas 1- lítrica mestra, 2- empurrão, 3- sintéticas e 4- antitéticas.

5.2 EXPERIMENTO 2: RAMPAS CÔNCAVAS SEPARADAS POR PLATAFORMA HORIZONTAL

Neste experimento, a falha mestra se desenvolveu sobre rampas e plataformas (1, 2, 3 e 4; Figura 22). Sobre a rampa superior côncava, formou-se um *rollover* (5, Figura 22) e sobre a plataforma superior foram geradas falhas sintéticas (6, Figura 22) e antitéticas secundárias (7, Figura 22). Uma pequena falha reversa (8, Figura 22) foi formada sobre a rampa superior. Na rampa côncava inferior (3, Figura 22), formaram-se falhas antitéticas reversas com mergulho de cerca de 60° (9, Figura 22). Sobre a plataforma inferior, desenvolveu-se um depocentros limitado por falhas antitéticas íngremes cujo mergulho é aproximadamente 75° (7, Figura 22).

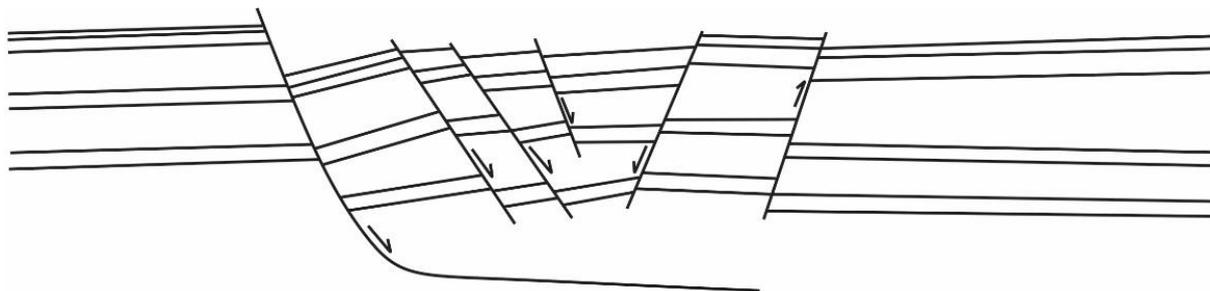
Neste experimento a falha mestra tem um mergulho final íngreme ($\geq 70^\circ$) sobre a rampa passando a horizontal na região da plataforma. O mergulho final das falhas normais sintéticas é de até 50° e das antitéticas de até cerca de 60° . O *rollover* resultante apresentou variação de mergulho varia entre 10° e cerca de 40° entre as camadas pré e sin-tectônicas (Figura 23).

O modelo 3D gerado para as estruturas desenvolvidas neste experimento permite melhor visualização da geometria das falhas e sucessões pré e sin-tectônicas (Figuras 24 e 25).

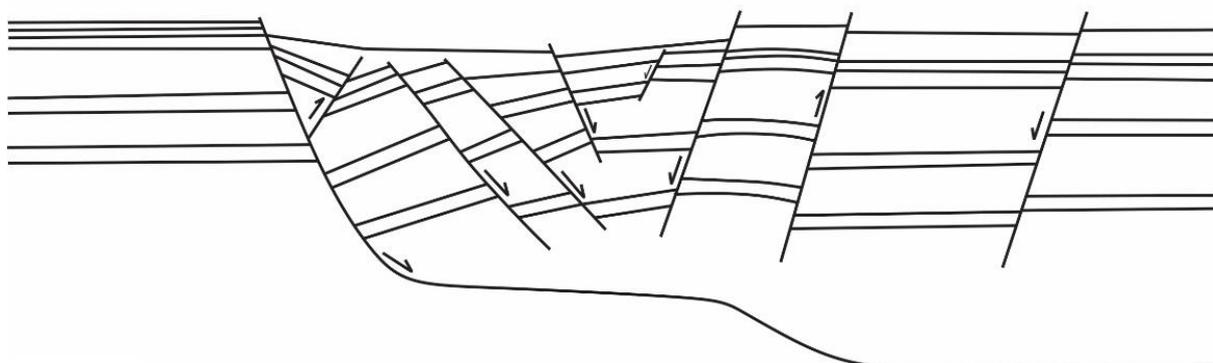


Figura 22: Seção tipo do experimento 2 mostrando: rampas 1- superior e 3- inferior; plataformas 2- superior e 4- inferior; 5- *rollover*; falhas planares secundárias 6- sintéticas e 7- antitéticas; 8 e 9 - falhas reversas.

a) T1



b) T2



c) T3

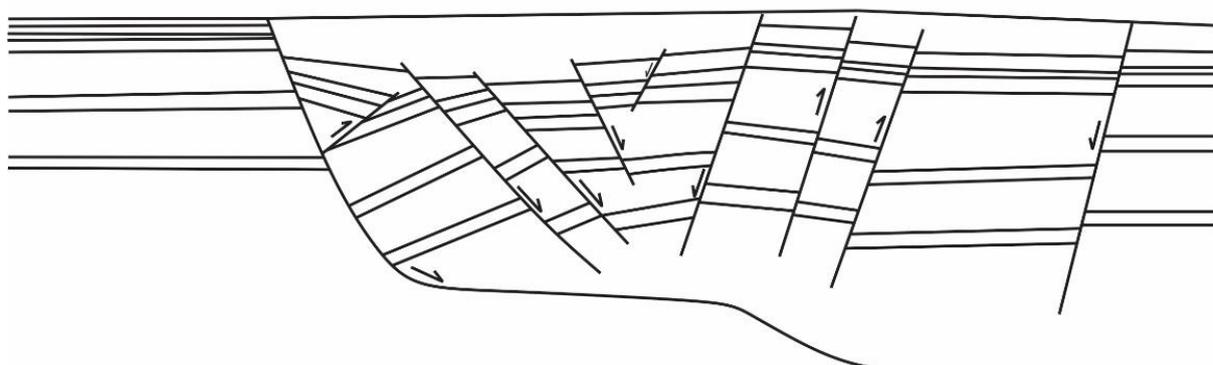


Figura 23: Evolução das estruturas formadas no experimento 2 em três intervalos de tempo: com o decorrer da extensão a falha mestra, inicialmente íngreme (a) passa a horizontal em profundidade. O mergulho das falhas sintéticas torna-se mais suave, uma falha reversa se forma; falhas normais de alto ângulo truncam as camadas sin-tectônicas (b). Outra falha reversa se forma sobre rampa inferior (c) Ilustrações baseadas em fotografias da parede lateral do experimento.

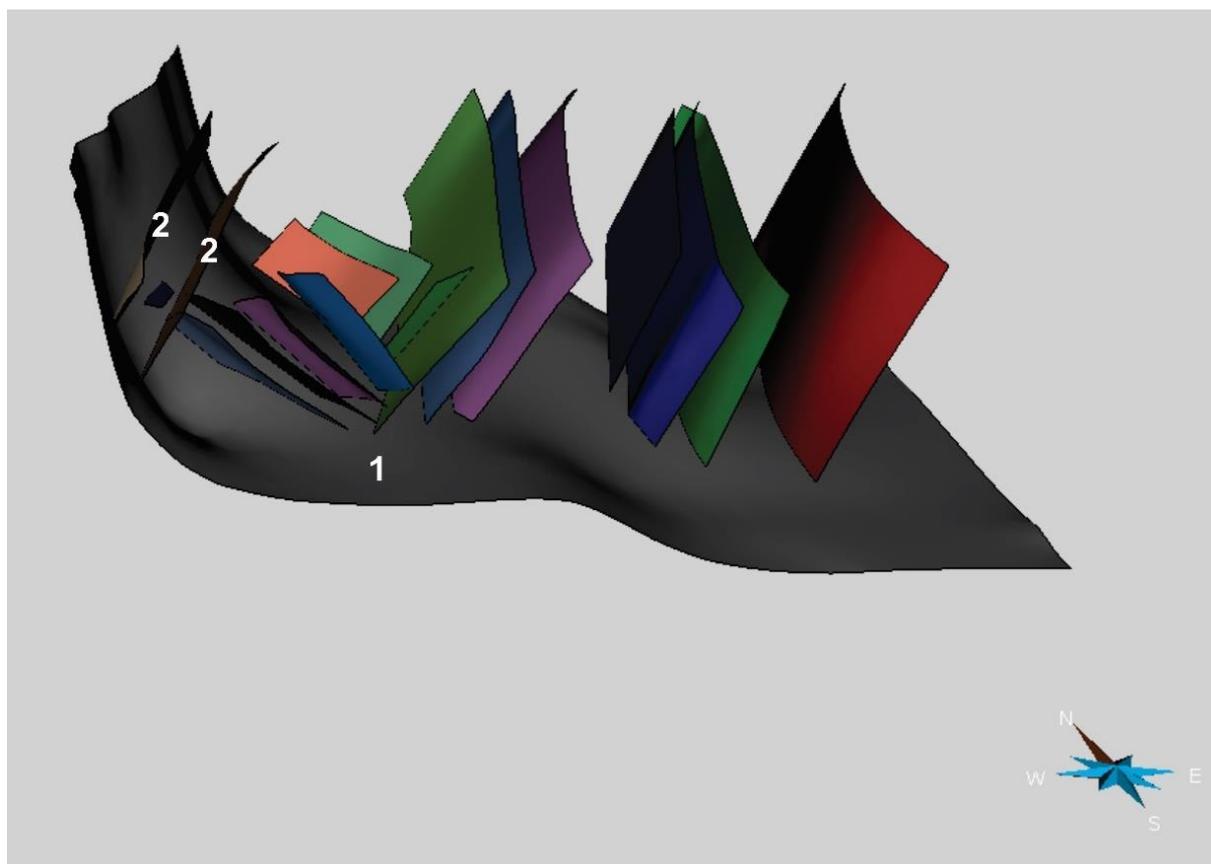


Figura 24: A geometria das falhas mestra (1), sintéticas e antitéticas associadas e falhas reversas (2) geradas no experimento 2. Modelo 3D elaborado no *Software Skua* 2015.

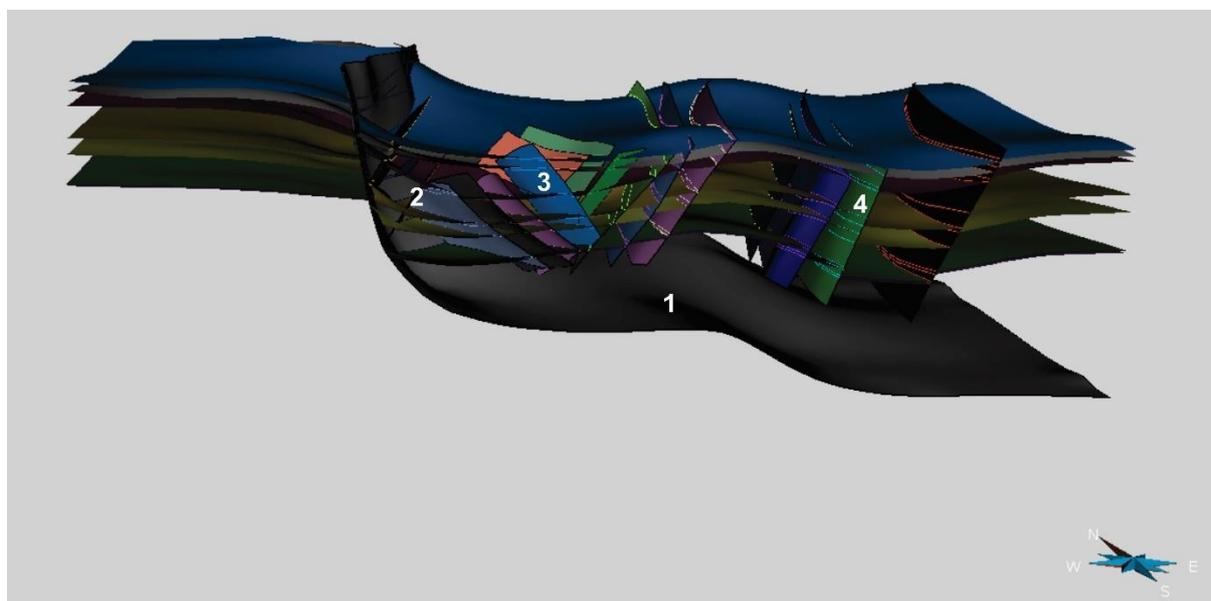


Figura 25: A geometria das falhas e sucessões no experimento 2 conforme modelo 3D elaborado no *Software Skua* 2015. Falhas 1- lístrica mestra, 2- reversa, 3- sintéticas normais e 4- antitéticas reversas.

5.3 EXPERIMENTO 3: RAMPA CÔNCAVA QUE PASSA A CONVEXA

Neste experimento, a falha mestra se desenvolveu sobre uma rampa côncava que passa a convexa e a uma plataforma horizontal (1,2,3; Figura 26). Acima da rampa côncava se originou um *rollover* nas camadas pré-tectônicas (4; Figura 26) e *graben* de colapso nas sin-tectônicas (5, Figura 26). Além destas estruturas, desenvolveu-se um sinformal associado à rampa convexa e à plataforma (6, Figura 26). Esta estrutura sinformal é menos desenvolvida em direção às camadas sin-tectônicas. Lateralmente ao sinformal ocorrem *grabens* limitados por falhas sintéticas e antitéticas com mergulho final de 50° e 55°, respectivamente (7 e 8; Figura 26). Além disso, foram formadas falhas sintéticas reversas com mergulho de 50° acima da plataforma inferior (9, Figura 26). Acima da plataforma ocorrem duas falhas antitéticas, uma planar (8, Figura 26) e outra convexa com mergulho mais elevado, ca. 65°, no segmento inferior (10, Figura 26). Pode-se dividir as estruturas deste experimento em três regiões: a superior associada ao antiformal *rollover* e *graben* de colapso; a intermediária representada pelo sinformal e a inferior por *grabens* e falhas reversas.

O modelo 3D gerado para as estruturas desenvolvidas neste experimento permite melhor visualização da geometria das falhas e sucessões pré e sin-tectônicas (Figura 27 e 28).

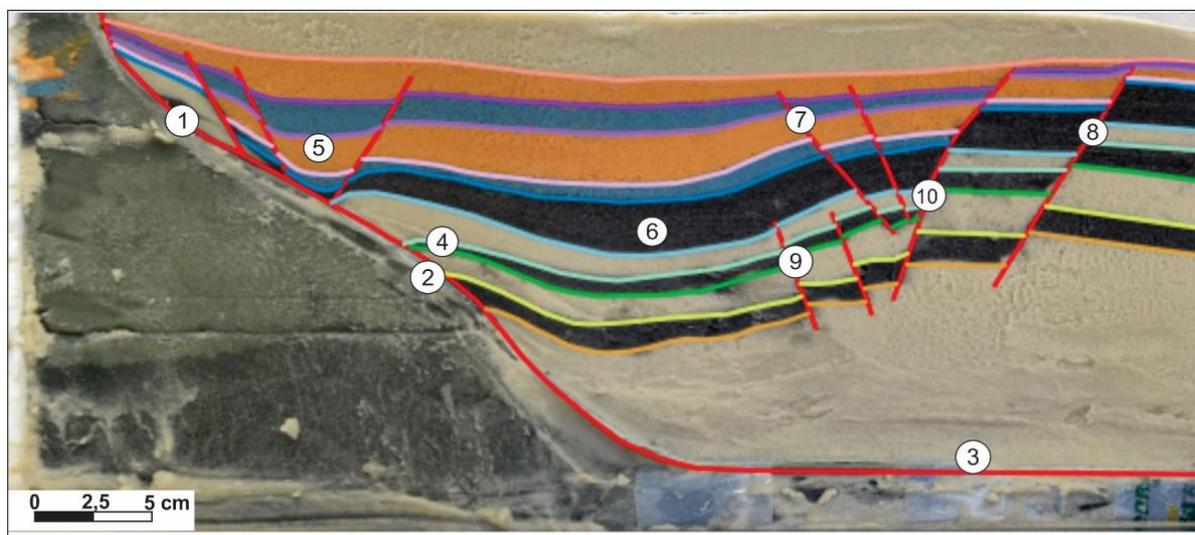


Figura 26: Seção tipo do experimento 3 mostrando: rampas 1- côncava e 2- convexa; 3- plataforma; 4- *rollover*; 5- *graben* de colapso; 6- sinformal; falhas sintéticas 7- normal e 9- reversa; falhas antitéticas 8- planar e 10- convexa.

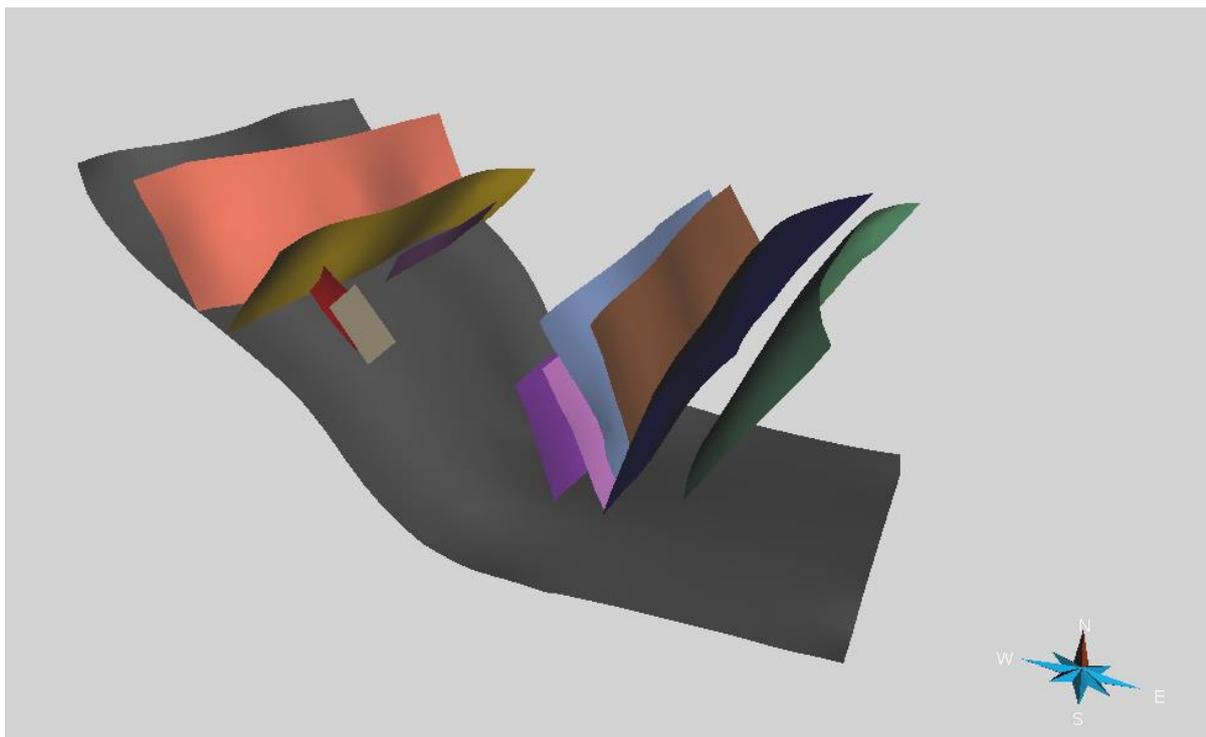


Figura 27: A geometria das falhas mestra, sintéticas e antitéticas associadas geradas no experimento 3. Modelo 3D elaborado no *Software Skua* 2015.

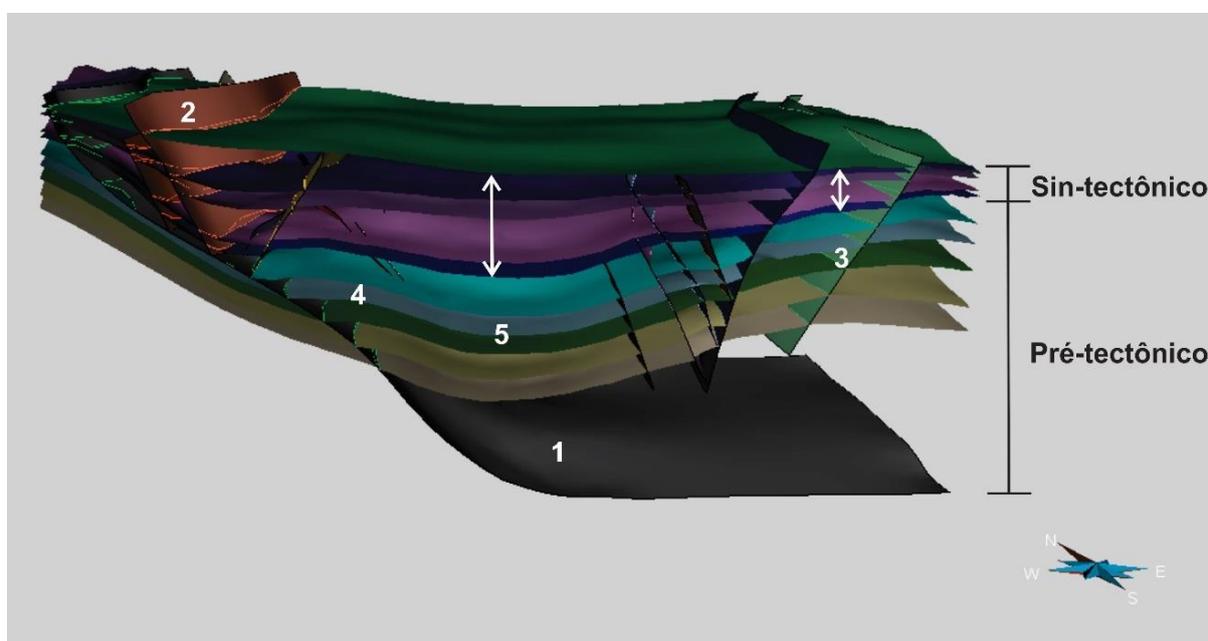


Figura 28: A geometria das falhas e sucessões no experimento 3, conforme modelo 3D elaborado no *Software Skua* 2015. Falhas 1- lítrica mestra, 2- sintéticas, 3- antitéticas e dobras 4- rollover e 5- sinformal. Setas brancas mostram diferença de espessura das camadas sintectônicas.

6 DISCUSSÕES

Os três experimentos físicos geraram sistemas de falhas lítricas de crescimento. Estas falhas são semelhantes às que ocorrem em bacias com alta taxa de sedimentação em relação à extensão e com maior espessura da sucessão sin-tectônica sobre o *rollover*. As estruturas geradas nos experimentos foram comparadas às observadas em seções sísmicas paralelas à direção de mergulho de falhas lítricas de crescimento no Golfo do México e na bacia Joana d'Arc, Newfoundland, Canadá, cuja história está relacionada com a movimentação do sal.

6.1 EXPERIMENTO 1: RAMPA CÔNCAVA

Este modelo pode ser comparado a falhas lítricas simples, ou seja, aquelas com apenas um segmento côncavo. O antiformal *rollover* e os *grabens* gerados são similares aos mostrados nos experimentos de Ellis & McClay (1988) com areia homogênea e rampa com mergulho de 60°. Porém, a falha de empurrão que aparece no experimento 1 (6 na Figura 18) não ocorre no modelo dos autores. Provavelmente, esta falha foi gerada devido a compressão formada pela diferença de velocidade dos grãos que descem e os que ainda irão descer a rampa ou pela rotação de blocos durante a movimentação.

Outro resultado do experimento 1 foi maior rotação da sucessão pré-tectônica em relação a sin-tectônica, durante a formação do *rollover*. Isso pode ter sido gerado pela alta taxa de extensão (192 mm/h). Mauduit and Brun (1998) mostraram que uma extensão rápida gera mergulho maior do *rollover* tanto nas camadas pré- como cedo sin-tectônicas. Já a sucessão tardi-tectônica mostra mergulho menor gerando uma discordância intraformacional (Figura 30a). Porém, com baixa taxa de extensão as sucessões pré- e sin-tectônicas mostram mergulhos similares (Figura 30b).

A falha lítrica e estruturas associadas podem ser comparadas com a Falha Corsair, uma falha de crescimento cenozoica no Golfo do México (Figura 31). O deslocamento vertical nesta falha é de *ca.* 5 km e o horizontal de 16 km e o *rollover* é a principal armadilha do óleo na região (Mahmood, 1996). O *rollover* e *grabens* gerados no experimento 1 são similares aos observados no *hanging wall* da Falha Corsair, porém, nesta não ocorre a falha de empurrão como no experimento (Figuras 31 e 32).

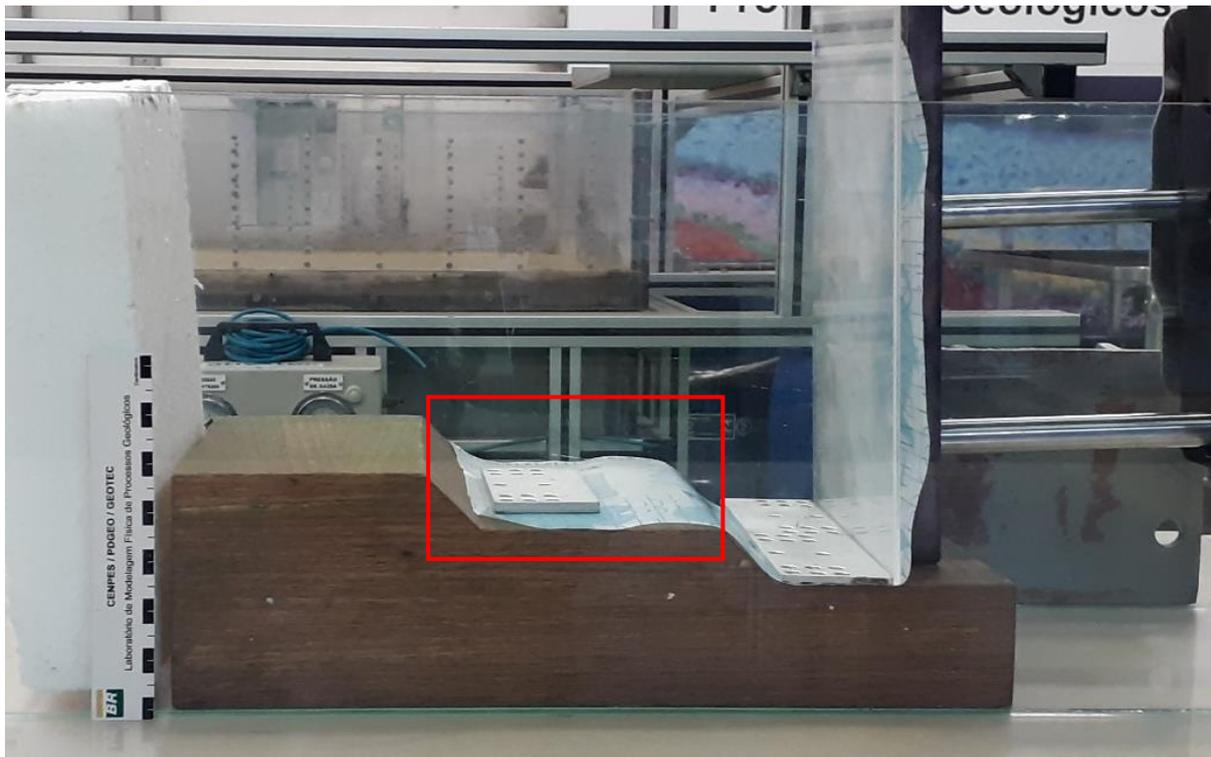


Figura 29: Configuração do experimento 1, mostrando a geometria rampa-plataforma planar no bloco rígido de madeira. O retângulo vermelho define a região de rampa e plataforma superior analisada no final do experimento.

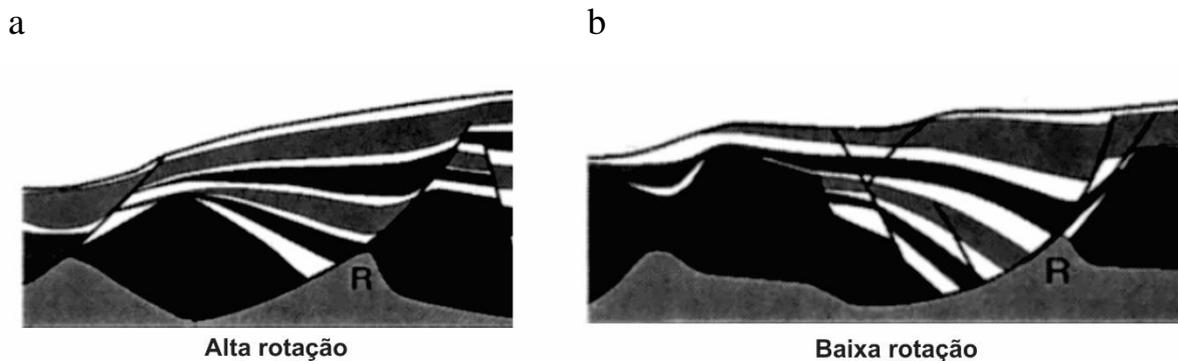


Figura 30: Modelo esquemático baseado em experimento em caixa de areia de falhas lítricas simples mostrando a diferença de rotação das camadas em direção à falhas mestra. (a) com alta taxa de rotação, as camadas inferiores apresentam maior basculamento em relação às superiores e b) com baixa taxa de rotação não há tanta variação de mergulho entre as camadas. Fonte: Mauduit and Brun (1998).

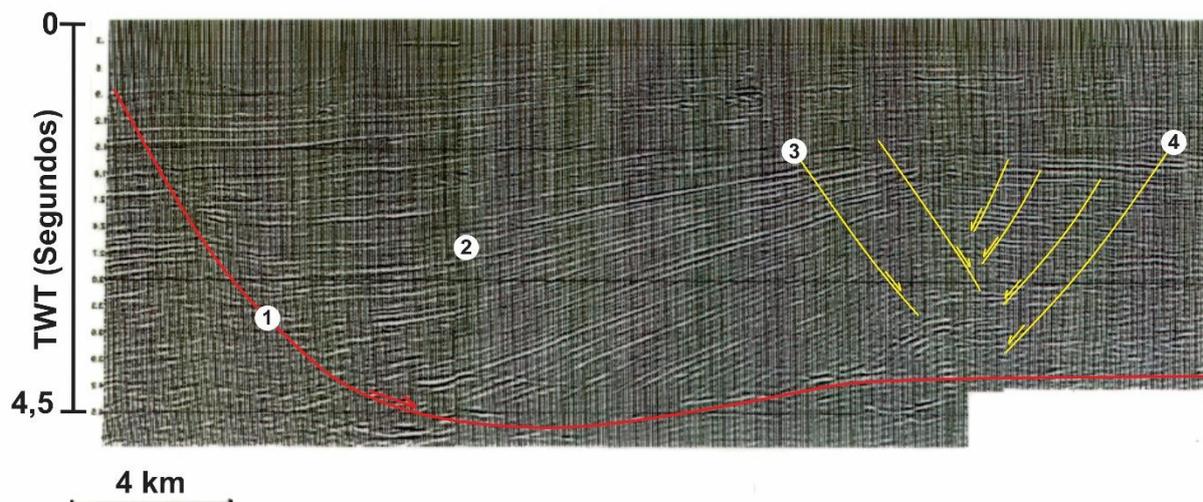


Figura 31: Interpretação de seção sísmica mostrando 1- falha lítrica de crescimento, 2- rollover e grabens limitados por falhas 3- sintéticas e 4- antitéticas. Compare com estruturas semelhantes obtidas no experimento 1 (Figura 32). Seção sísmica da Falha Corsair extraída de Waltham *et al.* (1994).

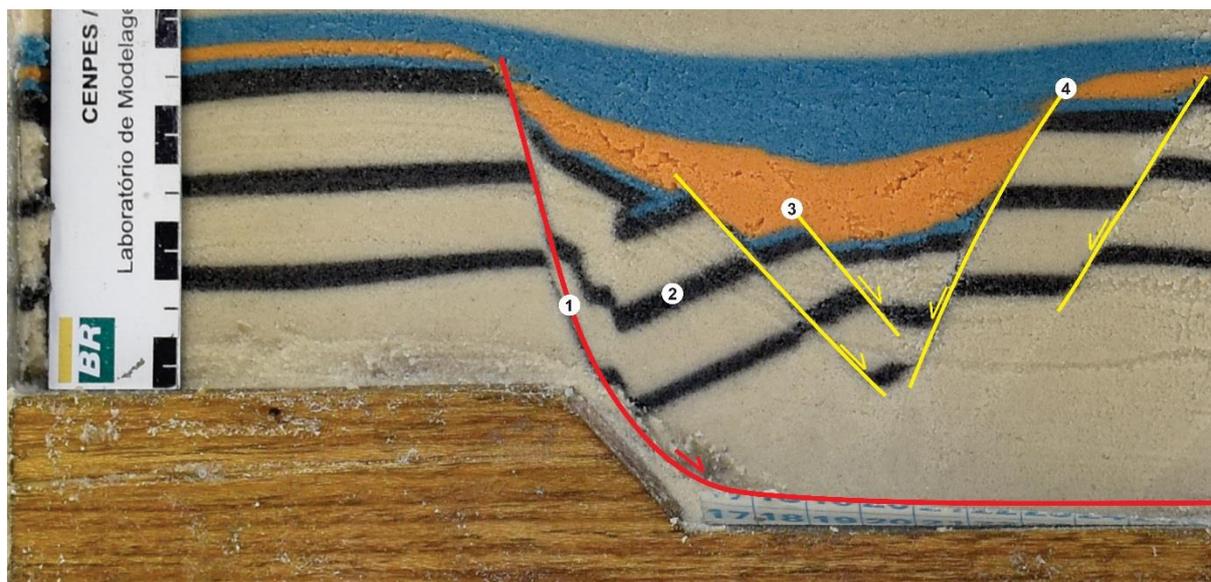


Figura 32: Seção tipo do experimento 1 mostrando estruturas semelhantes às que ocorrem em seção sísmica da Falha Corsair no Golfo do México: 1- falha lítrica mestra, 2- rollover e grabens limitados por falhas 3- sintéticas e 4- antitéticas.

6.2 EXPERIMENTO 2: RAMPAS CÔNCAVAS SEPARADAS POR PLATAFORMA HORIZONTAL

Neste experimento a falha mestra foi desenvolvida sobre um bloco rígido com duas rampas côncavas para o topo (superior e inferior) separadas por plataformas horizontais (Figura 33). Sobre a rampa e plataforma superiores, formaram-se, respectivamente, um antiformal *rollover* e falha de empurrão, e falhas sintéticas e antitéticas planares (Figura 22). A gênese destas estruturas é entendida como similar à gênese das estruturas do experimento 1. O resultado do experimento pode ser comparado a um trecho da Falha Corsair que também mostra antiformal *rollover*, arqueamento das camadas pré- e sin-tectônicas e *grabens* de colapso associados a falhas sintéticas e antitéticas sobre o segmento horizontalizado (Figuras 34 e 35). A diferença é que no experimento 2 foram também geradas falhas antitéticas reversas sobre a rampa inferior (3, Figura 21).



Figura 33: Configuração do experimento 2, mostrando a geometria de rampas curvas côncavas separadas por plataforma horizontal, assinalada pelo retângulo vermelho.

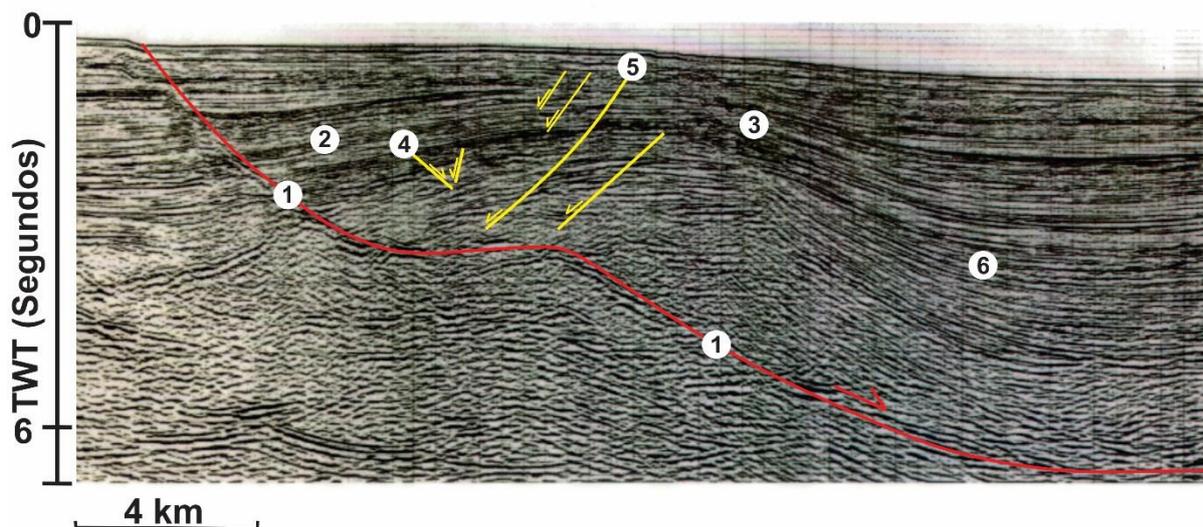


Figura 34: Interpretação de seção sísmica de um trecho Falha Corsair: 1- falha lístrica de crescimento com inflexões côncavas, 2- *rollover*, 3- arqueamento sobre a rampa inferior, 4- falhas 4- sintéticas e 5- antitéticas, e 6- depocentro. Compare com as estruturas geradas no experimento 2 (Figura 35). Imagem extraída Waltham *et al.* 1994

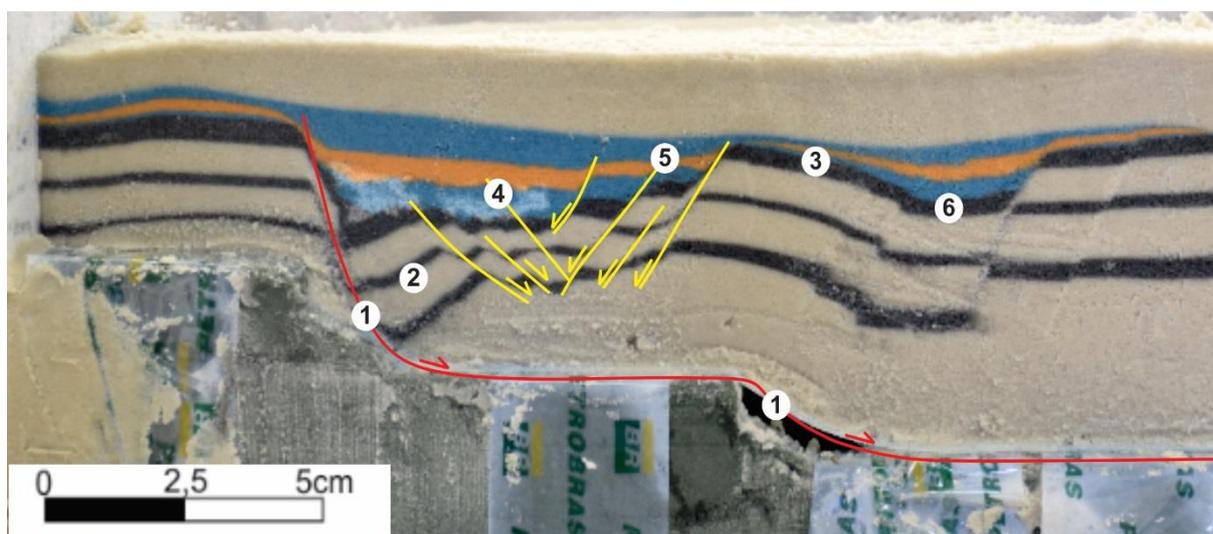


Figura 35: Seção tipo do experimento 2 mostrando: 1- falha lístrica mestra com rampas côncavas, 2- *rollover*, 3- arqueamento de camadas pré- e sin-tectônicas acima da rampa inferior, 4- falhas sintéticas, 5- falhas antitéticas e 6- depocentro associado à porção inferior da falha mestra. Estruturas semelhantes ocorrem no *hanging wall* da Falha Corsair (Figura 34).

6.3 EXPERIMENTO 3: RAMPA CÔNCAVA QUE PASSA A CONVEXA

Neste experimento a geometria do bloco rígido, sobre o qual se desenvolveram as estruturas, é similar as de falhas lístricas do tipo rampa-plataforma, onde existe um segmento convexo logo após ao segmento côncavo (Figura 36). Os resultados são semelhantes aos obtidos em caixas de areia por McClay & Scott (1991).

A presença de um segmento convexo logo após o côncavo gera um sinformal com flanco mergulhando no mesmo sentido da rampa convexa (Figura 38). Forma-se também um *graben* na sucessão sin-tectônica, relacionado ao colapso produzido pelo antiformal *rollover* na sucessão pré-tectônica (3, Figura 38).

As estruturas formadas neste experimento podem ser comparadas àquelas que ocorrem na Falha de Murre, na Bacia Joana d'Arc, Mesozoico de Newfoundland. Esta falha apresenta geometria rampa-plataforma com antiformal *rollover* seguido de um sinformal e falhas sintéticas e antitéticas (compare Figuras 37 e 38).

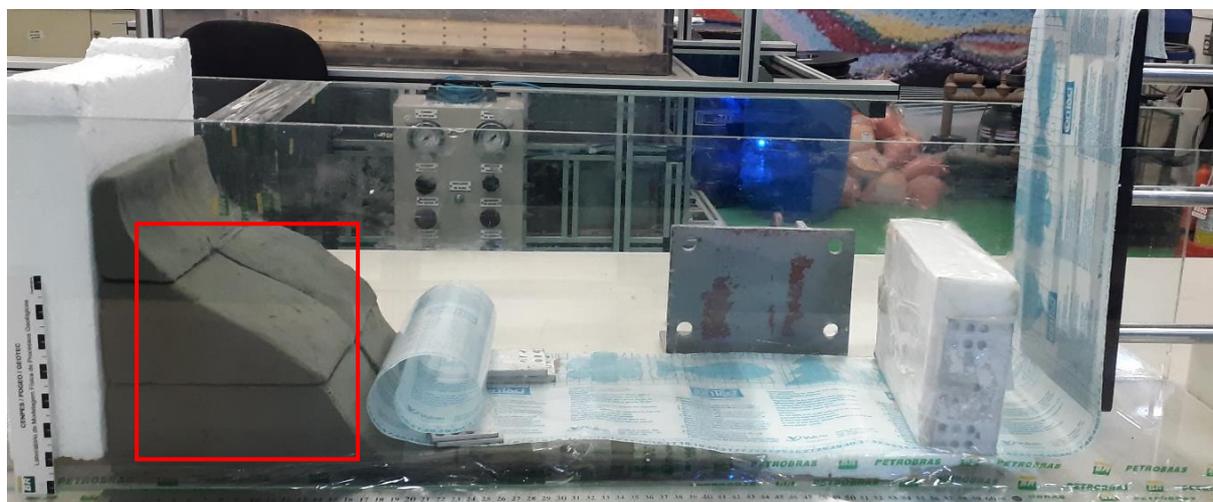


Figura 36: Configuração do experimento 3, mostrando a transição da rampa côncava a convexa da superfície esculpida no bloco rígido, delimitada pelo retângulo vermelho.

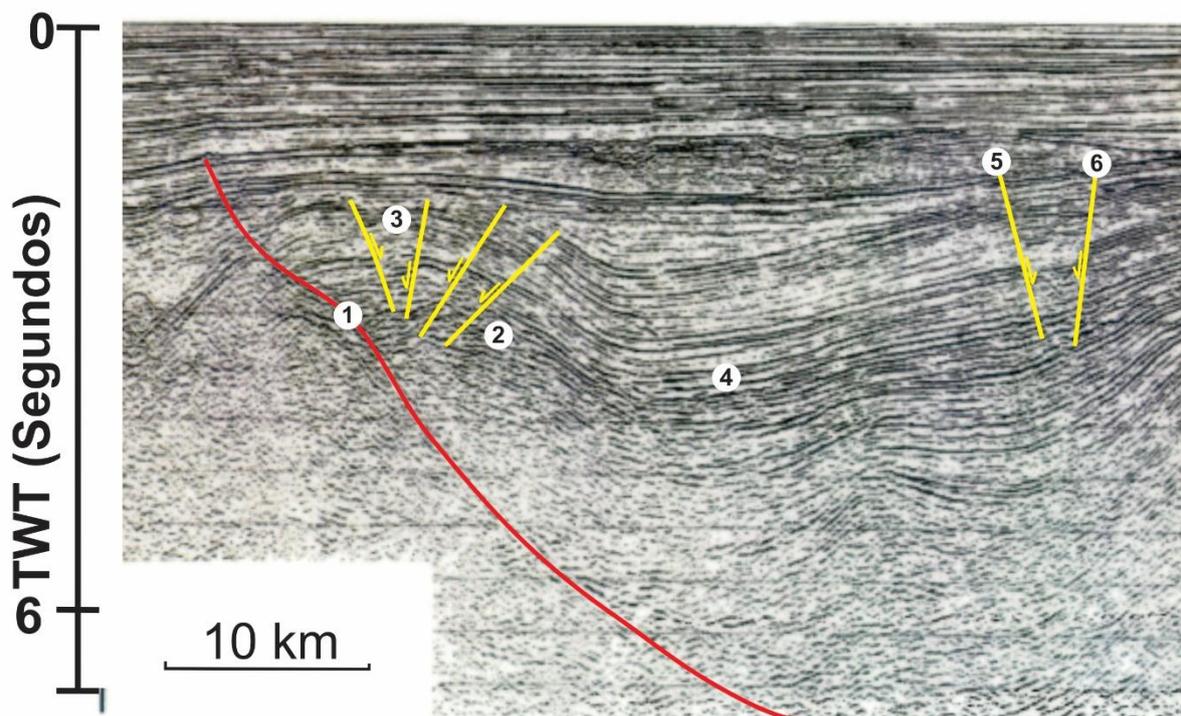


Figura 37. Interpretação de imagem de seção sísmica da Falha de Murre, Bacia Joanna D'Arc, Mesozóico, Newfoundland. *Hanging wall* com: 1- falha lítrica, 2- antiformal *rollover*, 3- *grabens* associados, 4- sinformal e falhas 5- sintética e 6- antitética. Imagem extraída de Waltham *et al.*, 1994.

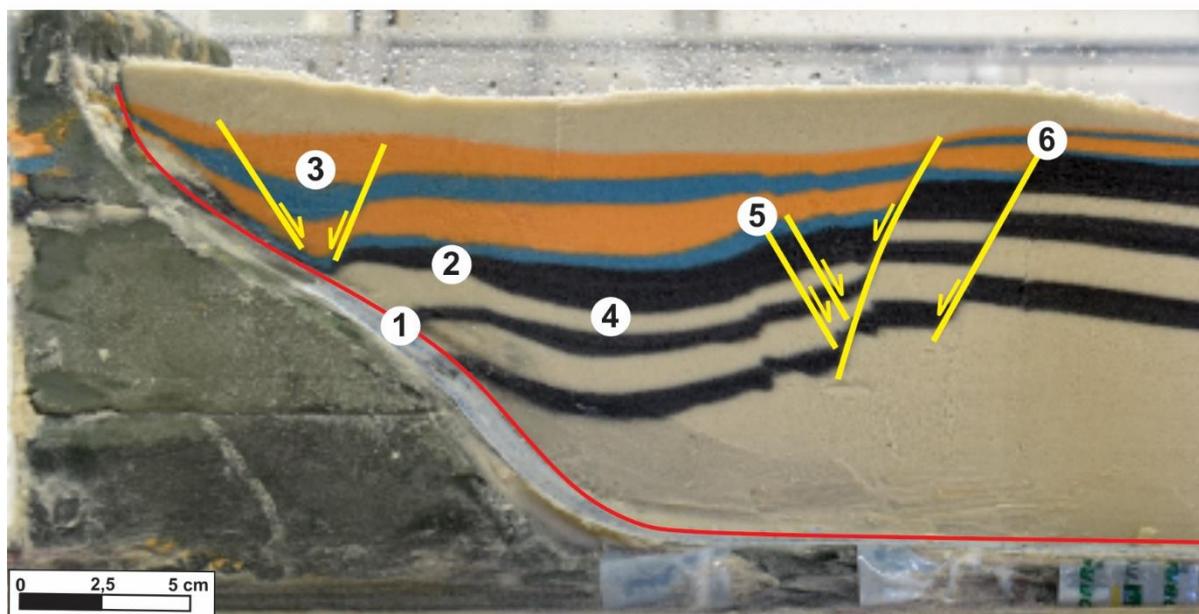


Figura 38: Seção tipo do experimento 3 mostrando: 1- falha lítrica, 2- antiformal *rollover*, 3- *graben* de colapso, 4- sinformal, falhas 5- sintética e 6- antitética. Estruturas semelhantes ocorrem no *hanging wall* da Falha Murre (Figura 37).

7 CONCLUSÕES

Os experimentos mostraram que a geometria da superfície que separa o *hanging wall* do *footwall* de falhas lítricas de crescimento controla a geração de estruturas no *hanging wall*. Na natureza esta superfície, normalmente, separa unidades geológicas com reologia distinta, como uma sucessão sedimentar em contato com talude de borda de bacia ou a parede de um domo de sal.

Nos três experimentos foram gerados antiformal *rollover* e *grabens* limitados por falhas sintéticas e antitéticas. Estas estruturas se formam para preencher o espaço criado pela extensão, o *rollover* no segmento das rampas e os *grabens* sobre a parte horizontal da falha mestra. Outra característica comum aos três ensaios é o aumento de espessura da sucessão sin-tectônica sobre o *rollover*. Além disso, a variação da geometria das falhas ao longo do *strike* influenciou na individualização dos depocentros.

Nos experimentos 1 e 2, formaram-se também falhas de empurrão na sucessão sin-tectônica acima da rampa superior. Possivelmente, a compressão ocorreu devido à diferença de velocidade de transporte de material na plataforma pré-rampa e na rampa. No experimento 3 foi gerado um sinformal sobre a área de transição entre a rampa e plataforma inferiores. Provavelmente esta estrutura foi formada devido ao colapso do *hanging wall* na direção sintética ao da rampa convexa.

As estruturas geradas nos três experimentos são similares àquelas que aparecem em seções sísmicas de falhas lítricas de crescimento. Os experimentos constituem uma ferramenta auxiliar no entendimento de estruturas extensionais comuns em campos de óleo e gás.

8. BIBLIOGRAFIA

- BARR, D., 1987. **Lithospheric stretching, detached normal faulting and footwall uplift.** In: M.P. Coward, J.F. Dewey and P.L. Hancock (Editors), *Continental Extensional Tectonics*. Geological Society London Special Publications, 28: 75-94 p.
- COBBOLD, P.R., MEISLING K., MOUNT, V.S. 2001. **Reactivation of an obliquely rifted margin, Campos and Santos basins, southeastern Brazil:** American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 85: 1925-1944p.
- ELLIS, P.G. and MCCLAY, K.R., 1988. **Listric extensional fault systems results of analogue model experiments.** Basin Research, 1: 55-71p.
- FOSSSEN, H. 2010b. **Structural Geology.** Cambridge: Cambridge University Press. 463p.
- GIBBS, A. D. 1983. **Balanced cross-section construction from seismic sections in areas of extensional tectonics.** Journal of Structural Geology, 5: 15-160p.
- GRAVELEAU, F., MALAVIEILLE, J., DOMINGUEZ, S. 2012. **Experimental modelling of orogenic wedges: A review.** Tectonophysics, 538: 1-66p.
- HAMBLIN, W. K. 1965. **Origin of "reverse drag" on the downthrown side of normal faults.** Geological Society of America Bulletin. 76: 1145-1164p.
- HUBBERT, M.K., 1937. **Theory of scaled models as applied to the study of geological structures.** Geological Society of America Bulletin 48: 1459-1520p.
- KOYI H. 1997. **Analogue modelling: from a qualitative to a quantitative technique: a historical outline.** Journal of Petroleum Geology, 20 (2): 223-238p.
- MAHMOOD, T. 1996. **Three dimensional analogue modelling of extensional fault systems and their applications to the Barrow - Dampier sub basin, western Australia.** Australian Petroleum Exploration Association Journal, 34 (1): 555-565p.
- MAUDUIT, T. & BRUN, J.P. 1998. **Growth fault/rollover systems: Birth, growth and decay.** Journal of Geophysical Research, 103/B8: 18119-18136p.
- MCCLAY, K.R. 1990. **Extensional fault systems in sedimentary basins: a review of analogue model studies.** Marine and Petroleum Geology, 7: 206 – 233p.
- MCCLAY, K.R., SCOTT, A.D., 1991. **Experimental models of hanging wall deformation in ramp-flat-listric extensional fault systems.** Tectonophysics, 188 (1-2): 85 – 96p.
- MORTON, W. H. & BLACK, R. 1975. **Crustal attenuation in Afar. In: Afar Depression of Ethiopia** (edited by: Pilger, A. & Rosier, A.) Interunion commission on Geodynamics, Sci. Rep. No. 14. E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, 55-65p.
- NUNNS, A.G., 1991. **Structural restoration of seismic and geologic sections in extensional regimes.** American Association of Petroleum Geologists Bulletin, v. 75, p. 278-297

- WALTHAM, D.A, MCCLAY, K.R, WANG, X.T.1994. **Seismic modelling of 2d & 3d extensional fault systems**. Fault Dynamics Project. London: Royal Holloway.
- WERNICKE, B. P. & BURCHFIEL, B. C. 1982. **Modes of extensional tectonics**. Journal of Structural Geology, 4: 105–115p.
- XIAO, H. & SUPPE, J. 1992. **Origin of rollover**. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 76: 509–529p.
- ZHENG, X., HE, G., HU, S., YAO, Z., WANG, H., LIN, L. 2015. **Improved geometric models of extensional fault bend folding**. Acta Geologica Sinica, 89: 1847 – 1857p.