

UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO ESCOLA DE MINAS DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA



# TRABALHO FINAL DE GRADUAÇÃO

A MODELAGEM FÍSICA DE UMA ZONA DE CISALHAMENTO COMPRESSIVA CORTADA POR UMA ZONA TRANSPRESSIVA, EMPREGANDO-SE DIFERENTES MATERIAIS ANALÓGICOS – O EXEMPLO DO FEIXE DE ZONAS DE CISALHAMENTO MANHUAÇU-SANTA MARGARIDA, ORÓGENO ARAÇUAÍ.

Stéphany Rodrigues Lopes

MONOGRAFIA nº 233

Ouro Preto, maio de 2017

# A MODELAGEM FÍSICA DE UMA ZONA DE CISALHAMENTO COMPRESSIVA CORTADA POR UMA ZONA TRANSPRESSIVA, EMPREGANDO-SE DIFERENTES MATERIAIS ANALÓGICOS – O EXEMPLO DO FEIXE DE ZONAS DE CISALHAMENTO MANHUAÇU-SANTA MARGARIDA, ORÓGENO ARAÇUAÍ.



### FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO

Reitora Cláudia Aparecida Marliére de Lima Vice-Reitor Hermínio Arias Nalini Júnior Pró-Reitor de Pesquisa e Pós-Graduação Prof. Dr. Marcílio Sousa da Rocha Freitas

**ESCOLA DE MINAS** 

Diretor Prof. Dr. Issamu Endo

Vice-Diretor

Prof. Dr. José Geraldo Arantes de Azevedo Brito

### DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA

Chefe

Prof. Dr. Luís Antônio Rosa Seixas

### TRABALHO FINAL DE GRADUAÇÃO

### Nº 233

# A MODELAGEM FÍSICA DE UMA ZONA DE CISALHAMENTO COMPRESSIVA CORTADA POR UMA ZONA TRANSPRESSIVA, EMPREGANDO-SE DIFERENTES MATERIAIS ANALÓGICOS – O EXEMPLO DO FEIXE DE ZONAS DE CISALHAMENTO MANHUAÇU-SANTA MARGARIDA, ORÓGENO ARAÇUAÍ.

### **Stéphany Rodrigues Lopes**

Orientador Profa. Dr. Caroline Janette Souza Gomes *Co-Orientador* Prof. Dr. Leonardo Eustáquio da Silva Gonçalves

Monografia do Trabalho Final de Graduação apresentado ao Departamento de Geologia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial à obtenção do Título de Engenheiro Geólogo e à Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação em cumprimento ao disposto no Programa de Voluntários de Iniciação Científica – ano 2007

OURO PRETO

2017

Universidade Federal de Ouro Preto – http://www.ufop.br Escola de Minas - http://www.em.ufop.br Departamento de Geologia - http://www.degeo.ufop.br/ Campus Morro do Cruzeiro s/n - Bauxita 35.400-000 Ouro Preto, Minas Gerais Tel. (31) 3559-1600, Fax: (31) 3559-1606

Os direitos de tradução e reprodução reservados. Nenhuma parte desta publicação poderá ser gravada, armazenada em sistemas eletrônicos, fotocopiada ou reproduzida por meios mecânicos ou eletrônicos ou utilizada sem a observância das normas de direito autoral.

### CRÉDITOS DE AUTORIA

Revisão geral: Stéphany Rodrigues Lopes Caroline Janette Souza Gomes

Catalogação elaborada pela Biblioteca Prof. Luciano Jacques de Moraes do Sistema de Bibliotecas e Informação - SISBIN - Universidade Federal de Ouro Preto

 L864m Lopes, Stéphany Rodrigues. A modelagem física em uma zona de cisalhamento compressiva cortada por uma zona transpressiva, empregando-se diferentes materiais analógicos [manuscrito]: o exemplo do Feixe de Zonas de Cisalhamento Manhuaçu-Santa Margarida / Stéphany Rodrigues Lopes. - 2017.
66f.: il.: color; grafs; tabs; mapas.
Orientadora: Profa. Dra. Caroline Janette Souza Gomes. Coorientador: Prof. Dr. Leonardo Eustáquio da Silva Gonçalves .
Monografia (Graduação). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Geologia.
1. Modelagem física. 2. Geologia estrutural. 3. Areia. 4. Cristais. I. Gomes, Caroline Janette Souza. II. Gonçalves , Leonardo Eustáquio da Silva. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

Catalogação: ficha@sisbioptopspr243(815.1)

http://www.sisbin.ufop.br

#### TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

TÍTULO: A Modelagem Física de uma Zona de Cisalhamente Compressiva Cortada por uma Zona Transpressiva, Empregando-se diferentes Materiais Analógicos – O Exemplo do Feixe de Zonas de Cisalhamento Manhuaçu- Santa Margarida, Orógeno Araçuaí

**AUTORA: STEPHANY RODRIGUES LOPES** 

**ORIENTADORA:** Profa. Caroline Janette Souza Gomes

Aprovada em: 16 de maio de 2017

### BANCA EXAMINADORA:

Profa. Caroline Janette Souza	a Gome Contractor	DEGEO/UFOP
Prof. Marco Antônio Fonseca	es 3 to	DEGEO/UFOP
Marcela Lopes Zanon	Ciarcular Joman	DEGEO/UFOP

Ouro Preto, 16/05/2017

Dedico aos meus amados pais.

### Agradecimentos

Agradeço primeiramente aos meus pais, Geraldo e Silésia, que nunca mediram esforços e sacrifícios para me apoiar em todos os meus sonhos. À minha irmã Stela por sempre estar ao meu lado me incentivando. Ao Thomás pelo amor, apoio, conselhos, paciência e ajuda imprescindível para que este trabalho fosse realizado. Aos meus amigos pela amizade, estudos, campos e longas risadas.

Agradeço também a Universidade Federal de Ouro Preto, pela oportunidade, e a todos os professores do Departamento de Geologia por todo o aprendizado e crescimento durante a graduação, em especial a professora Dra. Caroline Janette Souza Gomes, pela orientação, correções e suporte nestes anos de trabalho e também ao professor Dr. Leonardo Gonçalves pelas conversas e conselhos.

À república Maria Maria, meu eterno lar, ex alunas e moradoras, obrigada pela convivência, paciência e aprendizado. Por fim, agradeço a todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação e da construção deste trabalho, o meu muito obrigado.

ÍNDICE DE ILUSTRAÇÕESxv
ÍNDICE DE TABELASxix
RESUMOxxi
1-INTRODUÇÃO1
1.1 - APRESENTAÇÃO1
1.2 - OBJETIVOS E METAS
1.3 - METODOLOGIA DE TRABALHO4
1.3.1 - Pesquisa Bibliográfica
1.3.2 - A Modelagem Física Analógica
2-TRABALHOS ANTERIORES 11
2.1 - BREVE HISTÓRICO DA MODELAGEM FÍSICA11
2.2 - MODELOS FÍSICOS DE SISTEMAS COMPRESSIVOS13
2.3 - MODELOS FÍSICOS DE SISTEMAS TRANSCORRENTES16
2.4 - MODELOS FÍSICOS COM INTERFERÊNCIA ENTRE SISTEMAS COMPRESSIVOS E TRANSCORRENTES
2.5 MODELOS FÍSICOS PRÉVIOS DO FEIXE DE ZONAS DE CISALHAMENTO MANHUAÇU-SANTA MARGARIDA23
2.6 - MODELOS FÍSICOS DESENVOLVIDOS COM A MISTURA DE AREIA COM CRISTAIS DE MICA
3-GEOLOGIA REGIONAL
3.1 - O ORÓGENO (FAIXA) ARAÇUAÍ : UMA BREVE REVISÃO
3.1.1 - O Feixe de Zonas de Cisalhamento Manhuaçu-Santa Margarida
3.2 - A FAIXA RIBEIRA: UMA BREVE REVISÃO
4-TRABALHOS EXPERIMENTAIS 41
4.1 - DESCRIÇÃO DOS MODELOS41
4.2 - EXPERIMENTOS DESENVOLVIDOS NA SÉRIE F1, DE UMA ÚNICA FASE DE DEFORMAÇÃO41
4.3 - EXPERIMENTOS DESENVOLVIDOS NA SÉRIE F2, COM DUAS FASES DE DEFORMAÇÃO
5-DISCUSSÕES
5.1 - A PRIMEIRA FASE DE DEFORMAÇÃO (F1)55
5.2 - A SEGUNDA FASE DE DEFORMAÇÃO (F2)
5.3 - CONSIDERAÇÕES SOBRE O DOMÍNIO SUL DO FEIXE DE ZONAS DE CISALHAMENTO MANHUAÇU-SANTA MARGARIDA (FAIXA ARAÇUAÍ) A PARTIR DOS MODELOS FÍSICOS
6-CONCLUSÕES
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS
APÊNDICE A

### Sumário

# Índice de Ilustrações

Figura 1.1. Mapa geológico simplificado da região sudeste do Brasil
<b>Figura 1.2.</b> Fotografia da caixa dos experimentos, em planta, usada na primeira etapa de deformação, antes do preenchimento com o material analógico
<b>Figura 1.3.</b> Fotografia da caixa dos experimentos, em planta, empregada na segunda etapa de deformação antes do preenchimento com o material analógico
<b>Figura 1.4.</b> Esquemas da base da caixa de experimentos, antes da deposição das camadas, com identificação dos locais onde os perfis foram produzidos
Figura 2.1. Aparato usado por Hall para a simulação de dobras, em argila úmida, por meio de compressão lateral
<b>Figura 2.2.</b> Fotografia de Cadell (1888) demonstrando a sua "caixa de pressão", que ele usou para deformar camadas de argila, para estudar a compressão de estruturas
<b>Figura 2.3.</b> (A) Vista em planta da configuração geral dos modelos que mostra a disposição inicial do substrato dúctil e rúptil. (B), (C) e (D) Ilustrações esquemáticas das três séries dos modelos e suas respectivas variáveis
<b>Figura 2.4.</b> Fotografias e desenhos esquemáticos das três série de experimentos, ao final da deformação, em planta (séries 1 e 2) e em dois perfis
Figura 2.5. Desenho esquemático de nove perfis cortados através de um modelo da série 3 16
Figura 2.6. Caixa de experimentos dividida em duas metades
Figura 2.7. Deformação progressiva da série 1 (A - E), sem sedimentação ou erosão
Figura 2.8. Imagem das seções transversais representativas dos experimentos realizados para cada série
<b>Figura 2.9.</b> (A) A caixa de experimentos antes da deposição da areia. (B) O experimento montado, antes do início da deformação. (C) Vista em planta, das primeira e segunda etapas experimentais 20
Figura 2.10. Fotografias e interpretação dos experimentos
Figura 2.11. Fotografias e interpretação do experimento mais espesso, após 7,5 cm de movimento transcorrente, com vários perfis
<b>Figura 2.12.</b> (A) O experimento de Gonçalves <i>et al.</i> (2012), em planta, antes da deposição das camadas de silicone e areia. (B) Desenho, em planta, do experimento após uma compressão de 7 cm.
<b>Figura 2.13.</b> (A) Caixa do experimento, antes da deposição das camadas de silicone e areia. (B) Fotografia da deformação final do experimento que apresentou uma pequena mudança na terminação da zona de cisalhamento, e (C, D e E) Fotografias de cortes nos setores norte, central e sul, conforme indicado em B
Figura 2.14. Fotografias da base da caixa dos principais experimentos, antes do preenchimento com o material analógico
Figura 2.15. Fotografias em planta do experimento 08

Figura 2.16. Fotografias de três perfis do experimento 08 mostrando a deformação em diferentes cortes
Figura 2.17. Fotografias da base da caixa dos experimento, antes do preenchimento com o material analógico
Figura 2.18. Painel com as fotografias da deformação final de oito dos nove experimentos, em planta, após o surgimento da segunda falha
Figura 2.19. Desenho esquemático da caixa dos experimentos utilizada por Lasmar (2016)
Figura 2.20. Fotografias dos cortes centrais dos seis experimentos com a interpretação das falhas 30
<b>Figura 3.1.</b> O Orógeno Araçuaí. FA = Faixa de dobramento Araçuaí, ZI = zona de interferência do Orógeno Araçuaí com o Aulacógeno do Paramirim
<b>Figura 3.2.</b> Perfil detalhado do segmento Norte e respectivos máximos estatísticos de foliações miloníticas e lineações de estiramento
<b>Figura 3.3.</b> Perfil detalhado do segmento Central e respectivos máximos estatísticos de foliações miloníticas e lineações de estiramento
Figura 3.4. Perfil detalhado do segmento Sul e respectivos máximos estatísticos de foliações miloníticas e lineações de estiramento
Figura 3.5. O Cráton do São Francisco e suas faixas móveis
Figura 3.6. Mapa da compartimentação tectônica da região sudeste brasileira
<b>Figura 3.7.</b> Perfil da compartimentação tectônica da Faixa Ribeira, entre a borda do Cráton do São Francisco e o litoral fluminense, passando pela Região Serrana Fluminense
<b>Figura 4.1.</b> Fotografias em planta do experimento 01F1 mostrando a deformação progressiva de 1,0 cm em 1,0 cm
Figura 4.2. Fotografias, em planta, dos experimentos 01F1 (este é aqui repetido, para melhor comparção), 02F1, 03F1 e 04F1
<b>Figura 4.3.</b> Esquema simplificado da base da caixa dos experimentos, somente com o papel cartão, na porção noroeste e a indicação dos perfis
Figura 4.4. Fotografias dos perfis referentes aos experimentos 01F1 e 02F1 46
Figura 4.5. Fotografias dos perfis referentes aos experimentos 03F1 e 04F1
<b>Figura 4.6.</b> Fotografias, em planta, de dois momentos da deformação progressiva dos experimentos 01F2, 02F2, 03F2 e 04F2
Figura 4.7. Recorte das quatro zonas transpressivas, ao final da deformação da segunda fase, para comparação
Figura 4.8. Fotografias dos perfis referentes aos experimentos 01F2 e 02F2
Figura 4.9. Fotografias dos perfis referentes aos experimentos 03F2 e 04F2
<b>Figura 4.10.</b> Esquema simplificado da base da caixa dos experimentos, somente com o papel cartão, na porção noroeste, e a indicação dos perfis NS
Figura 4.11. Fotografias de três perfis do Experimento 01F2B, transversais à zona transpressiva 53
Figura 5.1. Os perfis C=20 dos quatro experimentos da fase 1, 01F1, 02F1, 03F1 e 04F156

<b>Figura 5.2.</b> Gráfico dos ângulos de mergulho da falha mais nova medida em cada um dos perfi produzidos nos experimentos realizados com uma fase de compressão (F1)
<b>Figura 5.3.</b> Gráfico da magnitude da componente do rejeito direcional medida em cada um do quatro experimento realizados com duas fases de compressão (F2)
Figura 5.4. (A) Fotografia do perfil C do experimento 01F2B e (B) desenho esquemático de um do modelos da Série 1

### Lista de Tabelas

Tabela 1. Relação dos modelos analógicos desenvolvidos com as principais características de cada experimento.     8
Tabela 2. Síntese da formação e evolução dos terrenos tectono-estratigráficos e seus domínios     39
<b>Tabela 3.</b> Relação dos modelos analógicos desenvolvidos na primeira fase (F1) com as principaiscaracterísticas de cada experimento.41
Tabela 4. Relação dos modelos analógicos desenvolvidos com as principais características de cada experimento.     48

### Resumo

O presente estudo, de modelagem física analógica, visou dar continuidade aos projetos de Iniciação Científica da autora, que foram baseados nos trabalhos de Gonçalves *et al.* (2012) e Gouvêa (2014), que, por sua vez, se basearam no trabalho de doutorado de Teixeira-Silva (2010), que interpretou o Feixe de Zonas de Cisalhamento Manhuaçu-Santa Margarida, na porção meridional do Cráton São Francisco, região sul do Orógeno Araçuaí, como uma zona de empurrão mergulhante para leste, parcialmente rotacionada para a vertical na sua porção sudeste, de direção NE, tornando a sua movimentação reversa dextral a direcional dextral. No entanto, estas modelagens físicas foram realizadas em uma única fase de deformação compressiva e não geraram os resultados esperados. Desta forma, analisou-se no presente estudo um aspecto diferente daquele abordado anteriormente: simulou-se a situação de zonas de cisalhamento compressivas que transicionam a zonas transpressivas considerando-se duas etapas consecutivas de deformação.

Foram desenvolvidos nove modelos experimentais, em duas sequências: a primeira, só com uma fase de deformação, compressiva, e, a segunda, com uma de compressão seguida por outra de transpressão. As principais variáveis dos experimentos foram o material analógico empregado (areia e uma mistura de areia com cristais de mica) e o tipo de descolamento basal (rúptil ou dúctil). Na caixa de experimentos, de 30 cm de comprimento por 32 cm de largura, introduziu-se, em sua porção nordeste um recorte de papel cartão, com 0,4 cm de espessura, cuja borda leste simulava uma descontinuidade, que, durante a encurtamento progressiva, daria origem a uma zona de empurrão. Ao final da deformação, os experimentos foram umedecidos com água e cortaram-se perfis paralelos à direção do encurtamento ou transversais à zona transpressiva, para a interpretação.

Os experimentos confirmaram que é interessante empregar a mistura de areia com cristais de mica, em modelos físicos, quando se pretende simular feições levemente plásticas (rúpteis-dúcteis). A mistura gerou, em perfil, dobras arredondadas no bloco do teto de falhas de cavalgamento, nenhum retroempurrão e causou um arrasto dos horizontes guias, ao longo de zonas de cisalhamentos, em planta.

A presença de uma camada basal de silicone nos experimentos montados com a areia pura e com a mistura de areia com cristais de mica, simulando uma zona de cisalhamento dúctil na crosta rúptil, produziu rejeitos ligeiramente maiores das falhas, mas não gerou feições plásticas. Desta forma, somente a mistura areia com cristais de mica provou constituir um material analógico relevante para a simulação de deformações rúpteis-dúcteis. No entanto, demonstrou-se, ainda, que o comportamento da mistura de areia com cristais de mica não é suficientemente plástica para causar uma possível rotação à vertical de falhas de empurrão por uma fase deformativa, mais nova, transpressiva, como propõem Teixeira *et al.* (2009). Em 3D, a segunda fase de deformação produziu nos presentes experimentos uma estrutura em flor positiva, local, sem modificar os ângulos de mergulho das falhas pré-existentes.

Assim, sugere-se para a tese de Teixeira *et al.* (2009), sobre o Feixe de Zonas de Cisalhamento Manhuaçu-Santa Margarida (Faixa Araçuaí), da rotação de falhas de empurrão (baixo ângulo) para falhas direcionais (alto ângulo), condições de níveis crustais profundos, dúcteis, como sugerem também Alkmim *et al.* (2006).

### 1.1 - APRESENTAÇÃO

O presente estudo constitui parte de uma disciplina obrigatória, Trabalho de Conclusão de Curso (TCC 402), do curso de graduação Engenharia Geológica da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP). Trata-se da continuação de trabalhos de Iniciação Científica desenvolvidos dentro do Programa de Iniciação à Pesquisa (PIP) da UFOP. O primeiro, de título: "Análise da cinemática das terminações de uma zona de cisalhamento compressiva: modelos físicos", foi realizado nos anos 2014-2015, e, o segundo, foi produzido entre 2015-2016, e tinha o título: "A modelagem física analógica de uma zona de cisalhamento compressiva – a influência da geometria da zona de sutura preexistente e de diferentes materiais analógicos sobre as suas terminações".

Modelos físicos têm como objetivo simular estruturas geológicas buscando testar a aplicabilidade de modelos tectônicos teóricos, ilustrar a evolução progressiva da deformação e compreender os mecanismos que controlam a sua geometria e a sua cinemática. Modelagens físico-analógicas desenvolvidas no mundo inteiro já proporcionaram relevantes avanços e melhoras nas interpretações de estruturas, diminuindo assim, o fator empírico das análises estruturais, balizadas, essencialmente, na experiência técnica e profissional de cada pesquisador.

Este trabalho enfoca a tese de que a terminação sul do Feixe de Zonas de Cisalhamentos Manhuaçu-Santa Margarida tenha sido causada por uma interferência entre as duas faixas, Araçuaí e Ribeira (ambas neoproterozóicas). Como observado, entre outros, por Teixeira-Silva (2010), o Feixe de Zonas de Cisalhamento Manhuaçu-Santa Margarida além de inverter, na porção sul, para NE-SW, é localmente truncado pela Faixa Ribeira (Fig. 1.1). Neste domínio, esta faixa possui cinemática transcorrente dextral, sendo de mesma idade ou mais jovem que o feixe.



Lopes, S. R., 2017. A modelagem física de uma zona de cisalhamento compressiva cortada...

**Figura 1.1.** Mapa simplificado da região sudeste do Brasil mostrando o Feixe de Zonas de Cisalhamento Manhuaçu-Santa Margarida (FC-MSM) (dividida nos segmentos norte, central e sul) e outras zonas de cisalhamento regionais, do Orógeno Araçuaí, assim como a Faixa Ribeira, na porção sudeste. ZCAC = Zona de Cisalhamento de Abre Campo; ZCMM = Zona de Cisalhamento de Maripá de Minas; ZCGu = Zona de Cisalhamento de Guaçui; ZCAP = Zona de Cisalhamento Além Paraíba; ZCB = Zona de Cisalhamento Batatal. SN = Segmento Norte; SC = Segmento Central. (Gonçalves *et. al.*, 2012; modificado de Teixeira-Silva, 2010).

Gonçalves *et al.* (2012) e Gouvêa (2014) testaram por meio de experimentos físicoanalógicos a viabilidade cinemática da interpretação acima citada, utilizando uma caixa de experimentos chamada de 'caixa de areia'. Em ambos os trabalhos, os autores concluiram que é cinematicamente possível uma falha reversa passar progressivamente a uma falha oblíqua reversa, em sua terminação.

As modelagens efetuadas no âmbito dos dois projetos de Iniciação Científica, nas quais se analisaram inúmeras condições de contorno diferentes, revelaram, no entanto, que a componente direcional da terminação da falha de empurrão constitui uma feição transitória. Esta passa a assumir novamente características de falha de empurrão com a continuidade da deformação. O resultado obtido não invalida a hipótese de Teixeira-Silva (2010) de, na natureza, uma falha compressiva apresentar na sua terminação características direcionais.

Desta forma, pretende-se analisar, por meio de modelos físicos, um aspecto diferente daquele examinado por Gonçalves *et al.* (2012) e Gouvêa (2014): a situação de zonas de cisalhamento compressivas que transicionam a zonas transpressivas considerando-se duas etapas consecutivas de deformação.

Os materiais analógicos mais empregados para a simulação da crosta rúptil são a areia de quartzo e argilas úmidas, de propriedades elásticas e friccionais-plásticas. O emprego destes materiais constitui, no entanto, uma simplificação da natureza uma vez que, a depender das condições de pressão e temperatura vigentes na crosta, esta pode ter sofrido uma deformação mais plástica, ao longo de sua história evolutiva.

O fato exposto acima, conduziu, no presente trabalho, à comparação da deformação em areia de quartzo com a produzida em uma mistura de areia de quartzo com cristais de mica, na proporção de 14:1, em peso (conforme Gomes 2013, Gomes *et al.* 2015 e Lasmar 2016). Adicionalmente, analisou-se o comportamento destes dois materiais sobre uma camada de silicone, simulando zonas de cisalhamento dúcteis.

Lopes, S. R., 2017. A modelagem física de uma zona de cisalhamento compressiva cortada...

#### 1.2 - OBJETIVOS E METAS

O presente estudo teve como objetivo geral fornecer uma contribuição ao conhecimento da deformação compressiva, por meio da modelagem física analógica.

Os objetivos específicos foram dois:

i) Analisar duas fases de deformação sucessivas, uma primeira, compressiva, cortada pela, mais nova, de caráter transpressivo. Assim, pretendia-se examinar um aspecto diferente daquele analisado por Gonçalves *et al.* (2012) e Gouvêa (2014), para o domínio sul do Feixe de Zonas de Cisalhamento Manhuaçu-Santa Margarida (Faixa Araçuaí). Enquanto aqueles autores analisaram a viabilidade cinemática de uma falha reversa passar, em sua terminação lateral, a assumir movimentos direcionais, em presente estudo, será investigada a geometria de estruturas resultantes da superposição de estruturas transpressivas sobre compressivas, mais antigas.

ii) Comparar a deformação gerada em dois materiais analógicos diferentes: em areia pura e em uma mistura de areia com cristais de mica, na proporção 14:1. O emprego dos dois materiais analógicos visava analisar uma deformação puramente rúptil com outra rúptil-dúctil, em consequência de possíveis temperaturas mais elevadas, durante o Evento Brasiliano.

#### 1.3 - METODOLOGIA DE TRABALHO

### 1.3.1 - Pesquisa Bibliográfica

Foi efetuada uma pesquisa bibliográfica sobre a história da modelagem física analógica, sobre a análise de novos materiais analógicos e sobre alguns trabalhos referentes a simulações de sistemas compressivos, transcorrentes e da interferência entre ambos.

Pesquisaram-se, também, alguns estudos sobre os cinturões de dobramentos Ribeira e Araçuaí, neste, em especial sobre a zona de cisalhamento de Abre Campo do Feixe de Zonas de Cisalhamento Manhuaçu-Santa Margarida.

### 1.3.2 - A Modelagem Física Analógica

O presente trabalho de pesquisa foi desenvolvido no Laboratório de Modelagem Tectônica, do Departamento de Geologia da Universidade Federal de Ouro Preto. No laboratório o trabalho se dividiu nas seguintes etapas: tratamento do material analógico, montagem da caixa de experimentos e desenvolvimento dos experimentos (deformação, documentação por fotografias e cortes nos experimentos previamente umidificados).

### - Tratamento do Material Analógico

Os procedimentos experimentais, iniciais, de tratamento dos materiais analógicos seguiram a metodologia, rotineiramente adotada no laboratório.

A areia de quartzo utilizada nos experimentos passou, inicialmente, por um processo de lavagem em água corrente, para extração da argila. Depois de seca, em uma estufa, esta areia foi peneirada por meio de um aparelho de peneiramento. Utilizaram-se cinco peneiras (1000  $\mu$ m, 750  $\mu$ m, 500  $\mu$ m, 350  $\mu$ m e 210  $\mu$ m), mas apenas a areia de granulometria <350  $\mu$ m foi utilizada. Em seguida, esta areia foi tingida (com tinta Acrilex) em diversas cores e novamente peneirada, utilizando a peneira de 350  $\mu$ m.

Em alguns experimentos utilizou-se uma mistura composta por areia de quartzo tratada e cristais de mica cuja proporção usada foi de 280 g de areia para 20 g de cristais de mica, o que corresponde a uma proporção de 14:1.

Para a simulação da deformação dúctil, isto é, de uma zona de cisalhamento dúctil, empregou-se o silicone polydimethylsiloxane, um fluido de alta viscosidade, de 1,95 x **10**<sup>4</sup> Pa s (informada pela fábrica). Este material foi adquirido através da empresa americana, *Clearco Products Co Inc*.

### - Desenvolvimento dos experimentos

Foram feitos nove experimentos, nos quais as principais variáveis foram o tipo de descolamento basal (rúptil ou dúctil) e o material analógico empregado (areia ou uma mistura de areia com cristais de mica). Desenvolveram-se duas sequências de experimentos: a primeira, só com uma fase de deformação, compressiva, e, a segunda, com duas: uma de compressão seguida por outra de transpressão.

Todos os experimentos foram montados em uma caixa retangular de acrílico, com 30 centímetros (cm) de largura e 32 cm de comprimento, limitada por duas paredes laterais de vidro transparente e duas paredes frontais, sendo uma delas móvel.

A base de toda a caixa de experimentos foi coberta por uma folha de cartolina branca. Na porção nordeste da caixa introduziu-se um recorte de papel cartão, com 0,4 cm de Lopes, S. R., 2017. A modelagem física de uma zona de cisalhamento compressiva cortada...

espessura, cuja borda leste simulava uma descontinuidade, que, durante a deformação, daria origem à Zona de Cisalhamento de Abre Campo (Fig. 1.2). A geometria e espessura deste papel cartão foi definida com bases nos experimentos anteriores realizados pela autora, sendo este formato o que melhor apresentou desempenho na representação desta zona de sutura. Além disso, levantou-se a parede móvel, por 2 mm, para que a deformação ocorresse sempre no interior do descolamento basal (de 4 mm de espessura), constituído por areia, silicone ou da mistura de areia com cristais de mica, com o intuito de manter o atrito basal igual nas duas etapas de deformação.



**Figura 1.2.** Fotografia da caixa dos experimentos, em planta, usada na primeira etapa de deformação, antes do preenchimento com o material analógico. A borda leste do papel cartão representa a Zona de Cisalhamento de Abre Campo e a seta o sentido do movimento da parede móvel. A escala corresponde a 6 cm.

Para os experimentos nos quais se produziram as duas fases de deformação, introduziu-se, na base da caixa, uma folha de acetato, na metade sul da caixa, com o intuito de gerar um movimento transpressivo (Fig. 1.3). A folha de acetato foi presa no fundo de uma segunda parede frontal móvel, disposta atrás da primeira. A segunda parede móvel foi acionada apenas na segunda fase de deformação. Com o intuito de criar o espaço necessário para que a transpressão pudesse ocorrer, manteve-se livre de areia uma área de 5 cm junto à parede fixa. O espaço foi ocupado por um bloco de isopor que permaneceu ali durante a primeira etapa de deformação sendo retirado apenas antes da fase de transpressão.



**Figura 1.3.** Fotografia da caixa dos experimentos, em planta, empregada na segunda etapa de deformação antes do preenchimento com o material analógico. A folha de acetato, na porção sul, foi presa em uma segunda parede móvel e tinha a função de produzir a transpressão da segunda fase de deformação, da direita para a esquerda. A escala corresponde a 6 cm.

Nos experimentos 02F1, 04F1, 02F2, 04F2, inseriu-se uma camada de 0,4 cm de silicone na base da caixa no espaço vazio da caixa de experimentos, nos demais modelos a deposição do material analógico ocorreu sobre a cartolina.

Nos ensaios constituídos por camadas de areia colorida, com aproximadamente 0,2 cm cada, a deposição ocorreu por peneiramento de uma altura aproximada de 20 cm, utilizandose uma peneira de granulometria 350µm. Os experimentos 03F1, 04F1, 03F2, 04F2 foram montados com camadas de mistura (areia + cristais de mica) intercalas com camadas de areia pura, cuja deposição da primeira ocorreu por deposição manual e a segunda por peneiramento.

Em todos os experimentos a espessura do material analógico foi de 1,6 cm, com exceção da área sobre o papel cartão, na qual a espessura correspondia a 1,2 cm, estes valores também foram definidos com base nos resultados obtidos anteriormente pela autora. A tabela

Lopes, S. R., 2017. A modelagem física de uma zona de cisalhamento compressiva cortada...

1 apresenta as variáveis de todos os experimentos, agrupados de acordo com as fases de deformação.

**Tabela 1.** Relação dos modelos analógicos desenvolvidos com as principais características de cada experimento. Na numeração dos experimentos, F1 e F2 dizem respeito à primeira e à segunda fases de deformação, respectivamente.

Fase de deformação	Número do experimento	Descolamento basal	Material analógico	Magnitude de Compressão total (cm)
Primeira	01F1	Areia	Areia	7,5
	02F1	Silicone	Areia	6,5
	03F1	Mistura de areia com cristais de mica	Mistura intercalada com camadas de areia pura	8,5
	04F1	Silicone	Mistura intercalada com camadas de areia pura	8
Segunda	01F2A	Areia	Areia	10,5
	01F2B	Areia	Areia	10,5
	02F2	Silicone	Areia	12
	03F2	Mistura de areia com cristais de mica	Mistura intercalada com camadas de areia pura	12
	04F2	Silicone	Mistura intercalada com camadas de areia pura	10,5

Antes do início da deformação de cada experimento, desenhou-se, na superfície de topo dos modelos, um malha quadrada de 4 cm x 4 cm, e depositaram-se pequenas quantidades de areia colorida, para o monitoramento da deformação, em planta. Todos os experimentos foram encurtados com uma velocidade de deformação constante (2,3 cm/h) efetuada pela parede móvel acoplada a um motor elétrico.

Após concluída a deformação, os experimentos foram umedecidos com água, empregando-se um pulverizador manual, para viabilizar o corte de perfis internos nos modelos. Em todos os experimentos foram efetuados quatro cortes paralelos à direção do encurtamento (Fig. 1.4.I), somente no experimento 01F2B realizaram-se cortes transversais à

zona transpressiva, que visavam fornecer a visão tridimensional das estruturas geradas (Fig. 1.4.II).

Toda a deformação progressiva foi registrada por fotografias, em intervalos regulares de 0,5 cm, em perfil e em planta. Os cortes, na areia úmida, também foram fotografadas. Ao final, as imagens foram tratadas no programa CorelDRAW.



**Figura 1.4.** Esquemas da base da caixa de experimentos, antes da deposição das camadas, com identificação dos locais onde os perfis foram produzidos, de acordo com: I) a distância do perfil em relação à parede norte; II) a distância da parede móvel leste da caixa de experimentos (A, a 15 cm; B, a 18 cm e C, a 21 cm). A linha pontilhada na figura II indica o limite da folha de acetato incerida para a realização da segunda etapa de deformação.

Lopes, S. R., 2017. A modelagem física de uma zona de cisalhamento compressiva cortada...

## CAPÍTULO 2 TRABALHOS ANTERIORES

### 2.1 - BREVE HISTÓRICO DA MODELAGEM FÍSICA

Na Modelagem Física Analógica, também chamada de Tectônica Experimental, simulam-se eventos tectônicos em escalas reduzidas e utilizam-se materiais equivalentes apropriados. Desde o século XIX, a modelagem física tem sido usada para reproduzir as estruturas geológicas buscando-se a compreensão dos mecanismos que regem a geometria e a cinemática da deformação.

A primeira documentação realizada para registrar uma modelagem física foi elaborada em 1815, por Sir James Hall que pretendia estudar a origem de dobras presentes ao longo da costa leste da Escócia. De acordo com Koyi (1997), a modelagem de Hall consistiu de dois experimentos distintos, o primeiro feito com espessos pedaços de panos, confinados verticalmente, e comprimidos na horizontal por duas tábuas de madeira; o segundo, foi montado com camadas de argila úmida, no aparato mostrado na figura 2.1 A argila úmida que gerou bons resultados é ainda usada em simulações atuais.



Figura 2.1. Aparato usado por Hall para a simulação de dobras, em argila úmida, por meio de compressão lateral (Ranalli, 2001).

Segundo Koyi (1997), apenas depois de 50 anos dos primeiros estudos de Hall outros pesquisadores trabalharam com experimentos físicos. No ano de 1888, na Grã-Bretanha, Cadell construiu a primeira "caixa de pressão", na qual o movimento de um pistão tinha a função de gerar a deformação de camadas depositadas na horizontal (Fig. 2.2). Esta caixa de experimentos é considerada precursora da "caixa de areia", usada atualmente, em formatos mais modernos.


**Figura 2.2.** Fotografía de Cadell (1888) demonstrando a sua "caixa de pressão", que ele usou para deformar camadas de argila, para estudar a compressão de estruturas (Koyi 1997).

Outro importante pesquisador de modelos experimentais compressivos foi Willis, que em 1894, nos Estados Unidos, efetuou a deformação de camadas de argila, de diferentes composições e cores, no estudo dos processos de dobramento dos Apalaches.

Numerosos outros estudiosos se destacaram por suas pesquisas nesta área de modelagem física, como, por exemplo, Lyell (1871), Daubrée (1878,1879), Favre (1878), Pfaff (1880), Forchheimer (1883), Schardt (1884) e Reade (1886) (*apud* Koyi 1997 e Graveleau *et al.* 2012).

Apesar das inúmeras pesquisas efetuadas desde o século XIX, somente em 1937, o primeiro trabalho de cunho teórico, que descreve os fundamentos científicos da modelagem física analógica, foi escrito por Hubbert. Neste trabalho, o autor adapta a Análise Dimensional usada na Engenharia, para a Geologia Estrutural e estabelece a relação entre os parâmetros físicos laboratoriais com os encontrados na natureza. Os parâmetros para os quais o autor define os denominados 'coeficientes de proporcionalidade' (também conhecidos como coeficientes de similaridade ou fatores de escala) são: as dimensões, o tempo, a massa, a densidade, a viscosidade, a força e a tensão.

De acordo com Koyi (1997), Hans Ramberg montou o primeiro laboratório de modelagem tectônica, na Suécia. Entre os anos de 1960 e 1970, trabalhou em pesquisas que consideravam a força gravitacional nos processos geológicos, estudando, especialmente, a

formação de diápiros de sal, mas também a de rochas intrusivas. Ramberg também foi o primeiro e único a lançar um livro sobre a modelagem física analógica, no qual descreve as características teóricas dos modelos em escala, com destaque às estruturas dúcteis.

Um grande avanço na Modelagem Tectônica ocorreu a partir da década de 80, sobretudo, nas áreas de pesquisa de sistemas distensivos, quando as companhias petrolíferas entenderam a valiosa contribuição que a modelagem física pode dar ao entendimento de bacias sedimentares.

#### 2.2 - MODELOS FÍSICOS DE SISTEMAS COMPRESSIVOS

Cotton & Koyi (2000) analisaram a evolução do Potwar Plateau and Salt Range, no Paquistão, a partir do desenvolvimento de uma série de experimentos físicos, em caixa de areia. Os autores simularam sistemas compressivos, do tipo *thin-skinned*, sobre substratos dúcteis (simulando, por exemplo, camadas de evaporitos) e rúpteis, para entender a formação dos diferentes tipos de estruturas que se formam em áreas com e sem um descolamento dúctil.

Três séries de modelos foram preparados para estudar o efeito da variação da espessura do substrato dúctil (simulado por silicone) e da sobrecarga (uma cunha de areia) (Fig. 2.3A). A variável, sobrecarga, foi analisada em diferentes experimentos nos quais esta foi montada tanto antes quanto durante a deformação. Assim, uma primeira série era constituída por um conjunto de modelos com substrato de espessuras variáveis (Fig. 2.3B), a segunda, foi montada com uma cunha de areia (uma sobrecarga 'précinemática') sobre a camada de silicone (Fig. 2.3C); e, a terceira, com uma camada de areia separando o silicone da parede móvel (indicada pela letra d, na figura 2.3D). Esta última disposição visava a formação inicial de um sistema de falhas na camada de areia (entre a parede móvel e a camada de silicone), com progressivo deslocamento deste sistema por sobre a camada de silicone, simulando, assim, a sobrecarga sincinemática.

A figura 2.4 apresenta os principais resultados das três séries de experimentos lado a lado, para melhor comparação. Em todos, observa-se que a propagação da frente de deformação é mais rápida no domínio do substrato dúctil. A diferença é pequena nos modelos da série 1, mas bem pronunciada nas duas outras. Nestas, a diferença na magnitude de deslocamento da frente de deformação produz entre os dois domínios, rúptil e dúctil, uma zona de transpressão, com potencial para formação de domos salinos (de silicone).

No geral, no domínio rúptil, os autores observaram a formação de pilhas antiformais, vergentes para o antepaís e uma cunha crítica com alto ângulo de declividade. Enquanto isso, no domínio dúctil formaram-se, além dos empurrões, retroempurrões de forte rejeito (Fig. 2.5) resultando estruturas do tipo dobras em caixa (*box fold*) e cunhas críticas com ângulo de mergulho, comparativamente, mais baixos. Ao final, os autores confirmaram estudos anteriores que mostraram que em domínios com substrato dúctil são geradas falhas com ângulo de mergulho mais elevado do aquelas formadas em domínios rúpteis.



Figura 2.3. (A) Vista em planta da configuração geral dos modelos que mostra a disposição inicial do substrato dúctil (silicone SGM36, em preto) e rúptil (areia, em branco). (B), (C) e (D) Ilustrações esquemáticas das três séries dos modelos e suas respectivas variáveis (modificado de Cotton & Koyi 2000).

#### Trabalho de Conclusão de Curso - nº 233, 66p, 2017



**Figura 2.4.** Fotografias e desenhos esquemáticos das três série de experimentos, ao final da deformação, em planta (séries 1 e 2) e em dois perfis. Observar, nos perfis, o alto ângulo de mergulho das falhas no silicone, e, em planta, a variação no deslocamento da frente de deformação entre os dois domínios (modificado de Cotton & Koyi 2000).



**Figura 2.5.** Desenho esquemático de nove perfis cortados através de um modelo da série 3. Observar a diferença no deslocamento relativo das duas frentes de deformação e e o grande número de retroempurrões no domínio dúctil (modificado de Cotton & Koyi 2000).

#### 2.3 - MODELOS FÍSICOS DE SISTEMAS TRANSCORRENTES

Le Guerroué & Cobbold (2006) analisaram a formação de falhas transcorrentes sob a influência de processos de erosão e sedimentação, a partir de modelos analógicos. Com este objetivo, desenvolveram 18 experimentos em uma caixa retangular, onde as duas metades foram deslocadas entre si, em sentidos opostos, como mostra a figura 2.6.



**Figura 2.6.** Caixa de experimentos dividida em duas metades. Dois aparelhos, cada um preso a um dos parafusos, produzem o deslizamento ao longo do corte basal gerando, assim, as as estruturas em flor mostradas no interior do pacote de areia (modificado de Le Guerroué & Cobbold 2006).

Os modelos foram desenvolvidos em cinco séries distintas, descritas a seguir: na série 1 foi gerada um transcorrência simples, sem erosão nem sedimentação; na série 2, os autores simularam uma erosão (efetuada por um aspirador de pó), sem sedimentação; na série 3, episódios de erosão alternaram com deposição uniforme de sedimentos sobre o topo do experimento; na série 4, efetuou-se a deposição de sedimento, sem erosão; e, por fim, na série 5, a sedimentação foi efetuada duas vezes mais rápida do que na série 4 sem erosão.

A figura 2.7, apresenta de forma esquemática, a deformação, em planta, de um modelo da primeira série (série 1). Nesta figura percebe-se claramente a formação progressiva das estruturas que compões uma zona transcorrente: falhas R (as primeiras a se formarem, com um ângulo de  $16^{\circ}$  em relação à borda da caixa), P e Y.



**Figura 2.7.** Deformação progressiva da série 1 (**A** - **E**), vista em planta, sem sedimentação ou erosão. É possível visualizar a deformação progressiva, observando os marcadores passivos (linhas preto, branco e cinza) que foram deslocados durante o movimento lateral dos blocos. Observar os diferentes tipos de falhas que compõem a zona de transcorrência: R, P e Y (modificado de Le Guerroué & Cobbold 2006).

Os perfis da figura 2.8 mostram, de forma esquemática, a deformação progressiva das 5 séries de experimentos, até 40 cm de deslocamento total. Em todos os experimentos se formaram estruturas em flor positiva, como esperado. Algumas das principais características observadas nas diferentes séries foram: 1) em experimentos com erosão, mas sem sedimentação (série 2), no geral as falhas apresentaram um ângulo de mergulho mais baixo do que o normal; e 2) experimentos com erosão e sedimentação (série 3) apresentaram em média um aumento do mergulho das falhas, especialmente nas fases iniciais e finais da deformação; 3) o rejeito reverso, médio, das falhas da série 3 foi maior do que aquele observado nos modelos da série 1 e menor do que o da série 2; 4) na série 4 (com sedimentação mas sem erosão) a magnitude média do rejeito reverso foi também maior do que nos modelos da série 1, porém menor do que o da série 3. Entre outros, os autores sugerem que o aumento crescente do peso da sobrecarga pode ter causado a supressão das falhas de ângulo de mergulho mais baixo. As falhas com ângulo de mergulho mais elevado se mantiveram pelo fato de estas suportarem menos peso no seu bloco do muro.



**Figura 2.8.** Imagem das seções transversais representativas dos experimentos realizados para cada série. A coluna, ao lado, apresenta a magnitude de deslizamento de cada corte: 5 cm, 10 cm, 20 cm e 40 cm. Da esquerda para a direita, tem-se as séries sem erosão ou sedimentação (série 1), com erosão e nenhuma sedimentação (série 2), com erosão e sedimentação (série 3), sedimentação, sem erosão (série 4), e rápida sedimentação sem erosão (série 5) (modificado de Le Guerroué & Cobbold 2006).

## 2.4 - MODELOS FÍSICOS COM INTERFERÊNCIA ENTRE SISTEMAS COMPRESSIVOS E TRANSCORRENTES

Modelagens físicas que simulam dois regimes deformacionais, por exemplo, extensão e compressão ou o contrário, constituindo a inversão tectônica, são comuns. No entanto, simulações da superposição do regime compressivo ou extensivo sobre estruturas transcorrentes (ou o contrário) são pouco frequentes. Alguns autores que já modelaram situações deste tipo são: Diraison *et al.* (2000); Di Bucci *et al.* (2006) e Rosas *et al.* (2012). Dentre estes, será descrito, abaixo, de forma breve, o estudo de Rosas *et al.* (2012) uma vez que este mais se assemelha ao do presente estudo.

Rosas *et al.* (2012) desenvolveram modelagens analógicas (e numéricas) para testar a tese de que as estruturas da região do Golfo de Cadiz (no limite das placas tectônicas da África e Eurásia, região da Ibéria) tenham resultado da interferência tectônica entre falhas transcorrentes e compressivas. As três figuras da caixa de experimentos (Fig. 2.9) mostram que o modelo foi desenvolvido em duas etapas, primeiro com uma compressão (de poucos centímetros, apenas até a formação de algumas falhas de empurrão), e, em seguida, com uma transcorrência.

As figuras 2.10 e 2.11 mostram as modelagens em planta e em perfil. Os autores concluíram que na zona de interferência se formaram falhas oblíquas (reversas-dextrais), com desenvolvimento geométrico e cinemático variável, e falhas verticais, estas formadas a partir de fraturas Y, de cinemática direcional dextral. Enquanto as falhas verticais, Y, em geral mantiveram geometria e cinemática, constantes, na zona de interferencia, o mesmo não ocorreu com as falhas oblíquas. Estas nuclearam como falhas de empurrão que progressivamente se propagaram da frente de compressão para o domínio transcorrente, rotacionando concomitantemente. Neste processo, as falhas de empurrão 'puras' passaram a falhas oblíquas reversas-dextrais (dominantemente transcorrentes).



B - Caixa de experimento com camadas de areia sem deformação



C - Principais passos da deformação, vistos em planta



**Figura 2.9.** (A) A caixa de experimentos antes da deposição da areia. As setas (1° e 2°) indicam o movimento induzido por motores passo a passo durante a primeira e a segunda etapas experimentais, respectivamente. (B) O experimento montado, antes do início da deformação, com as dimensões da caixa. (C) Vista em planta, das primeira e segunda etapas experimentais (modificado de Rosas *et al.* 2012).



Figura 2.10. Fotografias e interpretação dos experimentos. (A1), (A2) e (A3) apresentam a deformação progressiva de um dos experimentos cuja espessura da areia foi de 5 cm. (B) e (C) mostram a deformação final de experimentos de 4 cm e 3 cm de espessura, respectivamente (modificado de Rosas *et al.* 2012).



A Vista superior do modelo

**Figura 2.11.** Fotografias e interpretação do experimento mais espesso, após 7,5 cm de movimento transcorrente, com vários perfis. Em (**A**) tem-se uma fotografia e respectivo desenho esquemático da deformação final, em planta, com a localização dos perfis apresentados em (**B**) Os perfis 1 e 2 mostram uma estrutura em flor, normal à direção do movimento; os perfis 3 a 5, estruturas do domínio transcorrente e compressivo, separados, com pequena e com forte interferência, respectivamente; e o perfil 6, somente as estruturas compressivas. F1, F2 e BT (empurrões e retroempurrão) foram produzidos durante a primeira etapa de deformação; F3 a F5, R e Y (empurrões, falhas Riedel e Y) s e originaram durante a etapa dois (modificado de Rosas *et al.*, 2012).

### 2.5 - MODELOS FÍSICOS PRÉVIOS DO FEIXE DE ZONAS DE CISALHAMENTO MANHUAÇU-SANTA MARGARIDA

Gonçalves *et al.* (2012) foram os primeiros autores a empregar a modelagem física analógica para testar a viabilidade cinemática, dinâmica e mecânica do modelo tectônico de Teixeira *et al.* (2009) para o Feixe de Zonas de Cisalhamento Manhuaçu-Santa Margarida e a Zona da Cisalhamento de Abre Campo (zona de sutura do Orógeno Araçuaí). O objetivo dos autores era simular uma ou mais falhas de empurrão associadas a uma zona de sutura e analisar, se a terminação lateral destas falhas rotaciona para a vertical, adquirindo assim movimentação reversa dextral a transcorrente dextral.

Na caixa de experimentos utilizaram uma folha de cartolina, cuja borda simulava a zona de sutura, e uma placa de isopor, representando o Cráton São Francisco, a oeste (Fig. 2.12A). Como materiais analógicos, empregaram areia e silicone para simular a crosta rúptil e dúctil, respectivamente. A figura 2.12B apresenta um desenho do resultado do experimento que forneceu o melhor resultado. Nesta figura percebe-se que a falha reversa mais nova passa a ter características de falha oblíqua reversa dextral, no seu domínio sul. Os autores concluíram que é possível que uma zona de fraqueza preexistente, de geometria irregular, controle a cinemática de falhas mais novas.



**Figura 2.12.** (A) O experimento de Gonçalves *et al.*(2012), em planta, antes da deposição das camadas de silicone e areia. (B) Desenho, em planta, do experimento após uma compressão de 7 cm (40%) com a indicação do rejeito lateral da falha mais nova, na região sul (indicada pela elipse vermelha).

Gouvêa (2014), em seu trabalho de monografia de final de curso, desenvolveu novos experimentos analógicos referente ao modelo tectônico de Teixeira *et al.* (2009) com a finalidade de aprofundar o estudo anterior. O trabalho concentrou-se na análise da transição da falha compressiva para uma falha reversa oblígua ou direcional, em planta e em perfil. Em

seis experimentos, o autor variou uma série de parâmetros, sendo o principal, a direção do vetor transporte tectônico, que era dirigido de leste para oeste e passou a atuar no sentido sudoeste. Na terminação da falha de empurrão, mais nova, o autor reconheceu, em planta, uma pequena componente de rejeito direcional (Fig. 2.13). Além disto, a comparação de três perfis ao longo desta mesma falha, revelou, de norte para sul, um ângulo de mergulho crescente e uma magnitude da componente do rejeito de mergulho decrescente. Este fato, permitiu confirmar a tese acima citada.



Figura 2.13. (A) Caixa do experimento de Gouvêa (2014), em planta, antes da deposição das camadas de silicone e areia. Em azul, tem-se uma folha de cartolina cuja borda nordeste simulou a zona de sutura. Observar a posição do norte, e, que a seta indica uma compressão no sentido SW. (B) Fotografia da deformação final (encurtamento de 9,5 cm) do experimento que apresentou uma pequena mudança na terminação da zona de cisalhamento, e (C, D e E) Fotografias de cortes nos setores norte, central e sul, conforme indicado em B. Na escala, cada conjunto de retangulos, preto e branco, representa 1 cm.

Em dois projetos de Iniciação Científica da UFOP, a presente autora trabalhou em cima do mesmo assunto, com o intuito de melhor entender a cinemática envolvida nas terminações de zonas de cisalhamento reversas, curvas, em planta.

No primeiro projeto PIP (2014-2015), Lopes & Gomes (2015), realizaram 12 modelagens geológicas experimentais, sistemáticas, em caixas cujas dimensões variaram, conforme as modificações introduzidas nos experimentos, com 32, 39 e 40 cm de comprimento x 30 cm de largura, nas quais variaram o tipo de descolamento basal (cartolina,

microesferas de vidro e silicone), a magnitude do encurtamento (mudando-se as distancias entre a parede móvel da caixa de experimentos e a zona de cisalhamento) e a geometria da zona de cisalhamento principal. Esta zona foi simulada pela borda leste de um papel cartão introduzido na base da caixa de experimentos (Fig. 2.14).



**Figura 2.14.** Fotografias da base da caixa dos principais experimentos, antes do preenchimento com o material analógico. Observar as diferentes geometrias utilizadas para simular a borda leste do papel cartão, que representa a Zona de Cisalhamento de Abre Campos. Nos experimentos E a I foi inserida uma faixa de areia de 2 cm, separando a camada de silicone da parede móvel. A seta à direita indica o sentido do encurtamento, nos modelos.

A análise cuidadosa da deformação progressiva dos experimentos, em planta, revelou que a forma da borda leste do 'papel cartão', na base, define a geometria do traço da falha aflorante, que nela nucleou. Assim, sugeriu-se que as características estruturais da terminação de uma falha compressiva, no entorno de um obstáculo, sejam influenciadas por sua

geometria, em planta. Estruturas preexistentes (por exemplo, a borda leste do papel cartão) normais ao transporte tectônico geram falhas com terminações que caracterizam pequenos deslocamentos direcionais enquanto aquelas oblíquas à direção do encurtamento, movimentos oblíquos.

Os modelos ainda mostraram que o encurtamento progressivo produz falhas de empurrão, também fora do domínio do obstáculo. Estas se conectam à falha principal impondo-lhe caráter puramente compressivo (vide exemplo do modelo 08, Fig. 2.15). A título de exemplo, mostram-se os perfis do modelo 08 na figura 2.16. Nestes, foi interessante observar, que, bem na curva do 'papel cartão', se formaram três pequenos retroempurrões, além de dois empurrões de baixo rejeito (Fig. 2.16 C). Os dois retroempurrões desaparecem mais a sul, sendo substituídas pelas duas falhas de empurrão, da região sul, acima referidas.



**Figura 2.15.** Fotografias em planta do experimento 08, (**A**) antes da deposição das camadas; e (**B** - **D**) durante a deformação progressiva: (**B**) após 3,6 cm (11,3%); (**C**) após 6 cm (24,96%) e (**D**) após 10 cm (31,3%) de encurtamento. O tracejado na figura (**C**) indica a terminação da falha mais nova com o pequeno rejeito direcional. Em (**D**), percebe-se que, após 10 cm de encurtamento, as falhas que se formaram (tardiamente) na região sul, se conectaram com as da porção norte. A parede móvel se posiciona do lado direito. A escala corresponde a 6 cm.



**Figura 2.16.** Fotografias de três perfis do experimento 08 mostrando a deformação em diferentes cortes (A, a 10 cm; B, a 12 cm; C, a 16 cm; e D, a 18 cm da parede lateral norte da caixa de experimentos). A parede móvel se posiciona do lado direito. A escala corresponde a 5 cm.

No segundo projeto PIP (2015-2016), Lopes & Gomes (2016) pretendiam complementar os experimentos previamente desenvolvidos, uma vez que os resultados destes ainda não tinham sido totalmente satisfatórios. Assim, o estudo tinha o intuito de desenvolver modelos de uma zona de cisalhamento curva na terminação, em planta, introduzindo-se variações na reologia do descolamento basal, dúctil (silicone misturado com pó de grafite, silicone normal e silicone montado sobre uma camada fina de areia) e, novamente, na geometria da zona de cisalhamento compressiva. Esta foi simulada por 'obstáculos' tanto de papel cartão quanto de isopor, variando-se a altura e geometria destes (Fig. 2.17).

Foram gerados nove experimentos, os quais revelaram que a pequena componente transcorrente só se formou em um único experimento (no experimento E2, Fig. 2.18). Assim, concluiu-se que uma componente transcorrente neste tipo de sistema compressivo pode ser considerada representativa apenas para determinado momento da deformação progressiva. No caso, seria o momento após a nucleação da falha, ao longo do papel cartão (que representa a zona de sutura, isto é, um obstáculo na natureza) e o início da formação do segmento desta mesma falha, no domínio sem o obstáculo. Após este momento, prevalece a cinemática compressiva. O fato não invalida a possibilidade de se formar, na natureza, uma terminação oblíqua, com componente direcional do movimento, em uma falha de empurrão desde que a deformação cesse neste momento.



**Figura 2.17.** Fotografias da base da caixa dos experimento, antes do preenchimento com o material analógico. Observar as diferentes formas do papel cartão (em cinza) e os blocos de isopor (em branco e com diferentes alturas), usados para simular a Zona de Cisalhamento de Abre Campo. Notar, também, que no experimento 9 foi introduzido um bloco de isopor junto à parede móvel para simular o Terreno de Cabo Frio. A escala corresponde a 6 cm.



**Figura 2.18.** Painel com as fotografias da deformação final de oito dos nove experimentos, em planta, após o surgimento da segunda falha. A seta amarela indica o pequeno deslocamento direcional da segunda falha que se nucleou junto ao papel cartão. A deformação ocorreu da direita para a esquerda. A parede móvel se posiciona do lado direito do experimento. A escala corresponde a a 6 cm.

### 2.6 - MODELOS FÍSICOS DESENVOLVIDOS COM A MISTURA DE AREIA COM CRISTAIS DE MICA

Lasmar (2016) utilizou microesferas de vidro e a mistura de areia com cristais de mica, na proporção 14:1, em peso (areia : cristais de mica) para analisar as influências de materias mais elasto-plásticas do que a areia, sobre estruturas compressivas, confinadas entre dois altos estruturais, do embasamento (Fig. 2.23). A autora usou como estudo de caso o Sistema de Cisalhamento Fundão-Cambotas, da região leste do Quadrilátero Ferrífero (MG), com a hipótese de que, durante o Evento Brasiliano, esta região poderia ter sido submetida a temperaturas mais elevadas do que as atuais.



**Figura 2.19.** Desenho esquemático da caixa dos experimentos utilizada por Lasmar (2016), em planta; C. Caeté e C. Bação se referem aos altos estruturais dos complexos metamórficos Caeté e Bação que constituíram obstáculos ao avanço da frente de deformação brasiliana. A seta indica o sentido de movimento da parede móvel (modificado de Lasmar 2016).

Três séries de experimentos foram desenvolvidas para realizar, além da comparação da deformação compressiva entre os diferentes materiais (a areia, a areia com cristais de mica e as microesferas de vidro), a análise de seus comportamentos sobre diferentes tipos de descolamentos basais: uma camada basal de silicone, representando uma zona de cisalhamento dúctil, e uma folha de plástico, de baixa fricção.

Os resultados obtidos neste trabalho (Fig. 2.24) confirmaram que as microesferas de vidro e a mistura de areia com cristais de mica constituem materiais analógicos mais elasto-

plásticos do que a areia. Esta feição foi melhor observada nos perfis dos experimentos sem a camada basal de silicone. A comparação dos três materiais revelou que as microesferas de vidro e a mistura de areia com cristais de mica produzem dobras-falhas de geometria mais arredondadas. Além disto, estes materiais se caracterizaram pela ausência (ou formação difusa) de retroempurrões.

Foi interessante notar que, em nenhum experimento, se formaram rampas laterais ao longo dos altos estruturais como as observadas no mapa de Dorr (1969). O fato conduziu Lasmar (2016) a sugerir que os altos estruturais, na natureza, talvez possuam uma geometria diferente daquela simulada nos experimentos ou que estas rampas se formaram em uma outra fase de deformação do Evento Brasiliano, como propõe alguns autores.



**Figura 2.20.** Fotografias dos cortes centrais dos seis experimentos com a interpretação das falhas. As escalas são de 3 cm ou de 4 cm (Lasmar 2016).

# CAPÍTULO 3 GEOLOGIA REGIONAL

#### 3.1 - O ORÓGENO (FAIXA) ARAÇUAÍ : UMA BREVE REVISÃO

O Orógeno Araçuaí foi definido, em 1977, por Almeida como um cinturão de dobramentos e empurrões ao longo da margem leste do Cráton São Francisco. Após diversos estudos sobre a correlação entre as faixas Araçuaí e Congo Ocidental, Pedrosa-Soares *et al.* (2001) caracterizaram o Orógeno Araçuaí-Congo Ocidental (*Araçuaí-West-Congo Orogen*) como sendo formado durante a aglutinação do Gondwana Ocidental. Esta zona orogênica neoproterozóico-cambriana está contida na grande reentrância situada entre os crátons do São Francisco e Congo (Fig. 3.1 ). Como grande parte do Orógeno Araçuaí-Congo Ocidental está localizada em terras brasileiras, que contêm todos os atributos geotectônicos para um orógeno colisional, os autores simplificaram a sua denominação para Orógeno Araçuaí (Pedrosa-Soares *et al.* 2001, 2007).

O Orógeno Araçuaí é considerado um orógeno colisional posterior a um orógeno acrescionário de margem continental ativa, e possui registros geotectônicos e litoestratigráficas como por exemplo depósitos de margem passiva, lascas ofiolíticas, zona de sutura, arco magmático, granitos sin-colisionais e plutonismo pós-colisional (Pedrosa-Soares *et al.*, 2001, 2007). Sendo assim, o Orógeno Araçuaí se desenvolveu por meio de inúmeras fases de deformação, de encurtamento crustal e formação de grandes volumes de magmas. Em mapa, apresenta-se com uma forma peculiar de "U" invertido ou em ferradura (Fig. 3.1). De acordo com Alkmim *et al.* (2007), esta constitui uma geometria incomum, pois a maioria dos orógenos não são confinados entre crátons, e os seus traços estruturais não possuem segmentos fechados.

A Zona de Cisalhamento de Abre Campo foi a primeira grande estrutura descrita no Orógeno Araçuaí, a leste do Cráton São Francisco, que foi reconhecida como uma descontinuidade geofísica (a *Descontinuidade Geofísica de Abre Campo*), por Haralyi & Hasui (1982) quando estes estudaram as anomalias, gravimétricas e magnéticas, localizadas no leste do Brasil. De acordo com Fischel *et al.* (1998), a Zona de Cisalhamento de Abre Campo está associada com o episódio acrescionário paleoproterozóico, por separar o Complexo Mantiqueira, a oeste, do Complexo Juiz de Fora, a leste. Posteriormente, outros autores (e.g., Peres *et al.*, 2004; Alkmim *et al.*, 2006; Gonçalves, 2009), interpretaram a Zona de Cisalhamento de Abre Campo como expressão da zona de sutura do orógeno neoproterozóica, por separar a ocorrência de granitóides pré-colisionais da Supersuíte G1, localizada no limite leste da Faixa Araçuaí.



Figura 3.1. O Orógeno Araçuaí. FA = Faixa de dobramento Araçuaí, ZI = zona de interferência do Orógeno Araçuaí com o Aulacógeno do Paramirim (modificado de Pedrosa-Soares *et al.* 2007).
3.1.1 - O Feixe de Zonas de Cisalhamento Manhuaçu-Santa Margarida

Segundo Teixeira-Silva (2010), o conjunto de zonas de cisalhamento (que inclui a Zona de Cisalhamento de Abre Campo) expostas entre Governados Valadares (MG), a norte, e a fronteira entre os estados de Minas Gerais e Rio de Janeiro, a sul, no limite entre os orógenos Araçuaí e Ribeira (Fig. 1.1), foi chamada de Feixe de Zonas de Cisalhamento Manhuaçu-Santa Margarida por estarem próximas a região de Manhuaçu (MG).

O Feixe de Zonas de Cisalhamento Manhuaçu-Santa Margarida (FC-MSM) possui aproximadamente 300 Km de extensão, largura entre 15 e 40 km e orientação geral NS. É considerado uma das estruturas principais do núcleo cristalino do Orógeno Araçuaí, formado por um conjunto de zonas de cisalhamento dúcteis, possuindo em mapa traços sigmoidais. A Zona de Cisalhamento de Abre Campo ocorre na porção oeste do feixe e o acompanha com geometria e cinemática muito similares.

Teixeira-Silva et al. (2009) dividiram o Feixe de Zonas de Cisalhamento Manhuaçu-Santa Margarida em três segmentos, norte, central e sul. O segmento norte se estende de Governador Valadares até Ubaporanga, e nele predominam zonas reversas sobre as transcorrentes (Fig. 1.1). No segmento central, que se estende de Caratinga até Ervália-Carangola, há predominância de zonas de cisalhamento transcorrentes, no seu interior, e reversas, na periferia. Por fim, o porção sul é formada por um conjunto de zonas transcorrentes, subparalelas, que invertem para NE-SW. Neste segmento apenas uma zona reversa foi identificada. No segmento sul, os autores observaram um comportamento diferenciado de algumas zonas de cisalhamento: a Zona de Cisalhamento Manhuaçu desaparece próximo a Muriaé e a Zona de Cisalhamento Santa Margarida trunca a faixa Ribeira.

Os litotipos intracrustais paleoproterozóicos que são afetados pelo Feixe de Zonas de Cisalhamento Manhuaçu-Santa Margarida compreendem os complexos Mantiqueira ou Piedade, Juiz de Fora, Quirino e Pocrane, além dos granitóides neoproterozóicos das suítes G1 e G2 (Derribadinha, Bom Jesus do Galho e Vermelho Novo), localizados na porção norte-central.

De acordo com Teixeira-Silva *et al.* (2009), o domínio sul do FC-MSM envolve rochas dos complexos Juiz de Fora e Quirino, Megassequência Andrelândia e granitóides neoproterozóicos pré a sin-colisionais. A Megassequência Andrelândia possui em sua sequência superior rochas composta por gnaisses granatíferos de derivação pelítica a semipelítica; enquanto o Complexo Quirino é formado por gnaisses granodiorítico (bandado e com elevado grau de anatexia) e estruturas migmatíticas e granitóides neoproterozóicos encaixados nas rochas do Complexo Juiz de Fora, da Megassequência Andrelândia e, do Complexo Quirino.

Teixeira-Silva (2010) efetuou uma análise estrutural detalhada ao longo de vários perfis transversais ao Feixe de Zonas de Cisalhamento Manhuaçu-Santa Margarida. A partir da interpretação dos máximos estatísticos de foliações miloníticas e lineações de estiramento, obteve as seguintes conclusões: no segmento norte, a movimentação dos blocos foi,

essencialmente, reversa e dirigida para oeste (Fig. 3.2); no segmento central, a cinemática foi oblíqua (Fig. 3.3) e, no segmento sul, direcional (Fig. 3.4).



**Figura 3.2.** Perfil detalhado do segmento Norte e respectivos máximos estatísticos de foliações miloníticas e lineações de estiramento (modificado de Teixeira-Silva 2010).



**Figura 3.3.** Perfil detalhado do segmento Central e respectivos máximos estatísticos de foliações miloníticas e lineações de estiramento (modificado de Teixeira-Silva, 2010).



**Figura 3.4.** Perfil detalhado do segmento Sul e respectivos máximos estatísticos de foliações miloníticas e lineações de estiramento (modificado de Teixeira-Silva, 2010).

#### 3.2 - A FAIXA RIBEIRA: UMA BREVE REVISÃO

Com uma extensão de aproximadamente 1400 km, na borda sul/sudeste do Cráton do São Francisco, a Faixa Ribeira, representa um cinturão de dobramentos e empurrões com orientação preferencial NE-SW. De acordo com Tupinambá *et al.* (2007), a Faixa Ribeira é considerada parte da Província Mantiqueira e tem como limitadores a Faixa Araçuaí (a norte), a Faixa Apiaí e o Cráton Luís Alves (a sul), as bacias da margem continental (a leste) e a Faixa Brasília (a oeste) (Fig. 3.5).

De acordo com Teixeira-Silva (2010) a formação da Faixa Ribeira, decorrente do seu orógeno homônimo, esta associada ao contato do Cráton São Francisco com a região sudoeste do Cráton do Congo e também com outras microplacas e arcos de ilhas presentes na porção sudeste. Heilbron *et al.* (2008) definem a Faixa Ribeira como a raiz de um orógeno colisional na margem sudeste do Cráton do São Francisco, que evoluiu durante o Ciclo Brasiliano.



**Figura 3.5.** O Cráton do São Francisco e suas faixas móveis. Legenda: Cobertura fanerozóica: 1-Bacia do Paraná. Província Tocantins: 2- Faixa Brasília. Província Mantiqueira: 3- Faixa Apiaí; 6faixas Ribeira e Araçuaí. Embasamento pré-1,7 Ga: 5- Cinturão Mineiro; 7- Maciço de Joinville. Coberturas do Cráton do São Francisco: 4 – Grupo Bambuí. Sv- Salvador; Rj- Rio de Janeiro; Fl-Florianópolis; Ct- Curitiba; Sp- São Paulo (Tupinambá *et al.*, 2007).

Desde os anos 80, mapeamentos lito-estruturais e estudos geotectônicos sistemáticos são desenvolvidos na porção setentrional da Faixa Ribeira (Fig. 3.6). Através destas pesquisas, foi possivel realizar sua compartimentação tectônica, de NW para SE, em quatro terrenos tectono-estratigráficos. Estes terrenos: Ocidental (margem são franciscana retrabalhada), Paraíba do Sul, Oriental e Cabo Frio são, por sua vez, subdivididos em domínios/compartimentos tectônicos. São apresentados no perfil da figura 3.7, no contexto de toda a compartimentação tectônica da região do sudeste brasileiro de Tupinambá *et al.* (2012).



**Figura 3.6.** Mapa da compartimentação tectônica da região sudeste brasileira. Legenda: 1-Coberturas Fanerozóicas; 2- Rochas Alcalinas do K/Eoceno; 3 a 4: Faixa Brasília: 3-Domínio Externo, 4-Domínio Interno; 5 a 7: Craton do São Francisco e Domínio autóctone: 5- Megasseqüência Andrelândia autóctone, 6- Supergrupo Bambuí, 7- Embasamento cratônico; 8 a 15: terrenos da Faixa Ribeira: 8- Terreno Ocidental/Domínio Andrelândia, 9- Terreno Ocidental/Domínio Juiz de Fora, 10-Terreno Paraíba do Sul, 11- Terreno Apiaí, 12- Terreno Embú, 13- Terreno Oriental: Ca- Domínio Cambuci, IT- Klippe Italva, Cos-Domínio Costeiro, 14- Terreno Oriental/Arco magmático Rio Negro, 15- Terreno Cabo Frio (Tupinambá *et al.*, 2007; modificado de Heilbron *et al.*, 2004).



**Figura 3.7.** Perfil da compartimentação tectônica da Faixa Ribeira, entre a borda do Cráton do São Francisco e o litoral fluminense, passando pela Região Serrana Fluminense. 1, embasamento Paleoproterozoico; 2- cobertura metassedimentar pós-1,8 Ga; 3- sequências metassedimentar à volta do arco magmático, ITV, Grupo Italva; BJ, Grupo Bom Jesus do Itabapoana; SF, Grupo São Fidélis; 4- Complexo Rio Negro, ortognaisses do Arco Magmático; 5- leucognaisses graníticos da Suíte Cordeiro; 6- Gnaisses metaluminosos da Suíte Serra dos Órgãos; 7- granitos da Suíte Nova Friburgo (Tupinambá *et al.*, 2012; modificado de Heilbron *et al.*, 2004).

Segundo Tupinambá *et al.* (2007), os domínios tectônicos são separados por falhas de empurrão e importantes zonas de cisalhamento oblíquas transpressivas. Algumas vezes, uma mesma zona de cisalhamento passa de empurrão para zona transcorrente dextral, mostrando uma convergência oblíqua.

O contato entre os terrenos Oriental e Ocidental é conhecido como Limite Tectônico Central, delimitado por uma zona de cisalhamento de mergulho NW (Almeida *et al.*, 1998). A amalgamação dos terrenos ocorreu entre 605 e 580 Ma, exceto pelo Terreno Cabo Frio, que só foi colado aos demais há 520 Ma.

Heilbron *et al.* (2000) e Tupinambá *et al.* (2007) classificam litologicamente os terrenos do segmento setentrional da Faixa Ribeira em três unidades: A) ortognaisses e ortogranulitos do embasamento, retrabalhados durante a Orogênese Brasiliana, com unidades de idade pré-1,7 Ga (não afloram no Terreno Oriental); B) rochas supracrustais, compostas por uma sequências de rochas sedimentares e vulcânicas, metamorfisadas durante a Orogênese Brasiliana (representam sequências de bacias de margem passiva e de arco magmático, formadas pós-1,7 Ga); e C) granitóides/charnockitóides gerados durante os diversos estágios da Orogênese Brasiliana. A tabela 2 constitui uma síntese da formação e evolução dos terrenos tectono-estratigráficos e seus domínios, de acordo com Heilbron *et al.* (1995).

Conforme descrito por Tupinambá *et al.* (2007), a relação entre as faixas Ribeira e Araçuaí ainda não está muito bem esclarecida devido à semelhança entre as unidades litológicas e a ausência de feições estruturais que pudessem separar os diferentes domínios estruturais. Para estes autores, a Faixa Araçuaí representaria a continuidade lateral dos terrenos ocidental (Domínio Juiz de Fora) e Oriental (Domínios Cambuci e Costeiro) (vide mapa da Fig. 3.6).

**Tabela 2.** Síntese da formação e evolução dos terrenos tectono-estratigráficos e seus domínios(Heilbron *et al.*, 1995).

Terrenos	Domínios tectônicos	Síntese da formação	
Tectono-estratigráficos	Dominios tectomeos		
Ocidental	Autóctone	Região marginal ao cráton São Francisco, cujo embasamento foi parcialmente retrabalhado na Orogenia Brasiliana.	
	Andrelândia	Cobertura sedimentar dobrada e falhada juntamente com embasamento, com vergência para o cráton.	
	Juiz de Fora	Imbricação tectônica entre embasamento e cobertura.	
Klippe Paraíba do Sul	Paraíba do Sul	Recobre o Domínio Juiz de Fora, cuja raiz ainda não foi reconhecida.	
Oriental	Cambuci Costeiro Italva	Formado em um ambiente de subducção e colisional arco/continente.	
Cabo Frio	Cabo Frio	Terreno com colagem tardia aos demais, há aproximadamente 520 Ma.	

# CAPÍTULO 4 TRABALHOS EXPERIMENTAIS

#### 4.1 - DESCRIÇÃO DOS MODELOS

A seguir são descritos os nove experimentos desenvolvidos, primeiro a série de experimentos de uma única fase de deformação (série F1) e, em seguida, os simulados em duas fases (série F2).

Para o primeiro experimento, 01F1 (Fig. 4.1), será apresentada a deformação progressiva, em planta, a cada 1,0 cm. Em todos os demais modelos serão expostas as fotografias que melhor retratam a deformação, além da apresentação e discussão dos seus respectivos perfis. O Apêndice A apresenta o conjunto de fotografias dos demais experimentos de acordo com a sua deformação progressiva.

# 4.2 - EXPERIMENTOS DESENVOLVIDOS NA SÉRIE F1, DE UMA ÚNICA FASE DE DEFORMAÇÃO

A tabela 3 resume os materiais analógicos e os descolamentos basais dos quatro experimentos desenvolvidos na série de experimentos com apenas uma fase de deformação, de encurtamento (F1).

**Tabela 3.** Relação dos modelos analógicos desenvolvidos na primeira fase (F1) com as principais características de cada experimento.

Número do experimento	Material analógico	Descolamento basal	Compressão (cm)
01F1	Areia	Areia	7,5
02F1	Areia	Silicone	6,5
03F1	Mistura intercalada com camadas de areia pura	Mistura de areia com cristais de mica	8,5
04F1	Mistura intercalada com camadas de areia pura	Silicone	8

#### - A deformação, vista em planta

As fotografias, em planta, da deformação progressiva do experimento 01F1 (Fig. 4.1) apresentam a deformação que foi observada, com pequenas variações, também nos outros quatro modelos (Fig. 4.2).

Na figura 4.1 percebe-se que a primeira falha de empurrão se formou próximo à parede móvel da caixa após pouco menos de 1 cm de encurtamento. Esta falha apresenta traçado irregular com leve concavidade voltada para leste, na região central. As demais falhas se formaram após 2,5 cm, 4 cm e 6,5 cm, todas, também, com traçado bastante irregular. A falha mais nova se formou próximo ao papel cartão, inserido na porção noroeste da caixa de experimentos. Esta falha se estende progressivamente no sentido sul (Figs. 4.1G e H).

No experimento 02F1, da figura 4.2, observam-se, ao final da deformação, como no experimento anterior, quatro falhas de empurrão. No entanto, diferentemente do modelo anterior, o traçado destas falhas não apresentam nenhuma concavidade relevante. Pouco antes do encurtamento de 5,5 cm, a falha mais nova se nucleou, ao mesmo tempo, próximo ao papel cartão (porção norte) e na região sul da caixa. Com a deformação progressiva, ambas se estenderam em direção ao centro, mas não chegaram a se unir até a deformação final de 6,5 cm.

O modelo 03F1 (Fig. 4.2) é um pouco diferente, pois a 'falha mais nova' somente aparece após 7,5 cm de deformação. Esta, nucleou-se junto ao papel cartão e, como no experimento 01F1, se estendeu progressivamente no sentido sul (Figs. 4.2G e H).

A formação das falhas mostrou-se irregular no experimento 04F1 (Fig. 4.2). A terceira falha se formou mais próxima do papel cartão do que a quarta, mas não se estendeu até a região sul (nem mesmo após 8 cm de encurtamento). A mais nova, foi gerada após 5,5 cm de encurtamento, entre a terceira e a segunda, e, com traçado irregular e leve concavidade voltada para leste.

É importante assinalar que nenhuma falha, de nenhum dos quatro experimentos, revela indícios de um deslocamento direcional, em sua extremidade sul.



**Figura 4.1.** Fotografias em planta do experimento 01F1 mostrando a deformação progressiva de 1,0 cm em 1,0 cm. O encurtamento está indicado, em centímetros, para cada imagem, por exemplo: C = 0,5 significa que a compressão foi de 0,5 cm. A parede móvel se posiciona do lado direito. A escala corresponde a 6 cm.



**Figura 4.2.** Fotografias, em planta, dos experimentos 01F1 (este é aqui repetido, para melhor comparção), 02F1, 03F1 e 04F1. O encurtamento está indicado, em centímetros, para cada imagem, por exemplo: C = 5,5 significa que a compressão foi de 5,5 cm. A linha tracejada representa o traço da falha mais nova, nucleada na borda leste do papel cartão, ao final da deformação. A parede móvel se posiciona do lado direito e a escala corresponde a 6 cm.

#### - A deformação, vista nos perfis

A Figura 4.3 apresenta um esquema simplificado da base da caixa de experimentos com a posição dos perfis, apresentados nas figuras 4.4 e 4.5, em relação a parede móvel (lateral leste da imagem).



**Figura 4.3.** Esquema simplificado da base da caixa dos experimentos, somente com o papel cartão, na porção noroeste e a indicação dos perfis apresentados nas figuras 4.4 e 4.5.

Nos perfis (Figs. 4.4 e 4.5), que apresentam a deformação final dos experimentos, observa-se, sempre, junto à parede móvel, que as primeiras falhas (as mais antigas) cavalgaram uma sobre a outra, formando uma cunha. Trata-se da resposta do material analógico à rigidez da parede da caixa de experimentos, no início da deformação. Com a deformação progressiva, a influência da parede desaparece sobre as falhas mais novas.

Muitas vezes, percebe-se nos perfis, um número de falhas diferentes daquele reconhecido em planta. Isto, acontece ou porque o rejeito das falhas foi muito pequeno ou, especialmente nos experimentos efetuados com a mistura de areia com cristais de mica, o traço destas estruturas, em planta, não é nítido.

Os perfis de cada um dos experimentos 01F1 e 02F1, de areia e de areia sobre um horizonte basal de silicone respectivamente (Fig. 4.4), revelam apenas uma pequena diferença no rejeito das falhas, nos diferentes perfis. Entre si, os dois experimentos, diferem na geometria da cunha compressiva, junto à parede móvel, que é mais estreita no modelo 02F1. Neste experimento, a cunha foi formada por um número maior de falhas, mas todas com

rejeito muito pequeno. Além disto, observa-se, no modelo com a camada de silicone, a formação de um retroempurrão com rejeito maior do que o do empurrão.



**Figura 4.4**. Fotografias dos perfis referentes aos experimentos 01F1 e 02F1. C=10, C=15 etc. significa que o perfil foi cortado a 10 cm, 15 cm etc. de distância da parede norte, conforme Fig. 4.3. A parede móvel se posiciona do lado direito e a escala corresponde a 5 cm.

Os experimentos 03F1 e 04F1 (Fig. 4.5), da mistura de areia com cristais de mica, mostram, nos perfis, estruturas bastante arredondadas. É interessante observar a diferença entre os modelos 03F1 e 04F1, cujos rejeitos são muito baixo e elevado, respectivamente. Além disto, percebe-se, no modelo 04F1, uma ascensão menor da cunha compressiva junto à parede móvel, e, em compensação, um número maior de falhas de empurrão, no antepaís.

Na comparação entre os dois experimentos montados sobre uma camada de silicone (modelos 02F1 e 04F1), observa-se que o retroempurrão em 02F1 e todas as falhas formadas no antepaís do modelo 04F1 apresentam um rejeito elevado. O exame cuidadoso revela que o silicone ascende ao longo das falhas o que causa o deslocamento elevado dos blocos de falhas.



**Figura 4.5.** Fotografias dos perfis referentes aos experimentos 03F1 = 04F1. C=10, C=15 etc. significa que o perfil foi cortado a 10 cm, 15 cm etc. de distância da parede norte, conforme Fig. 4.3. A parede móvel se posiciona do lado direito e a escala corresponde a 5 cm.

# 4.3 - EXPERIMENTOS DESENVOLVIDOS NA SÉRIE F2, COM DUAS FASES DE DEFORMAÇÃO

A tabela 4 resume os principais parâmetros dos cinco experimentos desenvolvidos nas duas fases de deformação.
**Tabela 4.** Relação dos modelos analógicos desenvolvidos com as principais características de cada experimento.

Número do experimento	Material analógico	Descolamento basal	Compressão da primeira fase (cm)	Transpressão da segunda fase
01F2A	Areia	Areia	7,5	3
01F2B*	Areia	Areia	7,5	3
02F2	Areia	Silicone	7,5	3
03F2	Mistura intercalada com camadas de areia pura	Mistura de areia com cristais de mica	9	3
04F2	Mistura intercalada com camadas de areia pura	Silicone	9	3

\*Experimento repetido para efetuar cortes transversais à zona transpressiva.

#### - A deformação, vista em planta

A figura 4.6 apresenta duas fotografias de cada experimento desta série (F2), de duas fases de deformação, em planta. Com exceção do experimento 02F1, todos foram submetidos, na fase 1, a uma magnitude de deformação ligeiramente maior do que nos experimentos da primeira série F1 (de uma única fase de deformação) para que no fim da fase de compressão, em todos os modelos, a falha mais nova estivesse formada por toda a extensão da caixa de experimento, permitindo a futura interferência com as estruturas transpressivas. Este fato explica a geometria e o número de falhas um pouco diferente nestes experimentos em relação aos anteriores.

Nas fotografias, da figura 4.6 é possível observar que, durante a segunda fase de deformação, de 3 cm, formou-se, em todos os experimentos, uma zona transpressiva. Esta ocorre ao longo da folha de acetato, inserida, previamente, na base da porção sul da caixa de experimentos, conforme descrito no capítulo 1, item 'Desenvolvimento dos experimentos' e figura 1.3.



**Figura 4.6.** Fotografias, em planta, de dois momentos da deformação progressiva dos experimentos 01F2, 02F2, 03F2 e 04F2. O encurtamento está indicado, em centímetros, para cada imagem, por exemplo: C = 2 significa que a compressão foi de 2 cm. A parede móvel se posiciona do lado direito e a escala corresponde a 6 cm.

A zona transpressiva se manifesta pelo movimento relativo dos horizontes guias NS (causado pelo deslocamento do bloco sul em relação ao norte), e, no modelo 01F2, de areia e sem a camada basal de silicone, pela ascensão do material analógico. No modelo da mistura de areia com cristais de mica (03F2) percebe-se apenas o traço de uma falha direcional e nos modelos montados sobre a camada basal de silicone (02F2 e 04F2) só apareceu uma zona de deformação dúctil, irregular (Fig. 4.7).

Os experimentos montados com a mistura de areia com cristais de mica (modelos 03F2 e 04F2) revelam um arrasto dúctil dos horizontes guias. Este corresponde a 3,2; 2,9; 3,3 e 3,1 cm, nos modelos 01F2A, 02F2, 03F2 e 04F2, respectivamente.

### **Experimento 01F2**



**Experimento 03F2** 

### **Experimento 02F2**





**Experimento 04F2** 



**Figura 4.7.** Recorte das quatro zonas transpressivas, ao final da deformação da segunda fase, para comparação. Linhas amarelas, contínuas e descontínuas, representam as linhas guias NS e EW respectivamente, desenhadas na superfície de topo dos experimentos e indicam a ocorrência da zona transpressiva (vide também seta grossa). A parede móvel se posiciona do lado direito e a escala corresponde a 6 cm.

#### - A deformação, vista nos perfis (E-W)

Entre os perfis da deformação final dos experimentos da segunda série, F2 (Figs. 4.8 e 4.9), as observações focam nas seções C=15 e C=17 (Fig. 4.3), da zona transpressiva. As duas outras, C=10 e C=20, somente se distinguem daquelas da série F1, pela magnitude de deformação, ligeiramente mais elevada.

As seções (que são paralelas ao transporte tectônico) só apresentaram uma deformação diferenciada na zona transpressiva, no experimento 01F2 (Fig. 4.8). Nos perfis C=15 e C=17, deste modelo, há um número maior de falhas, e, ambas as falhas, existem retroempurrões associados. É notável que nos outros experimentos não se observam diferenças significativas entre os dois perfis, C=15 e C=17.



**Figura 4.8.** Fotografias dos perfis referentes aos experimentos 01F2 e 02F2. C=10, C=15 etc. significa que o perfil foi cortado a 10 cm, 15 cm etc. de distância da parede norte, conforme Fig. 4.3. A parede móvel se posiciona do lado direito e a escala corresponde a 5 cm.





#### - A deformação, vista nos perfis (N-S) do experimento 02F2B

Finalmente, o experimento 01F2B repete o modelo 01F2A, para a execução de cortes na direção N-S, transversais à zona transpressiva (Figs. 4.10 e 4.11). Apenas, no perfil C, é possível caracterizar uma estrutura em flor positiva. Esta começou a se formar no perfil B (traços brancos contínuos), mas não se desenvolveu como no perfil C, devido à interferência das falhas de empurrão com vergência para oeste das duas fases de deformação, na região centro-sul da caixa. No perfil A prevalecem as feições compressivas.

Dos outros experimentos não se apresentaram cortes transversais à zona transpressiva, em função da falta de estruturas bem definidas, em planta.



**Figura 4.10.** Esquema simplificado da base da caixa dos experimentos, somente com o papel cartão, na porção noroeste, e a indicação dos perfis NS, apresentados na figura 4.11 (A, a 15 cm; B, a 18 cm e C, a 21 cm da parede móvel, à direita). A linha tracejada indica a posição aproximada do limite norte da folha de acetato que produziu a zona transpressiva no material analógico.



**Figura 4.11.** Fotografias de três perfis do Experimento 01F2B, transversais à zona transpressiva, (A, a 15 cm; B, a 18 cm e C, a 21 cm de distância da parede móvel leste da caixa de experimentos), à esquerda sem, e a direita com a interpretação das falhas. As linhas tracejadas, em branco, indicam as feições da transpressão, nos perfis. A escala corresponde a 5 cm.

# CAPÍTULO 5 DISCUSSÕES

### 5.1 - A PRIMEIRA FASE DE DEFORMAÇÃO (F1)

#### - Os experimentos de areia versus os de areia com cristais de mica

Durante a deformação progressiva, observou-se que, nos modelos montados com a mistura de areia com cristais de mica, a falha mais nova (a última) demorou mais para se formar. Apareceu após, no mínimo 7,5 cm de encurtamento, na mistura, enquanto nos experimentos de areia esta surgiu no máximo até 6,5 cm (em geral após 4 cm). É possível que esta diferença esteja relacionada ao processo de deformação, pois, no caso da mistura de areia com cristais de mica, o encurtamento deve ter sido acomodado por uma compactação maior do que a areia pura.

A comparação entre os perfis dos experimentos montados com areia e com a mistura de areia com cristais de mica (Figs. 4.4 e 4.5), revela que as estruturas formadas nos modelos da mistura apresentam geometria mais arredondada e nenhum retroempurrão. Estas observações confirmam os estudos efetuados por Lasmar (2016), com a mistura de areia com cristais de mica (Fig. 2.20), material que foi previamente analisado, com mais detalhes, por Gomes et al. (2015). Estes autores analisaram a mistura de areia com cristais de mica em um aparelho de cisalhamento simples, um *ring-shear tester*, e concluíram que a mistura se rompe sob tensão mais baixa que a areia, mas, por necessitar de um intervalo de tempo maior para este rompimento, a mistura é considerada mais plástica.

#### - A camada basal de silicone

A feição que mais chama a atenção na comparação entre os perfis com e sem a camada basal de silicone nos experimentos da fase 1 (Figs. 4.4 e 4.5) diz respeito à cunha compressiva, junta à parede móvel. Esta é sempre mais estreita na presença do silicone uma vez que este substrato causa, nesta região, um maior número de falhas, todos com pequenos rejeitos, conforme pode ser observado no exemplo do perfil C=20, da figura 5.1. É curioso observar que apenas nesta região, próximo à parede móvel, os rejeitos das falhas são muito baixos. No geral, estes deslocamentos, nos experimentos montados sobre a camada basal de silicone, são mais elevados do que na ausência desta.

O modelo 02F1 (de areia sobre a camada basal de silicone) (Fig. 4.4) mostra a formação de um retroempurrão com rejeito maior do que os dois empurrões a ele associado. Retroempurrões, em experimentos de areia com uma camada basal de silicone, são feições comuns, conforme o estudo, entre outros, de Cotton & Koyi (2000), mas, como já mencionado acima, não se formaram na mistura de areia com cristais de mica.

O modelo 04F1 (da mistura de areia com cristais de mica sobre a camada basal de silicone) (Figs. 4.5 e 5.1) produziu, no antepaís, três falhas, e, dentre estas, a mais antiga causou forte arredondamento das camadas sobrejacentes. Enquanto isto, em 03F1, só foi gerada uma única falha, de baixo rejeito.



**Figura 5.1.** Os perfis C=20 (de 20 cm de distância da parede norte) dos quatro experimentos da fase 1, 01F1, 02F1, 03F1 e 04F1, após 7,5 cm; 6,5 cm 8,5 cm e 8,0 cm de encurtamento, respectivamente. A deformação ocorreu da direita para a esquerda.

#### - Os ângulos de mergulho da falha mais nova

Nos experimentos desenvolvidos com apenas uma etapa de deformação, mediram-se os ângulo de mergulho da falha mais nova. Estes ângulos, lançados em um gráfico (Fig. 5.2) mostram-se maiores em todos os perfis do experimento de areia com a camada basal de silicone (modelo 02F1). Este fato confere com descrições da literatura, por exemplo, com os experimentos apresentados por Cotton & Koyi (2000). Os valores relativamente elevados nos perfis 15, 17 e 20, do modelo 02F1, é explicado pelo fato de a falha mais nova ter se formado junto à descontinuidade apenas na região do perfil 10 (onde seu ângulo de mergulho foi mais baixo). Nos outros perfis, ela aparece mais próximo da parede móvel, possivelmente em

função do comportamento fluido do silicone basal, mais desordenado (vide figura 4.4). No experimento 04F1, da mistura de areia com cristais de mica sobre a camada de silicone, ângulos de mergulho mais elevados do que no modelo com o silicone só ocorrem em dois perfis, C=10 e C=15.



**Figura 5.2.** Gráfico dos ângulos de mergulho da falha mais nova medida em cada um dos perfis de 10, 15, 17 e 20 cm produzidos nos experimentos realizados com uma fase de compressão (F1).

### 5.2 - A SEGUNDA FASE DE DEFORMAÇÃO (F2)

Nos experimentos 01F2A (01F2B), 02F2, 03F2 e 04F2 mediu-se a componente do rejeito direcional, da zona transpressiva, em planta (Fig. 4.7). Os valores obtidos foram lançados no gráfico da figura 5.3 e revelaram rejeitos direcionais relativamente homogêneos. Os valores se mantiveram próximo a 3 cm em função da direção da transcorrência, de 80°, quase paralela à direção do movimento. Possivelmente a magnitude de rejeito maior que a magnitude total de compressão tenha ocorrido por uma pequena acomodação do material analógico durante o processo de deformação dos experimentos.

A análise cuidadosa dos modelos, em planta (Fig. 4.7), revela que o arrasto dúctil ocorre apenas nos experimentos montados com a mistura de areia com cristais de mica, modelos 03F2 e 04F2. Este fato pode estar relacionado com a maior plasticidade da mistura, como discutido acima.



**Figura 5.3.** Gráfico da magnitude da componente do rejeito direcional medida em cada um do quatro experimento realizados com duas fases de compressão (F2).

Entre os cortes transversais à zona transpressiva (perfis NS) do modelo 01F2B, apenas o perfil C apresentou de forma nítida uma estrutura em flor positiva, como esperado (Fig. 4.11). Nos outros perfis, algumas dificuldades relativos à segunda fase de deformação (por exemplo, um desmoronamento lateral) pode ter influenciado o resultado. Estruturas em flor positiva, em sistemas transpressivos, foram simuladas por vários autores, entre outros, por Le Guerroué & Cobbold (2006) e Rosas *et al.* 2012 (sem uma camada de silicone na base) (Fig. 2.8) e por Casas *et al.* (2001) que introduziram um substrato de silicone no sistema.

A figura 5.4 mostra a semelhança entre o presente perfil C, do modelo 01F2B, e o perfil com deformação de 5 cm da Série 1 de Le Guerroué & Cobbold (2006). Ambos os perfis apresentam uma estrutura em flor positiva com falhas caracterizadas por altos ângulos de mergulho.



**Figura 5.4.** (A) Fotografia do perfil C do experimento 01F2B e (B) desenho esquemático de um dos modelos da Série 1 de Le Guerroué & Cobbold (2006) para comparação de uma estrutura em flor positiva.

## 5.3 - CONSIDERAÇÕES SOBRE O DOMÍNIO SUL DO FEIXE DE ZONAS DE CISALHAMENTO MANHUAÇU-SANTA MARGARIDA (FAIXA ARAÇUAÍ) A PARTIR DOS MODELOS FÍSICOS

A simulação da superposição de uma zona transpressiva dextral sobre estruturas compressivas, mais antigas, gerou, em planta, nos experimentos de areia pura (modelos 01F2 e 02F2) um deslocamento rúptil, e, naqueles da mistura de areia com cristais de mica (modelos 03F2 e 04F2), um arrasto dúctil, independente da presença ou não da camada basal de silicone (que simulava uma zona de cisalhamento dúctil). Assim, os dois experimentos da mistura de areia com cristais de mica refletem melhor a geometria da terminação sul do Feixe de Zonas de Cisalhamento Manhuaçu-Santa Margarida (Faixa Araçuaí) conforme o mapa da figura 1.1.

De acordo com Alkmim *et al.* (2006) existe um gradiente metamórfico que aumenta de norte para sul ao longo de todo Orógeno Araçuaí. Dessa forma, as rochas aflorantes na porção sul são interpretadas como exposições de níveis crustais mais profundos, portanto, necessariamente, mais dúcteis, se comparadas às rochas do setor norte. O fato sugere que a mistura de areia com cristais de mica representa uma reologia mais apropriada para representar a situação do Orógeno Araçuaí, na porção sul, na qual a interferência com o Sistema Ribeira causou o arrasto dextral.

Os experimentos não tinham o intuito de mostrar o que poderia ocorrer em condições crustais mais profundos (mais quentes) ou em uma superposição de falhas de cavalgamentos por uma zona de cisalhamento transpressiva, dúctil, cuja influência não seria apenas local, mas regional. Nos dois caso, é possível imaginar que as falhas de empurrão da primeira fase não teriam sido apenas cortadas pelas mais novas, mas a zona de deformação poderia ter causada a rotação das falhas à vertical como sugerem Teixeira *et al.* (2009). Modelagens físicas que simulariam esta situação teriam que ser montados com materiais analógicos granulares mais plásticos do que os aqui empregados. A modelagem física, no entanto, carece de materiais analógicos adequados para este tipo de comportamento reológico.

# CAPÍTULO 6 CONCLUSÕES

A comparação da deformação compressiva em caixas de experimentos providos de uma descontinuidade preexistente (no presente estudo, a borda leste do papel cartão), em parte do antepaís, empregando-se diferentes materiais e substratos, permitiu concluir que:

- A mistura de areia com cristais de mica constitui um material mais plástico do que a areia, uma vez que, em planta, percebeu-se que as falhas demoraram mais tempo para se formar, e, quando uma zona transpressiva corta o experimento, horizontes guias sofrem arrastos dúcteis; além disto, observaram-se, nos perfis, dobras arredondadas no bloco do teto das falhas, sem retroempurrões associados.
- A presença de uma camada basal de silicone causa nos dois materiais, na areia e na mistura de areia com cristais de mica, rejeitos ligeiramente mais elevados do que na ausência deste substrato. Este fato ocorre porque o silicone ascende ao longo das falhas.
- 3) Em todos os experimentos, a deformação progressiva gerou uma falha na descontinuidade preexistente, que, com exceção do experimento de areia sobre a camada de silicone, cresceu até ocupar toda a extensão da caixa de experimentos. Neste, se formou, na região fora da descontinuidade, um retroempurrão e pequenos empurrões que confirmaram a tendência do silicone de formar retroempurrões em detrimento a empurrões.
- 4) O ângulo de mergulho da falha nucleada na descontinuidade foi sempre menor no modelo com areia com substrato rúptil. Este fato confirma o comportamento de materiais dúcteis ou plásticos, descrito em diversos trabalho da literatura, de produzir ângulos de mergulho mais elevados do que os rúpteis.

Os experimentos mostraram que o emprego da mistura de areia com cristais de mica é útil, em modelos físicos, para a simulação de estruturas rúpteis-dúcteis. Desta forma, sugerese que a tese do presente trabalho, de que zonas de cisalhamento compressivas (de baixo ângulo de mergulho) possam transicionar a zonas transpressivas (de alto ângulo de mergulho), em duas etapas consecutivas de deformação, só seria possível em condições reológicas mais dúcteis.

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- Alkmim, F. F., Marshak, S., Pedrosa-Soares, A. C., Peres, G. G., Cruz, S. C. P. & Whittington, A. 2006. Kinematic evolution of the Araçuaí–West Congo Orogen in Brazil and Africa: Nutcracker tectonics during the Neoproterozoic assembly of Gondwana. *Precambrian Research*, 149: 43-63.
- Alkmim, F.F., Pedrosa-Soares, A. C., Noce, C. M. & Cruz, S. C. P. 2007. Sobre a Evolução Tectônica do Orógeno Araçuaí-Congo Ocidental. *Geonomos*, 15(1): 25-43.
- Almeida, F. F. M. 1977. O Cráton do São Francisco. Revista Brasileira de Geociências, 7: 349-364.
- Almeida, J.C.H., Tupinambá, M.A., Heilbron, M., Trouw, R. 1998. Geometric and kinematic analysis at the Central Tectonic Boundary of the Ribeira belt, Southeastern Brazil. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 39, Belo Horizonte, Anais, 32.
- Casas, A. M., Gapais, D., Nalpas, T., Besnard, K., Román-Berdiel, T. 2001. Analogue models of transpressive systems. *Journal of Structural Geology* 23(5): 733–743.
- Cotton, J. T. & Koyi, H. A. 2000. Modeling of thrust fronts above ductile and frictional detachments: Application to structures in the Salt Range and Potwar Plateau, Pakistan. *Geological Society of America Bulletin*, 112(3): 351-363.
- Di Bucci, D., Ravaglia, A., Seno, S., Toscani, G., Fracassi, U. & Valensise, G. 2006. Seismotectonics of the southern Apennines and Adriatic foreland: Insights on active regional E-W shear zones from analogue modeling. *Tectonics*, **25**(4).
- Diraison, M., Cobbold, P. R., Gapais, D., Rossello, E. A. & Le Corre, C. 2000. Cenozoic crustal thickening, wrenching and rifting in the foothills of the southernmost Andes. *Tectonophysics*, **316**(1): 91-119.
- Dorr II J.V.N. 1969. Physiographic, stratigraphic and structural development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. U.S. Geological Survey Professional Paper, **641**(A): 1-110.
- Fischel, D. P., Pimentel, M. M., Fuck, R. A., Costa, A. G. & Rosière, C. A. 1998. Geology and Sm-Nd isotopic data for the Mantiqueira and Juiz de Fora Complexes (Ribeira Belt) in the Abre Campo-Manhuaçu region, Minas Gerais, Brazil. In: International Conference on Basement Tectonics, 14, Ouro Preto, Anais, 21-23.
- Gomes, C.J.S. 2013. Investigating new materials in the context of analog-physical models. *Journal of Structural Geology*, **46**: 158-166.
- Gomes C.J.S., D'Angelo T., Almeida G. 2015. Testing the influence of a sand mica mixture on basin fill in extension and inversion experiments. In: Academia Brasileira de Ciências, 87, Rio de Janeiro, *Anais*, 51-62.
- Gonçalves L. E. S. 2009. Características Gerais e História Deformacional da Suíte Granítica G1, entre Governador Valadares e Ipanema, MG. Departamento de Geologia, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Dissertação de Mestrado, 112 p.
- Gonçalves L. E. S., Gomes, C.J.S., Alkmim F. F. 2012. Geometria e cinemática da Zona de Cisalhamento de Abre Campo (zona de sutura do Orógeno Araçuaí): resultados de uma modelagem física em caixas de areia. In: Congresso Brasileiro De Geologia, 46, Santos, Abstract.
- Gouvêa, L.P. 2014. Modelagem Física Analógica da Zona de Cisalhamento de Abre Campo, do Orógeno Araçuaí. Departamento de Geologia, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Monografia de Conclusão de Curso, 46p.
- Graveleau F., Malavieille J., Dominguez S. 2012. Experimental modelling of orogenic wedges: A review. *Tectonophysics*, 1(66): 538-540.
- Haralyi N.L.E. & Hasui Y. 1982. The gravimetric information and the Archean-Proterozoic structural framework of Eastern Brazil. *Revista Brasileira de Geociências*. **12**: 160-166.
- Heilbron M., Valeriano C.M., Valladares C.S., Machado N., 1995. A orogênese brasiliana no segmento central da Faixa Ribeira, Brasil. *Revista Brasileira de Geociências*, 25: 249–266.

- Heilbron, M.; Mohriak, W. U.; Valeriano, C. M.; Milani, E. J.; Almeida, J. & Tupinambá, M. 2000. From collision to extension: the roots of the southeastern continental margin of Brazil. In: W. Mohriak, M. Taiwani (ed.) *Atlantic rifts and continental margins*. Washington D. C., American Geophysical Union, 1-32.
- Heilbron M., Pedrosa-Soares A.C., Campos Neto M., Silva L.C., Trouw R.A.J., Janasi V.C. 2004. Província Mantiqueira. In: Geologia do continente sul- americano: Evolução da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida. São Paulo, Beca, 13: 203-234.
- Heilbron, M., Valeriano C. M., Tassinari, C.C.G., Almeida J.C.H., Tupinambá M., Siga Jr. O. & Trouw, R. J. A. 2008. Correlation of Neoproterozoic terranes between the Ribeira Belt, SE Brazil and its African counterpart: comparative tectonic evolution and open questions. In: Pankhurst, R.J.; Trouw, R.A.J, Brito Neves; B.B., de Wit M.J. (ed.) West Gondwana Pre-Cenozoic Correlations Across the South Atlantic Region. London, The Geological Society of London, 294: 211-237.
- Hubbert K. M. 1937. Theory of scale models as applied to the study of geologic structures. *Geol. Soc. Am. Bull.*, **48**: 1459-1520.
- Koyi, H. 1997. Analogue modelling: from qualitative to quantitative technique a historical outline. *Journal of Petroleum Geology*, **20**(2): 223–238.
- Lasmar, F.P. 2016. A modelagem física da Zona de Cisalhamento Fundão-Cambotas (QF) com o emprego de diferentes materiais analógicos. Departamento de Geologia, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Monografia de Conclusão de Curso, 64 p.
- Le Guerroué, E. & Cobbold, P. R. 2006. Influence of erosion and sedimentation on strike-slip fault systems: insights from analogue models. *Journal of Structural Geology*, **28**(3): 421-430.
- Lopes, S. R. & Gomes, J. S. 2015. Análise da cinemática das terminações de uma zona de cisalhamento compressiva: modelos físicos. Relatório Inédito.
- Lopes, S. R. & Gomes, J. S. 2016. A modelagem física analógica de uma zona de cisalhamento compressiva a influência da geometria da zona de sutura preexistente e de diferentes materiais analógicos sobre as suas terminações. Relatório Inédito.
- Pedrosa-Soares, A. C., Noce, C. M., Wiedemann, C. M. & Pinto, C. P. 2001. The Araçuaí–West Congo Orogen in Brazil: An overview of a confined orogen formed during Gondwanland assembly. *Precambrian Research*, 110: 307-323.
- Pedrosa-Soares, A. C.; Noce, C. M.; Alkmim, F. F.; Silva, L. C.; Babinski, M.; Cordani, U., Castañeda, C. 2007. Orógeno Araçuaí: síntese do conhecimento 30 anos após Almeida 1977. *Geonomos*, **15**: 1-16.
- Peres, G. G., Alkmim, F. F. & Jordt-Evangelista, H., 2004. The southern Araçuaí belt and the Dom Silvério Group: Geologic architecture and tectonic significance. In: Academia Brasileira de Ciências, 76, Rio de Janneiro, Anais, 771-790.
- Ranalli, G. 2001. Experimental tectonics: from Sir James Hall to the present. *Journal of Geodynamics*, **32**(1): 65-76.
- Rosas, F. M., Duarte, J. C., Neves, M. C., Terrinha, P., Silva, S., Matias, L., Gàrcia, E. & Bartolomé, R. 2012. Thrust-wrench interference between major active faults in the Gulf of Cadiz (Africa-Eurasia plate boundary, offshore SW Iberia): tectonic implications from coupled analog and numerical modeling. *Tectonophysics*, 548: 1-21.
- Teixeira-Silva, C. M., Alkmim, F. F, Pedrosa-Soares, A. C. 2009. Geometria e evolução do feixe de zonas de cisalhamento Manhuaçu - Santa Margarida, Orógeno Araçuaí, MG. *Revista da Escola de Minas*, 62(1): 23-34.
- Teixeira-Silva C. M. 2010. O Sistema Transcorrente da Porção Sudeste do Orógeno Araçuaí e Norte da Faixa Ribeira: geometria e significado tectônico. Departamento de Geologia, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Tese de Doutorado, 221 p.
- Tupinambá, M., Heilbron, M., Duarte, B. P., Nogueira, J. R., Valladares, C., Almeida, J. & Ragatky, C. D. 2007. Geologia da Faixa Ribeira Setentrional: estado da arte e conexões com a Faixa Araçuaí. *Revista Geonomos*, 15(1): 67-79.

- Tupinambá, M., Teixeira, W. & Heilbron, M. 2012. Evolução tectónica e magmática da faixa ribeira entre o neoproterozoico e o paleozoico inferior na região serrana do estado do Rio de Janeiro, Brasil. *Anuário do Instituto de Geociências*, **35**(2): 140-151.
- Willis, B. 1894. Annual report of the geological survey to the secretary of the interior: the mechanics of *Appalachian structure*. US Government Printing Office, **13**(2): 1-233.

# **APÊNDICE A**

# A DEFORMAÇÃO PROGRESSIVA, EM PLANTA, DOS EXPERIMENTOS 02F1, 03F1 E 04F1

## **02F1**





## 03F1















04F1













