



UFRJ

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
CCMN – INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA**

**MODELAGEM 2D APLICADA AO ESTUDO DO
DESENVOLVIMENTO DE ZONAS DE FALHAS EM
DEPÓSITOS DA FORMAÇÃO RESENDE
(BACIA DE VOLTA REDONDA, RJ)**

Juliana Ribeiro de Souza Santos Rodrigues

**Trabalho Final de Curso
Geologia**

**UFRJ
RIO DE JANEIRO
2016**



UFRJ

MODELAGEM 2D APLICADA AO ESTUDO DO DESENVOLVIMENTO DE ZONAS DE FALHAS EM DEPÓSITOS DA FORMAÇÃO RESENDE (BACIA DE VOLTA REDONDA, RJ)

Juliana Ribeiro de Souza Santos Rodrigues

Trabalho Final de Curso apresentado ao Departamento de Geologia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Geólogo.

Orientador (es):

Claudio Limeira Mello – Depto.Geologia/UFRJ

Aline Theophilo Silva – PETROBRAS/CENPES

**UFRJ
RIO DE JANEIRO
2016**

Rodrigues, Juliana Ribeiro de Souza Santos

Modelagem 2D aplicada ao estudo do desenvolvimento de zonas de falhas em depósitos da Formação Resende (Bacia de Volta Redonda, RJ) / Juliana Ribeiro de Souza Santos Rodrigues – Rio de Janeiro: UFRJ, Instituto de Geociências, 2015. viii, 39 p.

Orientador(es):

Claudio Limeira Mello; Aline Theophilo Silva

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

1. Cenozoico, 2. Modelagem Estrutural, 3. Formação Resende

Juliana Ribeiro de Souza Santos Rodrigues

MODELAGEM 2D APLICADA AO ESTUDO DO DESENVOLVIMENTO DE ZONAS DE FALHAS EM DEPÓSITOS DA FORMAÇÃO RESENDE (BACIA DE VOLTA REDONDA, RJ)

Trabalho Final de Curso apresentado ao Departamento de Geologia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Geólogo.

Aprovado em: ___/___/_____

Por:

Orientador: Prof. Dr. Claudio Limeira Mello (IGEO/UFRJ)

Orientador: Dra. Aline Theophilo Silva (PETROBRAS/CENPES)

Prof. Dr. Renato Rodriguez Cabral Ramos (MN/UFRJ)

Dr. Anderson Moraes (PETROBRAS/CENPES)

Agradecimentos

Agradeço aos meus orientadores, Aline Theophilo Silva, por sua dedicação, disponibilidade, pelos ensinamentos e carinho de sempre, e Claudio Limeira Mello, por sua dedicação, paciência, inspiração e por todos os ensinamentos durante minha graduação.

Agradeço à PETROBRAS/CENPES pela disponibilidade do espaço para trabalhar com o TECTOS (PETROBRAS & TECGRAF/PUC-RJ), e pelo transporte para o trabalho de campo e à Engenheira Naiara da Silva Pitta e ao Senhor José Luiz de Paiva Leizoto pelo apoio logístico.

Agradeço ao Dr. Anderson Moraes pelos conselhos e discussões e a todos os meus professores da graduação, pela inspiração e aprendizado.

Agradeço aos meus pais, ao meu irmão, aos meus grandes amigos de turma e da vida, por sempre me apoiarem, aconselharem e torcerem por mim. E ao meu amor, que divide as dificuldades e alegrias do dia a dia comigo.

Agradeço especialmente a Deus, por me guiar até esse caminho, pela saúde física e mental, e pela minha existência.

Resumo

Neste trabalho foi realizado um estudo de modelagem numérica 2D a respeito do controle da estratigrafia mecânica sobre o desenvolvimento de zonas de falhas em rochas siliciclásticas pouco consolidadas da Formação Resende (Bacia de Volta Redonda – RJ). Para tanto foi selecionado um afloramento onde é observada significativa deformação rúptil, relacionada a dois dos cinco eventos tectônicos cenozoicos identificados na bacia (TD – transcorrência dextral E-W; e E2 – distensão WNW-ESE). A estruturação principal do afloramento está relacionada à fase E2, representada por duas falhas normais de orientação ENE-WSW, com mergulhos opostos, formando um gráben. Ao longo dos planos das falhas são observadas variações na espessura de suas respectivas zonas de dano, aparentemente controladas pela composição da sucessão sedimentar cortada pelas falhas. Para verificar o efeito da estratigrafia mecânica sobre a deformação observada, foram executados alguns modelos numéricos 2D, nos quais se considerou um arcabouço estrutural simplificado, incluindo apenas as duas falhas normais da fase E2 e um empilhamento sedimentar sintético da estratigrafia mecânica do afloramento. Uma vez que não existem dados de ensaios mecânicos para a Formação Resende, foram atribuídas às camadas propriedades obtidas da literatura para rochas semelhantes. O programa utilizado foi o TECTOS (PETROBRAS & TECGRAF/PUC-RJ), que se baseia na mecânica do contínuo e no método de elementos finitos. Os resultados dos modelos evidenciam uma forte possibilidade de que as propriedades mecânicas das diferentes unidades litológicas controlem a variação do desenvolvimento da zona de dano das falhas. Pesam sobre essa conclusão incertezas quanto aos reais valores das propriedades mecânicas da Formação Resende e também a respeito da contribuição da deformação da fase TD (anterior à E2), além do desconhecimento da geometria do gráben em subsuperfície e da profundidade do embasamento.

Abstract

In this study was carried out a 2D numerical modeling, regarding the mechanical stratigraphy control on the development of fault zones in poorly consolidated siliciclastic rocks of the Resende Formation (Volta Redonda Basin, Southeastern Brazil). It was selected an outcrop on which is observed significant brittle deformation, related to two Cenozoic tectonic events identified in the basin (TD - dextral transcurrent E-W, and E2 - WNW-ESE distension). The main structural pattern of the outcrop was related to the tectonic event E2, represented by two normal faults of ENE-WSW orientation, with opposing dips, forming a graben. Variations in the thickness of damage zone were observed along these fault planes, apparently controlled by the composition of the sedimentary succession. In order to check the effect of mechanical stratigraphy to the development of damage zones, some 2D numerical models were performed, based on a simplified structural framework, including only the two main normal faults and a synthetic stratigraphy representing the main mechanics units. Since there is no mechanical data of Resende Formation rocks, they were assigned the mechanical properties obtained from the literature for similar rocks. The software used was the TECTOS (TECGRAF/PUC-RJ & PETROBRAS), which is based on the continuum mechanics and on the finite element method. The results showed a strong possibility that the mechanical properties of different lithologic units control the variation of the development of the fault damage zone. Some uncertainties are related to the actual values of the mechanical properties of the Resende Formation rocks, the contribution of the previous deformation event (TD) and also the graben geometry in subsurface and the basement depth.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Anatomia simplificada de uma falha (Fossen, 2010). <i>Damage zone (brittle)</i> – zona de dano (rúptil); <i>Core or slip surface</i> – núcleo ou superfície de deslizamento; <i>Drag zone (ductile)</i> – zona de arrasto (dúctil).....	2
Figura 2– Localização geográfica do afloramento. Fonte: <i>Google Maps</i>	4
Figura 3– Acesso ao afloramento. Fonte: <i>Google Maps</i>	5
Figura 4 - Contexto geológico regional do <i>Rift Continental do Sudeste do Brasil (RCSB)</i>	6
Figura 5– Mapa geológico do segmento central da Faixa Ribeira na região das bacias de Resende e Volta Redonda, de acordo com Heilbron <i>et al.</i> (2004). Fonte: <i>Sanson (2006)</i>	7
Figura 6 - Etapas da evolução tectônica do <i>Rift Continental do Sudeste do Brasil</i> . Fonte: Riccomini (1989).....	8
Figura 7 – Mapa geológico da região da Bacia de Volta Redonda. Fonte: Negrão <i>et al.</i> (2015).	9
Figura 8 – Coluna litoestratigráfica para a região da Bacia de Volta Redonda. Fonte: Negrão (2014).	10
Figura 9 – Seção geológica do afloramento estudado no presente trabalho. Fonte: Maciel (2016). F1 e F2 - Falhas principais do afloramento; P1, P2 e P3 - Perfis sedimentológicos realizados pela autora;.....	12
Figura 10 – Fotomosaico interpretado no presente estudo.	16
Figura 11 – Seção estratigráfica sintética do afloramento.	17
Figura 12 – Posicionamento da figura guia no <i>software TECTOS</i>	18
Figura 13– Seção representativa apresentando a malha <i>Triangulation</i> e a diferenciação das camadas por cores.	19
Figura 14 – Condições de contorno apresentadas no primeiro modelo geométrico elaborado.	20
Figura 15– Parâmetro RFS de acordo com o critério de Mohr-Coulomb (Moraes, 1995), onde a varia de acordo com as tensões aplicadas ao material, e b varia em resposta à a.	21
Figura 16 – Seção geológica do afloramento estudado, elaborada a partir da interpretação do fotomosaico e checagem em campo.	24
Figura 17 – Variação da espessura da zona de dano da falha F2.	25
Figura 18 – Resultado do Modelo 1. No lado esquerdo, está representada a estratigrafia mecânica do modelo e as suas condições de contorno (ver também a Figura 14); no lado direito, estão resultado do Modelo 1 no passo 40. A escala corresponde aos valores de RFS. As propriedades de rochas utilizadas neste modelo estão listadas no Quadro 1.	27
Figura 19 –Arquitetura dos modelos 12 e 12-b.	28

Figura 20 – Resultados dos modelos 12 e 12-b, passos 1 a 3. A escala corresponde aos valores de RFS.	30
---	----

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1 – Conversão da nomenclatura das unidades mecânicas no software e na seção sintética.....	21
Quadro 2 - Propriedades de rochas utilizadas no Modelo 1.....	22
Quadro 3 - Propriedades de rochas utilizadas no Modelo 12.....	31
Quadro 4 - Propriedades de rochas utilizadas no Modelo 12-b.....	32

SUMÁRIO

Agradecimentos	iii
Resumo	iv
Abstract	v
1. Introdução	1
2. Objetivo	4
3. Área de estudo	4
3.1. Localização e vias de acesso	4
3.2. Contexto geológico regional	5
3.3. Estratigrafia e evolução tectônica da Bacia de Volta Redonda	9
3.4. O afloramento estudado	12
4. Metodologia	13
4.1. Bases conceituais	13
4.2. Etapas realizadas	15
5. Resultados	23
5.1. Interpretação do fotomosaico	23
5.2. Dados de campo	23
5.3. Modelos numéricos	26
6. Discussões	33
7. Conclusões	34
Referências bibliográficas	36

1. Introdução

A demanda atual por combustíveis fósseis e por água subterrânea tem exigido, por parte da indústria e da academia, investimentos crescentes para o entendimento da distribuição da qualidade de reservatórios em subsuperfície. Entretanto, o entendimento de processos e a capacidade de representação precisa de corpos geológicos e estruturas tectônicas em subsuperfície é bastante limitado, devido à dificuldade em se obter informações das rochas e das estruturas tectônicas. Os dados são usualmente obtidos por métodos indiretos (*i.e.* métodos geofísicos; perfis elétricos de poços), ou limitados em quantidade e alcance amostral (*e.g.* *plugs*; testemunhos). Desta forma, a representação espacial dos materiais geológicos (*e.g.* rochas; geometria dos corpos sedimentares ou das zonas tectonicamente deformadas; distribuição das propriedades permoporosas) nem sempre tem a precisão desejada (Howell *et al.*, 2014; Bond, 2015). Para resolver essas questões, os recursos mais utilizados atualmente são o estudo de análogos e a utilização de ferramentas numéricas para a modelagem de processos geológicos (sedimentares e tectônicos).

O estudo de análogos fundamenta-se na análise *in situ* de rochas e de estruturas resultantes dos processos geológicos em questão. O estudo é realizado a partir de afloramentos que tenham características composicionais ou tectônicas semelhantes aos reservatórios em subsuperfície. Pode-se utilizar um ou mais afloramentos para um mesmo estudo, a depender da complexidade do problema geológico ou do conjunto de compatibilidades entre as características de cada afloramento e o que se conhece do reservatório em subsuperfície (Howell *et al.*, 2014).

Através do uso de ferramentas de modelagem numérica, busca-se testar modelos conceituais ou quaisquer ideias a respeito do processo geológico em discussão, através da aplicação de equações matemáticas que, acredita-se, possam representar os processos físicos que atuaram naquele contexto natural. A grande vantagem do uso de ferramentas numéricas é que estas permitem testar várias possibilidades de soluções para um mesmo problema, até o limite em que os

resultados sejam razoáveis para o meio natural analisado (Larson, 2005; Moraes, 2016).

Uma importante questão para a indústria do petróleo é o conhecimento do comportamento hidráulico de falhas em reservatórios, isto é, a capacidade de prever se uma falha vai se comportar como uma barreira (*i.e.* selo), como um conduto ou como uma combinação entre esses dois comportamentos (Pei *et al.*, 2015). Um dos fatores que impactam esse tipo de análise é a caracterização do desenvolvimento da zona de dano da falha (Figura 1), uma vez que nessa região pode haver considerável volume de rocha, de um lado e de outro da falha, que absorve parte da deformação. Desta forma, as rochas envolvidas na zona de dano têm suas características físicas originais alteradas, incluindo suas características permoporosas (Faulkner *et al.*, 2010; Pei *et al.*, 2015).

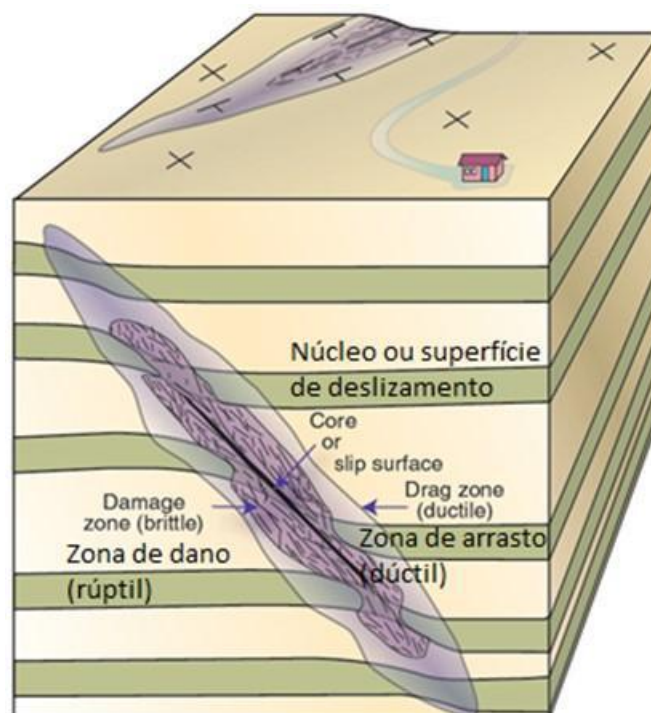


Figura 1 – Anatomia simplificada de uma falha (Fossen, 2010). *Damage zone (brittle)* – zona de dano (rúptil); *Core or slip surface* – núcleo ou superfície de deslizamento; *Drag zone (ductile)* – zona de arrasto (dúctil).

Considera-se que um dos fatores que controlam o desenvolvimento da zona de dano de falhas é a estratigrafia mecânica. É sabido que as propriedades de origem deposicional (e.g. seleção; estruturas sedimentares) e as de origem

diagenética (associadas à cimentação e dissolução) e por deformação (e.g. compactação; fraturamento) podem conferir propriedades mecânicas diferentes, tais como coesão, resistência ao cisalhamento e resistência à tração, para cada litotipo, camada, ou sequência de camadas. Para efeito de estudo de deformação em reservatórios, o conhecimento da estratigrafia mecânica pode auxiliar na predição de como as unidades respondem aos esforços tectônicos, contribuindo para a identificação de variação vertical e lateral significativa na distribuição de fraturas (Lorents *et al.*, 2002; Laubach *et al.*, 2009).

No presente estudo, foi feita uma combinação entre modelagem numérica e análise em um afloramento análogo a fim de estudar o controle da estratigrafia mecânica sobre o desenvolvimento da zona de dano de falhas em arenitos pouco consolidados da Formação Resende em um afloramento na Bacia de Volta Redonda (RJ). Esse estudo está inserido no escopo de um projeto mais amplo, que objetiva entender o efeito de diversas feições de deformação rúptil (e.g. falhas, bandas de compactação, *claysmear*) sobre as propriedades permoporosas de arenitos pouco consolidados. Para esse projeto foi selecionado este afloramento da Formação Resende como análogo a importantes reservatórios areníticos pouco consolidados e deformados encontrados nas bacias petrolíferas de Campos e Santos. A Formação Resende é formada predominantemente por arenitos com composição e características mecânicas semelhantes a esses reservatórios, além de apresentar uma diversidade de estruturas rúpteis comparáveis com as identificadas nestes mesmos reservatórios.

Durante os trabalhos realizados no afloramento para o levantamento de perfis estratigráficos, coleta de dados estruturais e a construção da seção geológica (Maciel, 2016), observou-se uma variação na espessura da zona de dano ao longo das duas principais falhas identificadas, variando de acordo com as diferentes camadas atravessadas pelas falhas. Nas camadas mais argilosas, a zona de dano se torna mais estreita, e se torna mais espessa nas camadas mais arenosas. A partir dessa observação, planejou-se a execução do presente estudo de modelagem numérica.

2. Objetivo

O presente trabalho teve como objetivo analisar, através de modelagem numérica 2D, o controle da estratigrafia mecânica sobre o desenvolvimento de zonas de dano de falhas em sedimentos siliciclásticos pouco consolidados, tomando como caso de estudo um afloramento da Formação Resende na Bacia de Volta Redonda (RJ).

3. Área de estudo

3.1. Localização e vias de acesso

O afloramento investigado nesse estudo está localizado no Gráben de Casa de Pedra, que corresponde ao principal depocentro da Bacia de Volta Redonda (Figura 2), localizada na região do médio do vale do rio Paraíba do Sul (Sanson *et al.*, 2006).



Figura 2– Localização geográfica do afloramento. Fonte: *Google Maps*.

O afloramento está localizado em um terreno particular cujo acesso é feito a partir da Rodovia do Contorno (ainda em construção), mediante autorização da empresa de fiscalização da obra, na cidade de Volta Redonda (Figura 3). “As coordenadas do afloramento são 22°32’26,22” S e 44°03’07,30”W, DATUM Córrego Alegre, zona 23 S.

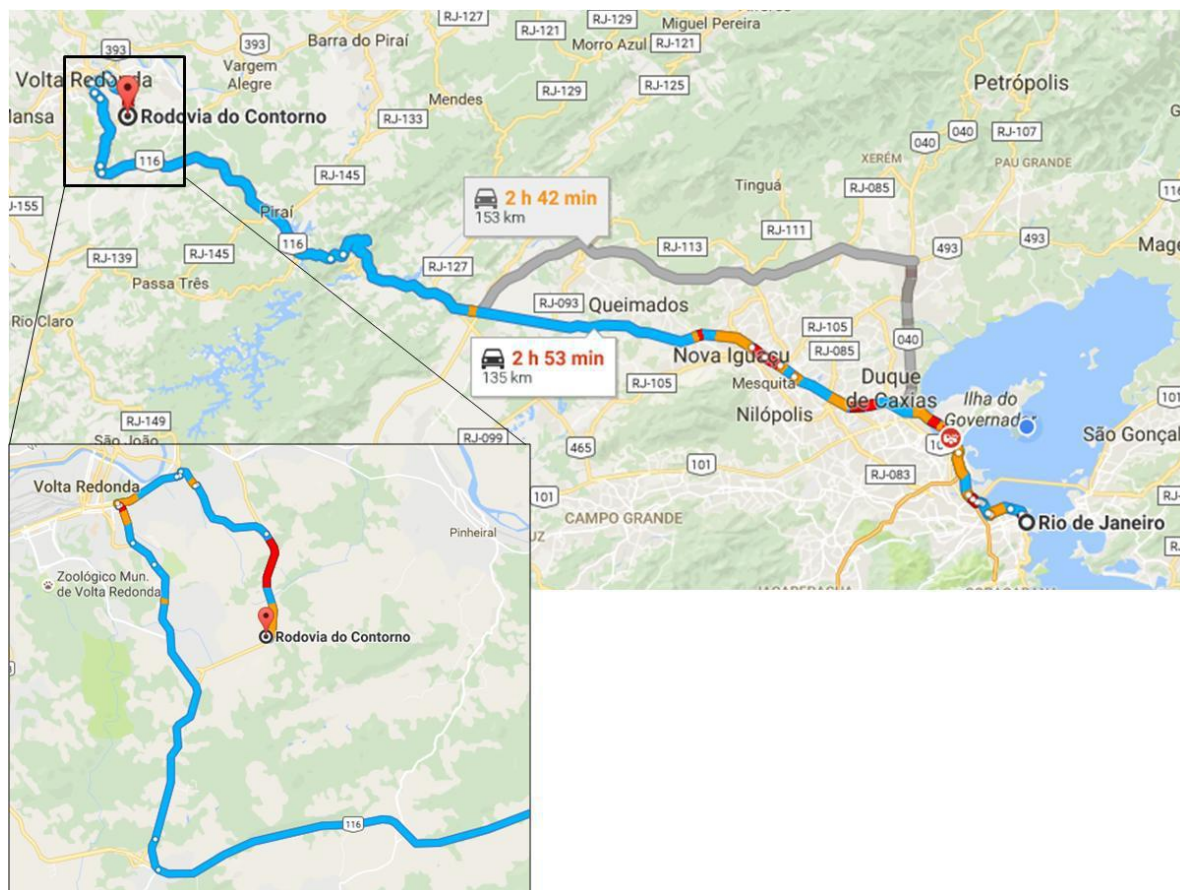


Figura 3—Acesso ao afloramento. Fonte: Google Maps.

3.2. Contexto geológico regional

A Bacia de Volta Redonda (Figura 4), juntamente com as bacias de Resende, São Paulo e Taubaté, compõe do Segmento Central do *Rift* Continental do Sudeste do Brasil (RCSB). O *rift*, de idade paleogênica, se estende paralelamente à linha de costa por aproximadamente 900 km, desde a cidade de Tijucas do Sul, no Paraná, até a porção *offshore* em frente à cidade de Macaé, no estado do Rio de Janeiro (Riccomini *et al.*, 2004). O RCSB inclui ainda a Bacia de Curitiba e os grábens de Guaraqueçaba, Cananéia e Sete Barras, no seu Segmento Ocidental e os grábens de Barra de São João e da Guanabara (a esse último se relacionam as bacias do

Macacu e de Itaboraí) no seu Segmento Oriental (Riccomini, 1989; Riccomini *et al.*, 2004).



Figura 4 - Contexto geológico regional do Rift Continental do Sudeste do Brasil (RCSB).

Legenda: 1) embasamento pré-cambriano; 2) rochas sedimentares paleozoicas da Bacia do Paraná; 3) rochas vulcânicas toleíticasecretáceas, da Formação Serra Geral, na Bacia do Paraná; 4) rochas relacionadas ao magmatismo alcalino mesozoico-cenozoico; 5) bacias cenozoicas do RCSB(1- Bacia de Itaboraí, 2- Gráben de Barra de São João, 3- Bacia do Macacu, 4- Bacia de Volta Redonda, 5- Bacia de Resende, 6- Bacia de Taubaté, 7- Bacia de São Paulo, 8- Gráben de Sete Barras, 9- Formação Pariquera-Açu, 10- Formação Alexandra e Gráben de Guaraqueçaba, 11- Bacia de Curitiba, 12- Gráben de Cananéia); 6) zonas de cisalhamento pré-cambrianas, em parte reativadas durante o Mesozoico e Cenozoico. Fonte: Riccomini *et al.* (2004).

Essas bacias foram instaladas sobre embasamento neoproterozoico, constituído por rochas da Faixa Ribeira (580 a 520 M.a.). Esses terrenos correspondem ao último ciclo da Orogênese Brasileira, quando foi concluída a amalgamação do paleocontinente Gondwana. Em razão da vergência da colisão, com direção predominante NW, a trama litoestrutural da Faixa Ribeira é caracterizada por grandes cinturões de dobramento e zonas de cisalhamento dúcteis dextrais, fortemente orientadas na direção NE-SW (Heilbron & Machado, 2003; Heilbron *et al.*, 2004; Trouw *et al.*, 2000; Schmitt *et al.*, 2004, 2008) – Figura 5. Esse arcabouço tectônico teria exercido forte controle sobre a formação do RCSB, o que é indicado pela geometria estreita e alongada segundo a direção NE-SW das bacias cenozoicas ali instaladas (Riccomini, 1989; Riccomini *et al.*, 2004).

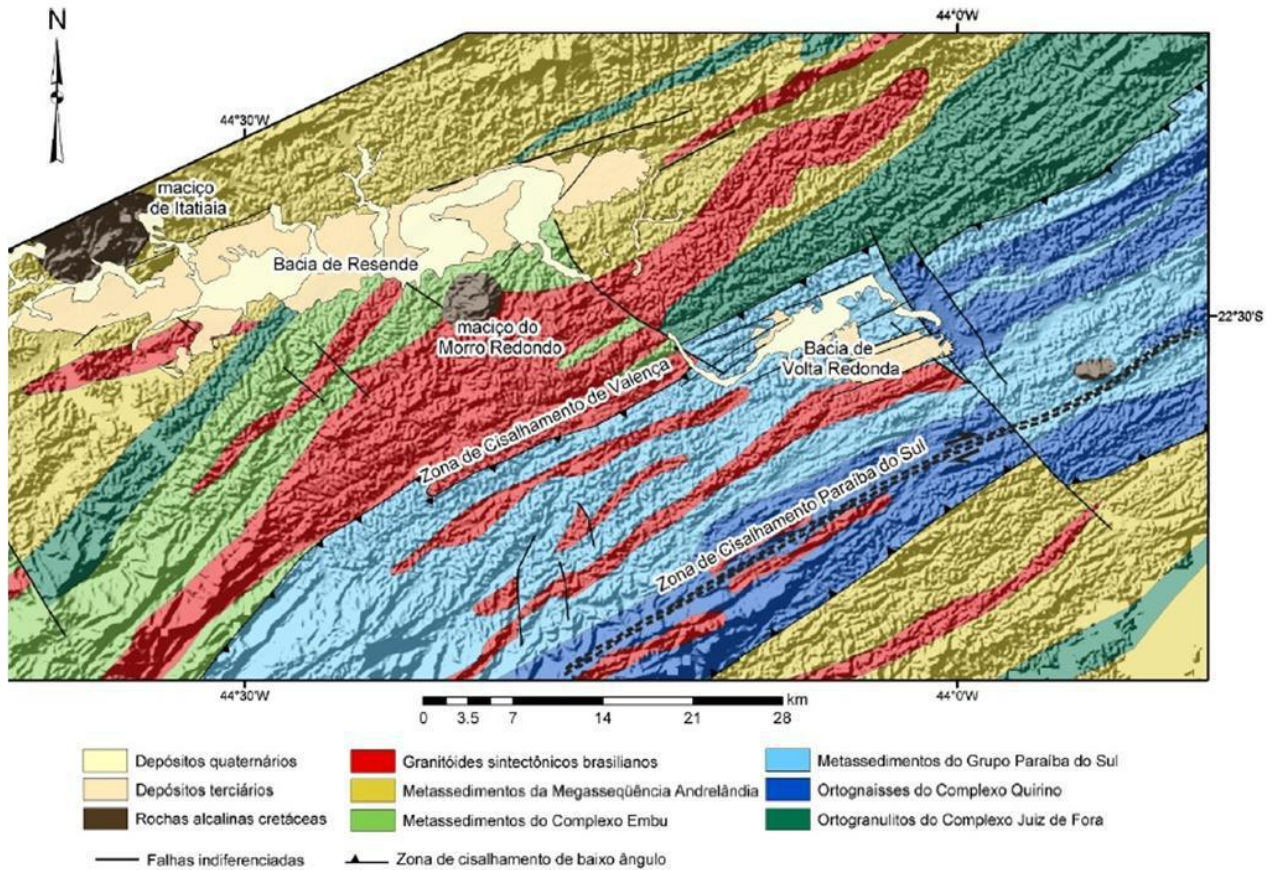


Figura 5– Mapa geológico do segmento central da Faixa Ribeira na região das bacias de Resende e Volta Redonda, de acordo com Heilbron *et al.* (2004). Fonte: Sanson (2006).

De acordo com Riccomini (1989), a origem do RCSB estaria relacionada ao basculamento termomecânico da região emersa adjacente à Bacia de Santos, associado à reativação de zonas de cisalhamento pré-cambrianas. O modelo proposto pelo autor identificou quatro eventos tectônicos sucessivos, sendo um de caráter formador (de abertura) e três deformadores (Figura 6). Mais tarde, Salvador & Riccomini (1995) identificaram um quinto evento, mais novo que os precedentes, este também de caráter deformador. Esses eventos são descritos a seguir:

- Fase E1 (distensão NNW-SSE), correspondente ao movimento de abertura do RCSB no Eoceno-Oligoceno, que reativou estruturas de orientação NE-SW, preexistentes no embasamento, como falhas normais;
- Fase TS (Transcorrência Sinistral E-W), que ocorreu no Mioceno, de caráter transcorrente sinistral E-W, com distensão NW-SE e, localmente, compressão NE-SW. Descontinuidades pretéritas NE-SW foram reativadas segundo movimentação

transcorrente sinistral, enquanto estruturas WNW-ESE se comportaram como falhas sintéticas do tipo P de Riedel;

- Fase TD (Transcorrência Dextral E-W), que ocorreu durante o Pleistoceno, é marcado por uma compressão NW-SE, em razão da qual falhas NE-SW apresentam movimentação transcorrente com características transpressionais;

- Fase E2 (distensão E-W a WNW-ESE), que ocorreu desde o final do Pleistoceno ao início do Holoceno. Nessa fase se deu a segmentação definitiva da calha deposicional original, resultando na atual configuração da distribuição dos sedimentos;

- Fase C (compressão E-W a WNW-ESE), correspondendo à fase atual. Está relacionada à sismicidade intraplaca registrada na região sudeste e à reativação inversa de falhas N-S e geração de famílias de juntas conjugadas de cisalhamento.

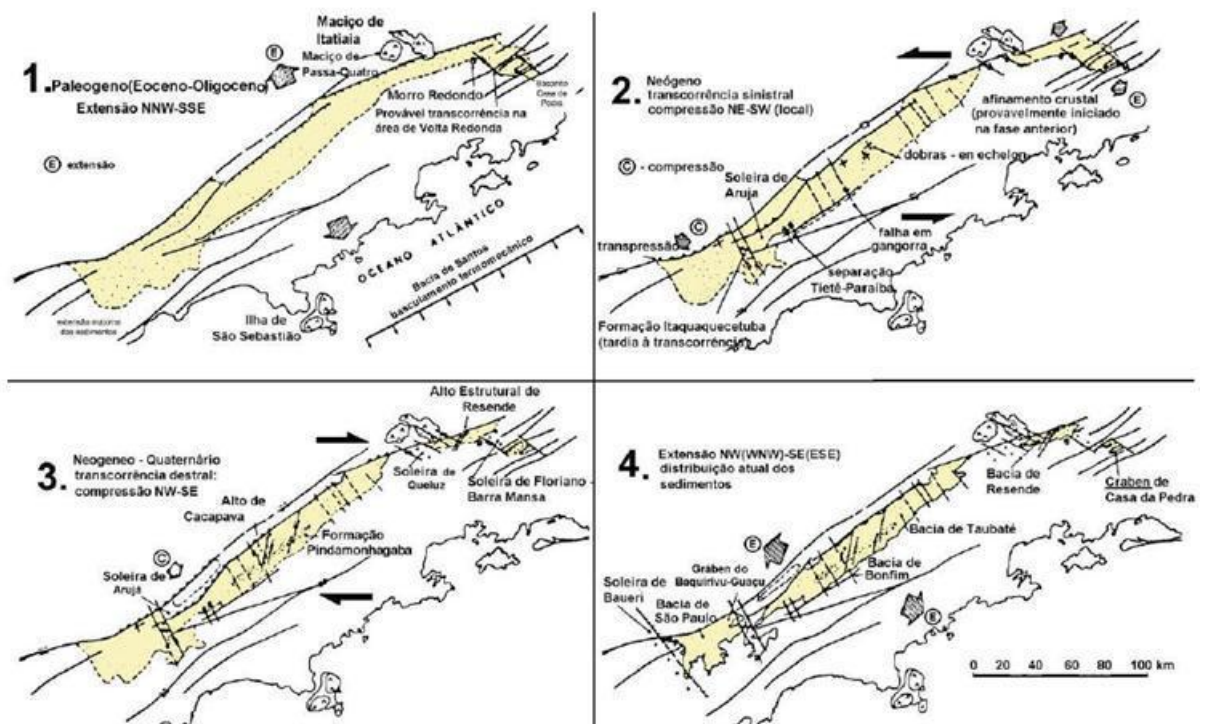


Figura 6 - Etapas da evolução tectônica do Rift Continental do Sudeste do Brasil. Fonte: Riccomini (1989).

Riccomini (1989) propôs que a alternância entre transcorrência sinistral e dextral E-W, e conseqüentemente de esforços trativos e compressivos, respectivamente, estaria relacionada ao balanço entre as taxas de abertura na cadeia mesoatlântica (*ridge push*) e de subducção da Placa de Nazca sob a Placa

Sul Americana (*slab pull*). Quando a taxa de subducção se torna maior que a de abertura, predomina um estado de transcorrência dextral, e quando a taxa de abertura se torna maior que a de subducção, predomina um estado de transcorrência sinistral.

3.3. Estratigrafia e evolução tectônica da Bacia de Volta Redonda

A maior ocorrência de registros sedimentares paleógenos da Bacia de Volta Redonda encontra-se no denominado Gráben de Casa de Pedra, que consiste em uma depressão tectônica de orientação ENE-WSW, com área em torno de 13 km² (figuras 2 e 7). Nessa região, os sedimentos estão bem preservados e ultrapassam os 100 m de espessura, além de apresentarem derrames de rocha ultrabásica alcalina (ankaramitos) entre os sedimentos paleogênicos (Riccomini *et al.*, 1983).

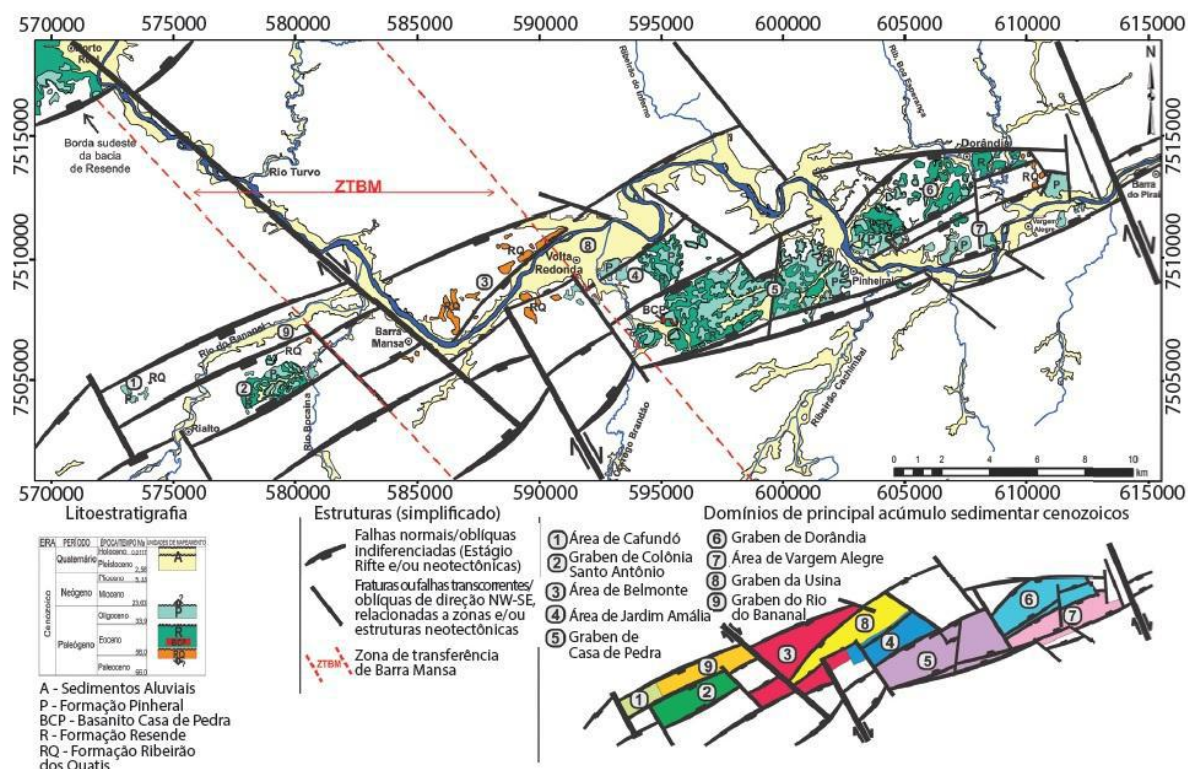


Figura 7 – Mapa geológico da região da Bacia de Volta Redonda. Fonte: Negrão *et al.* (2015).

Negrão (2014) e Negrão *et al.* (2015) definiram quatro novos grábens (figuras 2 e 7), sendo dois paleogênicos (Gráben de Dorândia, localizado a leste do Gráben de Casa de Pedra, e Gráben de Colônia Santo Antônio, a oeste da bacia) e dois quaternários (Gráben da Usina, situado na porção central da bacia e região mais

urbanizada da cidade de Volta Redonda, e Gráben do Rio do Bananal, situado na porção oeste da bacia e a norte do Gráben Colônia Santo Antônio).

Além desses grábens, o registro sedimentar da Bacia de Volta Redonda está associado a ocorrências menos contínuas de sedimentos sobre o embasamento pré-cambriano (Figuras 2 e 7), especialmente nas áreas das cidades de Volta Redonda e Barra Mansa, nas margens do rio Paraíba do Sul (Negrão, 2014; Negrão *et al.*, 2015).

Em relação ao quadro estratigráfico da Bacia de Volta Redonda, neste trabalho foi adotada a coluna estratigráfica de Negrão (2014) (Figura 8), que revisou a coluna anteriormente proposta por Sanson (2006). Nessa nova coluna, Negrão (2014) propôs correções em relação às discordâncias erosivas e aos limites temporais de cada unidade, principalmente quanto à relação entre a Formação Resende e os derrames ankaramíticos (Basanito Casa de Pedra).

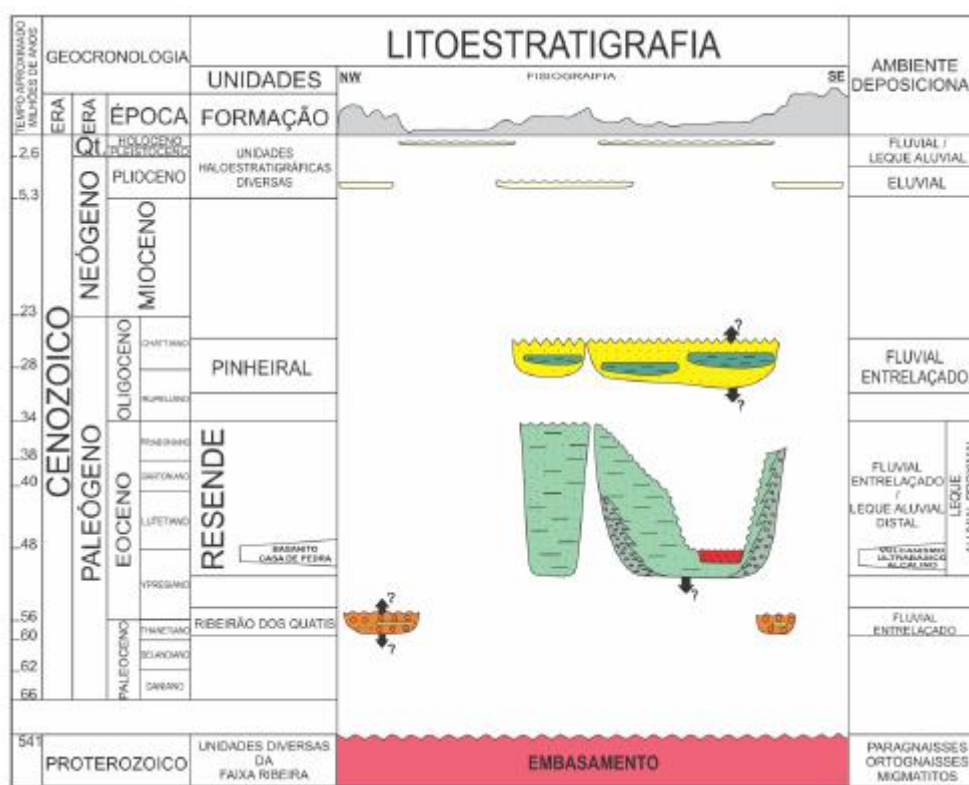


Figura 8 – Coluna litoestratigráfica para a região da Bacia de Volta Redonda. Fonte: Negrão (2014).

De acordo com Sanson (2006) e Negrão (2014), as principais unidades litoestratigráfica que ocorrem na bacia são:

- **Formação Ribeirão dos Quatis**, que corresponde aos depósitos mais antigos da bacia, ocorrendo em manchas isoladas em inconformidade com o embasamento gnáissico. Essa unidade se caracteriza por uma sucessão de camadas de conglomerados com intercalações de arenitos feldspáticos, podendo ocorrer lentes pelíticas. O paleoambiente interpretado é de canais fluviais entrelaçados, anterior à fase principal de reativação do sistema de falhas ENE-WSW;
- **Formação Resende**, que representa o registro sedimentar mais expressivo da bacia, sendo caracterizada por arenitos maciços e estratificados, sobre camadas finas de conglomerado, podendo ocorrer camadas de pelitos no topo dessas sucessões, configurando uma alternância de ciclos granodecrescentes. Esse registro é interpretado como fluvial entrelaçado;
- **Basanito Casa de Pedra**, que corresponde a corpos de rocha ultrabásica alcalina extrusiva, rica em fenocristais de olivina e de augita (ankaramito), apresentando textura porfirítica, com vesículas e amígdalas. Segundo Sanson *et al.* (2006), os derrames ocorreram em ao menos três episódios e estariam associados à fase máxima de distensão crustal do RCSB;
- **Formação Pinheiral**, que corresponde a uma sucessão sedimentar em discordância com a Formação Resende e, em alguns locais, com o Basanito Casa de Pedra. Esta unidade é composta por ciclos granodecrescentes de arenitos e conglomerados, além de camadas pelíticas laminadas ou maciças, sendo interpretada como um registro de canais fluviais entrelaçados, com períodos de inundação registrada pelos pelitos;
- **Sedimentos neogênicos**, que ocorrem em discordância com o registro sedimentar paleogênico da Bacia de Volta Redonda ou sobre o embasamento, sendo caracterizados por depósitos arenosos e argilosos que recobrem colinas de topografia suave;
- **Sedimentos quaternários**, representados por depósitos aluviais e coluviais, preservados em cabeceiras de drenagens e fundos de vales.

Sanson (2006) e Negrão (2014) identificaram quatro fases tectônicas rúpteis na Bacia de Volta Redonda, e as correlacionaram àquelas descritas por Riccomini (1989) e Riccomini *et al.* (2004):

- Fase E1 (distensão NW-SE) - não foram identificadas estruturas tectônicas que pudessem ser associadas ao evento distensivo E1 na Bacia de Volta Redonda, mas um estudo detalhado da distribuição de depósitos paleogênicos e de lineamentos estruturais indicou a atuação de um regime distensivo NW-SE com idade compatível com essa fase;
- Fase TS (Transcorrência Sinistral E-W) - os sistemas de falhas que se associam a esta fase afetaram apenas depósitos paleogênicos, não ocorrendo nas coberturas neogênicas e quaternárias, sugerindo que a idade desta fase tectônica se encontre entre o final do Oligoceno e o Mioceno;
- Fase TD (Transcorrência Dextral E-W) - de idade pleistocênica, afetou depósitos paleogênicos, neogênicos e pleistocênicos, mas não deforma os registros holocênicos;
- Fase E2 (distensão NW-SE) - essa fase afeta desde os depósitos paleogênicos até os sedimentos holocênicos.

3.4. O afloramento estudado

O afloramento selecionado para o trabalho corresponde a um corte a meia encosta em uma colina. Tem orientação N-S, aproximadamente 18 metros de altura por 54 metros de largura e apresenta um patamar que o divide em uma parte baixa e uma parte alta (Figura 9).

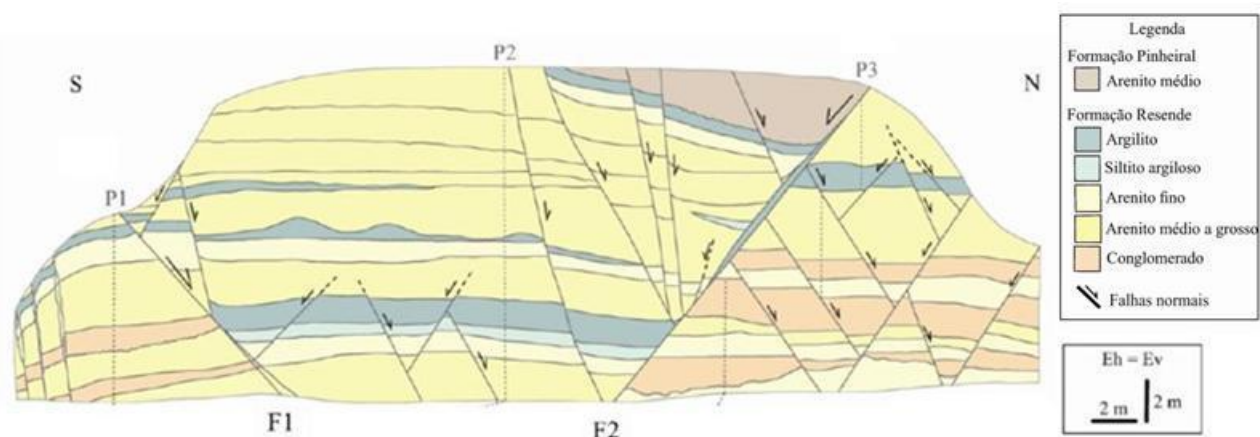


Figura 9 – Seção geológica do afloramento estudado no presente trabalho. Fonte: Maciel (2016). F1 e F2 - Falhas principais do afloramento; P1, P2 e P3 - Perfis sedimentológicos realizados pela autora;

A caracterização estrutural e estratigráfica do afloramento foi realizada por Maciel (2016). Segundo essa autora, a principal unidade estratigráfica que compõe o afloramento é a Formação Resende, nele representada por intervalos de arenitos, intercalados com conglomerados e lamitos. Maciel (2016) identificou ainda, em um pequeno intervalo na parte superior do afloramento, arenitos e lamitos muito intemperizados da Formação Pinheiral.

De acordo com a caracterização estrutural de Maciel (2016), as camadas da Formação Resende se apresentam seccionadas por duas falhas principais (F1 e F2), que dividem o afloramento em três blocos, formando um padrão de horstes e gráben (Figura 9). Essas duas falhas têm orientação ENE-WSW, mergulhos opostos e rejeitos de 5 m (F1) e 9 m (F2).

Corroborando a interpretação de que essas falhas sofreram a atuação de um regime de esforços distensivos, são apontadas características de deslocamento vertical das camadas e a orientação das estrias paralelas aos mergulhos dos planos. Existem elementos cinemáticos e geométricos indicativos de movimentações tectônicas anteriores, de caráter transcorrente, tais como: estrias superpostas (uma vertical, mais evidente, e outra sub-horizontal) identificadas em falhas menores; variação abrupta na espessura das camadas de um lado e de outro de F1 e F2; e fraturas tipo Riedel indicando movimentação dextral.

A partir do resultado da análise de paleotensões, Maciel (2016) identificou três eventos tectônicos atuantes no afloramento, compatíveis com as fases TS, TD e E2 do RCSB.

4. Metodologia

4.1. Bases conceituais

“A utilização de modelos em geologia estrutural e geotectônica é de fundamental importância para se compreender as deformações e a estruturação do planeta.” (Moraes, 2016, p.1)

Esses modelos podem ser classificados como: conceituais; físicos diretos; físicos com materiais análogos; matemáticos analíticos; e matemáticos numéricos.

Para este trabalho, foi utilizado um modelo matemático numérico, que basicamente descreve processos físicos de interesse em termos matemáticos, e

opera resolvendo conjuntos de equações selecionadas (Larson, 2005; Moraes, 2016). A escolha do modelo numérico deu-se pela praticidade para se gerar modelos através do computador, e também por permitir fazer alterações necessárias na geometria do mesmo e nas propriedades dos materiais.

O método dos elementos finitos baseia-se na resolução de equações diferenciais parciais, através da conexão entre os elementos individualizados no meio considerado. Algumas das vantagens em se utilizar esse método para o trabalho em questão são: visualizar a deformação em passos; trabalhar com materiais de propriedades distintas no mesmo modelo; e refinar a malha, ou seja, aumentar o número de elementos em determinada região que seja necessário maior detalhe.

A mecânica do contínuo é o ramo da mecânica clássica que estuda a resposta de materiais para diferentes condições de carga (Moraes, 2016). Os meios contínuos são compostos por agregados de “partículas”, que representam a menor unidade possível na subdivisão de materiais sólidos ou fluidos, nos quais as suas propriedades físicas variam continuamente e gradativamente no espaço.

Outro conceito importante para o desenvolvimento do presente estudo é o de estratigrafia mecânica. Trata-se da subdivisão de uma sucessão estratigráfica, de acordo com a escala interesse, em unidades mecânicas. A estratigrafia mecânica está relacionada à litologia, condições de pressão e temperatura, e o histórico de tensão a que o pacote rochoso foi submetido (Gross, 2003). Assim, essa subdivisão pode ser baseada na variação dos litotipos (e.g. cada rocha é uma unidade mecânica), na variação da espessura das camadas (e.g. uma sequência de camadas delgadas de arenitos é uma unidade mecânica, uma sequência de camadas espessas do mesmo arenito é outra unidade mecânica) ou qualquer outra combinação que atenda ao propósito amostral do modelo.

O entendimento dos parâmetros mecânicos que o TECTOS utiliza para classificar os materiais é importante para a compreensão de como a variação dos mesmos afeta os resultados dos modelos. O Módulo de Young (E) mede a razão entre a tensão (σ) e a elongação de uma linha na direção da carga aplicada (e); pode-se pensar que quanto mais alto o valor do Módulo de Young ($E = \sigma/e$) mais resistente é o material à deformação. A Razão de Poisson ($\nu = -(e_1/e_3)$) mede a proporção de quanto o material encurta longitudinalmente (e_3) e estende

lateralmente ($e_1=e_2$) quando submetido a uma compressão uniaxial; para materiais naturais $\nu < 0,5$, sendo $\nu = 0,5$ para um material ideal, incompressível. O Coeficiente de Biot descreve em um modo geral o comportamento poroelástico de um meio poroso submetido a uma dada compressão; os valores variam de 0 a 1, sendo que quanto mais próximo de 0 a tensão é sustentada pelos fluidos contidos nos poros (material saturado) e quanto mais próximo de 1 a tensão é sustentada pelos sólidos (material seco). O Ângulo de Dilatância (Ψ) está relacionado à variação do volume em materiais granulares (e.g. solos; areia) quando submetidos a tensões cisalhantes; ele pode ser calculado com base no círculo de Mohr-Coulomb, a partir de um teste de compressão triaxial, através de um gráfico da deformação volumétrica versus a deformação axial. O Ângulo de Fricção (ϕ) é um parâmetro representativo da resistência do material ao cisalhamento; a partir do círculo de Mohr-Coulomb é utilizado para determinar qual combinação entre a tensão de cisalhamento e a normal que irá causar a ruptura do material. A Coesão (C_0) mede a força entre os átomos de um material, quanto mais coesa a rocha, mais resistente à tensão cisalhante. A Densidade (ρ) é o parâmetro que mede a relação massa/volume; é expressa como a gravidade específica, que é a densidade da rocha em relação à densidade da água, sendo essencial para o cálculo do peso da coluna de rochas à profundidade de interesse (Means, 1976; Terzaghi, 1943).

4.2. Etapas realizadas

A realização do presente trabalho foi fundamentada a partir do cumprimento das seguintes etapas: i) interpretação de fotomosaico do afloramento; ii) levantamento de aspectos estratigráficos e estruturais em campo; iii) elaboração de uma seção estratigráfica sintética do afloramento; e iv) modelagem numérica.

A elaboração do fotomosaico foi feita a partir da junção de duas fotos (Figura 10), a partir das quais foram observadas diferentes texturas e cores que permitiram a identificação das principais falhas e intervalos litológicos.

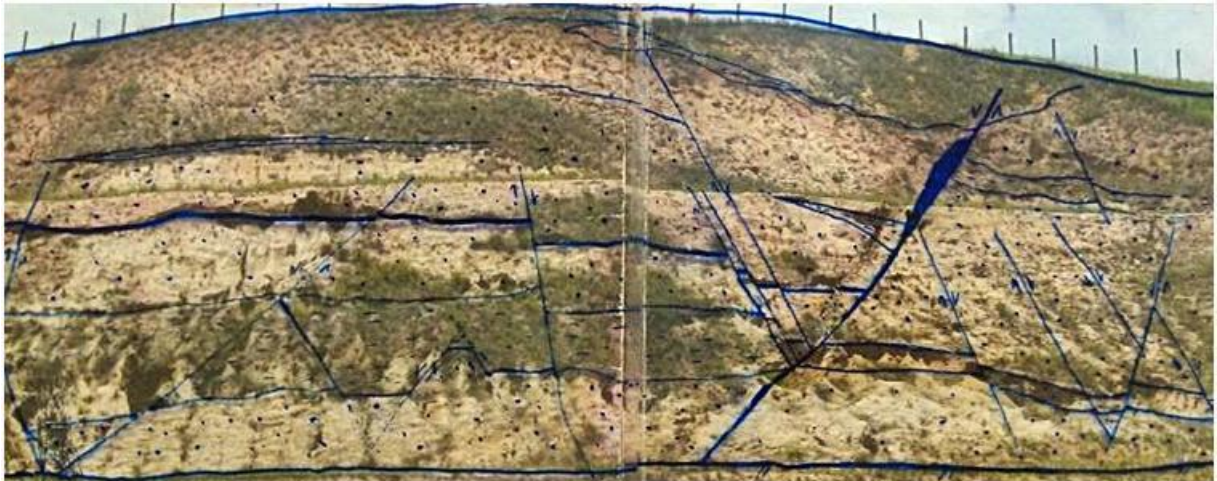


Figura 10 – Fotomosaico interpretado no presente estudo.

Os levantamentos de campo foram realizados em duas etapas. Na primeira etapa, em fevereiro de 2015, foi feita a correção da interpretação preliminar do fotomosaico. Na segunda etapa, em junho de 2016, foi feito o levantamento de detalhe das espessuras das zonas de dano nos blocos alto e baixo das falhas F1 e F2.

A partir do fotomosaico, ajustado com as informações de campo, foi feita uma seção estratigráfica sintética, honrando a sucessão e as espessuras médias dos intervalos litológicos identificados (Figura 11). Essa seção demonstra o principal padrão litológico do afloramento (intercalação de arenitos e pelitos), sem a influência das falhas, de forma a servir como base para a estratigrafia mecânica para a modelagem numérica. Objetivando a simplificação da malha e a otimização do tempo de processamento dos modelos, camadas de menor espessura foram desconsideradas.



Figura 11 – Seção estratigráfica sintética do afloramento.

Também a partir da interpretação do fotomosaico, foram obtidas as relações espaciais (*i.e.* inclinação e distância) entre as falhas F1 e F2, que compõem o arcabouço estrutural dos modelos numéricos. Falhas menores identificadas no fotomosaico também foram desconsideradas, visando à simplificação da malha e à otimização do tempo de processamento. Uma vez que o objetivo da modelagem numérica foi observar a variação da zona de dano de falhas nos intervalos areníticos e pelíticos, e as falhas F1 e F2 são as que apresentam maior desenvolvimento dessas zonas, considerou-se que essa simplificação não comprometeria o objetivo.

Para a etapa de modelagem numérica foi utilizado o programa TECTOS (PETROBRAS & TECGRAF/PUC-RJ). Este programa é fundamentado na mecânica do contínuo e no método dos elementos finitos, para a modelagem 2D ou 3D da deformação em meios geológicos. No presente trabalho foi utilizada a versão 2D do programa, pois a modelagem foi realizada sobre a seção do afloramento a partir do fotomosaico.

Os dados de entrada para a construção de um modelo no TECTOS são: a geometria do modelo; a geometria de descontinuidades estruturais (quando houver); os parâmetros mecânicos dos materiais envolvidos na deformação (*i.e.* módulo de

Young; coeficiente de Poisson; densidade; coeficiente de Biot; coesão; ângulo de fricção; ângulo de dilatância); as tensões atuantes; os anteparos; e os critérios de ruptura.

A arquitetura básica dos modelos nesse trabalho (*i.e GeometricModel*) foi construída a partir da imagem da estratigrafia sintética, importada para o TECTOS como bmp e depois descartada, sobre a qual foram desenhados os limites de camadas da estratigrafia mecânica (Figura 12). Essa imagem corresponde às dimensões reais da seção considerada no afloramento (18 m de altura por 40 m de largura). As dimensões dos limites externos dos modelos, entretanto, são maiores que a da seção (Figura 12). Essa medida foi tomada para se evitar a formação de artefatos dentro da área a ser analisada pela aplicação de tensão ou posicionamento de suportes (*i.e.* efeito de borda). As cores representam os diferentes pacotes sedimentares identificados no fotomosaico, que no modelo correspondem às diferentes unidades mecânicas utilizadas. A unidade “Entorno” foi introduzida acima e abaixo da sucessão estratigráfica sintética, para isolar mecanicamente as unidades de interesse dos efeitos de borda do topo e da base do modelo.

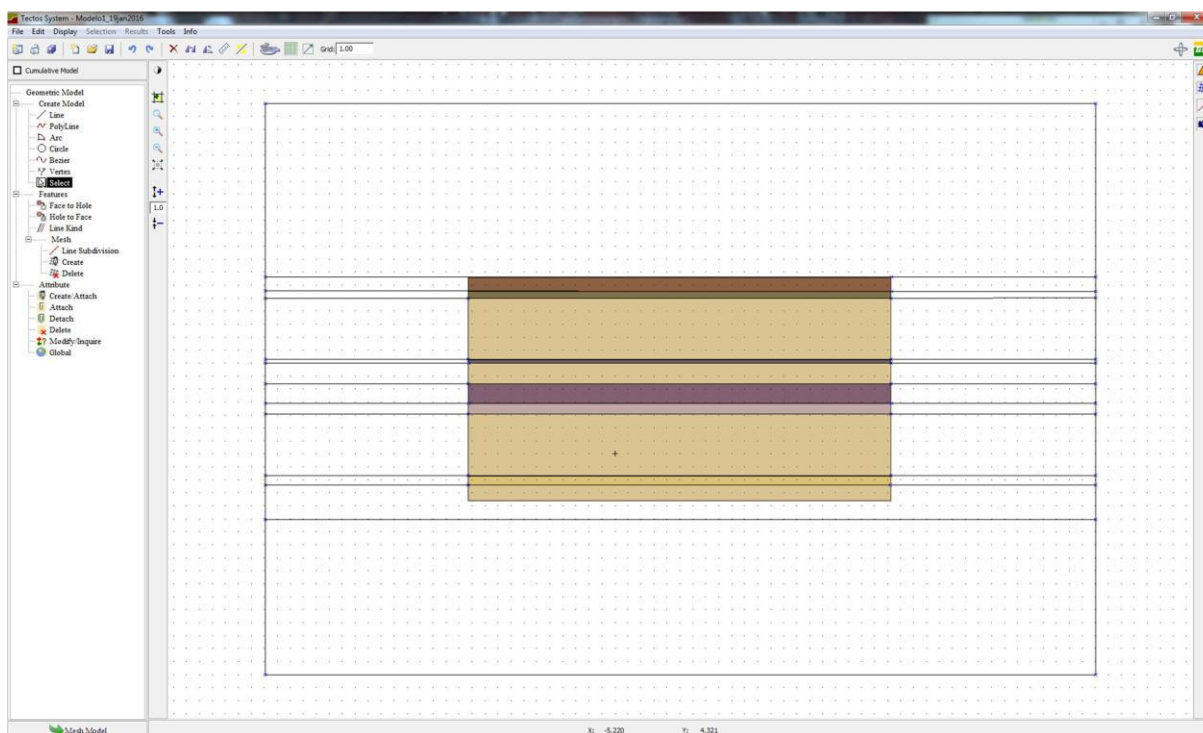


Figura 12 – Posicionamento da figura guia no *software* TECTOS.

O passo seguinte foi a geração da malha (Figura 13). Nesse estudo optou-se pela utilização de malha do tipo triangular, por esse tipo de malha permitir a melhor

acomodação de geometrias complexas, como os cruzamentos entre falhas e limites de camadas presentes nos modelos aqui construídos.

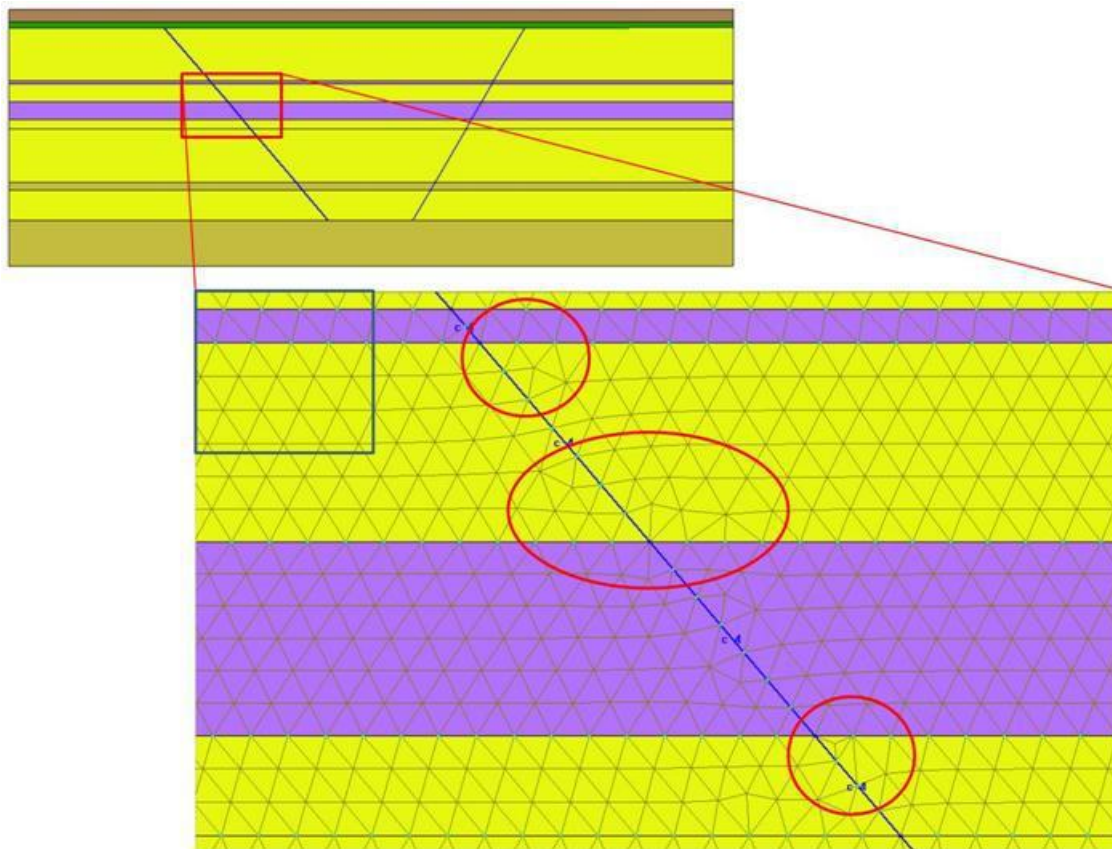


Figura 13–Seção representativa apresentando a malha *Triangulation* e a diferenciação das camadas por cores.

Como não existem, até o momento, ensaios mecânicos de laboratório para as rochas das formações Resende ou Pinheiral, as propriedades atribuídas à estratigrafia mecânica dos modelos foram obtidas da biblioteca de propriedades de rochas disponível no TECTOS. Essa biblioteca foi construída pela equipe desenvolvedora do programa, a partir de bibliografia específica sobre mecânica de rochas. Para os modelos elaborados foram selecionadas rochas composicionalmente similares àquelas encontradas no afloramento e as propriedades destas rochas foram assumidas como equivalentes às das formações Resende e Pinheiral.

A última etapa para a criação do modelo geométrico consistiu em aplicar as condições de tensão e barramento (*i.e.* anteparos) às bordas do modelo. No caso do primeiro modelo elaborado (Figura 14), foram colocados anteparos nas duas bordas

laterais, para impedir o deslocamento horizontal. Na base também foram colocados dois anteparos, para impedir o deslocamento vertical, deixando a parte central da base do modelo livre. Na parte central da borda superior foi aplicado um carregamento vertical com valor total de 5 MPa (aplicado gradualmente em 100 passos de incremento de tensão). Assim, pretendeu-se que o modelo reproduzisse a geração do gráben observado no afloramento. As propriedades mecânicas utilizadas nesse modelo estão relacionadas no Quadro 1.

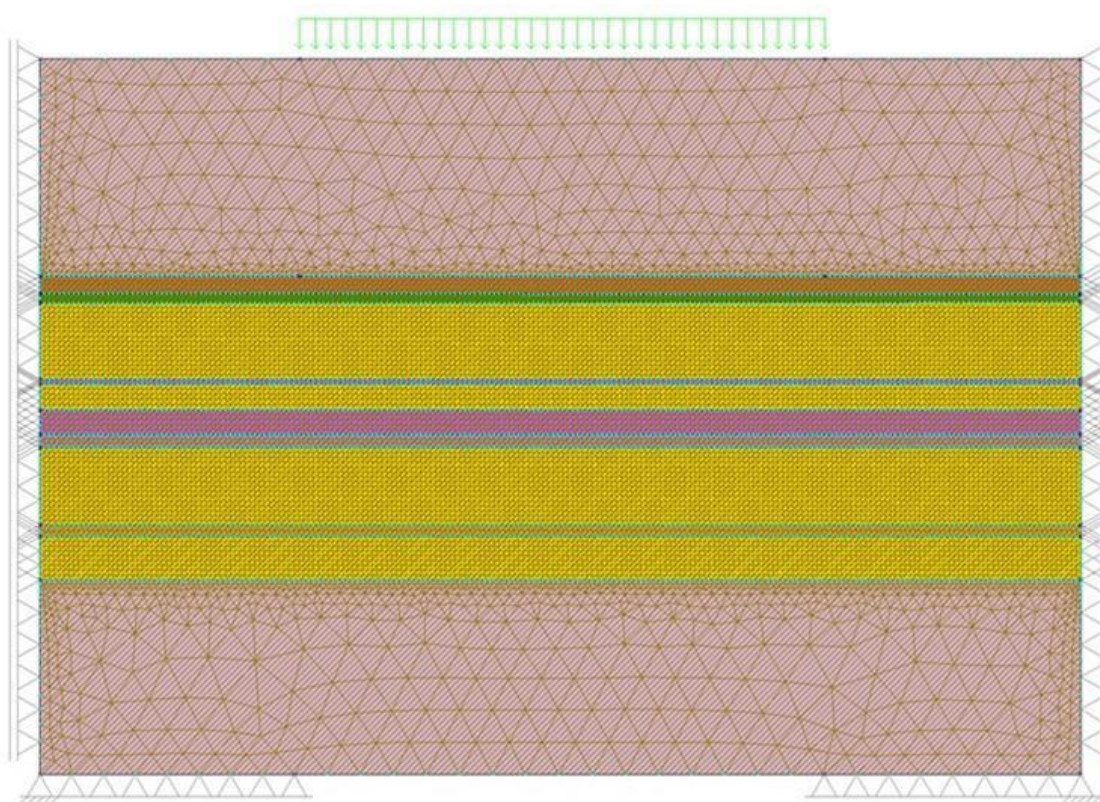


Figura 14 – Condições de contorno apresentadas no primeiro modelo geométrico elaborado.

Buscando reproduzir a geometria da deformação observada no afloramento, principalmente a variação das zonas de dano de F1 e F2, outros modelos foram executados, alterando as propriedades mecânicas e arranjos geométricos de aplicação de tensões e suportes. Isso se fez necessário em razão do desconhecimento a respeito das propriedades mecânicas reais das rochas e das condições de tensão e cinemática operantes no evento que causou a formação do gráben e das zonas de dano das falhas.

Os resultados dos modelos são apresentados no programa TECTOS através da representação gráfica de diversos parâmetros, distribuídos ao longo da malha. Esses parâmetros traduzem o estado de tensões acumuladas ou de deformação a cada ponto. Para ilustrar os resultados dos modelos executados nesse estudo, foi selecionado o parâmetro RFS (*Ratio of Failure by Stress*), que traduz o quanto o material submetido à tensão (i.e. rocha ou fratura preexistente) está próximo de tocar a envoltória de ruptura, no caso do critério de Mohr-Coulomb (Figura 15). Valores de RFS variam de 0 (longe da envoltória) a 1 (tocando a envoltória).

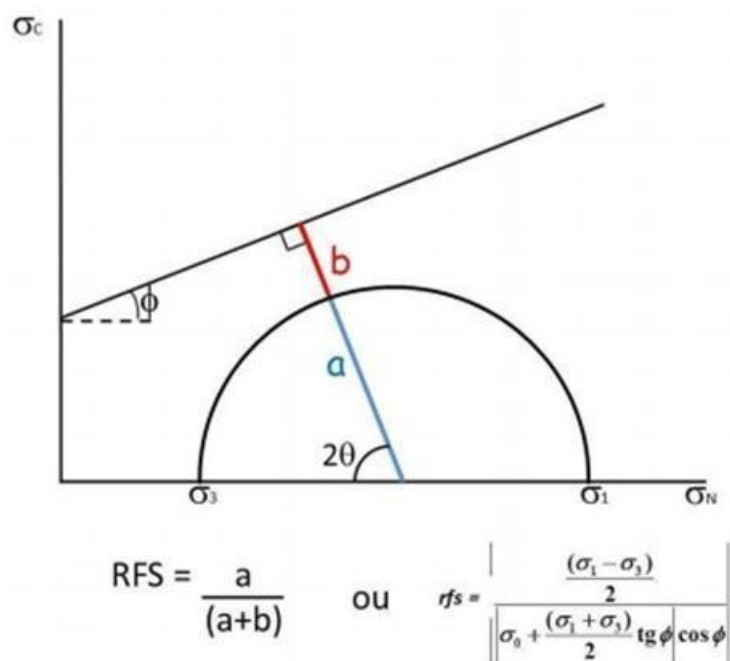


Figura 15– Parâmetro RFS de acordo com o critério de Mohr-Coulomb (Moraes, 1995), onde **a** varia de acordo com as tensões aplicadas ao material, e **b** varia em resposta à **a**.

Quadro 1 - Conversão da nomenclatura das unidades mecânicas no *software* e na seção sintética.

Nomenclatura	
Unidade mecânica Tectos	Unidade mecânica afloramento
Argilito_Topo	Argilito Pinheiral
ArenitoMedioCons	Arenito fino
ArenitoPoucoCons	Arenito médio a grosso
ArenitoMedioCons_Topo	Arenito Pinheiral
Argilito	Argilito
FolhelhoMedioConsVar	Siltito

Quadro 2 – Propriedades de rochas utilizadas no Modelo 1.

Material	Critério Mecânico	Módulo de Young (Pa)	Poisson	Densidade Kg/m ³	Coeficiente de Biot	Coesão			Ângulo de Fricção (°)			Ângulo de dilatação (°)		
						Relative strain	Inicial	Final	Relative strain	Inicial	Final	Relative strain	Inicial	Final
Entorno	Elastic linear	1e10	0.4	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Arenito médio a grosso	Mohr-Coulomb non-associated constant	1e9	0.45	2000	0.8	1000000			26			8		
Arenito Fino	Mohr-Coulomb non-associated constant	150e9	0.28	2330	0.9	50000000			30			12		
Siltito	Mohr-Coulomb non-associated variable	35e9	0.15	2550	0.9	Relative strain	Inicial	Final	Relative strain	Inicial	Final	Relative strain	Inicial	Final
						0.001	48000000	43000000	0.001	24	24	0.001	8	8
Argilito	Mohr-Coulomb non-associated constant	1e9	0.4	2000	0.9	1000000			20			6		
Argilito Pinheiral	Mohr-Coulomb non-associated constant	1e9	0.4	2000	0.9	1000000			20			6		
Arenito Pinheiral	Elastic linear	150e9	0.28	2330	0.9	-	-	-	-	-	-	-	-	-

5. Resultados

5.1. Interpretação do fotomosaico

A partir da interpretação do fotomosaico (Figura 16), observou-se uma predominância de pacotes areníticos no afloramento, intercalados por camadas lamíticas de espessuras variadas, por vezes apresentando geometria tabular e outras lenticulares. As camadas areníticas estão intercaladas também com níveis de conglomerados, que não puderam ser identificados através do fotomosaico.

Também são facilmente identificadas as falhas F1 e F2 e a configuração geral do afloramento, em um padrão de gráben e horstes. Diversas outras falhas menores foram identificadas a partir do fotomosaico, sendo que em algumas apenas o traço da falha é visível, devido a um pequeno deslocamento das camadas. Não foi possível observar a variação da zona de dano das falhas através da interpretação do fotomosaico.

A seção final (Figura 16) resulta da interpretação do fotomosaico após as correções de campo.

5.2. Dados de campo

As medições realizadas em campo indicam que existe, de fato, variação das zonas de dano ao longo das falhas F1 e F2.

No caso de F1, não foi possível obter os dados completos da variação da espessura da zona de dano, em razão de uma feição erosiva que afeta a porção média a superior do bloco alto e, também, a parte superior do bloco baixo. Desta forma, apenas a descrição da zona de dano da falha F2 será apresentada nesse estudo.

Ao longo de F2, o levantamento da variação da zona de dano foi feito a partir de medidas de espessura da zona de dano nos blocos alto e baixo, para cada litologia (Figura 17). Foi observado que a espessura da zona de dano no bloco alto não variou muito ao longo das camadas, enquanto no bloco baixo percebe-se que a zona de dano se concentra acima da camada mais espessa de argilito, tornando-se mais delgada até chegar ao mesmo argilito no bloco alto.



Figura 16 – Seção geológica do afloramento estudado, elaborada a partir da interpretação do fotomosaico e checagem em campo.

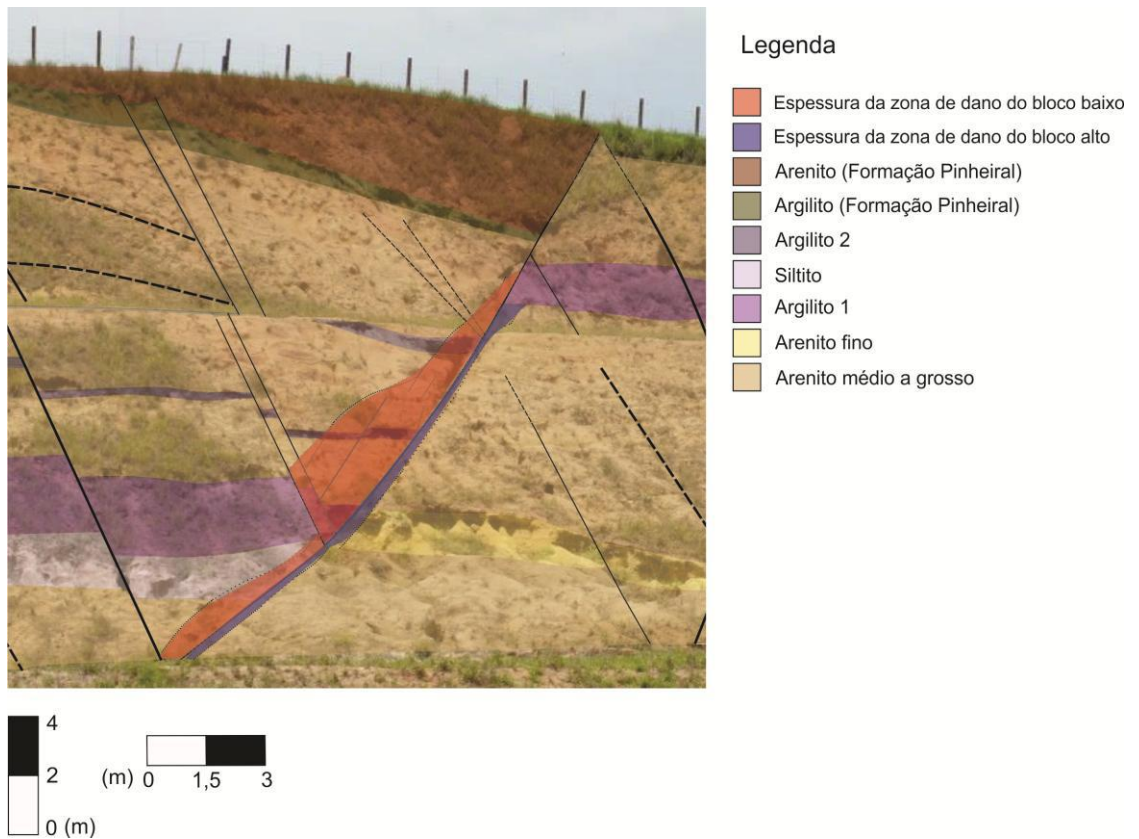


Figura 17 – Variação da espessura da zona de dano da falha F2.

Deve-se ressaltar a existência de duas falhas menores, com mergulhos opostos à F2, que podem representar uma barreira mecânica para o desenvolvimento da zona de dano da falha. Outra possível explicação para o adelgaçamento dessa zona de dano é a presença da camada de argilito onde exatamente a zona de dano se torna menos espessa. Essa camada, por ser significativamente mais plástica que as camadas arenosas acima, pode não ter respondido de maneira totalmente rúptil à deformação, ou ainda, o excesso de vegetação sobre essa camada pode ter interferido na identificação da zona de dano.

5.3. Modelos numéricos

Os resultados dos modelos apresentados a seguir referem-se à distribuição dos valores de RFS (*Ratio of Failure by Stress*).

Modelo 1

A partir da arquitetura, parâmetros mecânicos e estado de tensões aplicado ao Modelo 1, pretendia-se reproduzir a formação do gráben observado no afloramento, condicionado pelas falhas F1 e F2. Entretanto, esse não foi o resultado gerado pelo modelo, conforme ilustrado na Figura 18. O resultado obtido sugere que a unidade mecânica Siltito acumula grande parte da deformação, de forma aproximadamente uniforme ao longo da camada. Outra parte foi acumulada na camada correspondente à unidade Arenito Fino, nas regiões posicionadas sobre os suportes da base.

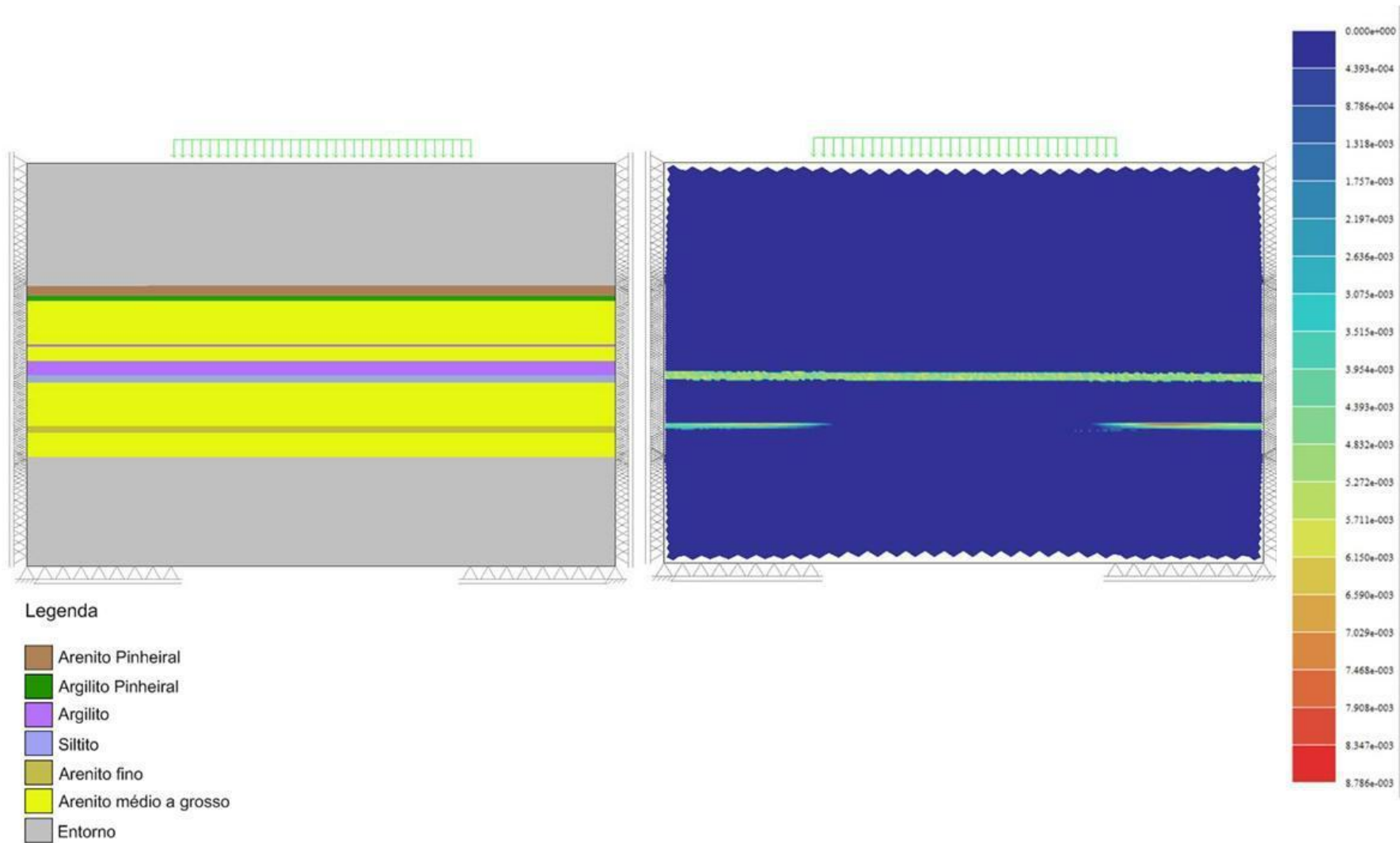


Figura 18 – Resultado do Modelo 1. No lado esquerdo, está representada a estratigrafia mecânica do modelo e as suas condições de contorno (ver também a Figura 14); no lado direito, estão resultado do Modelo 1 no passo 40. A escala corresponde aos valores de RFS. As propriedades de rochas utilizadas neste modelo estão listadas no Quadro 1.

Modelo 12 e Modelo 12-b

Dentre os 33 modelos executados, dois (modelos 12 e 12-b) apresentaram melhores resultados em relação à reprodução da geometria do gráben e em demonstrar como a variação de propriedades mecânicas de rocha altera o aspecto geral da deformação e, especificamente, o desenvolvimento das zonas de dano.

Ambos os modelos possuem a mesma arquitetura (Figura 19), que difere, porém, da arquitetura do Modelo 1.

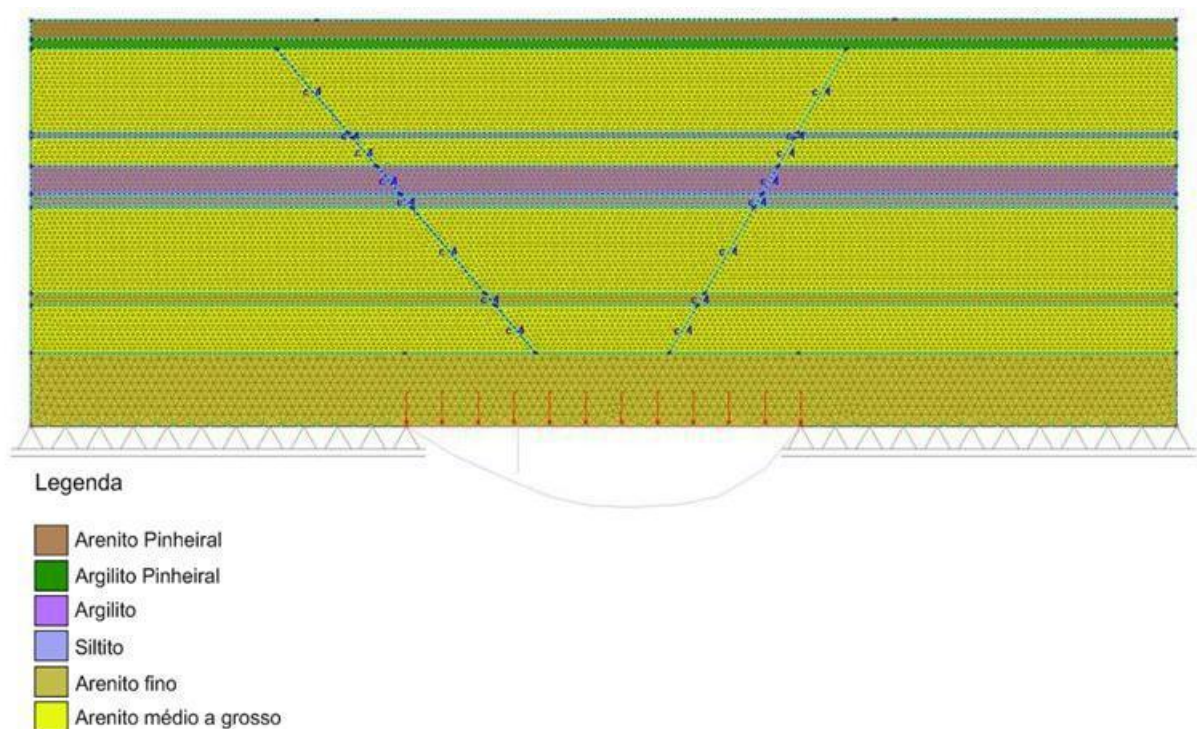


Figura 19 –Arquitetura dos modelos 12 e 12-b.

Os suportes laterais foram excluídos, para permitir que a malha se deslocasse na direção horizontal. Foram colocadas descontinuidades que representam as duas falhas principais. Não foi aplicada tensão em nenhuma das bordas; ao invés disso, foi prescrita uma geometria de deslocamento, com a qual se pretendeu rebaixar a parte central do modelo em 5 m (equivalente ao rejeito de F1), forçando o desenvolvimento de um gráben. Nestes modelos o deslocamento foi distribuído em 10 passos, para otimizar o tempo de máquina.

Quanto às propriedades mecânicas, também houve alterações em relação ao Modelo 1 (Quadro 1), com variações entre os modelos 12 (Quadro 2) e 12-b (Quadro 3). As alterações em relação ao Modelo 1 foram: a retirada da unidade mecânica

“Entorno”; a inserção da unidade “Arenito base”; e a alteração do valor de coesão na unidade “Argilito”, de 1000000 (Modelo 1) para 3000000 (modelos 12 e 12-b). A unidade “Entorno” tinha função de isolar dos efeitos de borda do topo e da base da área de interesse do modelo. Nos modelos 12 e 12-b não houve carregamento no topo, mas ainda era necessário isolar a base, onde foi prescrito o deslocamento. Para essa função, optou-se por repetir as propriedades da unidade “Arenito Pinheiral”, renomeada como “Arenito base”, para se preservar uma certa coerência estratigráfica com as unidades acima e também por se entender que a unidade “Entorno” poderia estar muito rígida, contribuindo para a não propagação da deformação dentro do modelo.

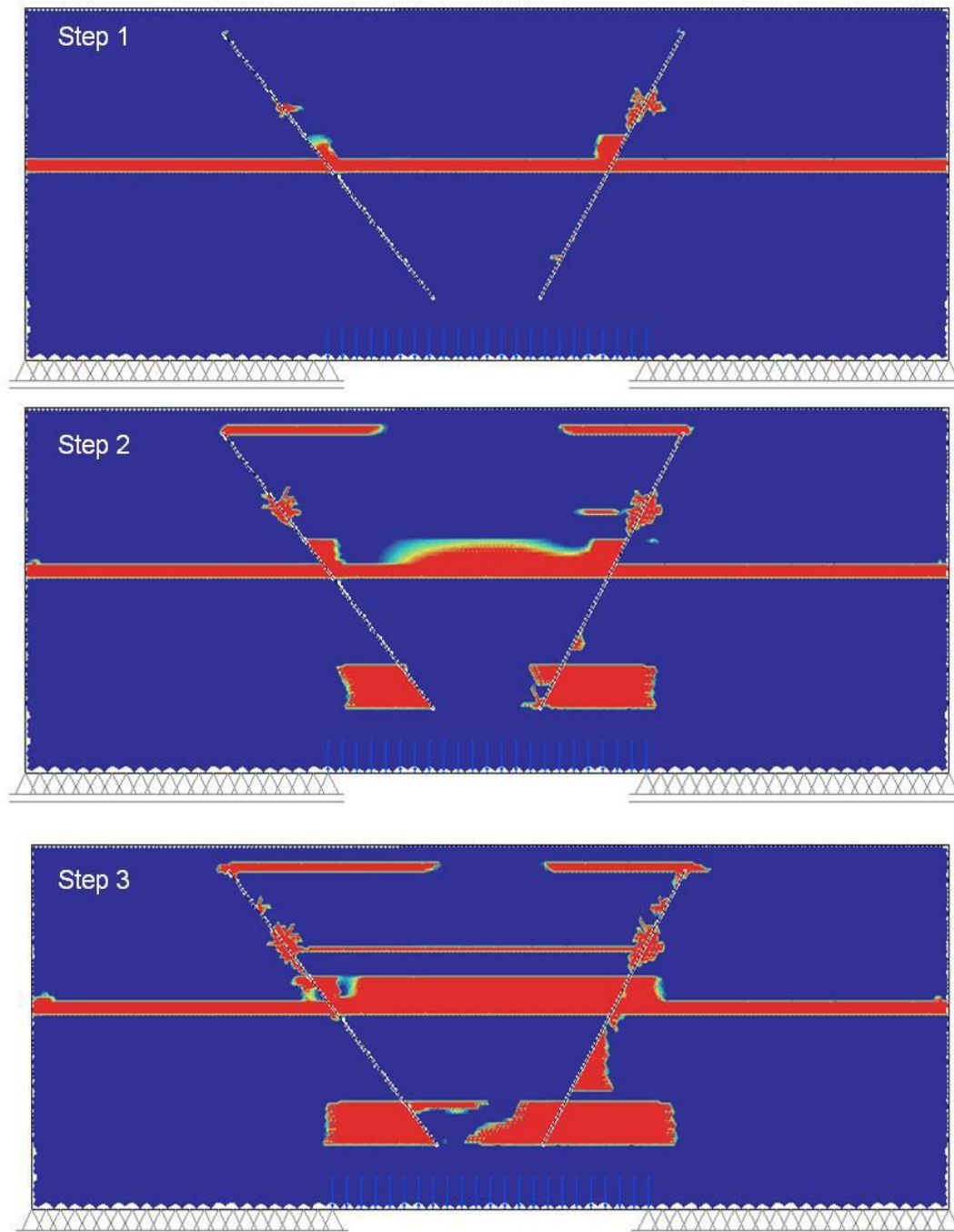
A alteração do valor de coesão da unidade mecânica “Argilito” foi uma decisão tomada a partir do entendimento de que esta unidade estava muito plástica, acumulando em demasia a deformação, dificultando a propagação da tensão para a parte interna do modelo.

O resultado do Modelo 12, do passo 1 a 3 (Figura 20), mostrou de forma razoavelmente satisfatória o desenvolvimento progressivo de zonas de dano, concentradas na unidade “Arenito médio a grosso”, preferencialmente nos blocos baixos de F1 e F2. Ainda assim se observa demasiada concentração de deformação ao longo da unidade mecânica “Siltito”. Esta unidade se configura como uma barreira mecânica, dificultando a propagação da deformação na metade inferior do modelo desde o passo 1.

A partir do passo 4, a deformação do modelo ultrapassou o limite razoável para a deformação nesse tipo de material na natureza.

O Modelo 12 foi renomeado como Modelo 12-b e novamente executado, sendo as propriedades da unidade “Siltito” substituídas por valores iguais aos da unidade “Arenito médio a grosso”. A partir dessa mudança, obteve-se uma melhor distribuição da deformação ao longo de todo o modelo. Nesta nova versão, se observou um considerável aumento das zonas de dano no bloco baixo, desde o passo 1, mas também uma forte deformação ao longo das camadas arenosas nos blocos altos, não identificadas em campo.

Modelo 12



Modelo 12-b

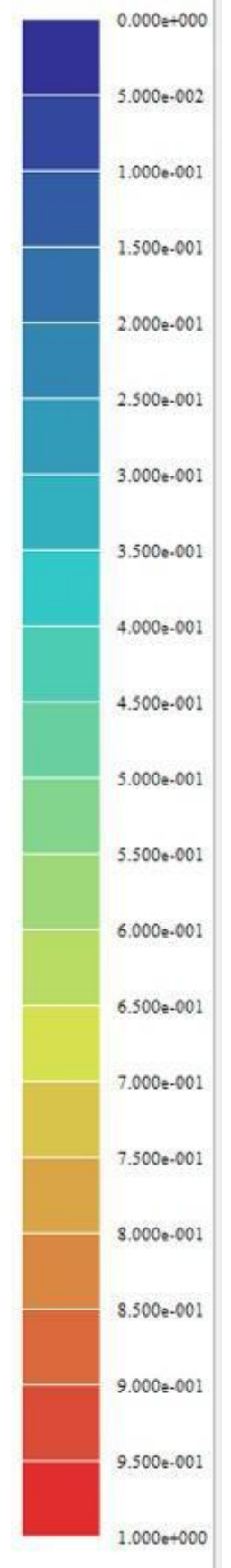
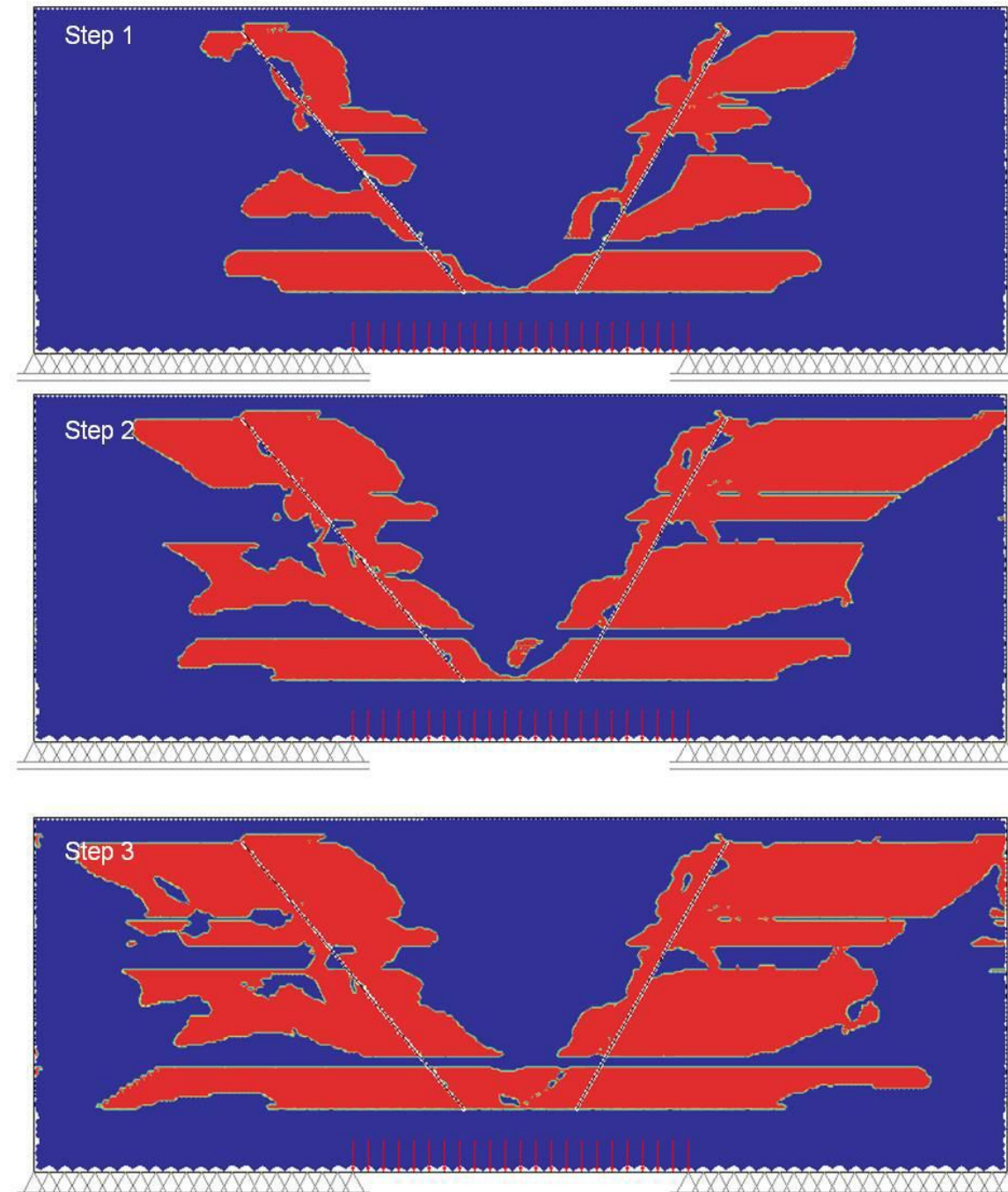


Figura 20 – Resultados dos modelos 12 e 12-b, passos 1 a 3. A escala corresponde aos valores de RFS.

Quadro 3 – Propriedades de rochas utilizadas no Modelo 12.

Material	Critério Mecânico	Módulo de Young (Pa)	Poisson	Densidade (Kg/m ³)	Coeficiente de Biot	Coesão			Ângulo de Fricção (°)			Ângulo de dilatação (°)		
						Relative Strain	Inicial	Final	Relative Strain	Inicial	Final	Relative strain	Inicial	Final
Arenito base	Elastic linear	150e9	0.28	2330	0.9	-			-			-		
Arenito médio a grosso	Mohr-Coulomb non-associated constant	1e9	0.45	2000	0.8	1000000			26			8		
Arenito Fino	Mohr-Coulomb non-associated constant	150e9	0.28	2330	0.9	50000000			30			12		
Siltito	Mohr-Coulomb non-associated variable	35e9	0.15	2550	0.9	Relative Strain	Inicial	Final	Relative Strain	Inicial	Final	Relative strain	Inicial	Final
						0.001	48000000	43000000	0.001	24	24	0.001	8	8
Argilito	Mohr-Coulomb non-associated constant	1e9	0.4	2000	0.9	3000000			20			6		
Argilito Pinheiral	Mohr-Coulomb non-associated constant	1e9	0.4	2000	0.9	1000000			20			6		
Arenito Pinheiral	Elastic linear	150e9	0.28	2330	0.9	-			-			-		

Quadro 4 - Propriedades de rochas utilizadas no Modelo 12-b.

Material	Critério Mecânico	Módulo de Young (Pa)	Poisson	Densidade (Kg/m ³)	Coefficiente de Biot	Coesão	Ângulo de Fricção (°)	Ângulo de dilatância (°)
Arenito base	Elastic linear	150e9	0.28	2330	0.9	-	-	-
Arenito médio a grosso	Mohr-Coulomb non-associated constant	1e9	0.45	2000	0.8	1000000	26	8
Arenito Fino	Mohr-Coulomb non-associated constant	150e9	0.28	2330	0.9	50000000	30	12
Argilito	Mohr-Coulomb non-associated constant	1e9	0.4	2000	0.9	3000000	20	6
Argilito Pinheiral	Mohr-Coulomb non-associated constant	1e9	0.4	2000	0.9	1000000	20	6
Arenito Pinheiral	Elastic linear	150e9	0.28	2330	0.9	-	-	-

6. Discussões

De acordo com o resultado do Modelo 1, as unidades Argilito e Arenito Fino, teriam acumulado alguma tensão, mas não o suficiente para rompê-las. Dessa forma, não haveria nenhuma deformação no afloramento. Esse resultado difere do que foi identificado no fotomosaico, e visto no afloramento. A razão dessa divergência de resultados, pode ter ocorrido devido ao Modelo 1 ter sido o primeiro teste a ser realizado, possivelmente, a arquitetura escolhida e as condições de contorno não estavam próximas da realidade. Outra possível interpretação para esse resultado seria a hipótese de que para chegar a uma configuração semelhante à atual, seria necessária a reativação de uma fase de deformação preexistente, como sugere os modelos 12 e 12-b, nos quais as falhas foram colocadas na arquitetura, e os resultados foram mais condizentes com o que foi visto em campo.

Os modelos 12 e 12-b apontam que deveria haver mais deformação (*i.e* zonas de dano; falhas) nos dois horstes do que o de fato observado no fotomosaico ou no próprio afloramento, no levantamento de campo. As possíveis razões para essa divergência de observações seriam devidas às limitações particulares de cada método. O fotomosaico tem limitação quanto à resolução das imagens que o compõem, que permitem a identificação apenas das falhas e limites de camadas mais expressivos. A análise do afloramento tem limitação quanto à preservação do registro da deformação no bloco alto de F1, em razão da existência de uma feição erosiva; e da dificuldade de identificação de falhas de pequeno rejeito no bloco alto de F2, em razão da homogeneidade composicional das camadas. Os modelos numéricos, por sua vez, também apresentam limitações quanto às propriedades mecânicas das rochas e quanto à confiabilidade das arquiteturas propostas, uma vez que não existem dados geofísicos que mostrem a geometria das estruturas em subsuperfície, a profundidade do embasamento e mesmo a geometria retilínea aplicada a F1 e F2.

O mapeamento de detalhe feito ao longo de F2 (Figura 17) mostrou que a espessura da zona de dano no bloco alto não variou muito ao longo das camadas (mais arenosas), enquanto no bloco baixo a zona de dano é mais espessa nas camadas de arenito, até o limite da camada principal de argilito. As hipóteses para

explicar essa observação foram a presença de duas falhas menores, com mergulhos opostos à F2, que poderiam representar uma barreira mecânica para o desenvolvimento da zona de falha, ou a presença da própria camada de argilito como barreira mecânica. Os resultados do Modelo 12-b parecem reproduzir em boa parte esse aspecto (Figura 20), sem que houvesse a formação de falhas antitéticas. Esses resultados parecem confirmar que, de fato, o contraste mecânico entre camadas favorece mais (no arenito) ou menos (no argilito) o desenvolvimento de estruturas de deformação rúptil. Ainda assim, pesa sobre essa análise a incerteza quanto à contribuição dos eventos precedentes a E2 no afloramento (TD e TS) para a formação das zonas de dano. Essa incerteza permanece em razão de a utilização de modelos numéricos não ser capaz de reproduzir perfeitamente deformações transcorrentes em 2D.

7. Conclusões

Em relação ao objetivo desse estudo, as modelagens numéricas cumpriram a função de demonstrar que existe possibilidade de controle da estratigrafia mecânica sobre o desenvolvimento de zonas de dano de falha nos sedimentos siliciclásticos pouco consolidados da Formação Resende. Uma vez que a estratigrafia mecânica usada nos modelos aqui analisados não foi construída a partir de propriedades das próprias rochas que compõem o afloramento, mas obtidas da literatura, esta constatação deve ser tratada com cautela.

Os modelos numéricos não reproduziram fielmente a geometria do afloramento. Entretanto, os resultados obtidos, em conjunto com aqueles provenientes das análises do afloramento, demonstram que esse tipo de abordagem (*i.e.* combinação de estudo de análogos com modelagens numéricas) é capaz de potencializar a capacidade do intérprete para testar hipóteses e antecipar necessidades de correções nos métodos de análise.

Desta forma, a continuidade das análises sobre o impacto de feições de deformação rúptil (como zonas de dano de falhas) em arenitos pouco consolidados necessita de uma boa base de dados de mecânica de rochas. E também, no caso específico do afloramento da Formação Resende estudado na Bacia de Volta Redonda, seria importante a realização de um levantamento estrutural de detalhe ao

longo de camadas-chave, como a camada principal de argilito, a camada de arenito acima desta e nos arenitos do bloco alto da falha F2. Como o bloco alto da falha F1 encontra-se parcialmente destruído, esse estudo não se aplicaria neste bloco.

Referências bibliográficas

Bond C. E., 2015. Uncertainty in structural interpretation: Lessons to be learnt. *Journal of Structural Geology*, v. 74, 185-200.

FAULKNER, R. D., JACKSON, L. A. C., LUNN, J. R., SCHLISCHE, W. R., SHIPTON, K. Z., WIBBERLEY, J. A. C., WITHKACK, O. M. A review of recent developments concerning the structure, mechanics and fluid flow properties of fault zones. *Journal of Structural Geology*, v. 32, p.1557-1575, 2010.

FOSSEN, H. *Structural Geology*. Cambridge University Press, 454 p., 2010

GROSS, M. R. Mechanical Stratigraphy: the Brittle Perspective. Seattle Anual Meeting, no. 250-4, 2003.

HEILBRON M. & MACHADO N., 2003. Timing of terrane accretion in the Neoproterozoic-Eopaleozoic Ribeira orogen (SE Brazil). *Precambrian Res.*, 125: 87-112.

HEILBRON, M., SOARES, P. C. A., NETO, M. C. C., SILVA, C. L., TROUW, R.A.J., JANASI, A. V. *Província da Mantiqueira*. In: *Geologia do Continente Sul-Americano: Evolução da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*. Beca, p. 180-203, 2004.

HOWELL, A., J., MARTINIUS, W., A., GOOD, R., T. The application of outcrop analogues in geological modelling: A review, present status and future outlook. From: Martinius, A. W.; Howell, J. A.; Good, T. R. (ed) 2014. *Sediment-Body Geometry and Heterogeneity: Analogue Studies for Modelling the Subsurface*. Geological Society, London, Special Publications, 387, 1–25.

LARSON, M. *Numerical modeling*, In: Maurice Schwartz, Ed. *Encyclopedia of Coastal Science*, Springer, Dordrecht, The Netherlands, 730-733, 2005.

LAUBACH, E. S.; OLSON, E. J.; GROSS, R. M. Mechanical and fracture stratigraphy. *AAPG Bulletin*, v. 93, no. 11, p. 1413–1426, 2009.

LORENTS, J. C., STERLING J. L., SCHECHTER D. S., WHIGHAM C. L., JENSEN J. L., Natural fractures in the Spraberry formation, Midland basin, Texas: The effects of mechanical stratigraphy on fracture variability and reservoir behavior. *AAPG Bulletin*. 86: 505-524.

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, 80 p..

MEANS, W. D., 1976. STRESS AND STRAIN - Basic Concepts of Continuum Mechanics for Geologists. Springer-Verlag, New York, 339 p.

MORAES, 2016. A. Mecânica do Contínuo para a Geologia Estrutural. Perse, 2ª Ed., 798 p..

MORAES, A., 1995. Estudo dos campos de tensões locais e da geração de falhas em regime extensional pelo método dos elementos finitos. Departamento de Geologia, Escola de Minas. Ouro Preto: UFOP.

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*, 45(2): 273-291.

NEGRÃO, P. A. Evolução Tectonossedimentar e Deformação Rúptil Cenozoica da Região da Bacia Sedimentar de Volta Redonda (Segmento central do Rifte Continental do Sudeste do Brasil, RJ). 2014. 249 f. Tese de Doutorado em Geologia – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2014.

PEI, Y., PATON, A. D., KNIPE, J. R., WU, K. A review of fault sealing behaviour and its evaluation in siliciclastic rocks. *Earth-Science Reviews*, v. 150, p.121–138, 2015.

RICCOMINI, C. 1989. O Rift continental do sudeste do Brasil. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 256 p.

RICCOMINI, C., SANT'ANNA, L. G., FERRARI, A. L. Evolução geológica do Rift continental do sudeste do Brasil. In: Geologia do continente Sul-Americano: Evolução da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida, São Paulo, p. 350-383, 2004.

SALVADOR, E.D. & RICCOMINI, C., 1995. Neotectônica da região do alto estrutural de Queluz (SP-RJ, Brasil). Revista Brasileira de Geociências, 25(3): 151-164.

SANSON, M. S. R., RAMOS, R. R. C., MELLO, C. L. Bacias Sedimentares Brasileiras - Bacia de Volta Redonda. Phoenix, 88: p. 1 - 6, 2006.

SANSON, M.S.R., 2006. Sistemas deposicionais aluviais e tectônica cenozóica na região de Volta Redonda (RJ) – Rift Continental do Sudeste do Brasil. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 151 p.

SCHMITT, R. S., TROUW, R. A. J., VAN SCHMUS, W. R. & PIMENTEL, M. M. 2004. Late amalgamation in the central part of West Gondwana: new geochronological data and the characterization of a Cambrian orogeny in the Ribeira Belt - SE Brazil. Precambrian Research, 133, 29–61.

SCHMITT, R.S.; TROUW, R.A.J.; VAN SCHMUS, W.R.; PASSCHIER, C.W., 2008. Cambrian orogeny in the Ribeira Belt (SE Brazil) and correlations within West Gondwana: ties that bind underwater. Geological Society, London, Special Publications 294, 279–296.

TERZAGHI, K., 1943, Theoretical Soil Mechanics, John Wiley and Sons, New York.

TROUW, R., HEILBRON, M., RIBEIRO, A., PACIULLO, F., VALERIANO, C.M., ALMEIDA, J.C.H., TUPINAMBÁ, M., ANDREIS, R.R., 2000. The central segment of the Ribeira Belt. *Tectonic Evolution of South America*, v. 31, p. 287-310.