

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE

(UFF)

AURÉLIO KASAKEWITCH RIBEIRO

**EFEITOS DA REATIVAÇÃO DE ESTRUTURAS E DA SOBREPOSIÇÃO DE
EVENTOS TECTÔNICOS NA EVOLUÇÃO DA BACIA DE VOLTA REDONDA – UMA
INVESTIGAÇÃO A PARTIR DE MODELOS DE CAIXA DE AREIA**

Niterói, RJ

2019

AURÉLIO KASAKEWITCH RIBEIRO

EFEITOS DA REATIVAÇÃO DE ESTRUTURAS E DA SOBREPOSIÇÃO DE EVENTOS
TECTÔNICOS NA EVOLUÇÃO DA BACIA DE VOLTA REDONDA – UMA
INVESTIGAÇÃO A PARTIR DE MODELOS DE CAIXA DE AREIA

Dissertação de Mestrado apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em Dinâmica dos
Oceanos e da Terra do Instituto de Geociências
da Universidade Federal Fluminense, como
parte dos requisitos para obtenção do título de
Mestre em Geologia

Orientador: Marco Antonio Cetale Santos

Co-orientadora: Aline Theophilo Silva

Niterói, RJ

2019

Ficha catalográfica automática - SDC/BIG
Gerada com informações fornecidas pelo autor

R484e Ribeiro, Aurélio Kasakewitch
Efeitos da reativação de estruturas e da sobreposição de eventos tectônicos na evolução da Bacia de Volta Redonda - Uma investigação a partir de modelos de caixa de areia / Aurélio Kasakewitch Ribeiro ; Marco Antonio Cetale Santos, orientador ; Aline Theophilo Silva, coorientadora. Niterói, 2019.
83 f. : il.
Dissertação (mestrado)-Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2019.
DOI: <http://dx.doi.org/10.22409/PPGDOT.2019.m.14828199705>
1. Bacia de Volta Redonda. 2. Modelagem Física. 3. Reativação Estrutural. 4. Produção intelectual. I. Cetale Santos, Marco Antonio, orientador. II. Silva, Aline Theophilo, coorientadora. III. Universidade Federal Fluminense. Instituto de Geociências. IV. Título.

CDD -

A todos aqueles que, de alguma maneira, estiveram próximos a mim durante essa jornada, muito obrigado. Aqueles que passam por nós não vão sós. Deixam um pouco de si, levam um pouco de nós (Antoine de Saint-Exupéry).

Agradecimentos

Gostaria de agradecer à Universidade Federal Fluminense (UFF), mais especificamente ao Departamento de Geologia e Geofísica, cujas instalações foram utilizadas para o desenvolvimento deste estudo e cujos profissionais colaboraram para a transmissão do conhecimento reunido neste documento.

Ademais, gostaria de agradecer à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de estudos oferecida e pelo apoio ao programa de pós-graduação da Universidade Federal Fluminense, sem os quais não seria possível a elaboração deste trabalho.

Gostaria de agradecer à Petrobras, mais especificamente às geólogas Aline Theophilo, Silvia Cristina e Fernanda Lourenço, da Gerência de Geologia Estrutural e Geotectônica (GEOTEC) do Centro de Pesquisas e Desenvolvimento Leopoldo Américo Miguez de Mello (CENPES), cujo laboratório de modelagem física fora utilizado para a elaboração dos modelos descritos ao longo deste estudo. Finalmente, gostaria de agradecer também aos companheiros de trabalho da Gerência de Geologia, Geofísica e Geomecânica de Reservatórios (GGGR), cuja compreensão e incentivo foram cruciais para que este trabalho fosse finalizado dentro do prazo programado.

Resumo

Esta dissertação apresenta uma investigação a respeito da evolução tectônica da bacia de Volta Redonda, tomando como base o modelo conceitual desenvolvido por Negrão (2014) e Negrão *et al.* (2015). Mais especificamente, buscou-se verificar através de modelagem física em caixas de areia como a reativação de estruturas preexistentes no embasamento e a sobreposição de eventos tectônicos identificados na bacia contribuiriam para sua configuração atual. Uma vez que o modelo de Negrão (2014) e Negrão *et al.* (2015) pressupõe que essa configuração foi principalmente definida durante o evento de abertura da bacia (evento E1 - distensão NE-SW) e o evento deformador sucessivo, de caráter transcorrente sinistral (TS – orientação E-W), os modelos construídos nesse estudo foram projetados para reproduzir em escala as condições de ocorrência individual e da sobreposição desses dois eventos. Para isso foram elaborados um total de nove modelos, dentre os quais foram selecionados para serem aqui discutidos aqueles que melhor reproduziram as geometrias propostas pelo modelo conceitual previamente proposto. As seções produzidas a partir do corte dos modelos físicos foram fotografadas e as imagens foram incorporadas a um *software* de modelagem geológica. Foram, então, dispostas segundo a orientação do protótipo natural para que suas estruturas e horizontes pudessem ser interpretados e comparados com o modelo conceitual para a bacia. De maneira geral, os modelos físicos conseguiram reproduzir satisfatoriamente as geometrias propostas pelo modelo conceitual. Em outras palavras, as atitudes das estruturas interpretadas dos modelos coincidiram com aquelas identificadas na bacia de Volta Redonda.

Palavras-chave: Bacia de Volta Redonda; Modelagem Física; Reativação estrutural.

Abstract

This dissertation presents an investigation about the tectonic evolution of the Volta Redonda Basin, based on the conceptual model developed by Negrão (2014) and Negrão et al. (2015). More specifically, this study sought to verify through sandbox modelling by what means the reactivation of pre-existing basement structures and the overlap of tectonic events identified in the basin would contribute to its current configuration. Since the model of Negrão (2014) and Negrão et al. (2015) assumes that this configuration was mainly defined during the basin opening event (event E1 – distension NE-SW) and the successive deforming event of sinistral transtension (TS – EW orientation), the models built in this study were designed to scale out the conditions of individual occurrence and the overlap of these two events. For this, a total of nine models were elaborated, among which were selected to be discussed here those that best reproduced the proposed geometries by the previously proposed conceptual model. The sections produced from the cut of the physical models were photographed and the images were incorporated into a geological modeling software. They were then arranged according to the orientation of the prototype so that their structures and horizons could be interpreted and compared to those presented in the conceptual model of the basin. In general, the physical models satisfactorily reproduced the geometries proposed by the conceptual model. In other words, the attitudes of the interpreted structures of the models coincide with those identified in the Volta Redonda basin.

Keywords: Volta Redonda Basin; Analogue Modelling; Reactivation of structures.

Sumário

1.	Introdução	12
2.	Objetivos.....	13
3.	Localização e vias de acesso.....	14
4.	Geologia Regional.....	16
4.1.	Embasamento.....	16
4.2.	Modelos tectônicos regionais.....	20
4.3.	Tectônica e estratigrafia da bacia de Volta Redonda	25
4.4.	Modelo Conceitual	30
5.	Metodologia	33
5.1.	Modelagem física.....	33
5.2.	Modelos digitais.....	41
6.	Resultados	44
6.1.	Modelos preliminares.....	44
6.2.	Modelos adotados.....	49
6.3.	Interpretação dos modelos adotados	53
6.3.1	Modelo 6.....	53
6.3.2	Modelo 8.....	55
6.3.3	Modelo 9.....	57
6.4.	Modelos Digitais	59
7.	Conclusões	71
	Referências Bibliográficas.....	73
	Apêndice 1	Histórico
	detalhado dos modelos elaborados.....	78
	Apêndice 2	Propostas para
	trabalhos futuros.....	80
	I) Utilização do Sistema P.I.V.....	81

II) Interpretação dos Modelos Físicos a partir de métodos não-invasivos de imageamento.....	81
III) Restauração Estrutural.....	82
IV) Distribuição tridimensional de propriedades	83

Índice de Ilustrações

Figura 1. Rota com origem na Universidade Federal Fluminense com destino à cidade de Volta Redonda, a partir da Rodovia dos Metalúrgicos e da Rodovia do Contorno.....	12
Figura 2. Mapa geológico da bacia de Volta Redonda e adjacências	17
Figura 3. Localização da área de estudos e mapa geológico simplificado do segmento central da Faixa Ribeira.....	19
Figura 4. Painel ilustrativo dos eventos neotectônicos reconhecidos em estudos anteriores no Sudeste do Brasil	22
Figura 5. Fases tectônicas identificadas para o Rift Continental do Sudeste do Brasil ...	24
Figura 6. Mapa geológico do registro cenozoico sobre MDE da região da bacia de Volta Redonda e mapa de localização das Estações AMT do ensaio audiomagnetotelúrico realizado no gráben de Casa de Pedra	27
Figura 7. Modelo conceitual para a bacia de Volta Redonda.....	32
Figura 8. Gráficos da tensão cisalhante contra o tempo para as areias utilizadas	34
Figura 9. Gráfico da tensão cisalhantes contra a tensão normal para as areias utilizadas.	35
Figura 10. Arquitetura inicial dos modelos físicos confinados em caixas de acrílico.....	36
Figura 11. Fase inicial de sedimentação do embasamento.....	38
Figura 12. Imagem espontânea tirada a partir de uma câmera fotográfica durante o momento de corte das seções do modelo.	39
Figura 13. Seções importadas para o <i>software</i> SKUA™ - PARADIGM	41
Figura 14. Conjunto de traços de falhas	42
Figura 15. Superfície de topo gerada para o preenchimento sedimentar de um modelo distensivo	43
Figura 16. Seções extraídas dos modelos preliminares.....	46
Figura 17. Configuração extraordinária para o Modelo 3.....	47
Figura 18. Seção extraída do Modelo 3	48
Figura 19. Representação esquemática dos modelos 6 e 8.....	50
Figura 20. Representação esquemática do modelo 9	52
Figura 21. Modelo 6.....	54
Figura 22. Modelo 8.....	56
Figura 23. Modelo 9.....	58

Figura 24. Arcabouço estrutural do Modelo 9	60
Figura 25. Identificação das falhas do Modelo 9.	61
Figura 26. Arcabouço estrutural das falhas que compõem o Modelo 9 populado com a propriedade 'Azimuth'	62
Figura 27. Estereogramas das falhas que compõem o arcabouço estrutural do Modelo 9.	63
Figura 28. Histograma de distribuição da direção das falhas.....	65
Figura 29. Dados extraídos das falhas que compõem o arcabouço estrutural do Modelo 9	66
Figura 30. Falha principal do Modelo 9 populada com uma propriedade capaz de traduzir o rejeito vertical acumulado	67
Figura 31. Volume representativo do arcabouço estrutural e 'estratigráfico' do Modelo 9.	68
Figura 32. Mapa de espessura das camadas que compõem o arcabouço 'estratigráfico' do Modelo 9.....	69

1. Introdução

O desenvolvimento de uma bacia sedimentar está subordinado à reativação de estruturas pretéritas. Não obstante estudos primorosos tenham abordado o assunto (MAURIN & GUIRAUD, 1993; GARTRELL *et al.*, 2005; KEEP & HARROWFIELD, 2005; FETTER, 2009; TONG *et al.*, 2014), a evolução tectônica em terrenos associados a zonas de fraqueza crustais anteriores não foi totalmente compreendida e merece ser extensivamente investigada.

Segundo Tong *et al.* (2014), zonas de fraqueza crustais compreendem, essencialmente, falhas ancestrais, podendo ocorrer tanto em embasamento cristalino quanto em rochas sedimentares. Acrescenta, ainda, que qualquer falha cuja gênese remeta a um evento tectônico anterior comportar-se-á como uma zona de fraqueza crustal no momento em que haja uma alteração do campo de tensões regionais.

McClay & White (1995), dentre outros pesquisadores, enfatizaram a importância da orientação das zonas de fraqueza crustais em relação ao campo de tensões vigente durante a geração e a reativação de estruturas. Por sua vez, Bellahsen & Daniel (2005), em um estudo mais aprofundado e metodológico, investigaram os efeitos que uma trama pretérita oblíqua composta por falhas normais provocaria em falhas mais novas, geradas a partir de um evento tectônico subsequente.

Os cenários evocados pela bibliografia apresentada servem de alicerce para a resolução do problema que esta pesquisa se propõe a responder: apurar os efeitos da reativação de estruturas e da sobreposição de eventos na evolução tectônica da bacia de Volta Redonda.

Nesse contexto, foram modelados individualmente e em sobreposição os dois primeiros eventos tectônicos identificados para a bacia de Volta Redonda: o evento de abertura da bacia sobre um embasamento previamente estruturado (evento E1 - distensão NE-SW) e o evento deformador sucessivo, de caráter transcorrente sinistral (TS – orientação E-W) (RICCOMINI, 1989).

A modelagem física analógica (i.e., modelagem em caixas de areia) provou ser uma metodologia prática e visualmente didática para se testar as condições de contorno

que acompanharam a evolução tectônica da bacia de Volta Redonda. Além disso, a sua aplicabilidade em cenários semelhantes, embasada em diversas publicações científicas do gênero (e.g., MCCLAY & WHITE, 1995; MCCLAY *et al.*, 2002; CORTI, 2012; CARVALHO, 2017), justifica o seu emprego. Desta maneira, esta metodologia será adotada ao longo desta dissertação.

2. Objetivos

Este estudo tem como principal objetivo investigar os efeitos da reativação de estruturas e da sobreposição de eventos tectônicos na evolução da bacia de Volta Redonda. Para que este objetivo fosse alcançado, foram utilizados modelos físicos em caixas de areia e modelos geológicos digitais como ferramentas capazes de simular os eventos tectônicos previstos para a bacia e interpretar as suas estruturas associadas, respectivamente.

3. Localização e vias de acesso

A bacia de Volta Redonda está localizada no estado do Rio de Janeiro, região Sudeste do Brasil (Figura 1A). Mais precisamente, seus depósitos jazem ao longo do médio vale do rio Paraíba do Sul, distribuídos nos municípios de Barra do Piraí, Barra Mansa, Pinheiral, Piraí, Porto Real e, finalmente, Volta Redonda.

A partir da Universidade Federal Fluminense, campus da Praia Vermelha, deve-se seguir pela BR-101 até a Via Expressa Presidente João Goulart. A partir da Via Expressa, seguir pela Rodovia Presidente Dutra (BR-116) até a saída 258A, onde é possível acessar a Rodovia dos Metalúrgicos (Figura 1B).

A recém-inaugurada, à data desta publicação, Rodovia do Contorno desmembra-se para leste da Rodovia dos Metalúrgicos nas proximidades do bairro de Vila Rica. A Rodovia do Contorno perpassa os principais afloramentos do preenchimento sedimentar da bacia de Volta Redonda, atravessando o gráben de Casa de Pedra perpendicularmente à sua maior alongação. Finalmente, a rodovia alcança o bairro de Três Poços, já próxima às grandes aglomerações urbanas da cidade.



Figura 1. Rota com origem na Universidade Federal Fluminense com destino à cidade de Volta Redonda, a partir da Rodovia dos Metalúrgicos e da Rodovia do Contorno. Tempo aproximado de percurso de carro: 2h, sem trânsito. Imagem retirada do Google Maps.

4. Geologia Regional

4.1. Embasamento

A bacia de Volta Redonda está inserida no contexto geológico do *Rift* Continental do Sudeste do Brasil (RCSB) (RICCOMINI, 1989), instalada sobre rochas proterozóicas/eopaleozóicas do segmento central da Faixa Ribeira. O embasamento da região compreende complexos ortoderivados paleoproterozoicos, complexos paragnáissicos neoproterozoicos e suítes intrusivas neoproterozoicas e paleozoicas, inseridos no domínio do Terreno Ocidental, Embu e Klippe Paraíba do Sul da Faixa Ribeira (HEILBRON, 1995; SCHMITT, 2001; HEILBRON *et al.*, 2004; TUPINAMBÁ *et al.*, 2007; NEGRÃO, 2014).

De acordo com Heilbron *et al.* (2004), o Grupo Paraíba do Sul é a unidade aflorante do embasamento de maior expressão na área da bacia de Volta Redonda. É composto por associações litológicas metamorfizadas em fácies anfibolito alto. Compreende, principalmente, biotita gnaisses bandados, em sua base, gnaisses micáceos e xistosos, em sua porção intermediária, e intercalações de (granada)-biotita gnaisses com xistos e gnaisses pelíticos em sua porção superior (HEILBRON *et al.*, 2004) (Figura 2).

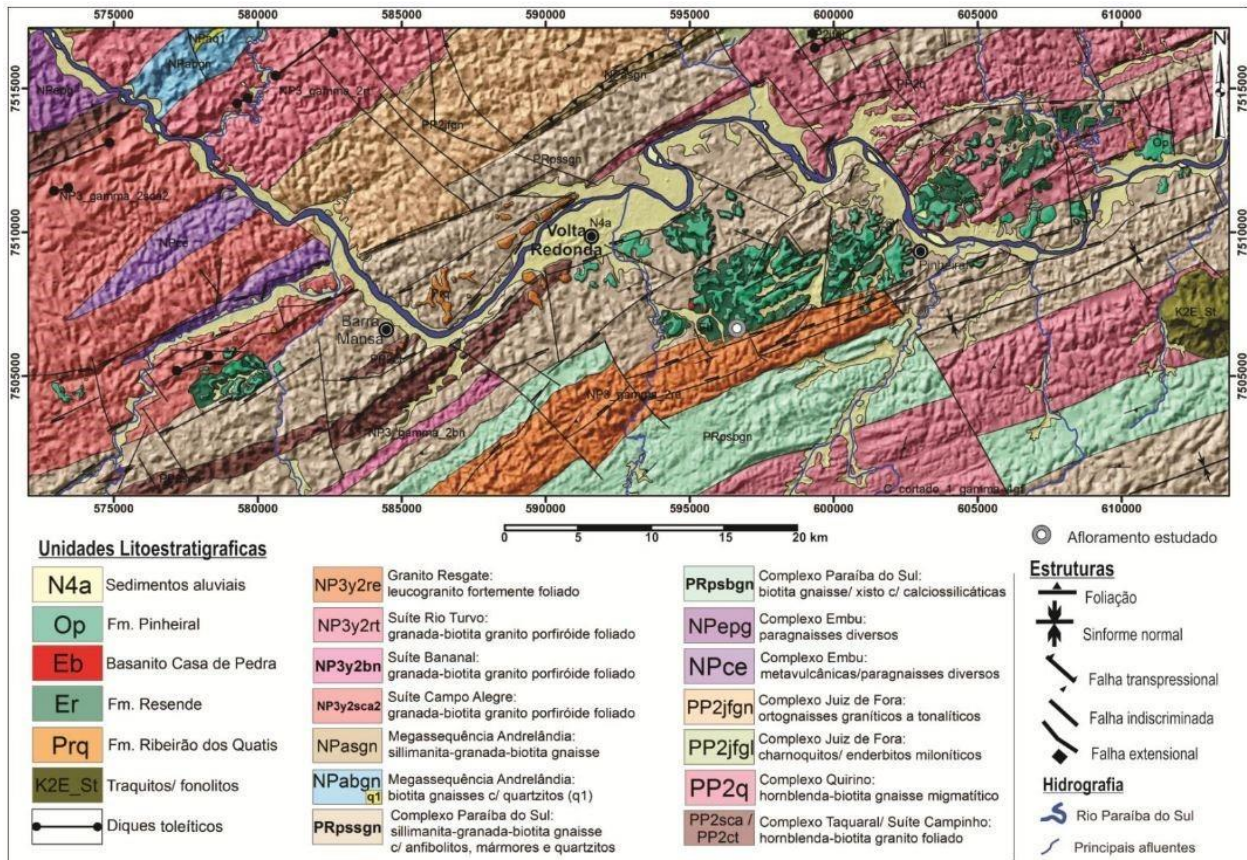


Figura 2. Mapa geológico da Bacia de Volta Redonda e adjacências, com a descrição das unidades litoestratigráficas e principais estruturas. Modificada de Negrão (2014) por Maciel (2016).

Ademais, outras associações litológicas possuem ocorrência restrita na área de estudos. O Complexo Embu, por exemplo, pode ser encontrado em suas extremidades oeste e noroeste. Esta unidade, cuja provável idade remete ao Neoproterozoico, é essencialmente constituída por gnaisses e xistos pelíticos com intercalações de quartzitos e rochas calcissilicáticas, em facies anfibolito (HEILBRON *et al.*, 2000; NEGRÃO, 2014).

O Grupo Andrelândia, por sua vez, ocorre somente na região norte da bacia de Volta Redonda. Suas associações litológicas, de idade neoproterozoica, correspondem a uma unidade basal, caracterizada essencialmente por biotita gnaisses granatíferos bandados, e à outra, superior, cuja composição inclui granada-biotita gnaisses bandados

derivados de rochas pelíticas e que apresentam intercalações de rochas manganesíferas (HEILBRON *et al.*, 2000; NEGRÃO, 2014).

Os domínios registrados anteriormente correspondem aos complexos paragneissicos neoproterozoicos identificados na área de estudos. Os complexos Juiz de Fora, Taquaral e a suíte Campinho, entretanto, representam complexos ortogneissicos de idade paleoproterozoica.

O Complexo Juiz de Fora é constituído por ortogneisses migmatíticos, cuja paragênese metamórfica remete à facies granulito. Ocorrem intercaladas tectonicamente com as rochas metassedimentares neoproterozoicas, limitadas por zonas de cisalhamento. Pode ser encontrado principalmente nas adjacências da Serra da Mantiqueira e mais discretamente na região da Serra do Mar (HEILBRON *et al.*, 2000; NEGRÃO, 2014).

O Complexo Quirino, por sua vez, é caracterizado por um gnaisse de foliação descontínua com aglomerados minerais de hornblenda e enclaves máficos alongados. Sua localização na área de estudos remete aos setores leste e nordeste, nas adjacências da bacia (HEILBRON *et al.*, 2000; NEGRÃO, 2014).

O Complexo Taquaral é composto por ortogneisses e rochas granitóides que, genericamente, são representados por hornblenda-biotita-gnaisse bandados migmatíticos e biotita leucogranitos foliados. Este complexo é localmente identificado na região centro-oeste da área de estudos (HEILBRON *et al.*, 2000; NEGRÃO, 2014).

A Suíte Campinho, enfim, representa um conjunto de ortogneisses ricos em hornblenda que ocorrem intercalados às rochas metassedimentares descritas anteriormente. Sua ocorrência é restrita à região sudoeste, sob a forma de corpos alongados (HEILBRON *et al.*, 2000; NEGRÃO, 2014).

Há de ser ressaltada a presença das suítes intrusivas nas adjacências da área de estudos. Destaca-se, dentre as demais, o Granito Resgate. Suas unidades constituem essencialmente leucogranitos peraluminosos. Esta suíte delimita a borda sul da bacia de Volta Redonda. No ponto EVR-49 do seu trabalho, Negrão (2014) caracteriza um biotita-gnaisse granítico ainda preservando as suas características originais, onde seria possível

identificar numerosas injeções pegmatíticas. Nesse contexto, conjectura-se se o contraste entre as propriedades físicas da suíte e as rochas encaixantes dos metassedimentos do Grupo Paraíba do Sul tenha condicionado e localizado, respectivamente, a abertura e a implantação do sistema de falhas principais do rifte .

Além do Granito Resgate, são identificadas as suítes Rio Turvo, Bananal, Campo Alegre e o Granito Serra do Ipiranga (HEILBRON *et al.*, 2000; NEGRÃO, 2014).

A trama estrutural composta pelas unidades do embasamento da área de estudos caracteriza-se por corpos alongados segundo uma direção preferencial ENE-WSW, sobre a qual a bacia de Volta Redonda se desenvolveu (Figura 3B).

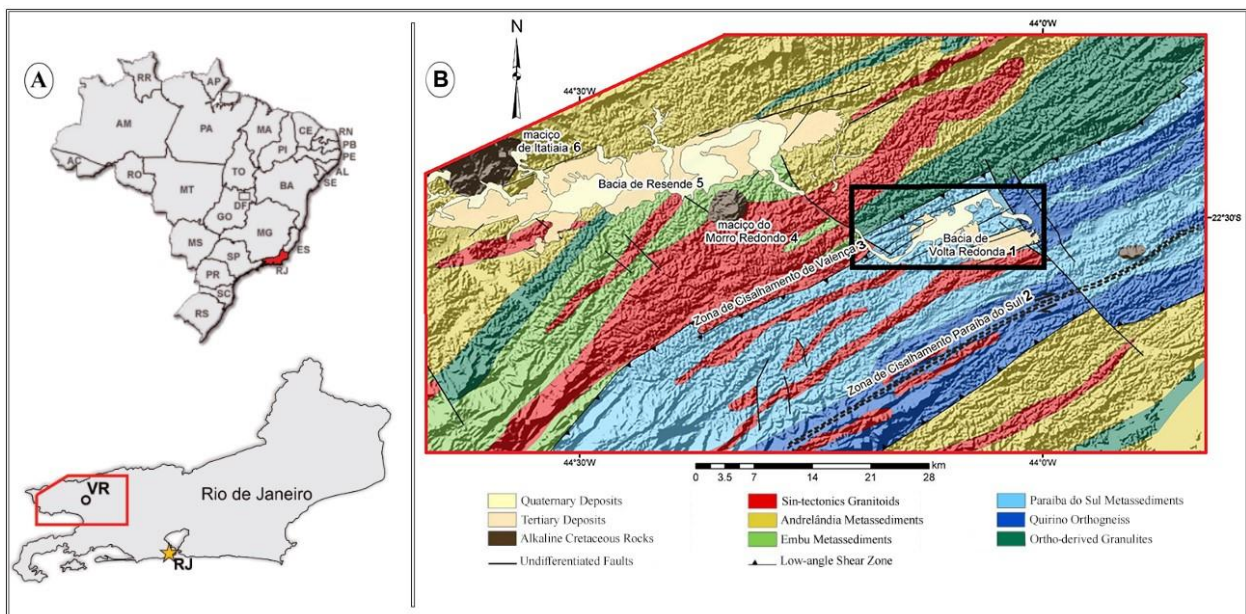


Figura 3. (A) Localização da área de estudos. (B) Mapa geológico simplificado do segmento central da Faixa Ribeira. Esta região compreende as bacias de Resende e, destacada pelo retângulo preto, Volta Redonda. (1) Bacia de Volta Redonda. (2) Zona de Cisalhamento Paraíba do Sul. (3) Zona de Cisalhamento de Valença. (4) Maciço do Morro Redondo. (5) Bacia de Resende. (6) Maciço de Itatiaia. Modificada de Negrão *et al.* (2015).

A bacia de Volta Redonda, por sua vez, apresenta uma geometria geral estreita e alongada com forte orientação NE-SW (Figura 3B), coincidente com direção preferencial

das unidades que compõem o embasamento e um forte indicativo de que haja uma forte relação com a trama pretérita estabelecida.

4.2. Modelos tectônicos regionais

Diversos autores conjecturaram sobre a origem e a evolução do tectonismo cenozoico no Sudeste do Brasil. Almeida (1976) definiu como Sistema de *Rifts* da Serra do Mar as grandes feições observadas na região, tais quais os vales tectônicos e as áreas montanhosas soerguidas por falhas e suas bacias menores relacionadas. Segundo este autor, estas feições teriam se originado a partir de expressivos movimentos verticais opostos entre a área em questão e as bacias sedimentares marginais do sudeste brasileiro.

Em 1978, Asmus & Ferrari propuseram uma hipótese que ia ao encontro daquela proposta por Almeida (1976). Baseada na compensação isostática entre as regiões continentais e oceânicas marginais, teorizou sobre a possível reativação tectônica ao longo de zonas de fraqueza pré-cambrianas, culminando no desenvolvimento de blocos crustais basculados limitados por falhas normais.

Melo *et al.* (1985) propuseram a nomenclatura “Sistema de bacias trafofênicas do Sudeste Brasileiro” às feições da Serra do Mar e seus vales contíguos. A proposta era baseada na observação das falhas normais de alto ângulo que delimitavam a instalação de bacias sedimentares preenchidas por depósitos cenozoicos.

Riccomini (1989), por sua vez, definira a nomenclatura *Rift* Continental do Sudeste do Brasil (RCSB). Sua hipótese propõe que a origem do RCSB estaria relacionada ao basculamento termomecânico na região emersa adjacente à Bacia de Santos, envolvendo reativações ao longo de zonas de cisalhamento preexistentes. Sua teoria foi

adotada neste trabalho devido à pluralidade de estudos em que nela se embasaram, culminando em um acervo bibliográfico vasto para consulta e alto grau de confiabilidade, além da possibilidade de representação segundo a metodologia adotada ao longo desta dissertação (Figura 4).

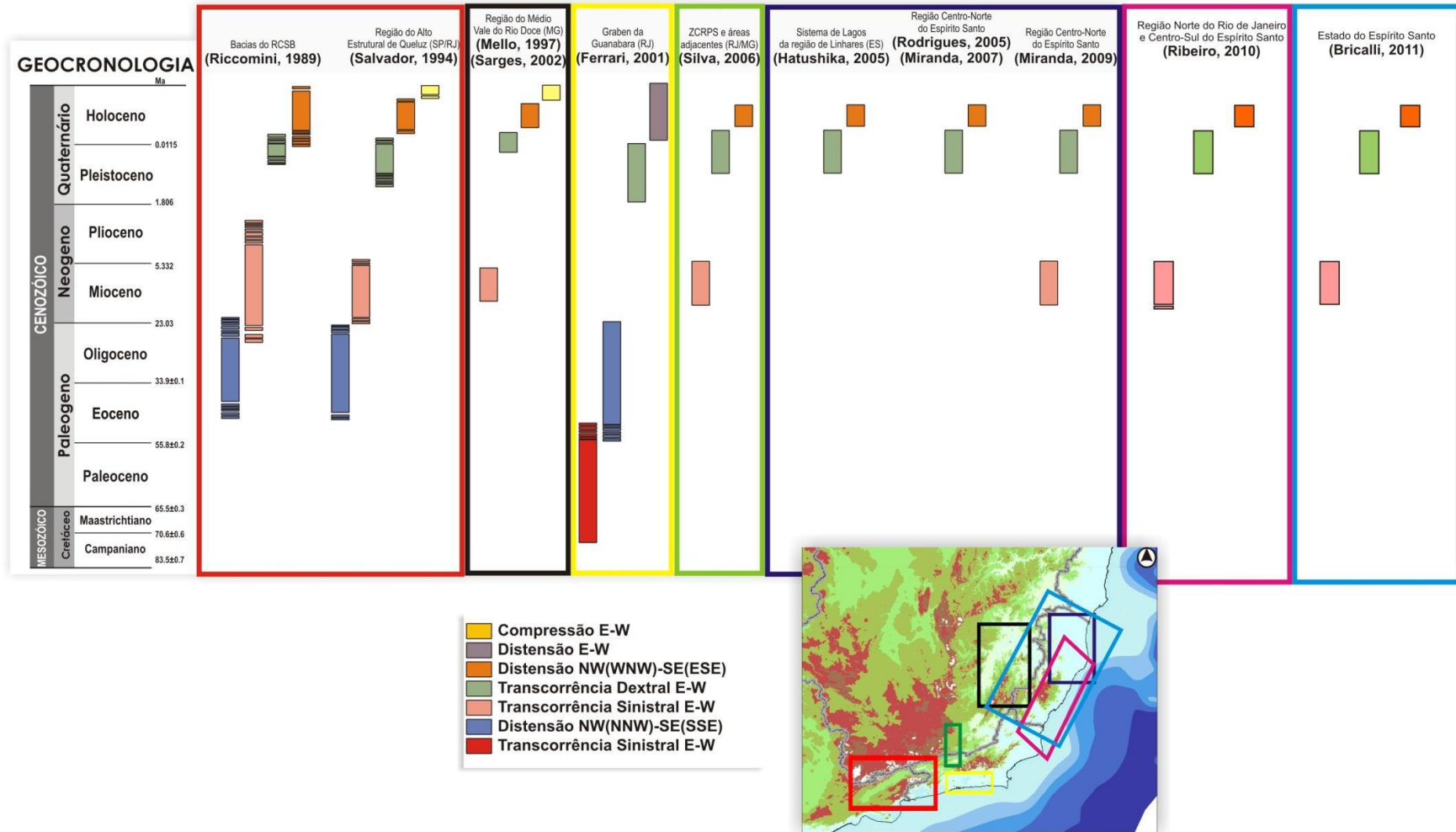


Figura 4. Painel ilustrativo dos eventos neotectônicos reconhecidos em estudos anteriores no Sudeste do Brasil. Modificada de Ribeiro (2010) por Brêda (2012).

Ainda de acordo com Riccomini (1989), a origem e a evolução tectônica do RCSB estariam relacionadas aos esforços distensivos de orientação NW-SE que atuaram durante o Paleogeno (E1) (Figura 5). À época de sua abertura, fora proposto pelo autor que o RCSB compunha uma feição estrutural mais contínua do que denota o registro sedimentar atualmente preservado. Nesse contexto, foram identificados três eventos tectônicos posteriores responsáveis pela segmentação e reestruturação do RCSB, sendo eles: uma transcorrência sinistral E-W (TS), durante o Mioceno; uma transcorrência dextral E-W (TD), durante o Pleistoceno; e, enfim, uma extensão NW-SE (E2), durante o Holoceno.

Em uma obra pouco mais recente, Salvador & Riccomini (1995) acrescentaram um quarto evento deformador relacionado a uma compressão E-W a WNW-ESE (C), de idade holocênica mais recente, cuja influência perdura até a atualidade.

Acerca destas fases, admite-se que o balanço entre os campos de tensão de longa distância relacionados aos fenômenos de abertura do Oceano Atlântico (*Ridge-push*) e da subducção da placa de Nazca sob o continente sul-americano (*Slab-pull*) tenha controlado a orientação dos esforços atuantes durante os eventos tectônicos identificados no RCSB (RICCOMINI, 1989).

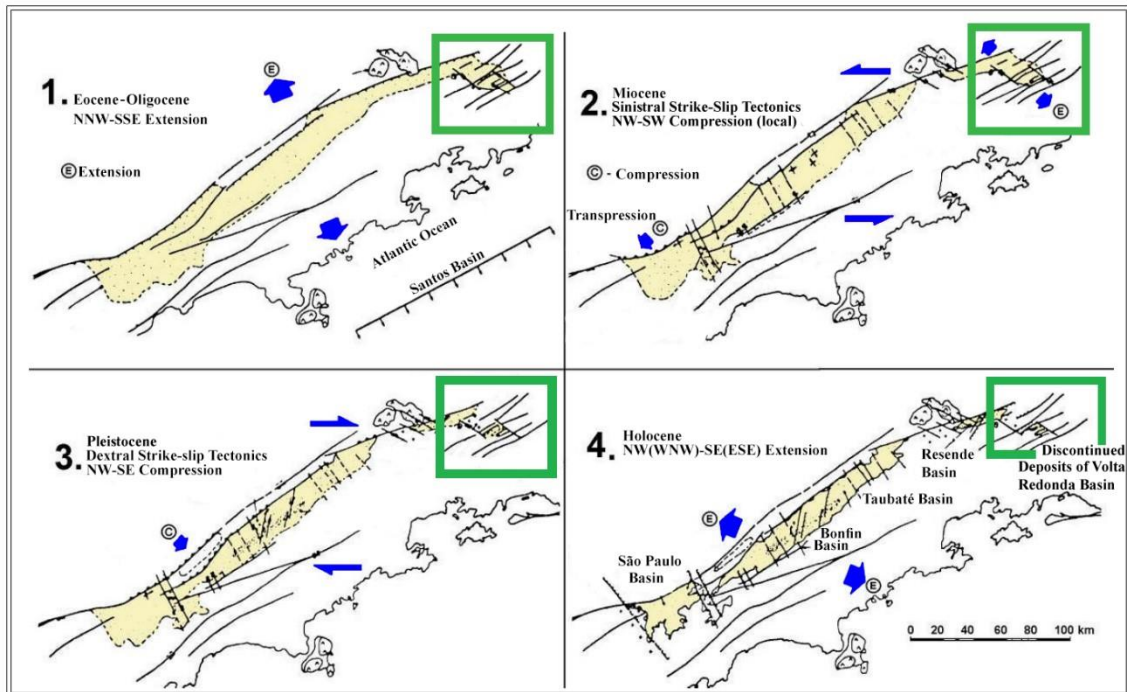


Figura 5. Fases tectônicas identificadas para o *Rift* Continental do Sudeste do Brasil. Destacada em verde, a região que abrange a bacia de Volta Redonda. Modificada de Riccomini (1989).

Além disso, é acrescentada na literatura a provável influência em menor escala de fatores locais, como a carga sedimentar da Bacia de Santos, a presença de soerguimentos regionais e a ascensão do nível do mar após o Pleistoceno (RICCOMINI & HIRUMA, 2002 apud RICCOMINI *et al.*, 2004).

Finalmente, devem ser expostas, também, as pesquisas de Zalán & Oliveira (2005) e Cogné *et al.* (2013), mais recentes. Zalán & Oliveira (2005) foram os responsáveis pela proposta de uma análise integrada dos grábens cenozoicos entre os estados do Paraná e Rio de Janeiro, retomando proposições anteriores de Almeida (1976) e Ferrari (2001). Nesse contexto, propuseram o termo Sistema de Riftes Cenozoicos do Sudeste do Brasil ao delimitarem quatro riftes de grandes dimensões, por eles denominados de Ribeira, Paraíba do Sul, Litorâneo e Marítimo.

Por sua vez, Cogné *et al.* (2013) interpretaram, com base em levantamentos estruturais em afloramentos e da reinterpretação de linhas sísmicas das bacias de Resende e Taubaté, que esta bacia esteve sujeita a, pelo menos, dois eventos tectônicos rúpteis. De acordo com a sua interpretação, propuseram à origem da Bacia de Taubaté um estilo tectônico de *pull-apart*.

4.3. Tectônica e estratigrafia da bacia de Volta Redonda

Sanson (2006), através da sua interpretação das estruturas rúpteis identificadas na bacia de Volta Redonda, foi o responsável pela classificação de quatro fases tectônicas correlacionáveis àquelas anteriormente descritas para o RCSB, consubstanciando suas origens e evoluções.

Relacionadas à fase E1, são observadas falhas normais de direção NE-SW a ENE-WSW na bacia de Volta Redonda. Por sua vez, são analisadas falhas sinistrais E-W a WNW-ESE, dextrais NW-SE e transpressivas NNW-SSE relacionadas à fase TS. Por fim, falhas normais NNE-SSW e transpressivas ENE-WSW estão associadas ao evento tectônico TD. Além destas estruturas, que foram organizadas de maneira sucinta neste item, relacionam-se ao relaxamento E2 estruturas responsáveis pela atual distribuição sedimentar nas bacias (NEGRÃO, 2014).

Nesse contexto, Negrão (2014) e Negrão *et al.* (2015) foram os responsáveis por apresentar uma nova perspectiva da distribuição do registro sedimentar cenozoico na região da bacia de Volta Redonda, assim como das suas principais estruturas associadas. Em seus trabalhos, os autores demonstram que as ocorrências sedimentares na bacia de Volta Redonda compreendem uma área mais ampla do que se pressupunha. Ainda de acordo com seus trabalhos, a região que abrange a bacia de Volta Redonda passa a apresentar um mosaico de ocorrências descontínuas e de depocentros de idade paleogênica e quaternária.

Ainda que os estudos de Negrão (2014) e Negrão *et al.* (2015) tenham evidenciado a maior amplitude dos depósitos cenozoicos que compreendem o registro sedimentar da

bacia de Volta Redonda, o gráben de Casa de Pedra manteve-se como a sua principal área de ocorrência e acumulação sedimentar (i.e., o principal depocentro). Esta feição é caracterizada como uma depressão tectônica alongada segundo a orientação ENE-WSW, estendendo-se por 9km entre o bairro de Casa de Pedra e a cidade de Pinheiral, e cuja largura varia em torno de 3km (SANSON, 2006).

A profundidade do seu embasamento, no entanto, ainda não fora constatada até o momento da elaboração deste estudo. Padilha & Vitorello (1992) foram os responsáveis pela realização de ensaios audiomagnetotelúricos com o objetivo principal de determinar as características geelétricas superficiais das bacias de Resende e Volta Redonda. As localizações das estações AMT, ilustrada pela Figura 6B, remetem ao gráben de Casa de Pedra (Figura 6). Segundo os autores, o foco dos ensaios era avaliar o arcabouço de ambas as bacias, concentrando-se em aspectos referentes ao formato das bacias e às espessuras sedimentares dos seus preenchimentos. Suas conclusões acerca da bacia de Volta Redonda reiteram a sua geometria em hemigráben e apresentam uma proposta que localiza as suas maiores espessuras sedimentares perante à borda norte, espessuras estas superiores a 100 m. Nesse contexto, torna-se evidente a necessidade de um método de investigação em subsuperfície mais preciso.

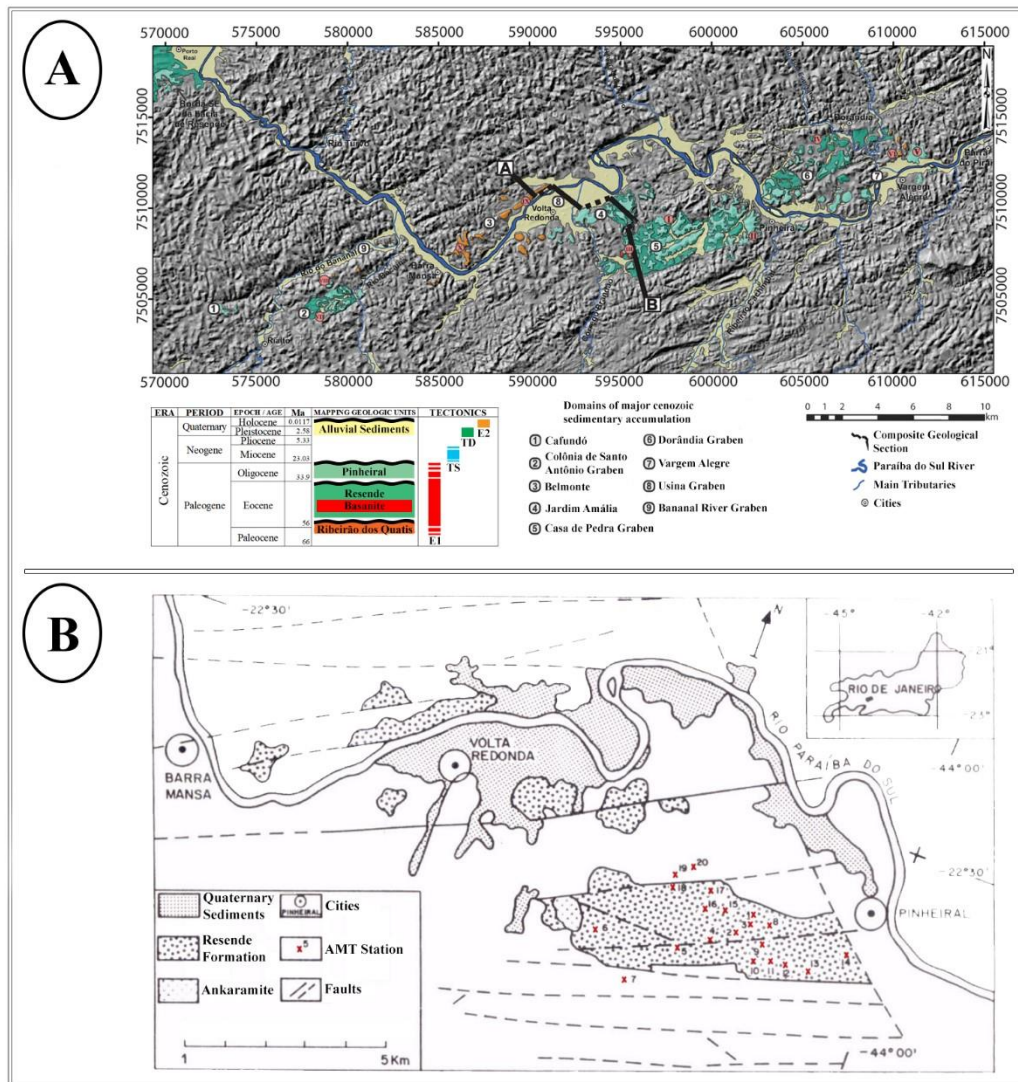


Figura 6. (A) Mapa geológico do registro cenozoico sobre MDE da região da bacia de Volta Redonda. As formas retilíneas de coloração preta representam o traçado das seções geológicas que serão discutidas no item 4.4 desta dissertação. Modificada de Negrão *et al.* (2015) (B) Mapa de localização das Estações AMT do ensaio audiomagnetotelúrico realizado no Graben de Casa de Pedra. Modificada de Padilha & Vitorello (1992).

O principal preenchimento sedimentar da bacia de Volta Redonda compreende as Formações Resende e Pinheiral (RICCOMINI, 1989; SANSON, 2006; NEGRÃO *et al.*, 2015), ambas depositadas durante a Fase Rife (E1). Ademais, são reconhecidas seqüências sedimentares anteriores à abertura da bacia, a Fm. Ribeirão dos Quatis, e derrames de rocha ultramáfica alcalina, o Basanito Casa de Pedra.

A Formação Ribeirão dos Quatis está relacionada à fase pré-rifte da evolução da bacia de Volta Redonda. É composta por conglomerados quartzosos, médios a grossos, intercalados com arenitos feldspáticos e, mais raramente, rochas pelíticas. São depósitos geralmente pouco espessos que jazem diretamente sobre o embasamento cristalino proterozoico e são definidos principalmente em altos estruturais externos da bacia. Atribui-se fluvial entrelaçado de alta energia ao paleoambiente de sedimentação interpretado que originara estes depósitos (RICCOMINI, 1989; NEGRÃO, 2014).

A Formação Resende, por sua vez, está relacionada ao primeiro evento de rifteamento da bacia, durante o Eoceno. É composta por intercalações de arenitos feldspáticos estratificados e conglomerados finos. Também são identificados lamitos de coloração esverdeada e brechas. Encontram-se, geralmente, em inconformidade sobre o embasamento cristalino. O paleoambiente de sedimentação interpretado para estes depósitos corresponde a leques aluviais, associados às bordas das falhas, e fluviais entrelaçados (RICCOMINI, 1989; NEGRÃO, 2014).

São definidas, também, ocorrências de corpos ankaramíticos, rochas vulcânicas de natureza ultramáfica alcalina caracterizada por uma textura afanítica, contendo microfenocristais de augita e olivinas. O principal registro dessas rochas na bacia de Volta Redonda é encontrado no bairro de Vila Rica, na cidade de Volta Redonda. O exato posicionamento estratigráfico dos corpos ankaramíticos da bacia de Volta Redonda, entretanto, não é um consenso entre os pesquisadores. Sanson (2006) e Sanson *et al.* (2006) os localizam entre as formações Resende e Pinheiral, enquanto que Riccomini (1989), Riccomini *et al.* (2004) e Negrão (2014) argumentam que o evento vulcânico ocorrera concomitantemente à deposição da Fm. Resende, principalmente em associação às suas porções mais basais. Essas lavas foram datadas pelos métodos K-Ar e Ar-Ar, que, respectivamente, apontaram idades entre $43,8 \pm 6,2$ e $41,7 \pm 5,7$ Ma, e entre $48,3 \pm 0,5$ e $47,6 \pm 0,7$ Ma (RICCOMINI *et al.*, 1983; RICCOMINI *et al.*, 2004; SANSON, 2006; SANSON *et al.*, 2006). Outros locais do RCSB onde essas rochas são encontradas são a Bacia de Resende, que juntamente com a bacia de Volta Redonda contém as principais ocorrências, e a borda norte da Bacia de Itaboraí, onde os derrames apresentam estrutura almofadada preservada e estão sobrepostos às unidades conglomeráticas da Fm. Rio Frio, que sucede a Fm. Itaboraí. As rochas basálticas foram

ali datadas pelo método K-Ar (RICCOMINI & RODRIGUES-FRANCISCO, 1992) fornecendo uma idade de $52,6 \pm 2,4$ Ma.

Em seguida à Formação Resende, deposita-se a Fm. Pinheiral. Esta unidade está relacionada à colmatção da bacia durante o Oligoceno, estando seus depósitos ora em inconformidade sobre o embasamento ora sobre os depósitos da Fm. Resende. Esses depósitos são caracterizados por conglomerados e arenitos estratificados associados a canais fluviais entrelaçados. Difere-se da sequência sedimentar sotoposta devido à presença de espessos intervalos pelíticos de coloração avermelhada relacionados a possíveis períodos de afogamento do sistema fluvial. Ramos *et al.* (2006) propõem um paleoambiente de sedimentação para a Fm. Pinheiral mais oxidante, enquanto que os lamitos de coloração mais esverdeada da Fm. Resende são possíveis indicadores de um paleoambiente mais redutor. Além disso, uma análise comparativa e composicional entre os seixos das frações mais grossas destas sequências sedimentares permite estabelecer o aumento da quantidade de seixos de quartzo a partir da base da Fm. Pinheiral. Na Fm. Resende, a composição identificada para os seixos que a compunham era majoritariamente lítica, provável indicador de um menor retrabalhamento.

4.4. Modelo Conceitual

Negrão (2014) e Negrão *et al.* (2015) foram os responsáveis pela elaboração do modelo conceitual a partir do qual foram planejados os modelos físicos desenvolvidos para cumprir o objetivo desse trabalho (Figura 7). Seu modelo foi elaborado a partir de dados de campo e da interpretação dos dados topográficos extraídos de uma seção composta que atravessava as regiões do gráben de Casa de Pedra, de Jardim Amália, do gráben da Usina e a Área de Belmonte (Figura 6A).

O modelo conceitual compreende seções esquemáticas que ilustram possíveis geometrias para a configuração atual da bacia de Volta Redonda e aquela ao término do estágio rifte. Desta maneira, propõe-se uma geometria inicial para a bacia em hemigráben totalmente preenchido cuja borda principal está localizada ao sul (Figura 7A), localização esta contrária àquela proposta por Padilha & Vitorello (1992). O autor também sugere a representação da falha principal da borda sul da bacia de Volta Redonda como um sistema ramificado.

Nesta mesma seção, é possível analisar sistemas de falhas sintéticas à falha de borda mergulhando para NW e antitéticas mergulhando para SE. Além disso, é possível observar que há um adelgaçamento das sequências sedimentares na direção NW e a presença da Fm. Ribeirão dos Quatis restrita aos altos externos à bacia. Ademais, a área que viria a caracterizar a Área de Jardim Amália encontra-se representada desde os primórdios da evolução tectônica da bacia como um alto anterior ou contemporâneo à sua gênese.

Por outro lado, a sua configuração atual propõe uma inversão parcial dos depocentros paleogênicos a NW da Área de Jardim Amália, sobre a qual depósitos aluviais quaternários referentes à sedimentação do rio Paraíba do Sul são identificados (Figura 7B). O autor relaciona a inversão parcial destes depocentros aos eventos deformadores neotectônicos, principalmente à atuação do evento E2 (distensão NW-SE).

Além disso, é possível perceber que a evolução topográfica e erosão consequente limitaram bastante a área de ocorrência da Fm. Pinheiral e Ribeirão dos Quatis.

O autor sugere que os altos estruturais de direção NE-SW, à exemplo da área de Jardim Amália, foram os responsáveis pela segmentação dos depocentros da bacia de Volta Redonda. Apesar de não descartar a hipótese de que a gênese de tais feições poderia datar da abertura da bacia, o autor afirma que tais feições se encontram reativadas por eventos neotectônicos, fornecendo como evidência a presença de falhas afetando tanto o embasamento quanto os registros paleogênico e quaternário.

A maior pluralidade de estruturas do sistema de falhas principais da bacia em sua configuração atual quando comparada àquela representativa do seu momento de abertura é um indicativo de que estas estruturas foram frequentemente reativadas durante os eventos neotectônicos subsequentes à abertura da bacia. Ademais, o autor aparentemente não sugere em seu modelo para a configuração atual da bacia que os eventos deformadores seguintes à sua abertura tenham expandido seu eixo transversal.

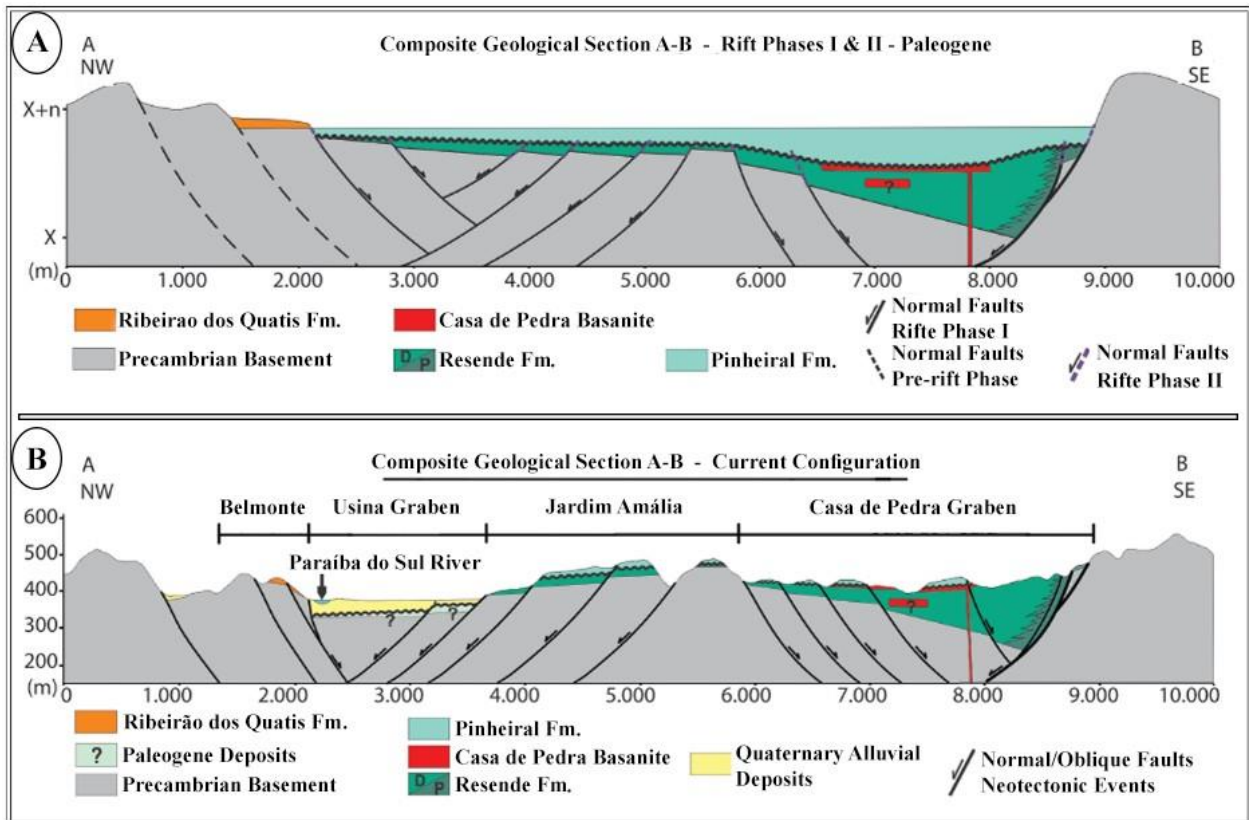


Figura 7. (A) Seção geológica composta representativa da configuração da bacia de Volta Redonda à época da sua abertura (E1). (B) Seção geológica composta representativa da configuração atual da bacia de Volta Redonda. Os segmentos que compuseram as seções estão dispostos, em planta, na Figura 6A. Modificada de Negrão *et al.* (2015).

5. Metodologia

5.1. Modelagem física

O material utilizado para o preenchimento dos modelos foi unicamente areia de quartzo. Este material é comumente utilizado para reproduzir os processos geológicos supracrustais rúpteis e representa, nos modelos que serão apresentados, as rochas do embasamento e do preenchimento sedimentar da bacia, apenas se distinguindo quanto às suas cores.

Todos os modelos físicos apresentados neste trabalho foram desenvolvidos no Laboratório de Modelagem Física de Processos Geológicos Peter Szatmari, no CENPES, Petrobras, no Rio de Janeiro. Carvalho (2017), que também desenvolveu a sua pesquisa no laboratório mencionado, determinou as propriedades friccionais da areia utilizada em seus modelos, que coincidem com aquelas utilizadas neste estudo. Desta maneira, os dados por ele compilados serão adotados para descrever o comportamento reológico das areias utilizadas.

De acordo com os principais resultados obtidos durante os ensaios no *ring-shear tester*, Carvalho (2017) pôde constatar que a variação na coloração das areias não altera de forma significativa as suas propriedades físicas, eliminando a possibilidade de que a heterogeneidade das cores adotadas em cada modelo interferisse na modelagem das estruturas. As figuras 8 e 9 ilustram, respectivamente, a relação entre a tensão cisalhante em função do tempo e da tensão normal. A partir desta imagem, é possível deduzir, por exemplo, que a areia incolor, amplamente utilizada para representar o arcabouço geológico dos modelos desenvolvidos, possui o ângulo de atrito interno, no instante da ruptura, ligeiramente mais elevado que as demais (i.e. $38,77^\circ$).

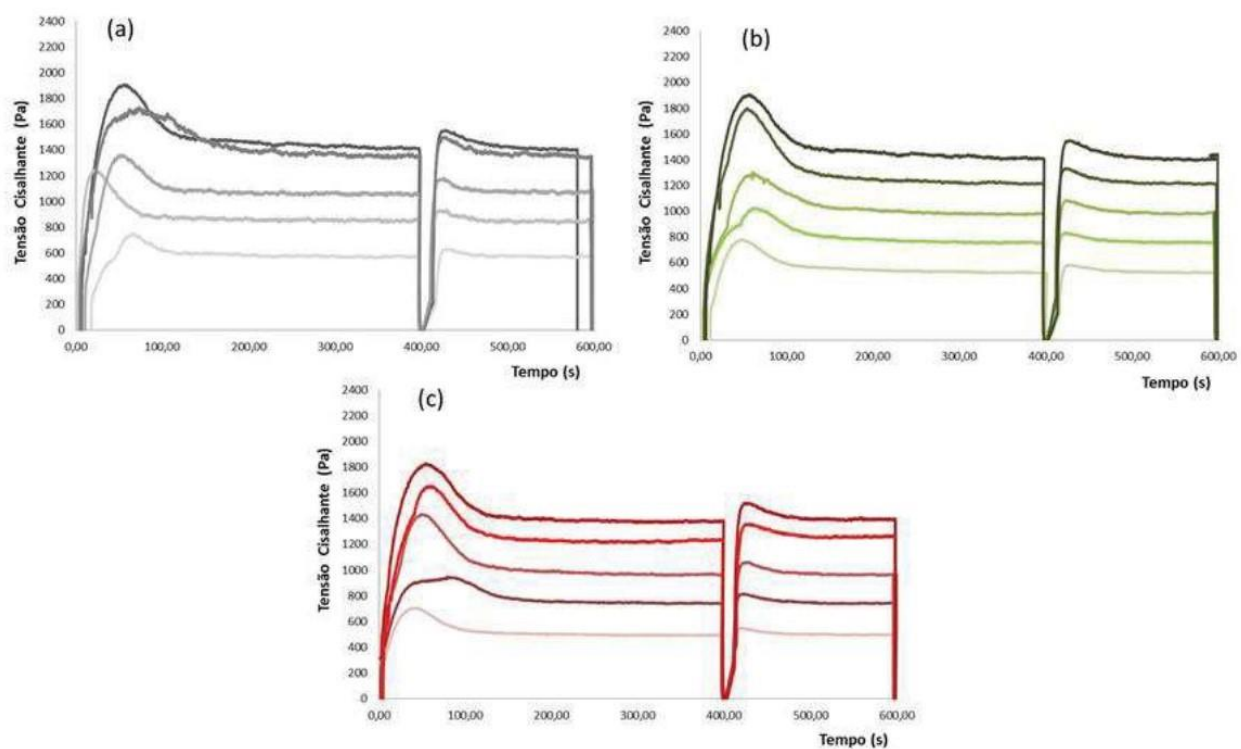


Figura 8. Gráficos da tensão cisalhante contra o tempo para as três areias analisadas pelo autor em questão. Retirada de Carvalho (2017).

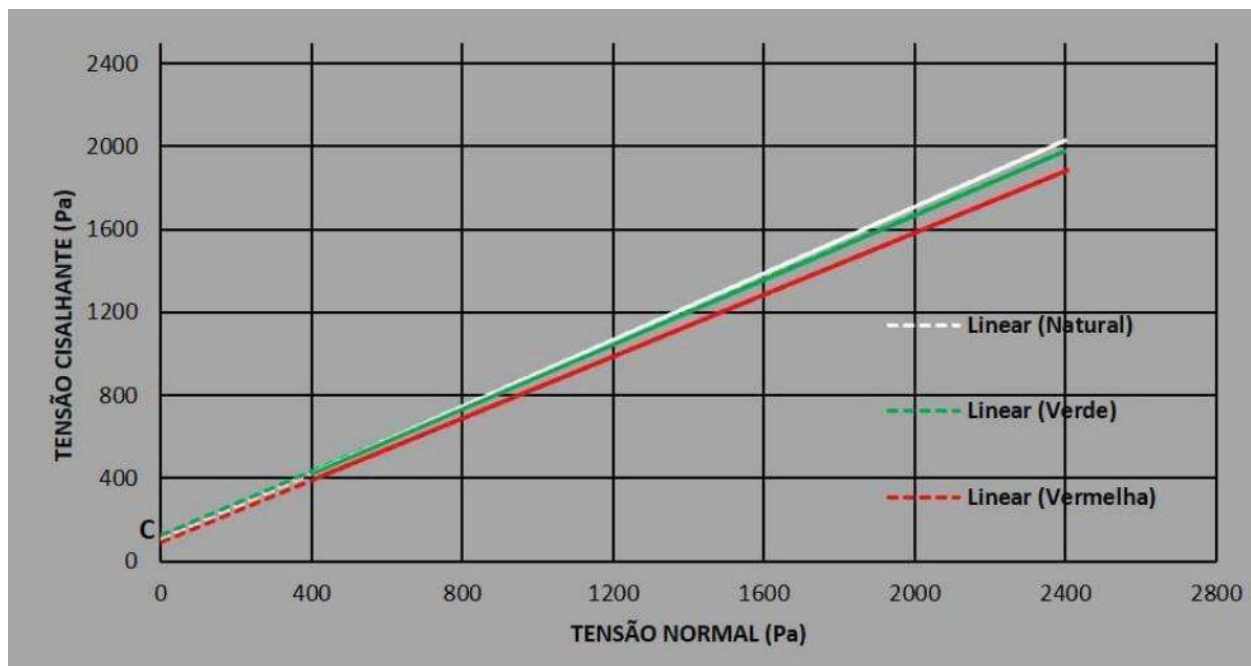


Figura 9. Gráfico da tensão cisalhantes contra a tensão normal para as três areias analisadas pelo autor. Retirada de Carvalho (2017).

De maneira geral, o fluxo de trabalho adotado para a elaboração dos modelos físicos em caixas de areia seguiu aquele idealizado por McClay & White (1995). Conseqüentemente, os modelos foram desenvolvidos em caixas de areia de dimensões controladas, podendo ou não estar sobre uma base de acrílico, mas, comumente, sendo limitados lateralmente por anteparos. Estes anteparos laterais, por sua vez, podem ser acoplados a um motor ou não, recebendo as nomenclaturas de paredes móveis ou fixas, respectivamente.

A estratégia adotada para simular as descontinuidades do embasamento foi utilizar as duas metades de uma mesma folha de acetato ou cartolina seccionada e, conseqüentemente, prendê-las às paredes móveis acopladas aos motores. Desta maneira, ao considerar que o motor imprime um esforço paralelo ao deslocamento dos seus braços, a orientação do corte nas folhas foi reproduzida de modo a refletir aquela do protótipo em relação ao campo de tensões pertinente (Figura 10).

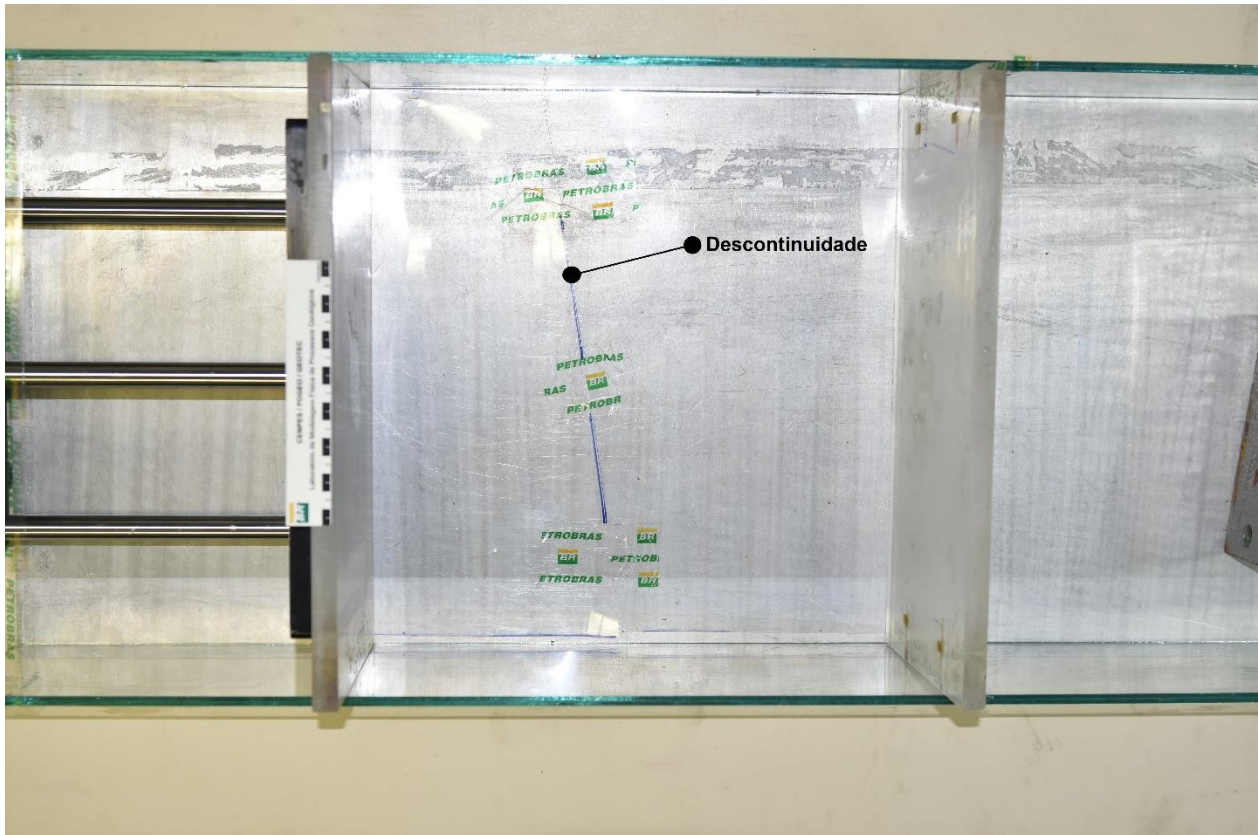


Figura 10. Arquitetura inicial dos modelos físicos confinados em caixas de acrílico. Em destaque, descontinuidade impressa a partir da secção de uma folha de acetato.

Em alguns modelos, com finalidades experimentais, foi implementado silicone sobre o localizador do experimento (i.e., o corte que separa as duas folhas a serem tracionadas pelo motor).

Este material é comumente utilizado para simular o comportamento plástico da crosta inferior ou do manto litosférico. Simula, também, a deformação em evaporitos e folhelhos, rochas cujo comportamento é considerado viscoso em função do prolongado intervalo de tempo de deformação. No caso deste trabalho, o objetivo da implementação do silicone, entretanto, foi o de melhor distribuir a deformação e, se possível, não mais a restringi-la ao interior do rifte.

A utilização do silicone altera as condições de contorno previstas nos modelos anteriores. Fatores cinemáticos, como a taxa de deformação, devem ser ajustadas para uma melhor correspondência às características do silicone, que devem ser devidamente

informadas pelo fabricante e ratificadas, se possível, pelo laboratório onde os modelos foram desenvolvidos.

O embasamento dos modelos, enquanto indeformado, era composto pela intercalação de camadas tabulares brancas e pretas, alternadamente dispostas. Durante a fase de abertura inicial, foram depositadas alternadamente camadas de cor azul e vermelha mediante a utilização de uma peneira. Essas camadas representaram as sucessões sin-tectônicas, referentes à sedimentação durante a fase E1 da bacia de Volta Redonda (Figura 11).

O motor foi o responsável por traduzir, em escala de laboratório, as fases tectônicas previstas na literatura adotada para a bacia de Volta Redonda. Sob uma taxa controlada e um deslocamento final programado computacionalmente, o motor arrastou as folhas que em si estavam presas, ocasionando a manifestação do rifte.

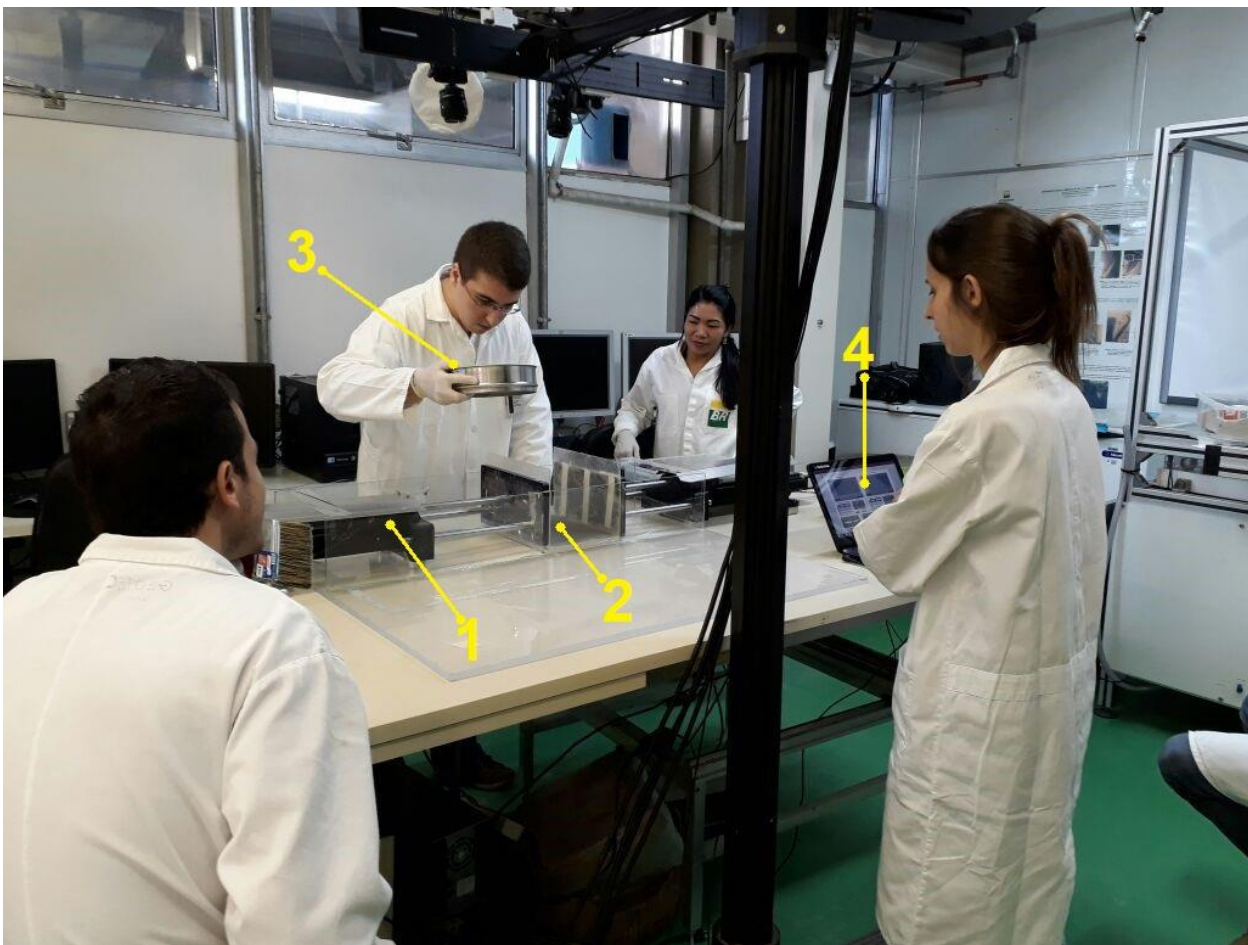


Figura 11. Fase inicial de sedimentação do embasamento. Destacados na imagem (1) Motor (2) Caixa onde o modelo será desenvolvido (3) Método de sedimentação adotado (4) Computador para controle dos parâmetros de deformação.

Uma vez todas as fases de deformação finalizadas, o modelo foi coberto por uma camada de areia branca e umedecido. Aproximadamente vinte e quatro horas depois, foram realizados cortes perpendiculares à sua estruturação (i.e., à estrutura anteriormente impressa nas folhas de acetato ou cartolina) com o intuito de serem fotografados, interpretados e, finalmente, incorporados a um *software* de modelagem digital (Figura 12).



Figura 12. Imagem espontânea tirada a partir de uma câmera fotográfica durante o momento de corte das seções do modelo.

Para sintetizar e organizar as informações transmitidas no decorrer deste tópico, foi elaborada uma planilha com alguns dos parâmetros geométricos e cinemáticos dos modelos elaborados.

Tabela 1. Principais parâmetros dos modelos adotados.

Parâmetros		Modelo 6	Modelo 8	Modelo 9
Dimensões Iniciais [cm]	X	35	35	37
	Y	37	37	50
	Z	7,2	7,2	7,2
Escala Horizontal		1:100000	1:100000	1:100000
Escala Vertical		1:50000	1:50000	1:50000
Deformação Imposta		Extensão obliqua assimétrica	Transtensão sinistral relativa	Extensão obliqua assimétrica + Transtensão sinistral relativa
Quantificação do Deslocamento do Motor [cm]		5	2,5	5 + 2,5
Taxa de Deformação [mm/h]		20	20	100
Dimensões Finais [cm]	X	40	37,5	42
	Y	-	-	52,5
	Z	-	-	-

5.2. Modelos digitais

Foi desenvolvido um fluxo de trabalho com o objetivo gerar modelos tridimensionais digitais a partir da interpretação das seções dos modelos em caixa de areia. O *software* utilizado para esta tarefa foi o SKUA-GOCAD™, da PARADIGM, devido à facilidade que apresentou em importar e posicionar corretamente no espaço as imagens.

Inicialmente, foram incorporadas ao *software* as seções extraídas dos modelos adotados (Figura 13). A disposição paralela das seções, devidamente espaçadas entre si, foi ajustada para que a bacia resultante dos experimentos ficasse em conformidade com a orientação da bacia de Volta Redonda.

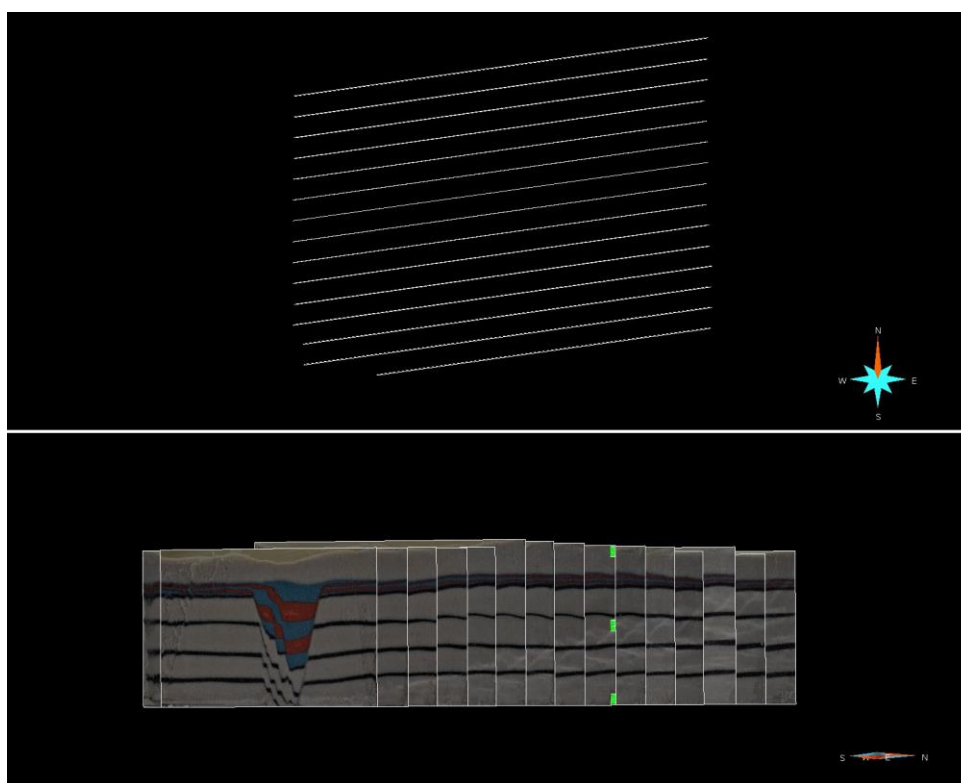


Figura 13. Seções importadas para o *software* SKUA™ - PARADIGM. Visadas de topo e de Leste.

O próximo passo consistiu na interpretação das falhas e horizontes. As falhas foram interpretadas seção a seção (Figura 14). Em cada seção, diferentes cores foram utilizadas para que fosse feita a diferenciação entre cada estrutura. Um dos papéis do intérprete é identificar a repetição das estruturas conforme se avança através das seções do modelo. Desta maneira, os traços de uma mesma estrutura identificada em diversas seções foram agrupados sob uma mesma cor. O conjunto desses traços, agrupados e modelados, compuseram o arcabouço estrutural dos modelos.

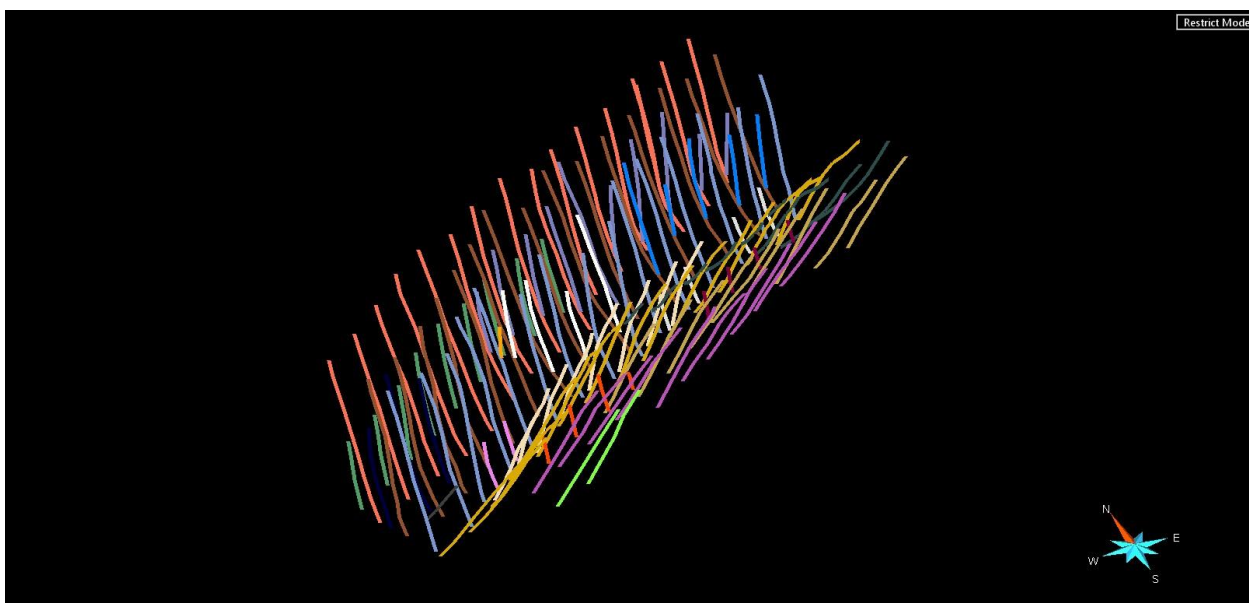


Figura 14. Conjunto de traços de falhas. Cada traço de uma mesma cor representa a sua interpretação em uma seção. Cores diferentes representam falhas diferentes.

A interpretação, por sua vez, de cada um dos horizontes que representam, tridimensionalmente, uma mesma camada culminou na elaboração de superfícies que povoaram o modelo digital (Figura 15). A ferramenta de interpretação permite ao usuário traçar linhas que ele julgue pertinentes à sua interpretação. Desta maneira, ele pode definir se deseja traçá-las no topo ou na espessura mediana de cada camada. Para este trabalho, foram interpretados os topos de cada camada do preenchimento da bacia. O embasamento, por sua vez, foi interpretado apenas no horizonte guia (i.e., o delgado horizonte preto) superior, que mantinha contato com o preenchimento sedimentar, servindo, assim, como horizonte limítrofe entre essas unidades.

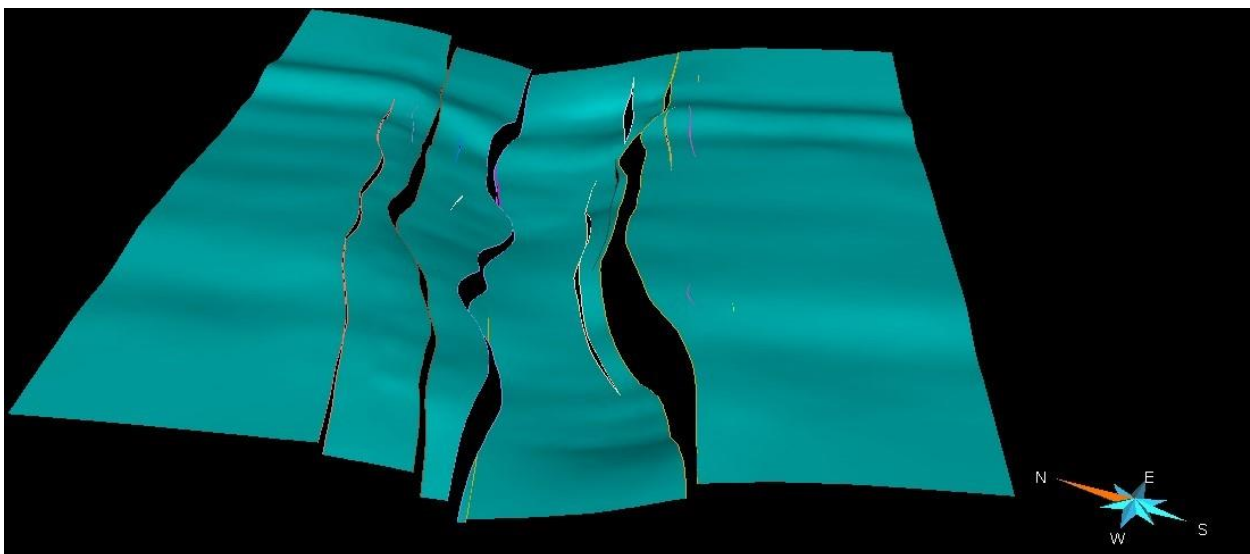


Figura 15. Superfície de topo gerada para o preenchimento sedimentar de um modelo distensivo. Na superfície, é possível identificar os rejeitos das falhas que a interceptam.

Dentre diversas funcionalidades, os produtos do fluxo de trabalho de modelagem digital (i.e., as superfícies e as falhas) são capazes de comportar atributos, calcular parâmetros e servir como base para diversos experimentos.

6. Resultados

Foram elaborados nove modelos com o intuito de reproduzir as duas primeiras fases tectônicas às quais a bacia de Volta Redonda fora submetida.

A primeira abordagem consistiu em determinar o modelo teórico para o arcabouço tectônico da bacia de Volta Redonda. Segundo a base bibliográfica adotada, o modelo de uma bacia assimétrica seria o mais apropriado. De acordo com este modelo, a extensão derivada de tensões de diferentes magnitudes culminaria em uma macrogeometria em hemigráben, cuja falha principal se localiza na borda mais próxima à principal tensão.

Todos os modelos, com a exceção de dois, simularam tectônicas puramente distensivas. Os parâmetros estabelecidos e as condições de contorno, entretanto, variaram de acordo com o resultado obtido à cada modelo, seguindo uma sequência lógica e evolutiva das geometrias resultantes e buscando que estas, progressivamente, se aproximassem daquelas propostas pelo modelo conceitual.

6.1. Modelos preliminares

Os resultados obtidos com base nos três primeiros modelos, aqui denominados preliminares, serviram de calibração para se alcançar a geometria descrita na literatura. A observação da geometria inicial proposta para a bacia de Volta Redonda pelo modelo conceitual adotado, em associação à presença de um alto interno cuja origem fora atribuída às fases iniciais ou anteriores à abertura do rifte, incentivaram a elaboração de hipóteses sobre um modelo de abertura que contemplasse ambos os cenários.

Desta maneira, com o intuito de reproduzir a configuração proposta para a bacia de Volta Redonda à época da sua abertura (E1), os dois primeiros experimentos sobrepuseram fases de abertura assimétrica e simétrica oblíquas, alternando entre si a ordem de execução dos eventos.

A Figura 16, a seguir, ilustra uma seção extraída de cada um dos modelos descritos anteriormente. É possível identificar que o Modelo 1 conseguiu desenvolver não

somente a geometria em hemigráben, mas também um *horst* no embasamento que poderia ser comparado ao Alto de Jardim Amália, descrito na literatura e ilustrado no modelo conceitual como uma feição geológica anterior ou contemporânea à abertura da bacia (Figura 16A). O Modelo 2, entretanto, afastou-se da geometria proposta pelos modelos de Negrão (2014) e Negrão *et al.* (2015) (Figura 16B). Antes de descartar integralmente a arquitetura e as condições de contorno que embasaram o segundo modelo, entretanto, testar-se-á outra abordagem para o seu desenvolvimento.

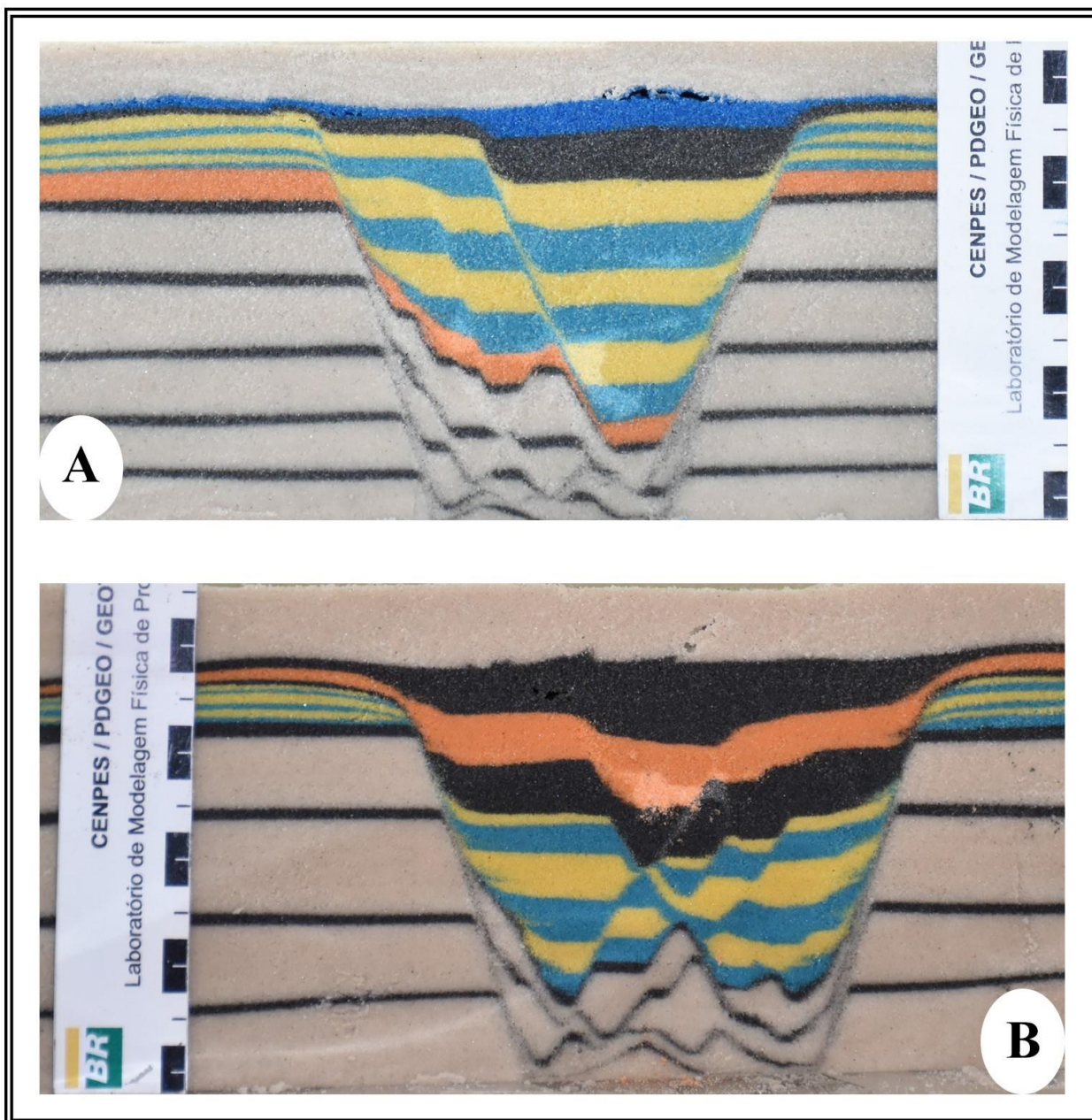


Figura 16. (A) Modelo preliminar em que uma fase de distensão simétrica foi sobreposta a uma anterior assimétrica. (B) Modelo preliminar em que uma fase de distensão assimétrica foi sobreposta a uma anterior simétrica. Estes modelos foram gerados com o intuito de preservar as principais características de cada fase, previstas na literatura. Desta maneira, almejava-se representar as estruturas propostas no modelo conceitual adotado. Entretanto, o que se observou é o predomínio da primeira fase tectônica sobre a estruturação do embasamento. Apesar da escassez de detalhes sobre as suas elaborações e a breve discussão proposta, são nítidos os altos estruturais gerados internos à bacia em ambos os casos e a bipolaridade dos depocentros, principalmente no caso da Figura 16B.

O terceiro modelo, para fins de verificar os resultados obtidos no segundo, repetiu a sua arquitetura. No entanto, foi testada a implementação do silicone sobre o localizador do experimento (i.e., o corte que separa as duas folhas a serem tracionadas pelo motor) (Figura 17).

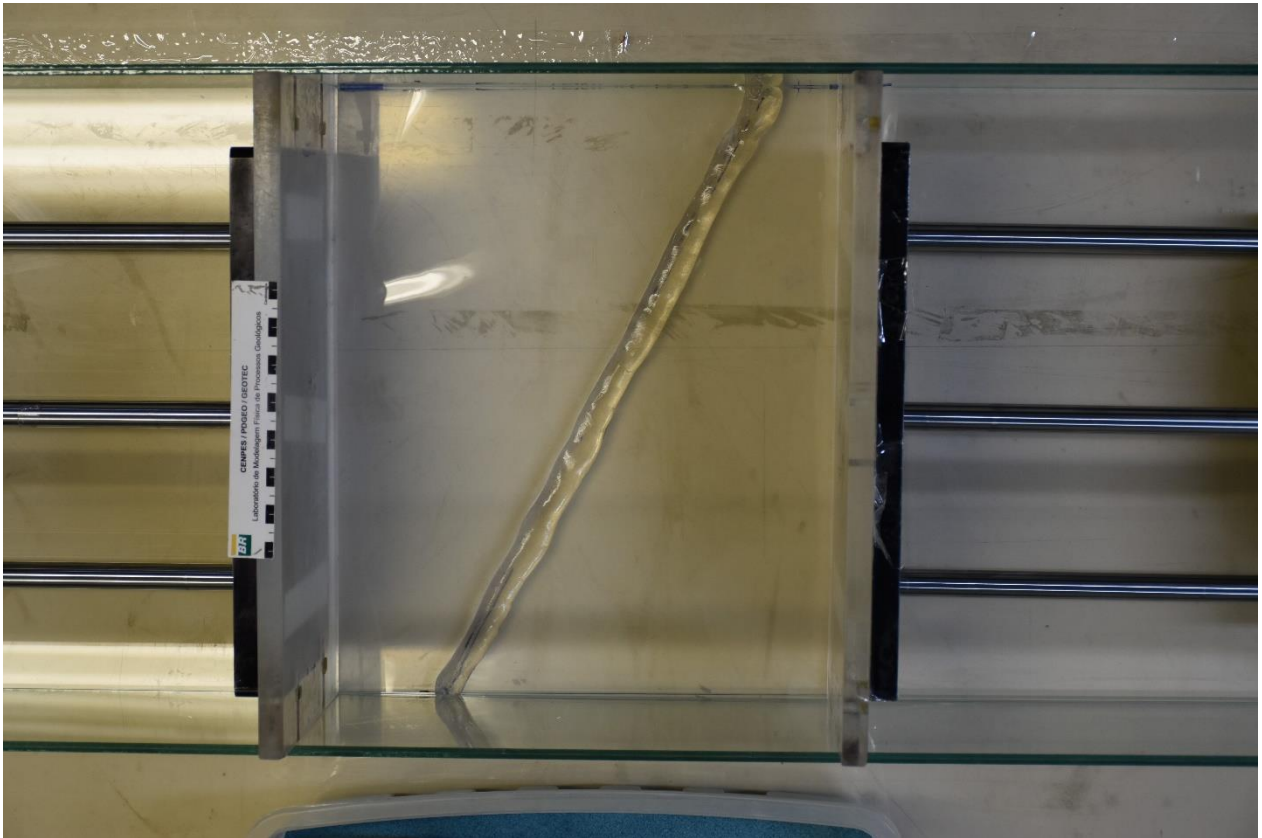


Figura 17. Configuração extraordinária para o Modelo 3, em que fora utilizado silicone ao longo do encaixe das folhas de acetato (i.e., o localizador do rifte).

Desta maneira, foi proposto que o terceiro modelo corresponderia à sobreposição das fases de abertura simétrica, anterior, e assimétrica, ambas sob taxas de deformação maiores devido à incorporação do silicone. A geometria pretendida, logicamente, deveria se aproximar daquela exposta no segundo modelo.

O resultado, novamente, não correspondeu satisfatoriamente à geometria apresentada no modelo conceitual (Figura 18). A espessura exagerada do embasamento sobre o delgado lineamento de silicone, aliada à taxa de deformação mais lenta que a

devida e à pouca abertura total planejada, colaboraram para que este modelo tenha culminado em uma geometria diferente daquela planejada. Além disso, o alto custo do material tornava inacessível o seu uso exagerado.

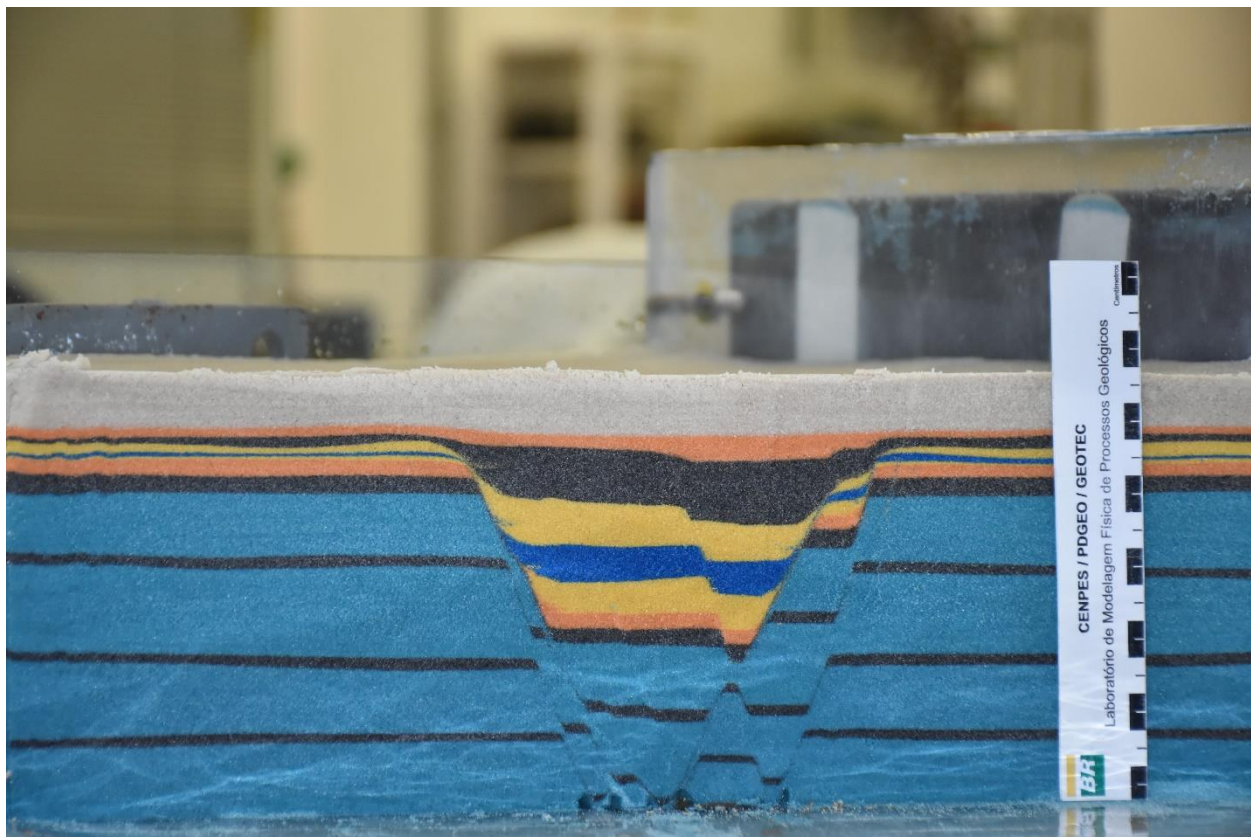


Figura 18. Seção extraída do Modelo 3. É possível analisar a desproporção de espessuras entre as camadas de areia depositadas e o silicone, resultando em um produto pouco verossímil.

6.2. Modelos adotados

A partir do quarto modelo confeccionado, desenvolveram-se majoritariamente modelos distensivos assimétricos com o intuito de representar o primeiro evento tectônico identificado na bacia de Volta Redonda, com exceção do sexto e do nono, que serão detalhados posteriormente no item 6.3.1 e 6.3.3.

Esta abordagem, entretanto, vai de encontro à geometria alcançada no Modelo 1, quando foram reproduzidas ordenadamente uma fase de abertura simétrica seguida por outra assimétrica. A geometria obtida no modelo em questão foi a que mais se aproximou da geometria inicial para a bacia de Volta Redonda proposta por Negrão (2014) e Negrão *et al.* (2015). Contudo, sua adoção seria inviabilizada pela arquitetura necessária para a sobreposição da fase TS. Em outras palavras, a disposição dos motores e o espaço disponibilizado para o seu manuseio impossibilitaria a implementação da fase deformacional seguinte. Por estes motivos, o resultado alcançado pelo modelo piloto não foi levado adiante.

Dos modelos seguintes, então, foram selecionados três para terem as suas concepções detalhadas. Os modelos em questão foram destacados por melhor representarem as geometrias idealizadas no modelo conceitual de Negrão: um modelo de rifteamento assimétrico de alta obliquidade ($\alpha = 82^\circ$); um modelo transcorrente sinistral de baixa obliquidade ($\alpha = 26^\circ$); e um modelo de sobreposição de um rifteamento assimétrico de alta obliquidade ($\alpha = 82^\circ$) por uma fase transcorrente sinistral de baixa obliquidade ($\alpha = 8^\circ$). Os ângulos adotados fazem referência à orientação das tensões das duas primeiras fases de deformação da bacia de Volta Redonda.

O fluxo de trabalho adotado para a confecção desses modelos, assim como as arquiteturas e condições de contorno contempladas por eles, são descritos de maneira mais elaborada no artigo “PHYSICAL MODELING OF SUPERIMPOSED TECTONIC EVENTS IN THE VOLTA REDONDA BASIN, SOUTHEASTERN BRAZIL”, submetido à revista *Brazilian Journal of Geology* e contemplado no Apêndice 2 deste documento.

De acordo com o protótipo em que foi baseado o modelo e nas condições de contorno que envolviam o alvo deste estudo, foram incorporadas à sua arquitetura folhas

de acetato ou cartolina sobre sua base presas aos motores. Este material teve o papel de localizar a abertura da bacia e condicioná-la segundo as condições de contorno.

Uma vez definida e confeccionada a arquitetura do modelo, foram depositadas areias brancas e pretas que compuseram o seu embasamento. Alternadamente, caracterizavam camadas mais espessas de areia branca e mais delgadas de areia preta.

A Figura 19, abaixo, sintetiza a arquitetura prevista para os modelos 6 e 8, respectivamente (Figuras 19A e 19C). Também apresenta seções representativas de um corte idealizado perpendicular à estruturação impressa nas folhas de acetato, representada pela coloração cinza mais escura na base dos modelos (Figuras 19B e 19D).

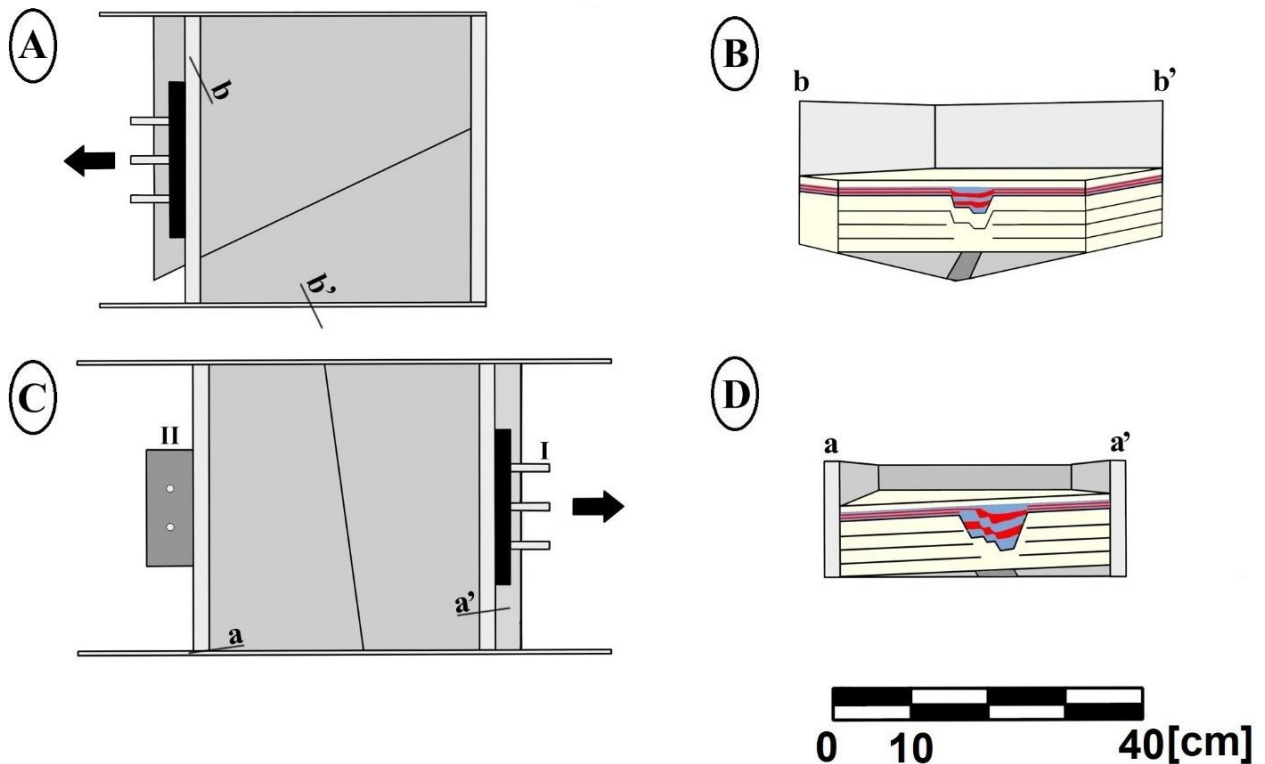


Figura 19. Representação esquemática dos modelos 6 e 8. (A) Arquitetura inicial do Modelo 6. Direção e sentido da deformação indicados pela seta preta. (B) Em perspectiva, seção representativa de um corte ideal realizado ortogonalmente à estruturação impressa na folha de acetato. (C) Arquitetura inicial do Modelo 8, anterior à sedimentação. Direção e sentido da deformação indicados pela seta preta. (I) Motor. (II) Suporte de chumbo para manter a integridade das paredes. (D) Em perspectiva, seção representativa de um corte ideal realizado ortogonalmente à estruturação impressa na folha de acetato.

A arquitetura e as condições de contorno que abarcaram o Modelo 9, entretanto, tiveram que ser replanejadas. Suas dimensões foram aumentadas e barreiras de areia foram utilizadas para conter o desmoronamento previsto durante a troca de posição dos motores, ou seja, quando a fase de abertura fosse sucedida pela transcorrência (Figura 20).

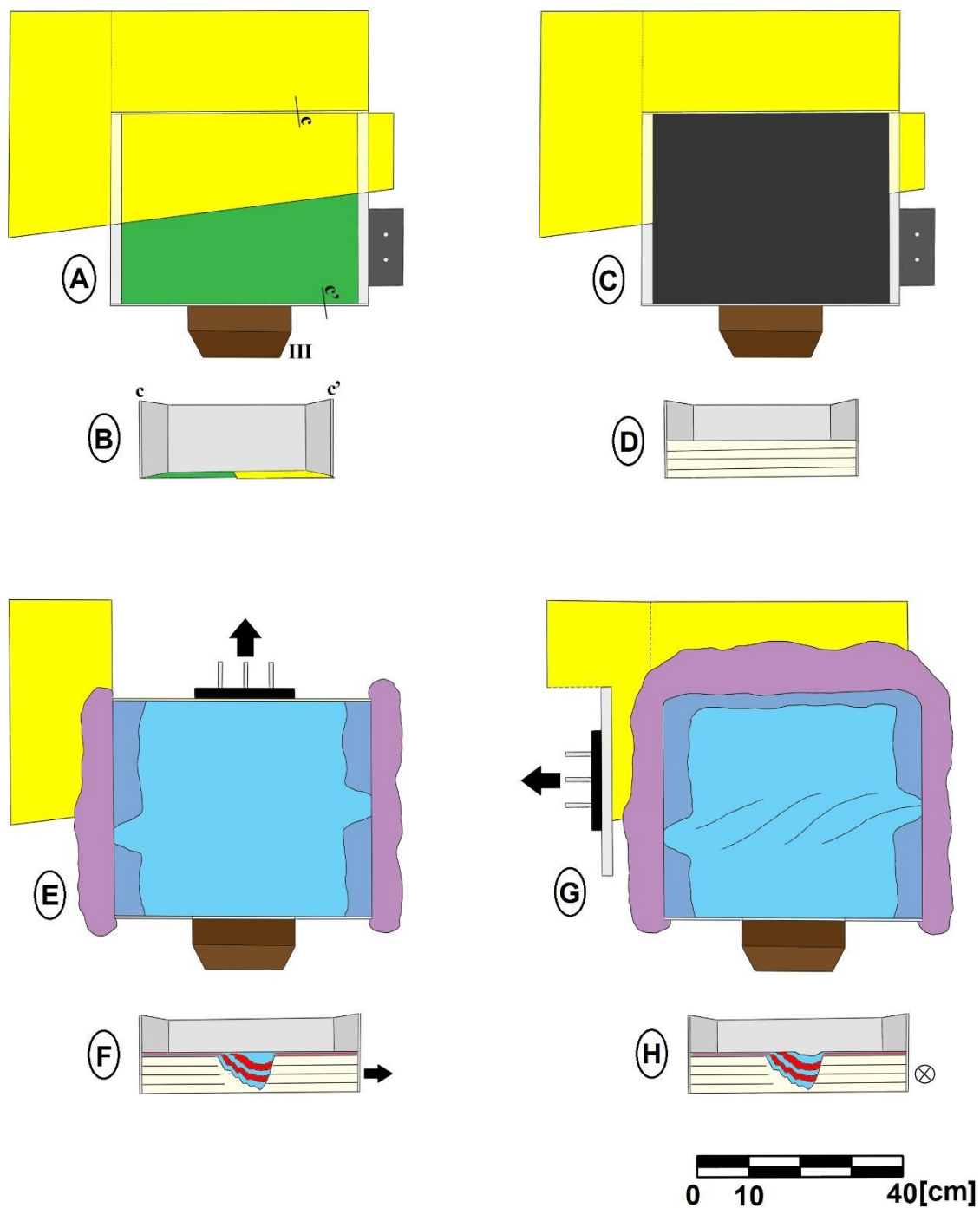


Figura 20. Representação esquemática do modelo 9. (A e B) Arquitetura inicial do Modelo 9, anterior à sedimentação. A estrutura de cor marrom (III) é um suporte de madeira utilizado para manter a integridade da parede na qual está presa. Vistas de cima e lateral, respectivamente (C e D), do Modelo 9 após o término da sedimentação, ainda indeformado. Vistas de cima e lateral, respectivamente (E e F), do Modelo 9 após o término da primeira fase de deformação: distensão assimétrica oblíqua (5 cm de deslocamento do motor). Vistas de cima e lateral, respectivamente (G e H), do Modelo 9 após a sobreposição da fase transcorrente sinistral (2,5 cm de deslocamento do motor) à abertura anterior. Vistas de cima e lateral, respectivamente.

6.3. Interpretação dos modelos adotados

De forma análoga ao item 6.2, este item abreviará as interpretações mais minuciosamente descritas no artigo científico em anexo. Desta forma, para mais detalhes, deve-se consultar o Apêndice 2 deste documento.

6.3.1 Modelo 6

O primeiro registro de estruturas em planta ocorreu após 0,5 cm de deslocamento do motor (Figura 21B). Eram falhas escalonadas localizadas diretamente sobre a separação das folhas de acetato.

Após 1 cm de deslocamento (Figura 21C), foram individualizados os primeiros depocentros do rifte. A geometria do modelo assemelhava-se, à esta etapa do fluxo de trabalho, a um complexo de bacias romboédricas.

Finalmente, aos 2,5 cm de abertura (Figura 21F), ocorreu a união dos depocentros, formando uma única e contínua bacia.

Em seção (Figuras 21G e 21 H), interpretou-se cortes com pouca complexidade estrutural, mesmo quando comparados às seções extraídas dos modelos preliminares. Nesse contexto, além das falhas 'oblíquas' que limitavam o rifte, poucas estruturas foram interpretadas em seu interior, a maioria deformando apenas as primeiras camadas depositadas durante a deformação.

As seções evidenciam que a profundidade do embasamento estava a pouco mais de 1 cm de profundidade em relação ao topo do preenchimento sedimentar, enquanto que a abertura máxima bacia alcançou aproximados 5,5 cm. Considerando os fatores de escala apresentados anteriormente no item 5.1, a geometria resultante equivale a uma bacia com aproximadamente 50 m de profundidade e 5,5 Km de abertura máxima em superfície.

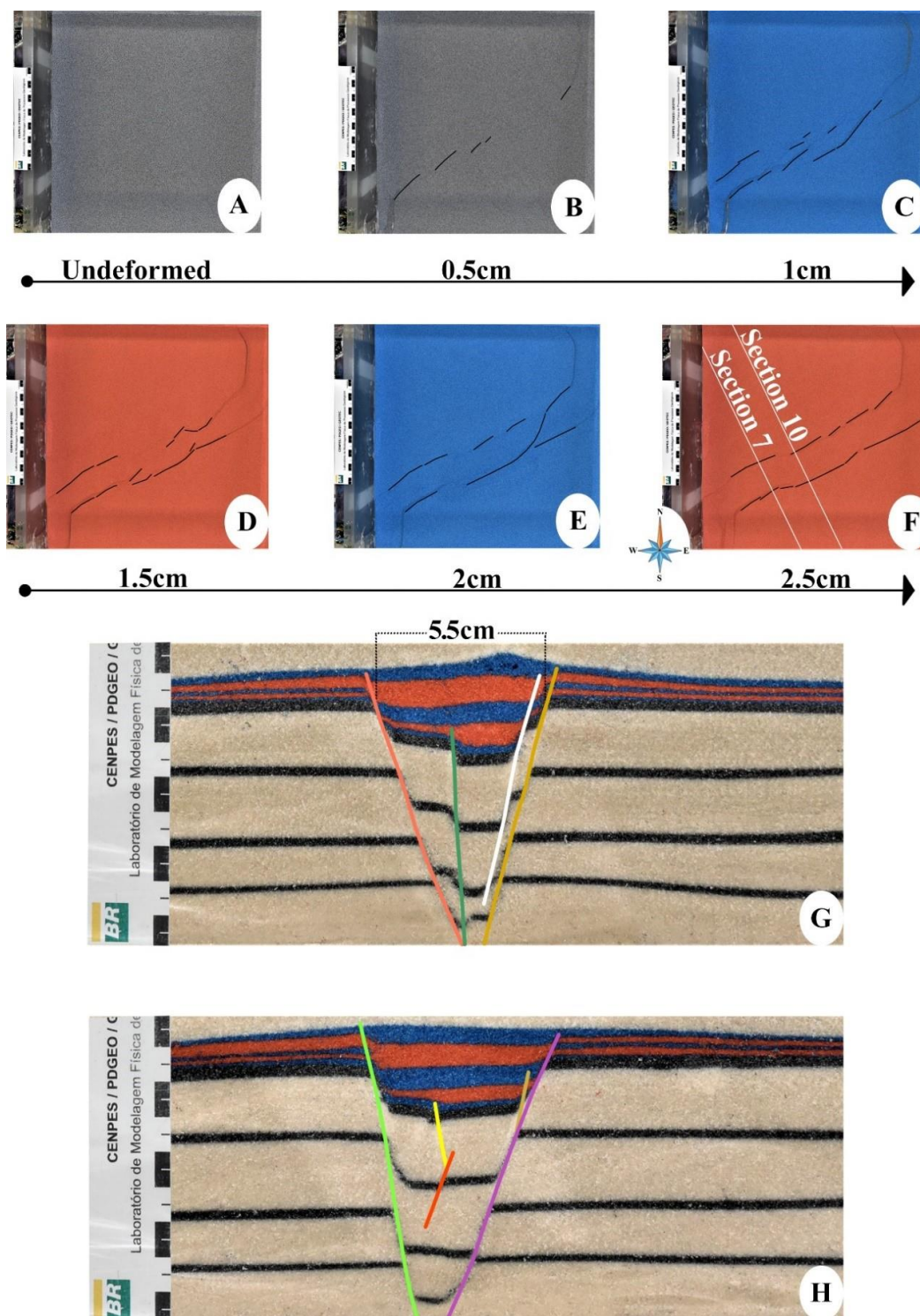


Figura 21. (A - F) Imagens em planta do Modelo 6. São expostas em ordem crescente de deformação, com intervalos de 0,5 cm entre si, referentes ao deslocamento do motor. (F) Modelo em planta após os 2,5 cm totais de deformação, anterior à deposição da camada azul final. Em destaque, a localização das seções G (Section 7) e H (Section 10). A lateral esquerda das seções, em planta, está localizada mais próxima à parede que se moveu.

6.2.2 Modelo 8

O desenvolvimento das primeiras estruturas ocorreu pouco antes que o modelo alcançasse 1cm de abertura (Figura 22B). Nesse contexto, falhas em um padrão suavemente escalonado, segmentado e concordantes com a estruturação impressa no embasamento delimitaram as falhas de borda do rifte.

Indo de encontro ao modelo anteriormente analisado no item 6.3.1, o rifte se desenvolveu sem que houvesse a segmentação do seu depocentro.

Mesmo ao se analisar em planta, o modelo comportava uma maior pluralidade estrutural, se comparado ao Modelo 6. Processos de estruturação externa ao rifte com orientação diferenciada e migração das falhas da borda 'flexural' para o interior da bacia são exemplos da maior abundância de estruturas interpretadas neste modelo.

Em seção (Figuras 22G e 22H), o rifte apresentava uma geometria em hemigráben cujas falhas da borda 'flexural' compunham degraus progressivamente mais profundos em direção à falha principal, próxima da qual estavam encerrados os mais espessos preenchimentos sedimentares.

As seções evidenciam que a profundidade do embasamento estava a pouco mais de 4 cm de profundidade em relação ao topo do preenchimento sedimentar, enquanto que a abertura máxima bacia alcançou aproximados 11 cm. Considerando os fatores de escala, a geometria resultante equivale a uma bacia com aproximadamente 200 m de profundidade e 11 Km de abertura máxima em superfície.

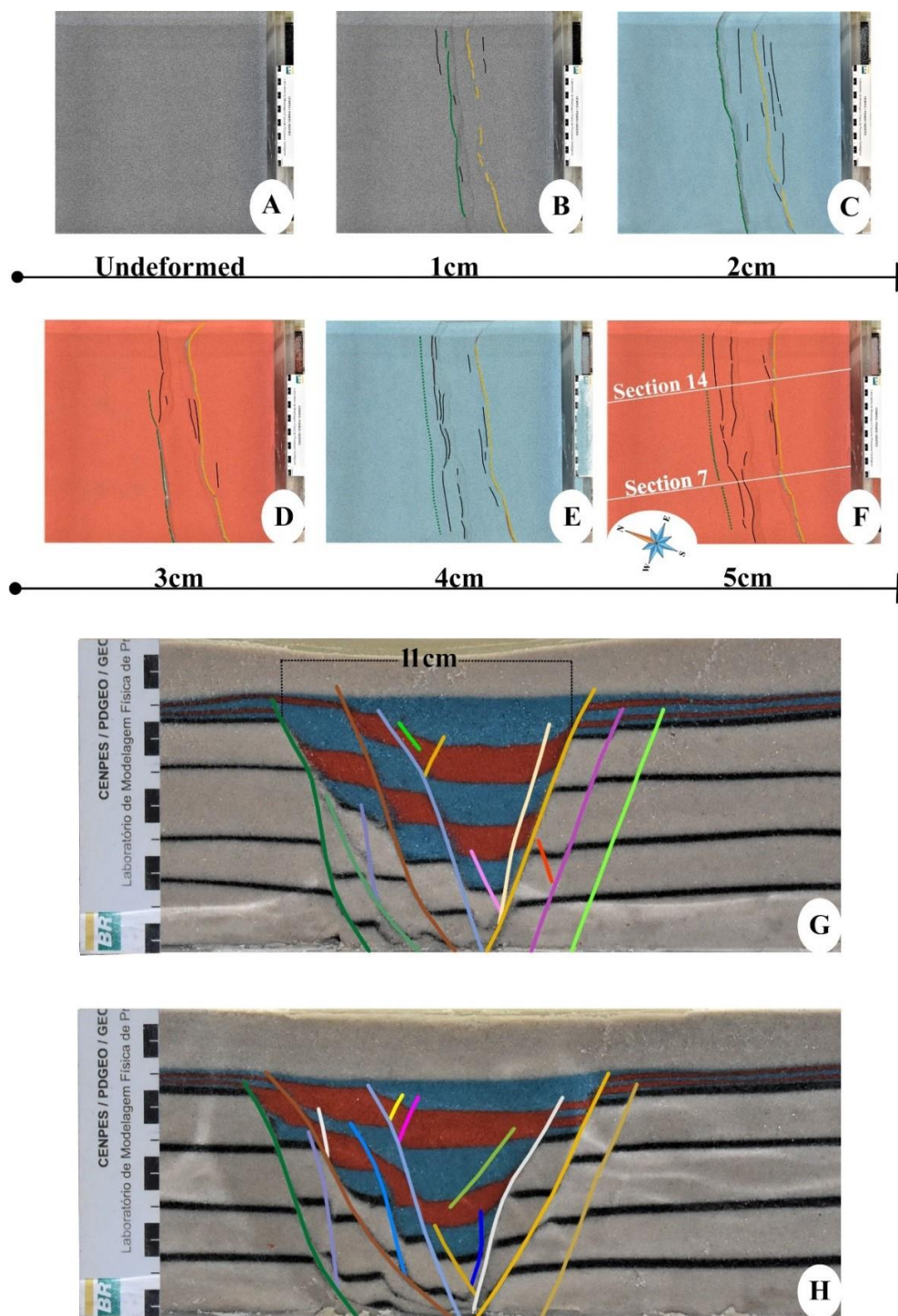


Figura 22. (A - F) Imagens em planta do Modelo 8. São expostas em ordem crescente de deformação, com intervalos de 1 cm entre si, referentes ao deslocamento do motor. (F) Modelo em planta após os 5 cm totais de deformação, anterior à deposição da camada azul final. As falhas de borda encontram-se coloridas segundo a paleta de cores adotada para a interpretação das seções. A linha tracejada de cor verde escura é uma indicação da localização em subsuperfície da falha principal da borda 'flexural', não mais ativa nos estágios de deformação apontados. Em destaque, a localização das seções G (Section 7) e H (Section 14). A lateral direita das seções, em planta, está localizada mais próxima à parede que se moveu.

6.3.3 Modelo 9

O desenvolvimento dos modelos 6 e 8, assim como suas interpretações, serviram como base conceitual para se compreender a estruturação resultante deste modelo. Suas condições de contorno, logo, foram ajustadas para que refletissem aquelas impostas anteriormente.

Apesar da arquitetura modificada, o nono modelo respondeu à primeira fase de deformação (i.e., abertura oblíqua assimétrica) de maneira bastante previsível, semelhante àquela exposta no Modelo 8.

Com a implementação da segunda fase de deformação (i.e., a transcorrência sinistral relativa), entretanto, estruturas oblíquas à estruturação principal do rifte compartimentalizaram o anteriormente contínuo depocentro da bacia (Figura 23F). Outra peculiaridade estrutural referente à esta fase foi a reativação das estruturas, principalmente do sistema de falhas que compunham a borda principal da bacia.

Em seção (Figura 23G e 23H), foi possível hierarquizar conjuntos de falhas segundo suas inter-relações. Além disso, foi possível analisar a geração de sistemas de grábens e *horsts* em superfície, além de inversões parciais dos depocentros, principalmente daqueles localizados próximos à borda 'flexural'.

Finalmente, foi notado um incremento tanto na espessura sedimentar quanto na máxima abertura em superfície do rifte após a sobreposição da segunda fase de deformação. As seções evidenciam que a profundidade do embasamento estava a pouco mais de 5 cm de profundidade em relação ao topo do preenchimento sedimentar, enquanto que a abertura máxima bacia alcançou aproximados 12,5 cm. Considerando os fatores de escala, a geometria resultante equivale a uma bacia com aproximadamente 250 m de profundidade e 12,5 Km de abertura máxima em superfície.

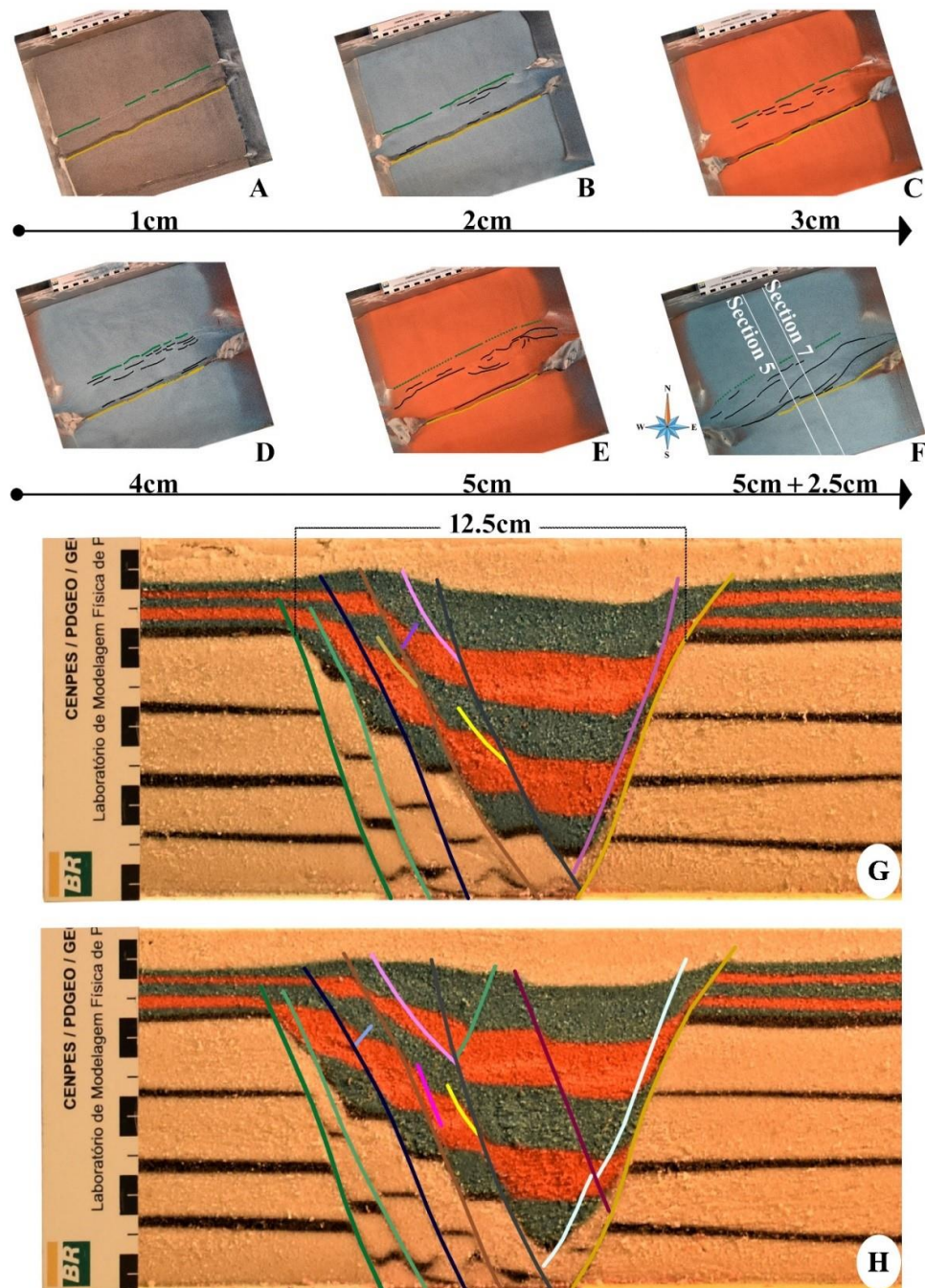


Figura 23. (A - E) Imagens em planta do Modelo 3, referentes à primeira fase de deformação (i.e., distensão assimétrica oblíqua). São expostas em ordem crescente de deformação, com intervalos de 1 cm entre si, referentes ao deslocamento do motor. (F) Modelo em planta após a sobreposição da fase transcorrente sinistral, com 2,5 cm de deslocamento da segunda parede móvel. As falhas de borda encontram-se coloridas segundo a paleta de cores adotada para a interpretação das seções. A linha tracejada de cor verde escura é uma indicação da localização em subsuperfície da falha principal da borda 'flexural', não mais ativa nos estágios de deformação apontados. Em destaque, a localização das seções G (Section 5) e H (Section 7). A lateral esquerda das seções, em planta, está localizada mais próxima à parede que se moveu (i.e., NNE segundo a roseta). Iluminação meridional.

6.4. Modelos Digitais

De acordo com o que fora exposto no item 5.2, o fluxo de trabalho apresentado culminou na criação de modelos digitais tridimensionais tanto do arcabouço estrutural quanto do 'estratigráfico' dos modelos físicos interpretados.

A Figura 24C representa o arcabouço estrutural do Modelo 9. Este arcabouço foi desenvolvido a partir da interpretação das falhas seção a seção. Nas figuras 24B e 24C, as cores das falhas que interceptam a superfície do modelo de caixa de areia são as mesmas daquelas do arcabouço digital, com o intuito de facilitar sua correlação visual.

A partir da construção do arcabouço estrutural, foi possível analisar a distribuição tridimensional e continuidade longitudinal das estruturas. Anteriormente, tinha-se apenas uma percepção pontual e desconexa das falhas durante a sua interpretação.

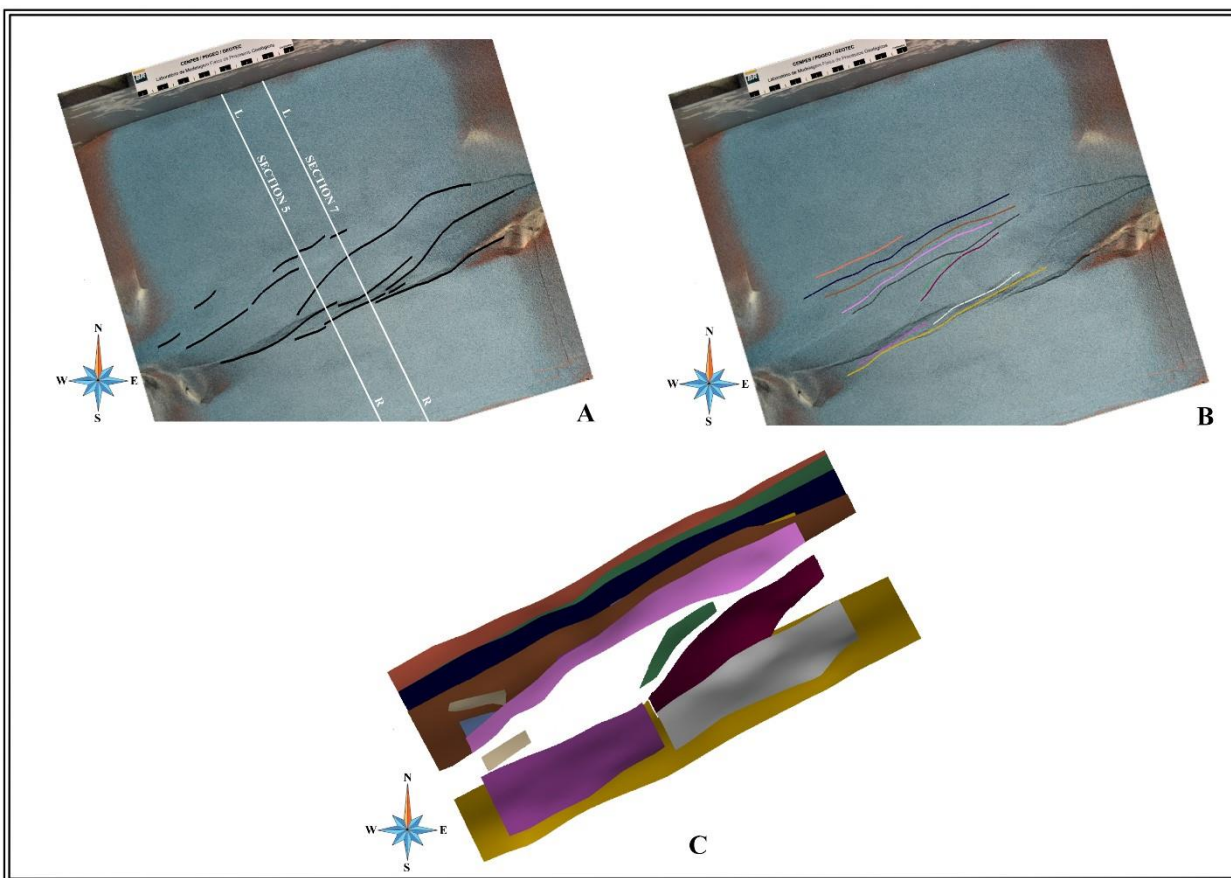


Figura 24. (A) Interpretação anteriormente proposta para o Modelo 9 em planta após a sobreposição dos 2,5 cm de transcorrência. (B) Intercepção das falhas interpretadas no *software* com a imagem de topo do modelo. (C) Arcabouço estrutural simplificado, produto da interpretação das 12 seções adquiridas no Modelo 9. Em (C), houve um prolongamento das extremidades das falhas durante a elaboração do modelo tridimensional devido às necessidades do *software*. Por este motivo, algumas vezes há discordância entre a extensão analisada em planta (B) e aquela modelada digitalmente (C). Iluminação meridional.

Com o intuito de guiar o leitor através dos resultados a seguir, as falhas foram dispostas, tanto em planta quanto em seção, e nomeadas (Figura 25).

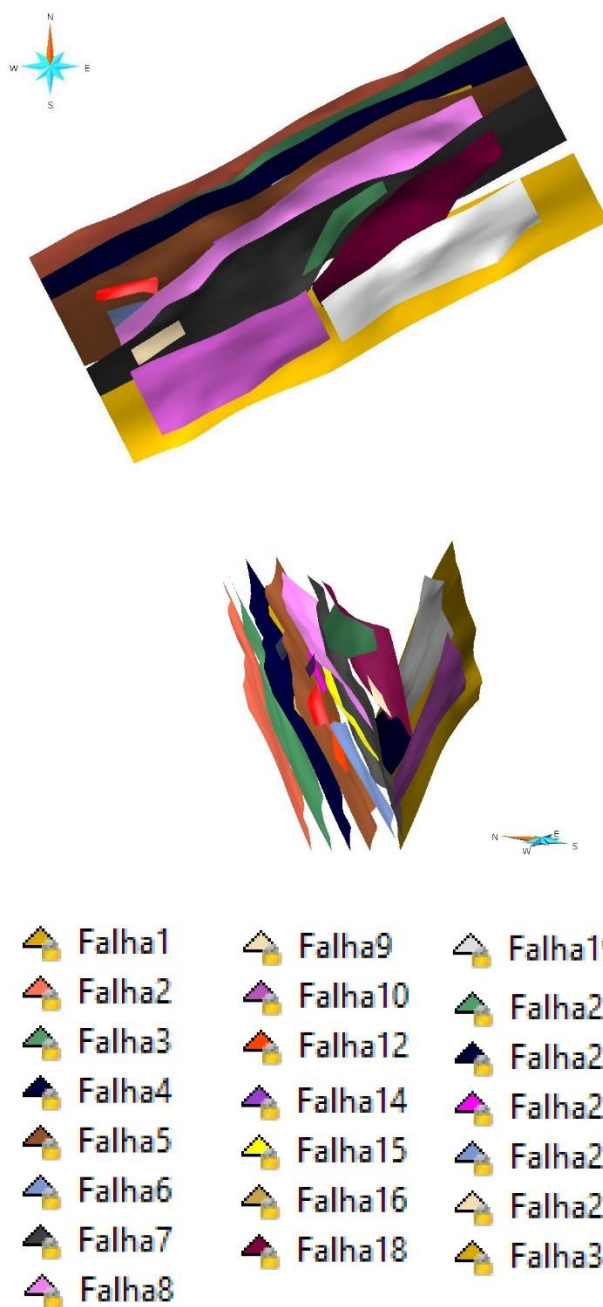


Figura 25. Identificação das falhas que compõem o arcabouço estrutural do Modelo 9.

Em seguida, buscou-se uma estratégia capaz de diferenciar as estruturas reativadas ou geradas durante a segunda fase de deformação (i.e., transcorrência sinistral - TS) daquelas pouco ou não reativadas, geradas durante a abertura do rifte. Como fora apontado anteriormente no item 6.3.3, estruturas oblíquas à maior elongação do rifte foram interpretadas na superfície do Modelo 9 após a implementação da transcorrência. Desta maneira, estabeleceu-se que a direção das falhas (i.e., *strike*) seria uma abordagem conveniente para a discriminação das falhas (Figura 26).

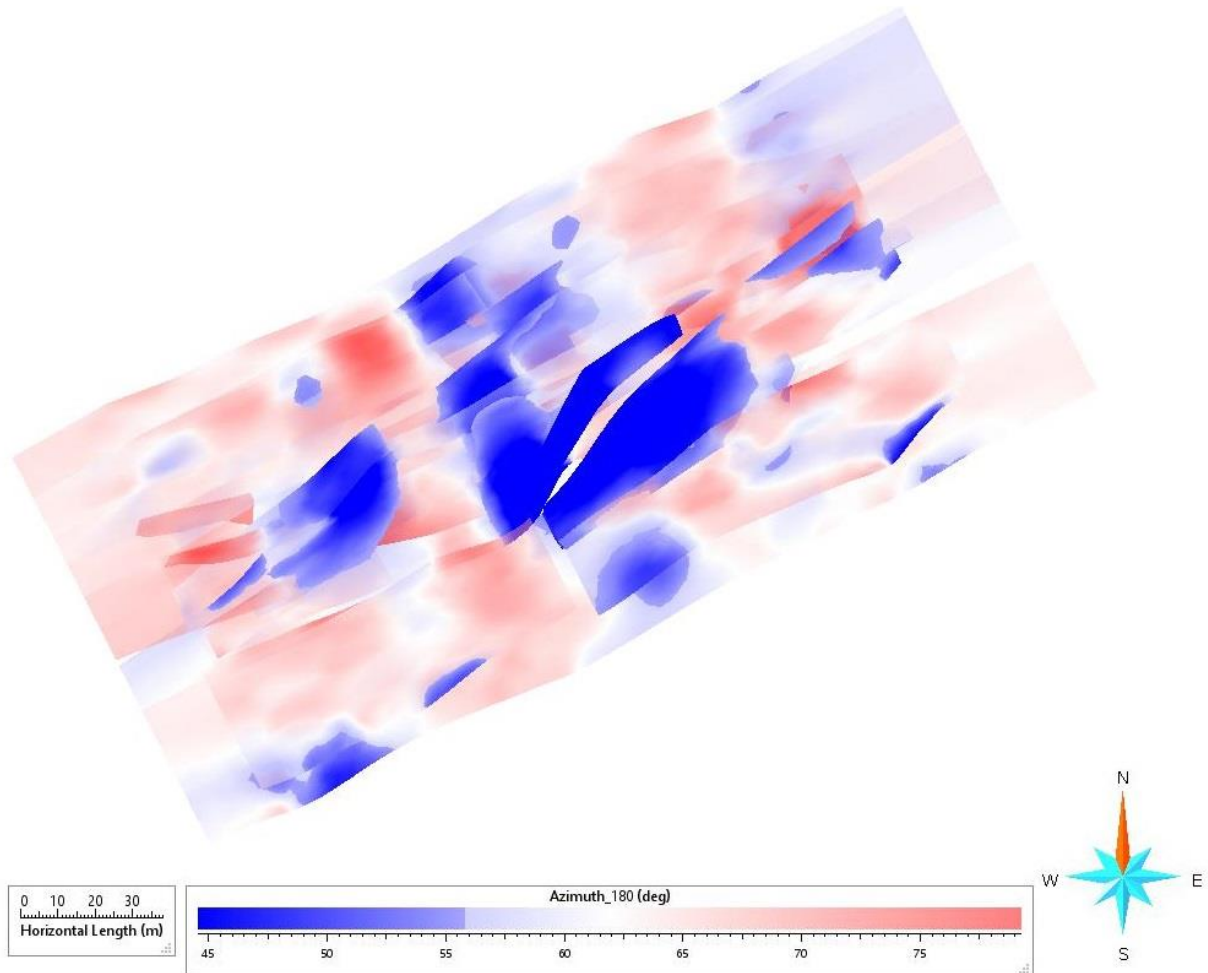


Figura 26. Arcabouço estrutural das falhas que compõem o Modelo 9 populado com a propriedade '*Azimuth*', responsável por traduzir a direção (i.e., *strike*) das estruturas.

A partir da análise visual do arcabouço estrutural povoado com a propriedade 'Azimuth', responsável por traduzir a direção das estruturas, foi proposto um agrupamento das falhas em famílias (Figura 27). Esta classificação foi baseada na variação da direção das falhas em relação às atitudes das estruturas geradas durante a fase de abertura do rifte. De acordo com esta classificação, as cores avermelhadas (Figura 26) indicariam falhas geradas durante a abertura do rifte, enquanto que as regiões ou falhas azuis (Figura 26) indicariam estruturas reativadas ou geradas durante a fase transcorrente, respectivamente.

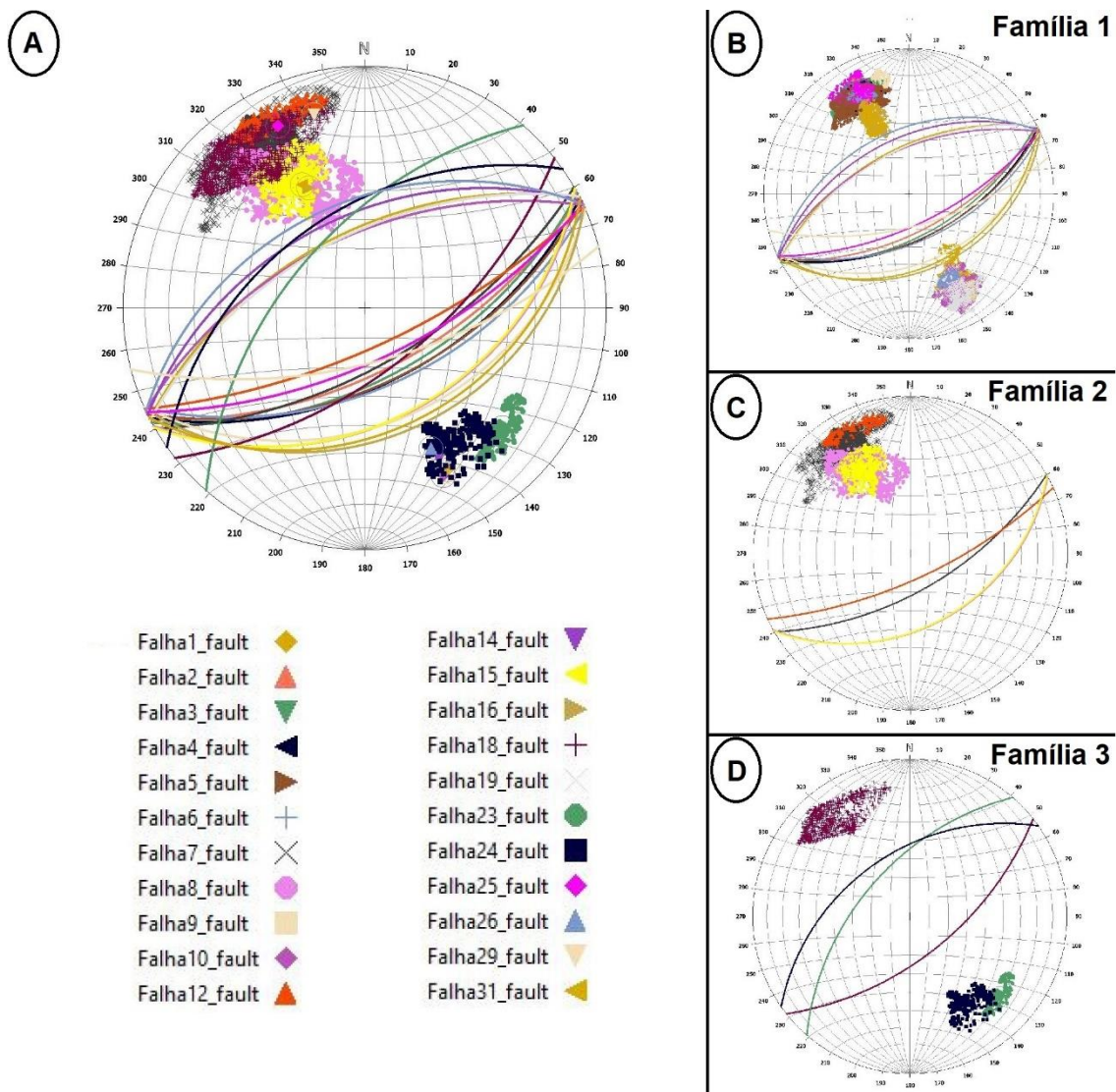


Figura 27. Estereogramas das falhas que compõem o arcabouço estrutural do Modelo 9. Visualização dos polos e do plano médio de caimento (A) de todas as falhas presentes no Modelo 9; (B) das falhas agrupadas na Família 1; (C) das falhas agrupadas na Família 2; (D) das falhas agrupadas na Família 3.

A Figura 27 apresenta os estereogramas de todas as falhas que compõem o arcabouço estrutural do Modelo 9. Por sua vez, o conjunto das figuras 27B a 27D, ilustra a classificação proposta para as estruturas a partir da estratégia adotada. Desta maneira, a Figura 27B estampa as estruturas geradas na fase de abertura do rifte em que foi identificada pouca a nenhuma reativação estrutural. Foram agrupadas nessa família as falhas 1, 2, 3, 4, 5, 6, 9, 10, 14, 16, 19, 25, 26, 29 e 31 (Família 1). Em seguida, a Figura 27C diferencia as estruturas cujas direções eram dúbias, não claramente podendo ser agrupadas na demais famílias. Nesta família, foram agrupadas as falhas 7, 8, 12 e 15 (Família 2). Enfim, a Figura 27D apresenta as falhas cujas direções diferiam das anteriormente apresentadas, potencialmente geradas ou muito reativadas na fase transcorrente. As falhas 18, 23 e 24 foram agrupadas nesta família (Família 3).

Em geral, nos estereogramas das figuras 27B a 27D, é possível definir que as falhas agrupadas na Família 1 possuem direções mais constantes em torno dos 60 e 70 graus. Por outro lado, as falhas agrupadas na Família 3 são caracterizadas por uma maior variação em sua direção, variando desde atitudes semelhantes àquelas das falhas geradas na fase de abertura a direções entre 40 e 50 graus.

Com a finalidade de corroborar os resultados obtidos a partir da classificação visual das falhas, foram gerados histogramas da distribuição das suas direções, apresentados de acordo com as famílias propostas anteriormente (Figura 28).

A partir da interpretação dos histogramas, é possível perceber que a classificação anterior foi adequada. A direção média das estruturas agrupadas na Família 1 é 63 graus, com desvio de até 7 graus. Por sua vez, a média das estruturas agrupadas na Família 3 é 51 graus, com desvio de até 10 graus.

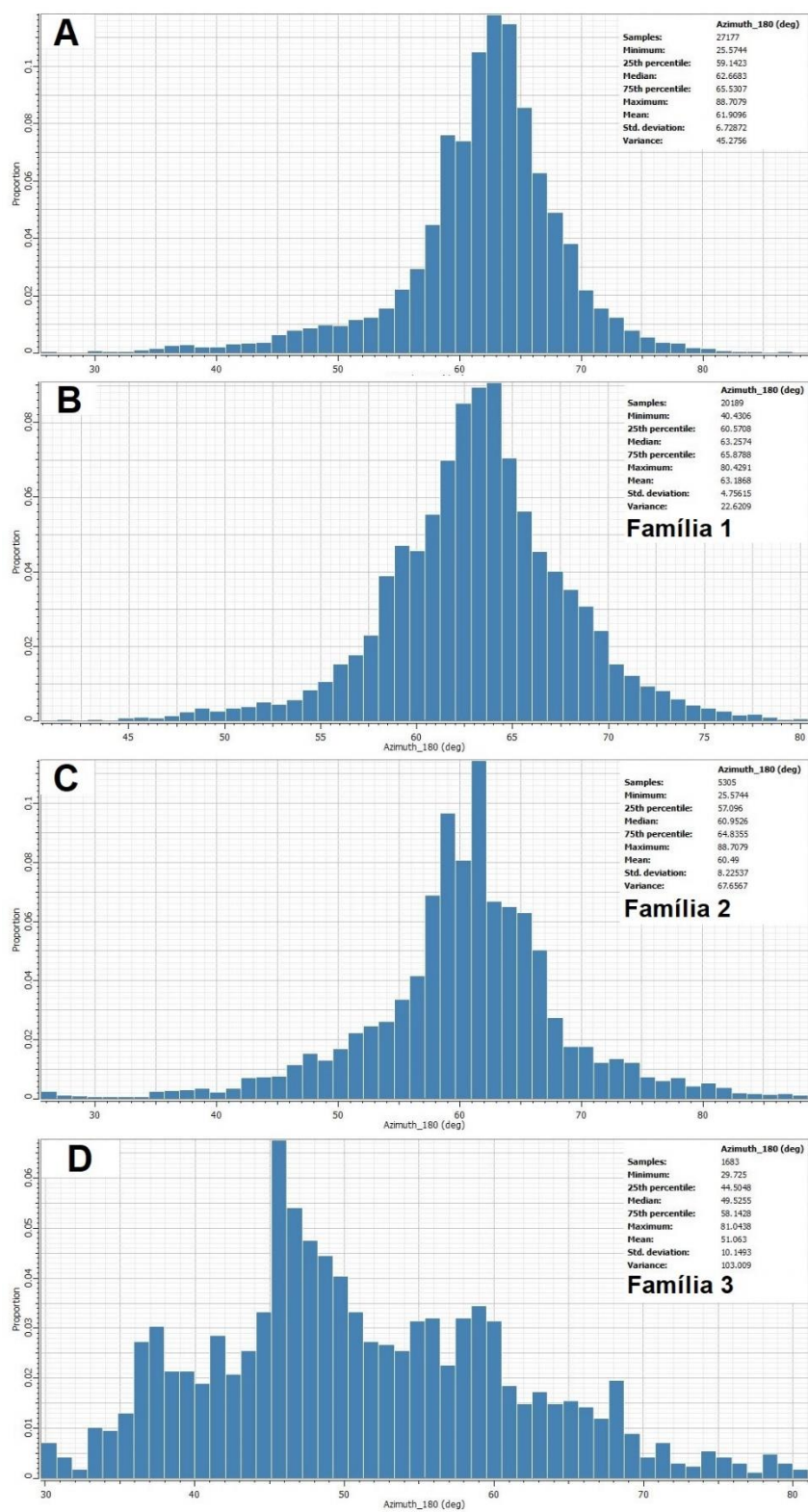


Figura 28. Histograma de distribuição da direção das falhas (i.e., strike) (A) que compõem o arcabouço estrutural do Modelo 9; (B) da Família 1; (C) da Família 2; (D) da Família 3.

Adicionalmente, foi possível resgatar algumas informações referentes às falhas que compõem o arcabouço estrutural do Modelo 9 (Figura 29).

Name	Scenario	Domain	Dip (Deg)	Azimuth (Deg)	Area (M ²)	Horizontal Extensi...	Vertical Extension...	Maximum Displacement (M)	Misfit (M)
Falha26	SnS	Depth	53.7461	243.227	318.795	52.6069	12.47	> 0,00	0.28
Falha14	SnS	Depth	58.6381	243.547	196.904	32.1545	11.42	0.18	0.16
Falha9	SnS	Depth	50.6354	65.5088	357.828	35.218	15.22	0.74	0.11
Falha23	SnS	Depth	64.885	220.674	1089.75	67.4902	29.64	0.84	0.11
Falha29	SnS	Depth	71.2872	75.3361	576.097	35.6275	28.45	3.76	0.10
Falha15	SnS	Depth	52.3871	60.8816	3620.95	219.167	33.15	3.96	0.23
Falha16	SnS	Depth	46.3668	64.7444	2237.68	128.558	21.39	4.08	0.22
Falha25	SnS	Depth	71.8106	64.4966	1326.32	67.4213	23.70	4.35	0.15
Falha31	SnS	Depth	48.5198	62.9383	1168.51	69.0948	29.51	4.67	0.21
Falha8	SnS	Depth	51.7582	60.84	6638.63	231.385	41.41	5.05	0.15
Falha12	SnS	Depth	76.7057	65.4179	1112.28	58.3504	45.89	5.41	0.10
Falha6	SnS	Depth	62.7459	65.7266	3159.29	81.898	62.28	20.91	0.08
Falha4	SnS	Depth	64.0978	62.9644	24166.4	356.921	112.34	29.28	0.09
Falha19	SnS	Depth	66.6974	242.896	7507.44	142.288	77.07	30.37	0.14
Falha24	SnS	Depth	57.6867	236.293	1548.74	86.1892	23.46	30.43	0.17
Falha3	SnS	Depth	65.8344	61.6545	21212.8	345.477	105.24	32.80	0.07
Falha10	SnS	Depth	65.1813	245.044	7520.36	151.358	82.56	36.20	0.11
Falha18	SnS	Depth	68.9238	51.5439	7080.13	131.222	78.64	37.03	0.12
Falha7	SnS	Depth	70.711	60.2316	22326.4	314.466	95.89	47.70	0.10
Falha2	SnS	Depth	68.4601	62.4782	21818.6	344.226	151.32	48.33	0.08
Falha5	SnS	Depth	64.143	63.3884	24489.8	319.371	100.86	52.84	0.08
Falha1	SnS	Depth	64.2872	242.717	25113.4	382.137	145.45	127.01	0.09

Figura 29. Dados extraídos das falhas que compõem o arcabouço estrutural do Modelo 9. No caso, destaca-se a coluna 'Maximum Displacement (M)', responsável por indicar o máximo rejeito vertical de cada estrutura.

A partir da Figura 29, organizada de acordo com os valores crescentes de 'Maximum Displacement' (i.e., rejeito vertical), é possível certificar que a falha principal do rifte (i.e., Falha 1) comportou grande parte da deformação.

Com a intenção de analisar mais detalhadamente o rejeito da falha principal do rifte, foi conduzido um método complementar de investigação. A falha foi, então, isolada e colorida de acordo com a quantidade de rejeito acumulado e nela foram traçadas as interseções dos horizontes por ela cortados (Figura 30).

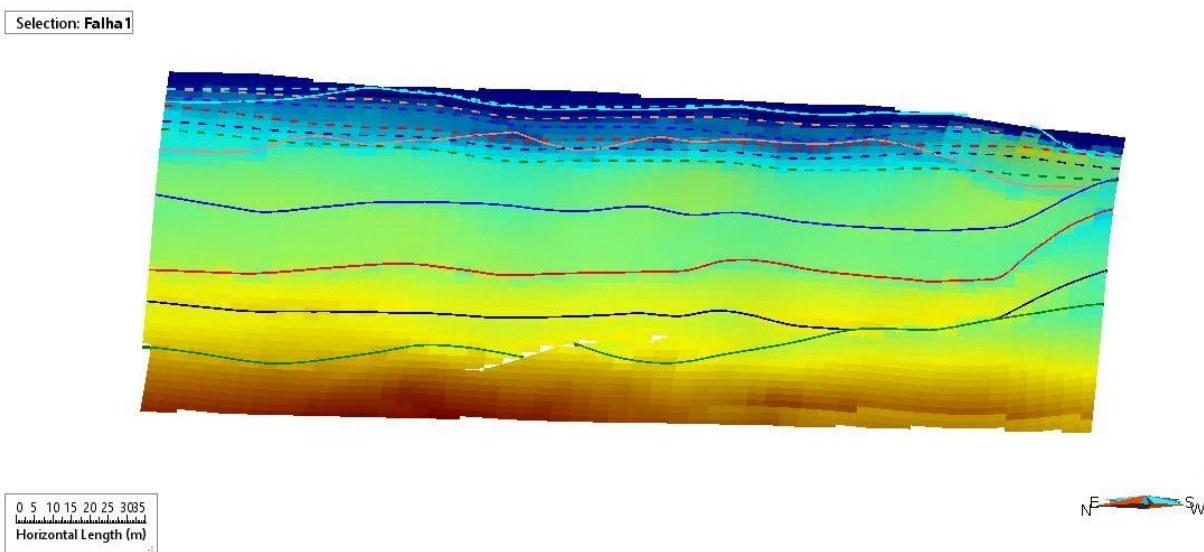


Figura 30. Falha principal do Modelo 9 (i.e., Falha 1) populada com uma propriedade capaz de traduzir o rejeito vertical acumulado. Os traços contínuos representam os horizontes à frente da falha, enquanto que os traços pontilhados representam os horizontes às costas da estrutura. Na imagem, as cores mais quentes representam os maiores rejeitos.

A partir da Figura 30, é possível deduzir que os maiores rejeitos estão relacionados ao horizonte do embasamento, gradativamente decrescendo em direção às camadas mais superficiais. Longitudinalmente, o rejeito aparenta aumentar em direção às porções centrais e setentrionais da estrutura.

A Figura 31, por sua vez, ilustra o volume tridimensional gerado para o Modelo 9. Nele, foram incorporados os dados estruturais, assim como as superfícies limítrofes de cada unidade sedimentar e o topo do embasamento.

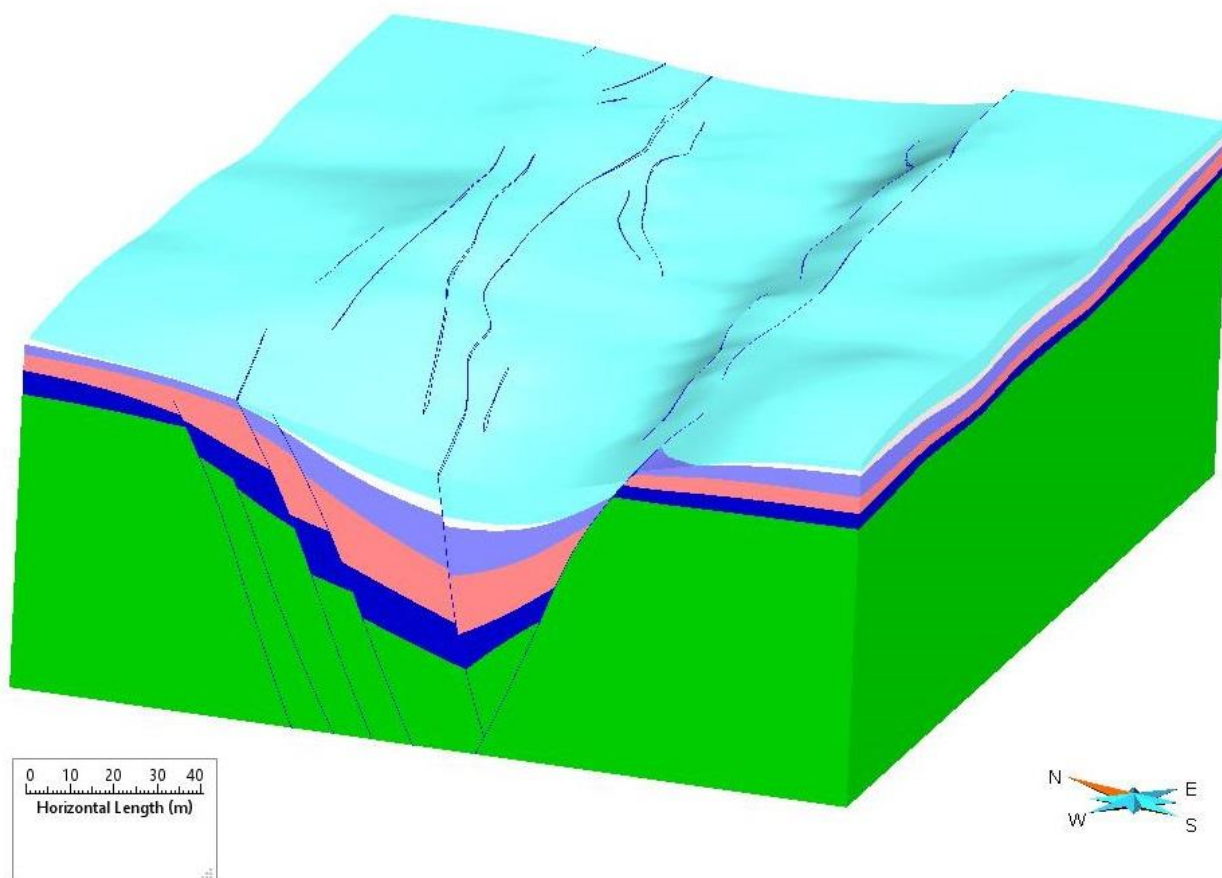


Figura 31. Volume representativo do arcabouço estrutural e 'estratigráfico' do Modelo 9.

A partir das informações que o volume tridimensional agregou à pesquisa, foi possível gerar mapas de espessura das distintas camadas que compuseram o Modelo 9 (Figura 32).

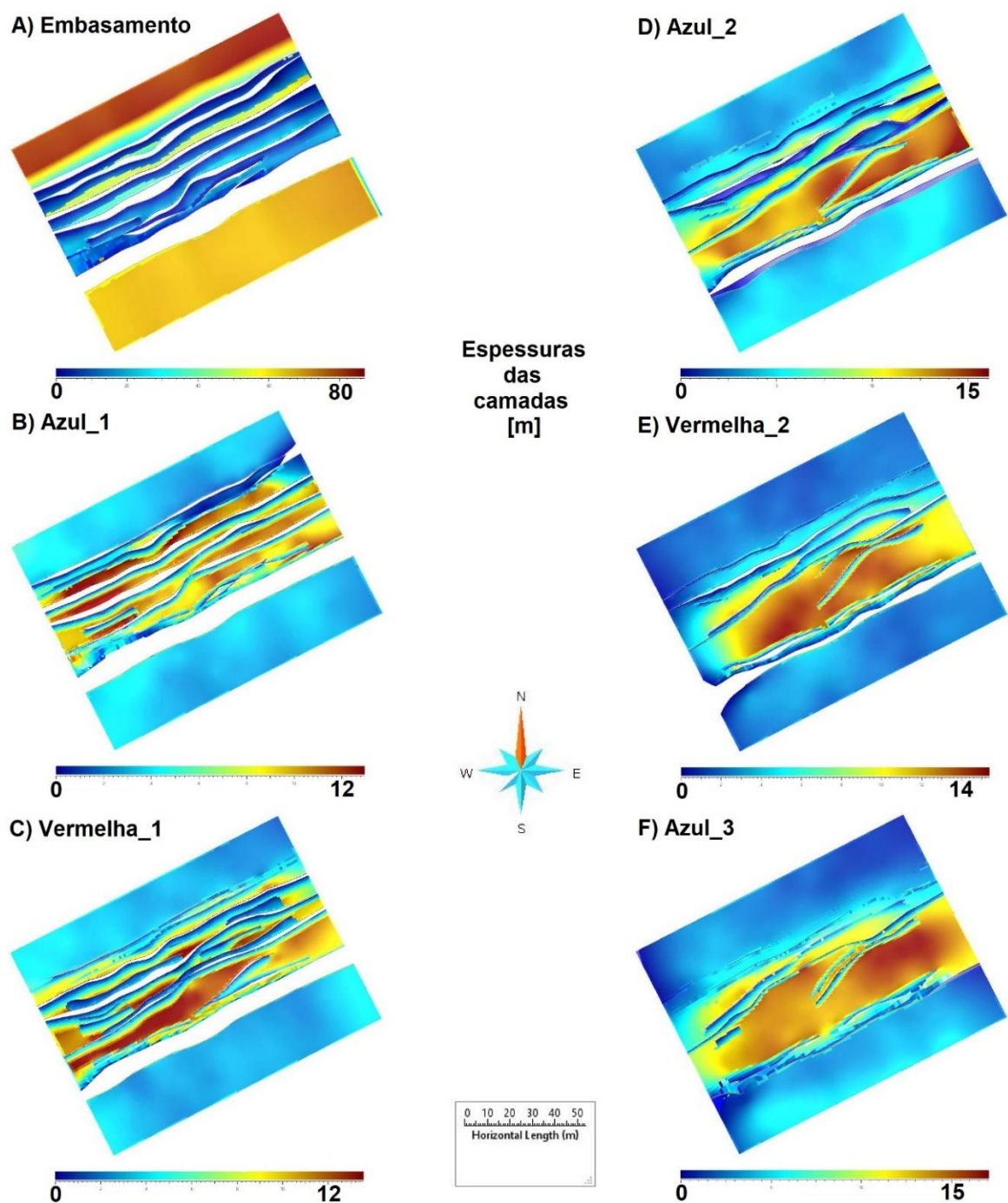


Figura 32. Mapa de espessura das camadas que compõem o arcabouço 'estratigráfico' do Modelo 9. Na imagem, as cores mais quentes representam as maiores espessuras sedimentares.

Dessa maneira, é possível explorar a variação da espessura das camadas de acordo com a sua disposição na bacia. Nesse contexto, admite-se que as maiores espessuras sedimentares das camadas inferiores restrinjam-se às adjacências do sistema de falhas principal da bacia, a Sudeste. As camadas mais superficiais, no entanto, são caracterizadas por uma maior dispersão. Suas maiores espessuras, inclusive, aparentam estar condicionadas pelas estruturas geradas ou reativadas na segunda fase de deformação (i.e., transcorrência sinistral – TS), como bem ilustrado pela Figura 32F.

7. Conclusões

O objetivo desse trabalho foi investigar os efeitos da reativação de estruturas e da sobreposição de eventos na evolução tectônica da bacia de Volta Redonda.

De maneira geral, os modelos físicos reproduziram satisfatoriamente a geometria proposta pelo modelo conceitual referente à configuração da bacia de Volta Redonda durante o Paleogeno. Em outras palavras, as atitudes das estruturas interpretadas dos modelos, tanto nas seções e quanto em planta, são análogas às aquelas preconizadas pelo modelo conceitual e mapeadas em campo (NEGRÃO, 2014), para as duas primeiras fases tectônicas identificadas na bacia de Volta Redonda. Essa analogia é mais evidente quando o modelo comparado é o Modelo 9.

Deve ser ressaltado, entretanto, que a carência de um anteparo equivalente ao Alto de Jardim Amália durante a abertura dos modelos os confere maior verossimilhança se comparados particularmente à evolução tectônica do graben de Casa de Pedra, ao invés da bacia de Volta Redonda. A ausência do anteparo, cuja função ao longo da deformação seria de compor um resistato durante os eventos de abertura da bacia, expõe uma limitação instrumental que acompanhou o desenvolvimento dos modelos expostos nesta dissertação. Além disso, é perceptível nos modelos conceituais que esta região exerce função protagonista durante os eventos de inversão parcial dos depocentros da bacia de Volta Redonda, ofício este que mesmo os modelos preliminares que tentaram reproduzir a geometria foram incapazes de simular.

Por sua vez, os modelos digitais gerados a partir da interpretação das seções extraídas dos modelos em caixa de areia se mostraram dados de grande serventia. Em posse desses modelos, foi possível realizar análises que não eram possíveis anteriormente, durante a interpretação das seções dos modelos físicos.

A partir da metodologia adotada para o agrupamento das falhas que compõem o arcabouço estrutural do Modelo 9, foi possível identificar as potenciais estruturas reativadas ou mesmo geradas na segunda fase de deformação. Nas falhas reativadas, foi possível perceber uma sequência evolutiva lógica das suas atitudes: primeiramente,

foram condicionadas pela relação entre o localizador e o campo de tensões primitivo e, posteriormente, manifestaram uma atitude condizente ao novo regime de tensões atuante.

Com base nessa mesma técnica, foi analisado que as estruturas geradas a partir da fase transcorrente tendem a manter atitudes semelhantes às daquelas geradas durante a abertura da bacia quando seus contatos estão próximos, adquirindo gradativamente obliquidade conforme se interioriza no rifte. Este condicionamento das estruturas decerto influenciou a distribuição dos dados e o cálculo da média das direções das falhas da Família 3 em seu histograma. Nesse contexto, conclui-se que estas estruturas certamente adquirem direções médias díspares àquelas apresentadas nos histogramas conforme se desenvolvem.

Os mapas de espessura, em concordância ao modelo conceitual adotado, localizam as maiores espessuras sedimentares nas adjacências do sistema de riftes principal a Sudeste. Entretanto, ressaltam que esta atribuição é mais admissível às camadas inferiores e intermediárias do preenchimento sedimentar da bacia. Além disso, os mapas destacam a reativação e consequente ramificação do sistema de falhas principal da bacia em direção ao seu interior, fazendo com que as maiores espessuras sedimentares das camadas mais superficiais estejam mais bem distribuídas ao longo da bacia ou, quando concentradas, localizadas próximas às estruturas geradas ou reativadas na fase transcorrente sinistral.

Desta maneira, os modelos físicos e digitais, produtos desta dissertação, serviram como método de comprovação e esclarecimento do que fora descrito na literatura acerca da estruturação da bacia de Volta Redonda. Com base no que fora discutido nesse item, então, conclui-se que o modelo conceitual de Negrão (2014) e Negrão *et al.* (2015) é viável para a evolução tectônica proposta para a bacia de Volta Redonda.

Referências Bibliográficas

Almeida, F.F.M. 1976. The system of continental rifts bordering the Santos Basin, Brazil. *An. Acad. Bras. Ciências*, Rio de Janeiro, 48:15-26.

Asmus, H.E. & Ferrari, A.L. 1978. Hipótese sobre a causa do tectonismo cenozóico na Região Sudeste do Brasil. In: *Aspectos Estruturais da Margem Continental Leste e Sudeste do Brasil*, Rio de Janeiro, CENPES/DINTEP, Série Projeto REMAC, 4, p. 75-88.

Bellahsen, N. & Jean Marc, D. 2005. Fault reactivation control on normal fault growth: an experimental study. *Journal of Structural Geology* 27, p. 769-780.

Brêda, T.C., Mello, C. L., M, Anderson 2018. Significado tectônico de padrões de lineamentos na porção emersa das bacias marginais do sudeste do Brasil e áreas de embasamento adjacentes. *Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ*, v. 41, p. 305-318.

Carvalho, T.S. 2017. Physical models of two-phase extensional basins and comparison with natural examples. *Dissertação de Mestrado em Geologia – Universidade Federal de Ouro Preto, Minas Gerais*, 171 p..

Cogné, N., Cobbold, P.R., Riccomini, C., Gallagher, K., 2013. Tectonic setting of the Taubaté Basin (Southeastern Brazil): insights from regional seismic profiles and outcrop data. *J. S. Am. Earth Sci.* 42, 194–204.

Corti, G. 2012. Evolution and characteristics of continental rifting: Analog modeling-inspired view and comparison with examples from the East African Rift System. *Tectonophysics* **522–523**:1–33.

Ferrari, A.L. 2001. *Evolução Tectônica do Graben da Guanabara*. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. 412 p.

Fetter, M. 2009. The role of basement tectonic reactivation on the structural evolution of Campos Basin, offshore Brazil: Evidence from 3D seismic analysis and section restoration. *Marine and Petroleum Geology* 26, p. 873-886.

Gartrell, A., Hudson, C., Evans, B. 2005. The influence of basement faults during extension and oblique inversion of the Makassar Straits rift system: Insights from analog models. *AAPG Bulletin*, v. 89, n. 4, p. 495-506.

Heilbron, M.C.L. 1995. O Segmento Central da Faixa Ribeira: Síntese Geológica e Ensaio de Evolução Geotectônica. Rio de Janeiro, 110p. (Tese de Livre-Docência, Departamento de Geologia-UERJ).

Heilbron, M.C.L., Mohriak, W., Valeriano, C.M., Milani, E., Almeida, J.C.H., Tupinambá, M. 2000. From collision to extension: The roots of the southeastern continental margin of Brazil. In: MOHRIAK, W.U. & TALVANI, M. (Eds.), *Atlantic Rifts and Continental Margins, Geology and Geophysics of Continental Margins*. American Geophysical Union, Geoph. Monogr. Series, 115:1-31.

Heilbron M., Pedrosa-Soares, A.C., Campos Neto M.C., Silva L.C., Trow R.A.J., Janasi, V.A. 2004. A Província Mantiqueira. In: Mantesso-Neto V., Bartorelli A., Carneiro C.D.R., Brito Neves B.B. (Eds.), *Geologia do Continente Sul-Americano: Evolução da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*. São Paulo, Editora Beca, p. 203-234.

Keep, M., Harrowfield, M. 2005. Basement reactivation and inversion mechanisms in the Timor and Norwegian seas. *Geological Society, London, Petroleum Geology Conference series*, v. 6, p. 861-871.

Maciel, I.B. 2016. Caracterização da deformação rúptil em afloramento da Formação Resende, Bacia de Volta Redonda (estado do Rio de Janeiro). Dissertação de Mestrado em Geologia - Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 80 p..

Maurin, J., Guiraud, R. 1993. Basement control in the development of the Early Cretaceous West and Central African Rift System. *Tectonophysics* 228, p. 81-95.

McClay, K.R., White, M.J. 1995. Analogue modelling of orthogonal and oblique rifting. *Marine and Petroleum Geology* 12, p. 137-151.

McClay, K.R., Dooley T., Whitehouse, P., Mills, M. 2002. 4-D evolution of rift systems: Insights from scaled physical models. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, **86**: 935-959.

Melo, M.S.; Riccomini, C.; Hasui, Y.; Almeida, F.F.M. & Coimbra, A.M. 1985. Geologia e evolução do sistema de bacias tafrogênicas continentais do sudeste do Brasil. *Rev. bras. Geoci.*, 15(3):193-201.

Negrão A.P. 2014. Evolução tectonossedimentar e deformação rúptil cenozoica da região da bacia sedimentar de Volta Redonda (Segmento Central do Rifte Continental do Sudeste do Brasil, RJ). PhD Thesis, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 249 p..

Negrão, A. P.; Ramos, R. R. C.; Mello, C. L.; Sanson, M. S. R. 2015. Mapa geológico do Cenozoico da região da bacia de Volta Redonda (RJ, Segmento Central do Rifte Continental do Sudeste do Brasil): identificação de novos grabens e ocorrências descontínuas, e caracterização de estágios tectonossedimentares. *Brazilian Journal of Geology*, v. 45, p. 273-291.

Padilha, A. L.; Vitorello, I. 1992. Investigações geoeletricas nas bacias de Volta Redonda e Resende. In: 37º Congresso Brasileiro de Geologia. São Paulo, Bol. Resumos Expandidos, v.2, p.403-404.

Panien, M., Schreurs, G., Pfiffner, A., 2006. Mechanical behaviour of granular materials used in analogue modelling: insights from grain characterisation, ring-shear tests and analogue experiments. *Journal of Structural Geology* 28, p. 1710-1724.

Ramos, R.R.C.; Mello, C.L.; Sanson, M.S.R. 2006. Revisão estratigráfica da bacia de Resende, Rift Continental do Sudeste do Brasil, Estado do Rio de Janeiro. *Geociências*, 25(1):59-70.

Riccomini, C.; Melo, M.S.; Carneiro, C.D.R.; Almeida, F.F.M.; Mito, J.A. & Hasui, Y. 1983. Sobre a ocorrência de um derrame de ankaramito na Bacia de Volta Redonda (RJ) e sua importância na datação das bacias tafrogênicas continentais do sudeste brasileiro. In: *Simpósio Regional de Geologia*, 4, São Paulo, 1983. Bol. Resumos... São Paulo, SBG. p.23- 24.

Riccomini C. 1989. O Rift Continental do Sudeste do Brasil. São Paulo, PhD Thesis, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 256 p..

Riccomini, C. & Rodrigues-Francisco, B.H., 1992 – Idade potássio-argônio do derrame de ankaramito da bacia de Itaboraí, Rio de Janeiro, Brasil: implicações tectônicas. In: *CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA*, 37., São Paulo: Resumos expandidos, São Paulo: SBG, p.469-470.

Riccomini, C., Sant'Anna, L.G., Ferrari, A.L. 2004. Evolução geológica do Rift Continental do Sudeste do Brasil. In: V. Mantesso-Neto, A. Bartorelli, C. Dal Ré Carneiro & B.B. Brito Neves (orgs.) *Geologia do Continente Sul-Americano – Evolução da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*. Beca, p. 383-405.

Rosendahl,

Salvador, E.D. & Riccomini, C. 1995. Neotectônica do Alto Estrutural de Queluz (SP-RJ, Brasil). *Rev. Bras. Geoc.*, 25(3):151-164.

Sanson, M. S. R. 2006. Sistemas Depositionais Aluviais e Tectônica Cenozóica na Região de Volta Redonda (RJ) – Rift Continental do Sudeste do Brasil. Programa de Pós-graduação em Geologia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Dissertação de Mestrado, 151 p.

Sanson, M.S.R.; Ramos, R R.C.; Mello C.L. 2006. Bacias Sedimentares Brasileiras - Bacia de Volta Redonda. *Phoenix*, 88: 1-6.

Schmitt, R.S. 2001. A Orogenia Búzios: um evento tectono-metamórfico Cambro-Ordoviciano caracterizado no Domínio Tectônico de Cabo Frio, Faixa Ribeira-Sudeste do Brasil. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Tese de Doutorado, 273p.

Tong, H., Koyi, H., Huang, S., Zhao, H. 2014. The effect of multiple pre-existing weakness on formation and evolution of faults in extended sandbox models. *Tectonophysics* 626, p. 197-212.

Tupinambá, M.; Heilbron, M.; Duarte, B.P.; Silva, L.G.E.; Nogueira, J.R.; Valladares, C.S.; Almeida, J.C.H.; Eirado, L.G.; Medeiros, S.R.; Almeida, C.G.; Miranda, A.W.A.; Ragatky, D.; Mendes, J.; Ludka, I. (2007). Geologia da Faixa Ribeira Setentrional: estado da arte e conexões com a Faixa Araçuaí. *Geonomos*, v. 15, p. 67-79, 2007.

Zalán & Oliveira 2005. Origem e evolução estrutural do Sistema de Riftes Cenozóicos do Sudeste do Brasil. In: *Boletim de Geociências da Petrobras* – v.13, nº 2, p. 269-300, maio/nov. 2005.

Apêndice 1
Histórico detalhado dos modelos elaborados

Modelo	Data		Breve Descrição	D0(x) [cm]	D0(y) [cm]	D0(z) [cm]				Fase de Deformação (n) Descrição	Taxa de Deslocamento do Motor 1	Taxa de Deslocamento do Motor 2	Descrição da sedimentação (tn/tn+1) (Dx n) Cor da Camada	D1(x) [cm]	D1(z) [cm]	Fase de Deformação (n+1) Descrição	Taxa de Deslocamento do Motor 1	Taxa de Deslocamento do Motor 2	Deposição da sedimentação (tn/tn+1) (Dx n) Cor da Camada	D2(x) [cm]	D2(z) [cm]	
	Inicial	Final				Camadas	Marca-dor	Pré-ri-fite	Total													
1	21/12/2017	22/12/2017	Primeiro modelo reproduzido. Este modelo teve o intuito de definir a melhor abordagem para a modelagem da primeira fase de deformação identificada na bacia de Volta Redonda, visando incorporar feições geológicas descritas na área de estudos (e.g., Alto de Jardim Amália) à geometria proposta pelos modelos conceituais. Foi prontamente identificada a necessidade de se trabalhar com exâgeros verticais exagerados, devido à pouca espessura do preenchimento sedimentar da bacia.	20	30	4 x 1.5 Branca	4 x 0.2 Preta	-	7	Abertura Assimétrica P0(- / -) Início da deformação 13h18	-	20mm/h (21.6mm/h)	(13h37 / -) (20.5cm) Camada Azul (13h46 / -) (21cm) Camada Amarela (14h07 / -) (21.7cm) Camada Azul (14h28 / -) (22.2cm) Camada Amarela (14h41 / -) (22.7cm) Camada Azul (14h49 / -) (23cm) Camada Amarela	23	-	Abertura Simétrica Motor 1 P1(- / -) Motor 2 P1(- / -)	20mm/h (21.6mm/h)	20mm/h (21.6mm/h)	(15h15 / -) (24.6cm) Camada Preta (15h33 / -) (25.6cm) Camada Laranja (15h50 / -) (27cm) Camada Preta	27	-	
2	02/01/2018	03/01/2018	Este experimento visou alternar a ordem estabelecidas para os processos corridos no primeiro modelo. Além disso, experiências com a disposição e fixação das folhas de acetato foram executadas, com o intuito do modelador encontrar a melhor metodologia possível para trabalhar.	20	37	5 x 1 Branca	5 x 0.2 Preta	0.7 Laranja	6,7	Abertura Simétrica P0(250mm / 240mm) Início da deformação (13h10)	10mm/h (8.64mm/h)	10mm/h (8.64mm/h)	(- / 13h41) (-) Camada Azul	20,7	-	Abertura Assimétrica Motor 1 P1(240mm / 230mm) Motor 2 P1(240mm / 220mm)	5mm/h (- mm/h)	20mm/h (21.6mm/h)	(- / 13h57) (21.4cm) Camada Amarela (- / 14h11) (21.9cm) Camada Azul (- / 14h28) (22.5cm) Camada Amarela (- / 14h43) (23.3cm) Camada Azul (- / 15h03) (23.8cm) Camada Amarela (- / 15h42) (24.6cm) Camada Preta (- / 15h42) (25cm) Camada Azul	25	-	
3	09/01/2018	10/01/2018	Primeiro modelo a utilizar silicone ao longo do localizador. A arquitetura da caixa de acetato, assim como a ordem das fases de deformação adotadas, foram similares àquelas definidas no modelo anterior.	30	37	4 x 2 Azul	4 x 0.3 Preta	0.3 Laranja	9,5	Abertura Simétrica P0(250mm / 240mm) Início da deformação (-)	10mm/h (8.64mm/h)	10mm/h (8.64mm/h)	(13h15 / 13h19) (31cm) Camada Amarela (13h52 / 13h59) (32cm) Camada Azul	32	-	Abertura Assimétrica Motor 1 P1(240mm / 230mm) Motor 2 P1(240mm / 220mm)	10mm/h (8.64mm/h)	20mm/h (21.6mm/h)	(14h20 / 14h24) (33cm) Camada Amarela (14h50 / 14h56) (34.4cm) Camada Preta (15h10 / -) (35cm) Camada Laranja	35	-	
4	15/02/2018	17/02/2018	Primeiro modelo de uma sequência lógica sugerida pelo Prof. Limeira (UFRJ). Foi feita, na ocasião da reunião com o professor, a sugestão de que simplificássemos a primeira fase de deformação. De agora em diante, simularemos a fase (E1) como uma abertura assimétrica oblíqua. Os modelos seguintes servirão para a identificação do melhor fluxo de trabalho para obtenção da geometria pretendida. Não haverá mais a camada Pré-Rifte referente à Fm. Ribeirão dos Quatis.	20	37	4 x 1.5 Amarela	4 x 0.3 Preta	-	7,4	Abertura Assimétrica P0(250mm / 240mm) Início da deformação (-)	-	20mm/h (21.6mm/h)	(- / 15h11) (21cm) Camada Roxa (- / 15h40) (22cm) Camada Laranja (16h05 / 16h08) (23cm) Camada Roxa (16h32 / 16h38) (24cm) Camada Laranja (- / -) (25cm) Camada Roxa	25	-	-	-	-	-	-	-	
5	04/06/2018	06/06/2018	O modelo anterior não foi capaz de reproduzir a geometria pretendida. Fora identificada uma diferença de ângulo entre as forças e o localizador do modelo anterior e aqueles definidos para o protótipo. Os experimentos seguintes serão devidamente imageados para servir de resultados parciais ou, quiçá, finais.	35	37	4 x 1.5 Branca	4 x 0.3 Preta	-	7,2	Abertura Assimétrica P0(- / -) Início da deformação (8h47)	-	20mm/h (21.6mm/h)	(9h16 / 9h21) (36cm) Camada Azul (9h45 / 9h52) (37cm) Camada Vermelha (10h14 / 10h19) (38cm) Camada Azul (10h43 / 10h49) (39cm) Camada Vermelha (11h13 / 11h19) (40cm) Camada Azul	40	-	-	-	-	-	-	-	
6	11/06/2018	12/06/2018	Geometria da caixa e do acetato semelhantes ao experimento anterior. Experimento de transcorrência sinistral com o intuito de simular a fase TS da bacia de Volta Redonda proposta por Riccomini (1989). Arbitariamente, foi definido que o deslocamento do motor seria equivalente à metade do anterior.	35 (35.3)	37 (37.5)	4 x 1.5 Branca	4 x 0.3 Preta	-	7,2	Transcorrência Sinistral P0(195mm / 170mm) Início da deformação (-)	-	20mm/h (21.6mm/h)	(12h35 / 12h38) (35.5cm) Camada Azul (12h49 / 12h52) (36cm) Camada Vermelha (13h04 / 13h07) (36.5cm) Camada Azul (13h18 / 13h22) (37cm) Camada Vermelha (13h28 / 13h35) (37.5cm) Camada Azul	37,5	-	-	-	-	-	-	-	
7	19/06/2018	20/06/2018	Teste para o modelo final, onde haveria tanto distensão (E1) quanto transcorrência sinistral (TS). A estratégia adotada para o desenvolvimento da segunda fase de deformação foi incorreta. O erro consistiu no mal planejamento das disposição e características (fixas ou móveis) das paredes limitantes do modelo.	35	37	4 x 1.5 Branca	4 x 0.3 Preta	-	7,2	Abertura Assimétrica P0(110mm/60mm) Início da deformação (12h13)	-	20mm/h (21.6mm/h)	(12h45 / 12h47) (36cm) Camada Azul (13h14 / 13h18) (37cm) Camada Vermelha (13h42 / 13h46) (38cm) Camada Azul (14h11 / 14h15) (39cm) Camada Vermelha (- / 14h37) (40cm) Camada Azul	40	-	x	x	x	x	x	x	
8	23/07/2018	24/07/2018	Modelo idealizado para o 49CBG e para a dissertação. Modelo de extensão oblíqua assimétrica em que o embasamento encontra-se, agora, corretamente posicionado perante as tensões. Os demais modelos foram aproveitados para análises comparativas quanto as diferentes estruturas geradas conforme a obliquidades entre essas componentes.	35,8	37	4 x 1.5 Branca	4 x 0.3 Preta	-	7,2	Abertura Oblíqua Assimétrica P0(200mm / 150mm) Início da deformação (12h38)	-	20mm/h (21.6mm/h)	(13h09 / 13h13) (36cm) Camada Azul (13h38 / 13h42) (37cm) Camada Vermelha (14h07 / 14h11) (38cm) Camada Azul (14h36 / 14h40) (39cm) Camada Vermelha (15h08 / -) (40cm) Camada Azul	40	-	-	-	-	-	-	-	
9	03/08/2018	06/08/2018	Primeira tentativa do modelo final, onde houve tanto distensão (E1) quanto transcorrência sinistral (TS). O único parâmetro que restou o ajuste foi a obliquidade da tensão imposta ao modelo, impossibilitada pela complexidade do experimento. Para a deposição das camadas sin-tectônicas, os motores foram parados, explicando a ausência do registro do tempo. Não houve sedimentação durante a transcorrência.	50	37	4 x 1.5 Branca	4 x 0.3 Preta	-	7,2	Abertura Oblíqua Assimétrica P0(150mm / 100mm) Início da deformação (14h40)	100mm/h (99.36mm/h)	-	(x / x) (37.904cm) Camada Azul (x / x) (38.926cm) Camada Vermelha (x / x) (39.961cm) Camada Azul (x / x) (40.956cm) Camada Vermelha (x / x) (42cm) Camada Azul	-	42	Transcorrência Sinistral P0(191mm / 166mm) Início da deformação (16h00)	-	100mm/h (99.36mm/h)	-	-	52,5	-

Planilha 1. A planilha acima sintetiza as atividades realizadas no laboratório de modelagem. Os itens foram dispostos em colunas, enquanto que os modelos estão dispostos nas linhas. A simbologia [D] foi definida para descrever a deformação, tanto no eixo 'x' quanto nos eixos 'y' e 'z', em que [D0] faz referência ao momento indeformado do modelo e suas dimensões em centímetros. A cor verde agrupa os parâmetros pré-deformação. A cor azul, por sua vez, agrupa os parâmetros analisados após a implementação da primeira fase de deformação. Enfim, caso haja a sobreposição de uma segunda fase de deformação, tais elementos serão descritos e agrupados pela cor amarela. A simbologia [P] foi adotada para representar a posição do motor. Este parâmetro é mutável de modelo para modelo e segue a posição analisada na tela do computador referente à extensão do braço mecânico do mesmo. Desta maneira, quando [P0], tem-se que o braço do motor ainda não se moveu. Em 'P0 (250mm/240mm)', lê-se que o braço moveu-se da posição inicial '250mm' até a posição final daquela fase '240mm', por exemplo. O símbolo [t], por sua vez, foi adotada para se referir ao tempo, ou seja, ao momento em que fora realizada cada ação. Desta maneira, lê-se em '(tn / tn+1)' o tempo inicial e o tempo final de cada etapa de sedimentação imposta ao modelo. Enfim, os símbolos '-' e 'x' referem-se aos dados ausentes por motivos de desnecessidade ou falha no experimento, respectivamente.

Apêndice 2
Propostas para trabalhos futuros

I) Utilização do Sistema P.I.V.

O P.I.V., ou ‘Particle Imaging Velocimetry’, é capaz de monitorar a deformação através de imagens de alta resolução. O sistema é capaz de acompanhar a movimentação de marcadores, no caso grãos de areia, durante a deformação e realizar uma comparação quantitativa das suas posições entre duas fotografias, onde o intervalo de tempo é conhecido. Esta quantificação da deformação tende a se aproximar da modelagem numérica.

A metodologia não foi utilizada pois não estava disponível no laboratório. Entretanto, acredita-se que a possibilidade de analisar o incremento da deformação através do tempo, assim como padrões no campo de velocidade/deslocamento, agregaria informações de grande serventia à pesquisa. Em posse desses dados, por exemplo, analisar-se-ia pedagogicamente a mudança nos padrões de deformação durante e após a sobreposição da segunda fase de deformação.

II) Interpretação dos Modelos Físicos a partir de métodos não-invasivos de imageamento

As seções, como demonstrado no item 5.1 deste documento, foram obtidas a partir de cortes utilizando uma faca sem serra, de comprimento considerável e amolada. Este método, entretanto, pode causar danos ao modelo durante o manuseio da faca e resulta no descarte do material após ser fotografado.

Alternativamente, métodos não invasivos para análise da deformação possibilitam maiores detalhamento e abrangência dos resultados. A tomografia computadorizada, por exemplo, já foi utilizada em diversos artigos publicados internacionalmente em revistas renomadas (PANIEN *et al.*, 2006). O GPR portátil (i.e., ‘*Ground Penetrating Radar*’) é outra possibilidade. Nenhuma das opções foi utilizada devido inviabilidade do transporte do modelo até o tomógrafo, localizado em outro laboratório, e do desconhecimento teórico e prático para o manuseio do GPR. Reitera-se que o incremento destas metodologias agregaria um valor imensurável às práticas de modelagem física analógica,

melhorando a percepção de como as estruturas se desenvolveriam à medida que os modelos fossem deformados.

III) Restauração Estrutural

O processo de restauração estrutural tem como objetivo determinar a atitude dos horizontes estratigráficos no passado geológico através de um processo conhecido como *back-stripping*.

Os resultados são capazes de reproduzir a geometria indeformada do modelo incorporado para testes. No caso de um modelo em caixa de areia, cujas geometria e condições de contorno iniciais são conhecidas, suas configurações originais hão de servir como calibração aos dados gerados a partir da restauração estrutural.

Ademais, caso este fluxo de trabalho seja implementado em paralelo a um método de investigação não-invasivo como a tomografia, seus dados gradativos poderão ser comparados ao longo da deformação imposta aos modelos.

IV) Distribuição tridimensional de propriedades

A capacidade dos modelos digitais de comportarem propriedades e distribuí-las tridimensionalmente é de grande serventia aos estudos geológicos e geofísicos (Figura 33). Além disso, quando produto interpretado de modelos físicos anteriormente desenvolvidos, os ensaios poderão ser desenvolvidos em um modelo digital cujas condições de contorno de sua concepção são conhecidas. Enfim, as informações aqui presentes sintetizam a capacidade que os modelos físicos analógicos têm, quando digitalizados, de servir como base para a elaboração de modelos conceituais robustos e para a realização de ensaios geológicos ou geofísicos mais detalhados.