

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA**

**KARINA ASSUMPÇÃO DA COSTA NÓBREGA**

**ANÁLISE DE ESFORÇOS EM ESTRUTURAS RÚPTEIS APLICADOS A  
RECURSOS NÃO CONVENCIONAIS EM MINA DE CARVÃO EM CANDIOTA, RS**

**CAÇAPAVA DO SUL**

**2018**

**KARINA ASSUMPÇÃO DA COSTA NÓBREGA**

**ANÁLISE DE ESFORÇOS EM ESTRUTURAS RÚPTEIS APLICADOS A  
RECURSOS NÃO CONVENCIONAIS EM MINA DE CARVÃO EM CANDIOTA, RS**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao curso de Geologia da  
Universidade Federal do Pampa, como  
requisito parcial para obtenção do título de  
Bacharel em Geologia.

Orientador: Prof. Dr. Felipe Guadagnin

Coorientador: Prof. Dr. Tiago Rafael  
Gregory

**CAÇAPAVA DO SUL**

**2018**

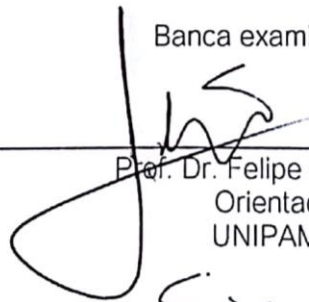
KARINA ASSUMPÇÃO DA COSTA NÓBREGA

**ANÁLISE DE ESFORÇOS EM ESTRUTURAS RÚPTEIS APLICADOS A RECURSOS NÃO CONVENCIONAIS EM MINA DE CARVÃO EM CANDIOTA, RS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Geologia da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Geologia.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 20, de dezembro de 2018.

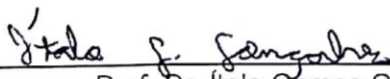
Banca examinadora:



Prof. Dr. Felipe Guadagnin  
Orientador  
UNIPAMPA



Msc. Sissa Kumaira  
UNIPAMPA



Prof. Dr. Ítalo Gomes Gonçalves  
UNIPAMPA

## AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Janaina e Adalberto, e a Bia, que bancaram toda essa história de sair do Rio e vir para Caçapava do Sul.

A Lidia, Claudio e Laura, que em todos esses anos, e mesmo antes de me conhecer, me deram um super suporte aqui no RS.

Agradeço a Bianca, minha companheira desde sempre, e que depois de duas formaturas, me acompanha na terceira.

A minha madrinha, Nilza, que me deu uma pilha enorme de livros que culminaram nessa minha decisão de virar cientista.

A minha tia Angela, agradeço a todas as aulas particulares de matemática. Aos meus avós Jorgina e Newton, pelo apoio.

As amigas, Laís e Fernanda,, por aquelas aulas de desenho geométrico, há quase 10 anos, que foram muito importantes para realização deste trabalho.

Aos amigos de Caçapava do Sul, Lucas, Ana, Dani, Índio, Mari, Yuri e Renan, agradeço pela companhia nas noites viradas, caronas, IBA, trabalhos, viagens, pelo pouso e pelo companheirismo.

Aos amigos do Rio, Mariana, Renata, Paula, Thales, Jou, Euclides, Adriana, Izabela, Matte, e tantos outros que eu possa ter esquecido de listar aqui.

Ao meu orientador, Felipe Guadagnin, pela parceria durante todos esses anos de graduação, incluindo, férias, finais de semana e horas extras depois do expediente. Ajudando com o *Chapter*, trabalhos, e qualquer coisa que a gente precisasse.

A Sissa por ter aceito ler e corrigir esse trabalho de mais de 80 páginas, pelas ajudas nos campos ao longo da faculdade e por ser sempre essa pessoa muito querida.

Ao professor Ítalo por ter aceito ser banca e ter dado ótimas contribuições para realização deste TCC.

Ao professor Gregory pelo incentivo e pelo excelente trabalho (faca na bota!).

Ao doutor Hugo, pela breve e grande contribuição nestes últimos meses.

E por último, não menos importante, ao Mateus, pelo companheirismo infinito durante esses cinco anos, desde mendicâncias no Uruguai, a aldeias indígenas na Bahia. Dividir comigo as tristezas e desespero dos dias cinzas agravados pelas noites viradas e trabalhos de faculdade, e claro, as alegrias dos dias de praia nas férias.

## RESUMO

Recursos de Hidrocarbonetos não convencionais possuem um papel importante na economia mundial. Esses recursos podem ser definidos como aqueles que possuem permeabilidade inferior a 0,1 mD e acumulações regionais contínuas, independentes de armadilhas estruturais ou estratigráficas. As características citadas, tornam a extração de hidrocarbonetos não convencionais demasiadamente cara e complexa. Existem diversos tipos de recursos não convencionais, como *shale gas*, *coalbed methane*, *tight gas*, *tight oil*, *shale oil*, reservatórios ígneos, areias oleosas e reservatórios carbonáticos fraturados e vugulares. Para a produção deste tipo de recurso são aplicadas duas técnicas associadas: perfuração de poços horizontais e faturamento hidráulico. O faturamento hidráulico é um método que consiste em gerar fraturas artificiais em rochas com baixa permeabilidade através da injeção de fluidos altamente pressurizados em um poço. O mecanismo de fraturamento pode acarretar perdas de reservas e, eventualmente, contaminação ambiental. Por isso, a análise estrutural e de esforços é importante para que haja um adequado controle geomecânico da rede de fraturas geradas. Grande parte das fraturas naturais ocorrem em escala sub-sísmica, limitando a análise a perfis de poços e testemunhos de sondagem. Este fator, associado a baixa taxa de amostragem dos poços pode vir a gerar uma alta incerteza em modelos geomecânicos. Sendo assim, o estudo de análogos é crucial para a compreensão das variáveis que controlam o fraturamento hidráulico em sistemas naturais. No Brasil, há ocorrência de hidrocarbonetos não convencionais em diversas regiões, uma delas é a Bacia do Paraná. Nesta Bacia há ocorrência de *coalbed methane* associado a camadas de carvão da Formação Rio Bonito, localizadas em subsuperfície. Neste trabalho, foram analisadas estruturas rúpteis de rochas carbonosas da Formação Rio Bonito na Mina de Carvão de Candiota da Companhia Rio Grandense de Mineração. O estudo visa entender os padrões das estruturas rúpteis da região a fim de gerar cenários de esforços para tendência ao deslizamento, dilatação e dilatação e deslizamento. As análises resultaram no reconhecimento de fraturas orientadas para NW, N, NE, e falhas normais, orientadas para N-S e NW-SE, provocadas por regimes extensionais. Baseada nas atitudes de estruturas que ocorrem com maior frequência, foram determinadas as direções de azimute e mergulho dos esforços em 24 cenários. A magnitude dos esforços foi manipulada a fim de compor situações onde o estado de esforços é triaxial e de regime compressional e extensional simultaneamente. As estruturas que apresentaram menor tendência a dilatar e deslizar apresentavam direção de mergulho opostas a  $\sigma_1$ . Em situações de maior caráter distensivo, grande parte das estruturas tendem a deslizar. A tendência a dilatação não apresentou variação expressiva com o aumento ou

diminuição dos esforços. Em situações onde  $\sigma_3$  é verticalizado, zonas com menor tendência a dilatação se concentram nas regiões do estereograma mais próximas a  $\sigma_1$  e nas regiões opostas a ele. Desta forma, o estudo permitiu entender como as estruturas das rochas carbonosas da Formação Rio Bonito aflorantes em Candiota respondem a determinados regimes de esforços, quanto dilatação e deslizamento.

Palavras-chave: *Coalbed Methane*. Recursos não convencionais. Análise de Esforços. Modelagem Tridimensional.

## ABSTRACT

Unconventional hydrocarbon resources play an important role in the world economy. These resources can be defined as those with permeability below 0.1 mD and continuous regional accumulations independent of structural or stratigraphic traps. This characteristics make the extraction of unconventional hydrocarbons too expensive and complex. There are several types of unconventional resources such as shale gas, coalbed methane, tight gas, tight oil, shale oil, igneous reservoirs, oily sands and fractured and vuggy carbonate reservoirs. To produce this type of resource two associated techniques are applied: drilling of horizontal wells and hydraulic fracturing. Hydraulic fracturing is a method of generating artificial fractures in rocks with low permeability by injecting highly pressurized fluids into a well. The fracturing mechanism can lead to loss of reserves and possibly environmental contamination. Therefore, the structural analysis is important so that there is adequate geomechanical control of the generated fracture network. Most of the natural fractures occur on a sub-seismic scale, limiting the analysis to well profiles and drill cores. This factor, coupled with the low sampling rate of the wells, may generate high uncertainty in geomechanical models. For this reason, the study of analogues is crucial for understanding the variables that control hydraulic fracturing in natural systems. In Brazil, there is occurrence of unconventional hydrocarbons in several regions, one of them is the Paraná Basin. In this basin there is occurrence of coalbed methane associated with layers of coal from the Rio Bonito Formation, located in subsurface. In this work, we analyzed the carbonate rock structures of the Rio Bonito Formation in the Candiota Coal Mine of Companhia Rio Grandense. The aim of the study is to understand the patterns of the region's brittle structures in order to generate stress scenarios for the tendency for sliding, dilation, dilation and slip. The analyzes resulted in the recognition of fractures oriented to NW, N, NE, and normal faults, oriented to N-S and NW-SE, caused by extension regimes. Based on structures with high frequency occurrence, it was determined 24 scenarios combining azimuth and dip direction data. The magnitude of the stress was manipulated in order to compose situations where the stress state is triaxial and compressional and extensional simultaneously. The structures that presented less tendency to dilate and to slide had dip direction opposite to  $\sigma_1$ . In situations of greater distensive scenario, most structures tend to slide. The tendency to dilation did not show significant variation with the increase or decrease of the efforts. In situations where  $\sigma_3$  is vertical, areas with less tendency to dilate are concentrated in the regions of the stereogram closer to  $\sigma_1$  and in regions opposite to it. In this way, the study allowed to

understand how the structures of the carbonaceous rocks of the Rio Bonito Formation outcropping in Candiota respond to certain regimes of efforts, such as dilation and slip.

Key-words: Coalbed Methane. Unconventional resources. Stress Analysis. Tridimensional Modelling



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Mapa de localização e situação da área de estudo. ....	15
Figura 2 - Mapa Geológica da Bacia do Paraná, com os limites das Supersequências. ....	16
Figura 3 - Coluna Estratigráfica da Bacia do Paraná, com destaque na Formação Rio Bonito em amarelo. ....	17
Figura 4 - Representação geológico do furo de sondagem F 371, na mina Candiota, onde é possível observar a estratigrafia tipo da sequência e a nomenclatura das camadas de carvão. ....	19
Figura 5 - Mapa de localização das possíveis ocorrências de acumulações de hidrocarbonetos não convencionais na porção Sul da Bacia do Paraná. ....	21
Figura 6 - Relação entre regime rúptil, rúptil-dúctil e dúctil, com aumento da temperatura e pressão, sob regimes dominados por extensão e por compressão. ....	23
Figura 7 - Tipos de falha relacionadas a abertura e ângulo de mergulho. ....	25
Figura 8 – Esforços em um ponto. A) Elipsoide de esforços. B) esquema de esforços agindo em um ponto. C) Componentes de esforços agindo nas faces de um cubo de tamanho infinitesimal. ....	28
Figura 9 - Tensões verticais e horizontais sobre diferentes regimes de falhamento. ....	28
Figura 10 - Diagrama de Mohr. ....	29
Figura 11 - Tipos de estados de esforços. ....	31
Figura 12 - Esquema ilustrativo que correlaciona valores de R (linha azul) e R' (linha rosa) a diferentes tipos de regimes de esforço. Os círculos rosas e os quadrados azuis marcam a transição entre um regime de esforço para o outro. O quadro Índice R' mostra a correlação, proposta por Delvaux et al. (1997), entre valores de R e R', orientação dos esforços e os regimes de esforço. ....	33
Figura 13 - Tipos de reservatórios de hidrocarbonetos convencionais e não convencionais. ....	35
Figura 14 - Classificações dos tipos de hidrocarbonetos não convencionais a partir de mecanismos de migração. ....	36
Figura 15 - Mecanismos de migração do metano nas camadas de carvão até as fissuras. ....	36
Figura 16 - Representação gráfica de ocorrência de micro e nanofraturas (cleats) existentes nas camadas de carvão. ....	37
Figura 17 - Procedimento utilizado para perfuração de poços horizontais e <i>fracking</i> . ....	39
Figura 18 - Veículo Aéreo Não Tripulado marca DJI modelo Phantom 4. ....	42
Figura 19 - Esquema ilustrativo de aquisição de fotos aéreas sobrepostas para realização de aerofotogrametria. ....	43

Figura 20 - Etapas do processamento de imagens para construção de Modelos Virtuais de Afloramento.....	45
Figura 21 - Processo para extrair medidas dos MVA e gerar planos. ....	47
Figura 22 -Vista em mapa dos modelos gerados neste trabalho. a) A2 b) M6 c) M1 d) M3 e) M5 f) M4 g) M2. ....	54
Figura 23 - Ortofotomosaíco mostrando a localização das estruturas observadas no afloramento M2.....	56
Figura 24 -Modelo do afloramento M2 interpretado. As medidas de falha estão representadas em vermelho e as de fraturas em verde. ....	57
Figura 25 - Veio de Pirita relacionado a plano de falha no afloramento M2. ....	58
Figura 26 - <i>Horsetail</i> . Fraturas preenchidas por minerais caracterizando um regime extensional no afloramento M3. ....	58
Figura 27 – Localização das estruturas no Modelo M3, com destaque as falhas, veios de pirita e <i>horsetailing</i> . ....	59
Figura 28 - Modelo do afloramento M3 interpretado. As medidas de falha estão representadas em vermelho e as de fraturas em verde. ....	60
Figura 29 - Localização de planos de falha no modelo M6.....	61
Figura 30 – Modelo 6 (M6). Planos de falha e fratura interpretados e estereogramas das respectivas estruturas.....	62
Figura 31 - Mapa Estrutural da Falhas. a) Modelo 06, b) Modelo 03, c) Modelo 02, d) Modelo Aéreo 01 .....	63
Figura 32 – Estereograma das fraturas medidas em campo e obtidas nos MVA. a) estereograma de polos dos planos de fratura; b) esterogramas de contorno dos polos dos planos de fratura.	64
Figura 33 – Estereograma das falhas medidas em campo e obtidas nos MVA. a) estereograma de pólos dos planos de falha, b) estereogramas de contorno dos polos dos planos de falha....	65
Figura 34 - Orientação dos paleotensores do Grupo 1. ....	65
Figura 35 - Orientação dos paleotensores do Grupo 2. ....	66
Figura 36 - Orientação de azimute e <i>dip</i> de maior frequência.....	67
Figura 37 - Cenários 1a e 1b. Os esforços principais estão orientados em relação a estruturas cujo azimute é 220° e ângulo de mergulho é 60°. No cenário 1a a magnitude do $\sigma_1$ é 60 Mpa, $\sigma_2$ é -6 Mpa , $\sigma_3$ é -3 Mpa . No cenário 1b é $\sigma_1$ é 25 Mpa, $\sigma_2$ é -10Mpa e $\sigma_3$ é -20 Mpa. ....	69
Figura 38- Cenários 1c, 1d, 1e. Os esforços principais estão orientados em relação a estruturas cujo azimute é 220° e ângulos de mergulho variando entre 10°, 50° e 80°. O valor de $\sigma_1$ é 25 MPa, de $\sigma_2$ é -10 MPa e $\sigma_3$ é -20 MPa. ....	70

Figura 39 - Cenários 1e, 1f, 1g. Os esforços principais estão orientados em relação a estruturas cujo azimute é 220° e ângulos de mergulho variando entre 10°, 50° e 80°. O valor de $\sigma_1$ é 60 MPa, de $\sigma_2$ é 6 MPa e $\sigma_3$ é -3 MPa.....	71
Figura 40 - Cenários 2a e 2b. Os esforços principais estão orientados em relação a estruturas cujo azimute é 270° e ângulo de mergulho é 60°. No cenário 1a a magnitude do $\sigma_1$ é 60 Mpa, $\sigma_2$ é -6 Mpa , $\sigma_3$ é -3 Mpa . No cenário 1b é $\sigma_1$ é 25 Mpa, $\sigma_2$ é -10Mpa e $\sigma_3$ é -20 Mpa. ....	73
Figura 41 - Cenários 2c, 2d, 2e. Os esforços principais estão orientados em relação a estruturas cujo azimute é 270° e ângulos de mergulho variando entre 10°, 50° e 80°. O valor de $\sigma_1$ é 25 MPa, de $\sigma_2$ é -10 MPa e $\sigma_3$ é -20 MPa. ....	74
Figura 42 - Cenários 2e, 2f, 2g. Os esforços principais estão orientados em relação a estruturas cujo azimute é 270° e ângulos de mergulho variando entre 10°, 50° e 80°. O valor de $\sigma_1$ é 60 MPa, de $\sigma_2$ é 6 MPa e $\sigma_3$ é -3 MPa.....	75
Figura 43 - Cenários 3a e 3b. Os esforços principais estão orientados em relação a estruturas cujo azimute é 150° e ângulo de mergulho é 60°. No cenário 1a a magnitude do $\sigma_1$ é 60 Mpa, $\sigma_2$ é -6 Mpa, $\sigma_3$ é -3 Mpa. No cenário 1b é $\sigma_1$ é 25 Mpa. ....	76
Figura 44 - Cenários 3c, 3d, 3e. Os esforços principais estão orientados em relação a estruturas cujo azimute é 150° e ângulos de mergulho variando entre 10°, 50° e 80°. O valor de $\sigma_1$ é 25 MPa, de $\sigma_2$ é -10 MPa e $\sigma_3$ é -20 Mpa.....	77
Figura 45 - - Cenários 3e, 3f, 3g. Os esforços principais estão orientados em relação a estruturas cujo azimute é 150° e ângulos de mergulho variando entre 10°, 50° e 80°. O valor de $\sigma_1$ é 60 MPa, de $\sigma_2$ é 6 MPa e $\sigma_3$ é -3 MPa.....	78

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	11
1.1. OBJETIVOS.....	13
1.2. JUSTIFICATIVA .....	13
2. ÁREA DE ESTUDO .....	14
3. CONTEXTO GEOLÓGICO .....	14
3.1. Supersequência Gondwana I .....	15
3.1.1. Formação Rio Bonito .....	16
3.1.1.1. Carvão de Candiota .....	18
3.2. Ocorrências de <i>Coalbed Methane</i> na Bacia do Paraná.....	20
4. REVISÃO DA LITERATURA .....	21
4.1. Análise Estrutural e Análise de Esforços .....	21
4.2. Estruturas Rúpteis.....	22
4.2.1. Fraturas .....	23
4.2.2. Falhas.....	24
4.2.3. Interação entre Fraturas e Falhas .....	26
4.3. Esforço.....	26
4.3.1. Estado de Esforço .....	29
4.3.2. Método de Inversão de Falhas .....	32
4.4. Tendência ao Deslizamento e Tendência à Dilatação .....	33
4.5. Recursos Não Convencionais .....	34
4.6. Coalbed Methane.....	35
4.7. Fraturamento Hidráulico.....	37
4.7.1. Relação do esforço com Fraturamento Hidráulico .....	40
5. MATERIAIS E MÉTODOS.....	41
5.1. Aquisição de Dados Estruturais e Fotográficos em Campo .....	41

5.2. Processamento das fotografias .....	44
5.3. Processamentos dos Dados Estruturais de Campo .....	46
5.4. Integração dos Dados de Campo com os Modelos 3D.....	46
5.5. Coleta de Medidas Estruturais a Partir dos MVA .....	46
5.6. Definição dos Paleotensores.....	47
5.7. Análise de Stress.....	48
6. RESULTADOS .....	52
6.1. Modelos Virtuais de Afloramento .....	52
6.2. Análise Estrutural .....	53
6.3. Modelo 2 (M2) .....	53
6.4. Modelo 3 (M3) .....	55
6.5. Modelo 6 (M6) .....	55
6.6. Geometria e Cinemática .....	64
6.7. Paleotensores .....	64
6.8. Análise de stress .....	67
6.8.1. Cenários para Estruturas com Azimute 220 .....	68
6.8.2. Cenários para Estruturas com Azimute 270 .....	72
6.8.3. Cenários para Estruturas com Azimute 150 .....	72
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	79
REFERÊNCIAS .....	81

## 1. INTRODUÇÃO

Recursos de hidrocarbonetos podem ocorrer sobre duas formas na Terra, como reservatórios convencionais e não convencionais (ALLEN, P; ALLEN, J, 2013). Reservatórios convencionais são compostos por rochas naturalmente porosas e permeáveis e por conterem acumulações de hidrocarbonetos em armadilhas abaixo de rochas selantes (LAW; CURTIS, 2002). Atualmente, estes reservatórios constituem a principal fonte de hidrocarbonetos a nível mundial, devido a maior facilidade e economicidade de extração e produção (LAW; CURTIS, 2002). Contudo, com o declínio das descobertas de novos reservatórios convencionais e o aumento dos custos de produção, as pesquisas de reservatórios não convencionais tem aumentado significativamente (ALLEN, P; ALLEN, J, 2013; ANP; 2010; SELLEY, 2015).

Recursos petrolíferos não convencionais são todas as acumulações de hidrocarbonetos que não são classificadas como convencionais. A definição inclui também hidrocarbonetos convencionais que alcançaram estado avançado de alteração exigindo métodos de extração demasiadamente complexos e caros (ALLEN, P; ALLEN, J, 2015; ANP, 2010). Os reservatórios não convencionais são caracterizados por apresentarem permeabilidade inferior a 0,1 mD e extensas acumulações regionais, independentes de armadilhas estruturais e estratigráficas (ANP, 2014; LAW; CURTIS, 2002). Segundo Zou et al. (2013), os reservatórios não convencionais podem ser contínuos e descontínuos. Os reservatórios não convencionais contínuos são o Gás de Folhelho (*Shale gas*), Metano de Carvão (*Coalbed methane; CBM*), Gás em rochas fechadas (*Tight Gas*), Óleo de Folhelho (*Shale Oil*) e Óleo em rochas fechadas (*Tight Oil*; Zou et al., 2013).

Nos reservatórios não convencionais são usualmente aplicadas duas técnicas de extração associadas: perfuração de poços horizontais e faturamento hidráulico (COLOMER; ALMEIDA, 2015; PONTES, 2015). O faturamento hidráulico é um método que objetiva o aumento da permeabilidade natural das rochas por meio da introdução de fluidos com volumes acima de 3.000 m<sup>3</sup>, possibilitando a extração de hidrocarbonetos (ANP, 2014). Para definir o ponto ótimo de perfuração é preciso um estudo detalhado do comportamento da rede de fraturas em cada reservatório de forma que o escoamento dos fluídos não ocasione perda de recursos e danos ambientais (COLOMER; ALMEIDA, 2015).

A análise da resposta das estruturas geológicas quando submetidas aos esforços durante o processo de fraturamento hidráulico é complicada pelo fato dos reservatórios não convencionais se localizarem em subsuperfície. As informações utilizadas para essa análise são oriundos de dados sísmicos ou poços (BISDOM et al., 2016). Os dados sísmicos possuem uma

grande cobertura lateral, mas baixa resolução vertical, e os poços possuem alta resolução vertical, mas baixa taxa de amostragem lateral. Sendo assim, ambos os métodos não permitem o reconhecimento em detalhe e a análise das fraturas em situações naturais. Dessa forma, o estudo de afloramentos análogos é extremamente relevante para a análise da rede de fraturas em reservatórios não convencionais.

O termo análogo de reservatório se refere a formações rochosas que são geologicamente comparáveis em termos de litologia e propriedades dos fluidos cujo estágio de conhecimento sobre suas características seja mais avançado do que o reservatório de interesse (HODGIN; HARREL, 2005). O entendimento de conceitos e padrões na interpretação de dados em locais onde as informações são limitadas é possível utilizando modelos análogos (HODGIN; HARREL, 2005). Os modelos análogos devem corresponder a processos similares de sedimentação, diagênese, pressão, temperatura, história química e mecânica e deformação estrutural em relação aos reservatórios naturais (HODGIN; HARREL, 2005).

No Brasil, reservatórios não convencionais ocorrem na Bacia do Paraná (EPE, 2018), entre outras bacias. Segundo EIA (2016), no Brasil haverá um aumento na produção de gás até 2040, e mais de um terço deste produto será proveniente de reservatórios não convencionais, principalmente *shale gas*, *tight gas* e *coalbed methane*.

Kalkreut et al. (2008) e Lourenzi e Kalkreuth (2014) realizaram estudos na Formação Rio Bonito na região sul do Brasil, indicando a presença de camadas de carvão com potencial para geração e armazenagem de *coalbed methane*. No estado do Rio Grande do Sul, no município de Candiota, ocorrem rochas carbonosas incluídas nas Formações Rio Bonito e Palermo, Grupo Guatá da Bacia do Paraná (MILANI et al., 2007). As camadas de carvão são mineradas para produção de energia pela Companhia Riograndense de Mineração (CRM). A extração de carvão é realizada em minas a céu aberto, permitindo acesso direto as camadas carbonosas. Por esses motivos, a região pode ser utilizada para a construção de modelos de reservatórios não convencionais análogos.

A construção de modelos de reservatórios análogos tem facilitado nas últimas décadas pelo uso de Modelos Virtuais de Afloramento (MVA). MVA são representações digitais tridimensionais foto-realistas de afloramentos naturais (e.g., TAVANI et al., 2014). São utilizados para extrair informações quantitativas e integrar informações de diversas fontes. Nesse trabalho, foi realizada análise dos esforços aplicados às rochas carbonosas da Formação Rio Bonito na mina da CRM por meio da análise estrutural em campo e utilizando MVA.

## 1.1. OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo geral realizar a análise dos esforços aplicados à rochas carbonosas da Formação Rio Bonito, para a contribuição ao estudo dos modelos de reservatórios não convencionais utilizando afloramentos análogos.

Os objetivos específicos incluem:

- a) Definir a geometria e a cinemática das estruturas geológicas em campo e utilizando MVA;
- b) Integrar os dados de campo com os dados interpretados nos modelos;
- c) Gerar modelos geológicos 3D;
- d) Propor cenários que incluam variações na orientação e magnitude dos esforços;
- e) Compreender a resposta das estruturas pré-existentes em relação aos cenários propostos.

## 1.2. JUSTIFICATIVA

A extração hidrocarbonetos não convencionais geralmente depende da técnica de fraturamento hidráulico (ANP, 2015). Este procedimento consiste na injeção de fluídos em alta pressão em subsuperfície, visando aumentar a poro-pressão, reduzindo a pressão efetiva e consequentemente gerando fraturas extensionais favoráveis ao escoamento de gás e óleo (ANP, 2015; ZOBACK, 2007). A análise de esforços e de deformação nesse contexto é importante para que haja um adequado controle de tensões da rede de fraturas reativadas ou neoformadas (MOVE, 2015).

Grande parte das fraturas naturais ocorre em escala sub-sísmica, limitando a análise a perfis de poços e testemunhos de sondagem (BISDOM et al., 2016). Nessa situação, a alta incerteza dos modelos geomecânicos obtidos é relacionada a baixa taxa de amostragem entre os poços (BISDOM et al., 2016). Outra questão importante é que o mecanismo de fraturamento pode acarretar perda de reservas e, eventualmente, contaminação ambiental (ANP, 2014). Desta forma, o estudo de análogos é necessário para a compreensão das variáveis que controlam o fraturamento hidráulico em sistemas naturais (HODGIN; HARREL, 2005).

Nessa conjuntura, a confecção de MVA permite aplicar os métodos utilizados na indústria, em rochas expostas, aumentando o grau de confiabilidade das análises. Ademais, os MVA permitem a coleta de dados estruturais de forma indireta, possibilitando obter informações das regiões inacessíveis do afloramento. Desta forma, a integração dos dados



estruturais de campo com os MVA, servem como aporte para análise estrutural e de esforços auxiliando assim, em estudos posteriores para o controle geomecânico da rocha.

## 2. ÁREA DE ESTUDO

Localizada no estado do Rio Grande do Sul, na cidade de Candiota, a área de estudo está situada na Mina de Candiota da CRM. O acesso, a partir de Porto Alegre se dá através da BR-290 com direção a Caçapava do Sul, seguindo pela primeira entrada no trevo da BR-153 com a BR-290, em sentido a Bagé. Avançando pela BR-293 na altura de Bagé com destino a Pelotas até encontrar o município de Candiota (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**). área de estudo situa-se entre as coordenadas UTM 242.601 mE e 6.503.095 mS (zona 22J).

## 3. CONTEXTO GEOLÓGICO

A Bacia do Paraná é uma bacia intracratônica que compreende um pacote rochoso sedimentar-magmático, com uma área de aproximadamente 1,5 milhão de km<sup>2</sup> e 7 quilômetros de espessura (Figura 2; MILANI et al., 2007). Está localizada nos territórios do Brasil, Uruguai, Argentina e Paraguai. Possui forma ovalada com eixo maior orientado na direção N-S (MILANI et al., 2007).

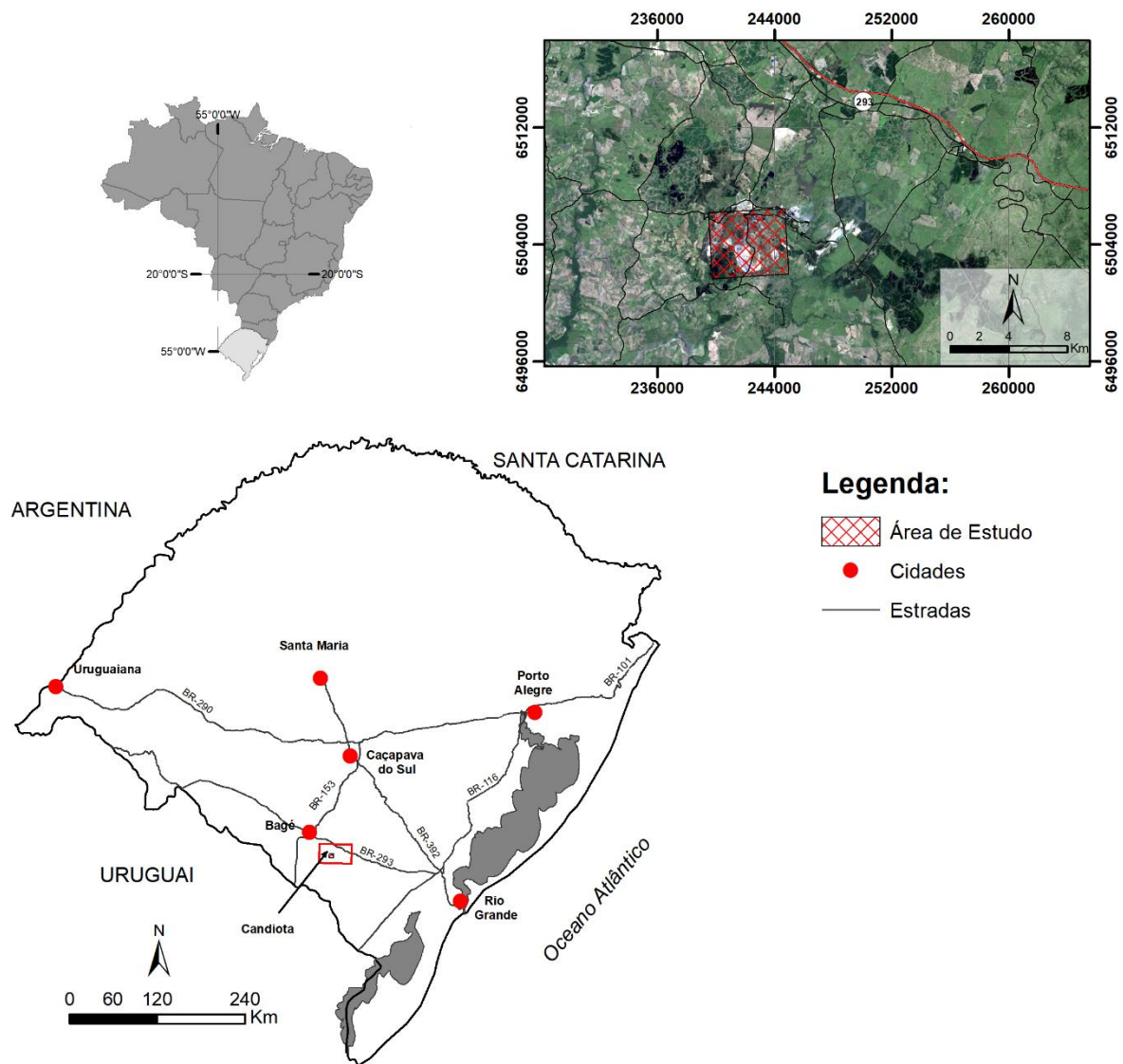
No Brasil, ocorre nos estados de Mato Grosso, Goiás, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais, São Paulo, Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul. A Bacia é formada, da base para o topo, pelo Grupos Rio Ivaí, Grupo Paraná, Grupo Itararé, Grupo Guatá, Grupo Passa Dois, Grupo São Bento e Grupo Bauru (ALVES e ADES, 1995). É subdividida também em seis supersequências (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**), as quais são denominadas: Rio vaí, Paraná, Gondwana I, Gondwana II, Gondwana III e Bauru (MILANI, 1998, p. 473 *apud*. MILANI, 1997).

Neste trabalho foram analisadas as sequências inseridas na supersequência Gondwana I, de idade predominantemente paleozoica. Este pacote rochoso é importante tanto devido ao seu potencial petrolífero quanto a existência de carvão e urânio na Formação Rio Bonito (MILANI et al., 2007).

### 3.1. Supersequência Gondwana I

A supersequência Gondwana I engloba o Grupo Guatá, que é composto pelas Formações Rio Bonito na porção basal e Palermo na parte superior (MILANI et al., 2007). A área de estudo compreende a Formação Rio Bonito, de idade permiana, composta por intercalações de camadas de carvão com arenitos finos, siltitos e siltitos carbonosos (MILANI et al., 2007).

Figura 1 - Mapa de localização e situação da área de estudo.

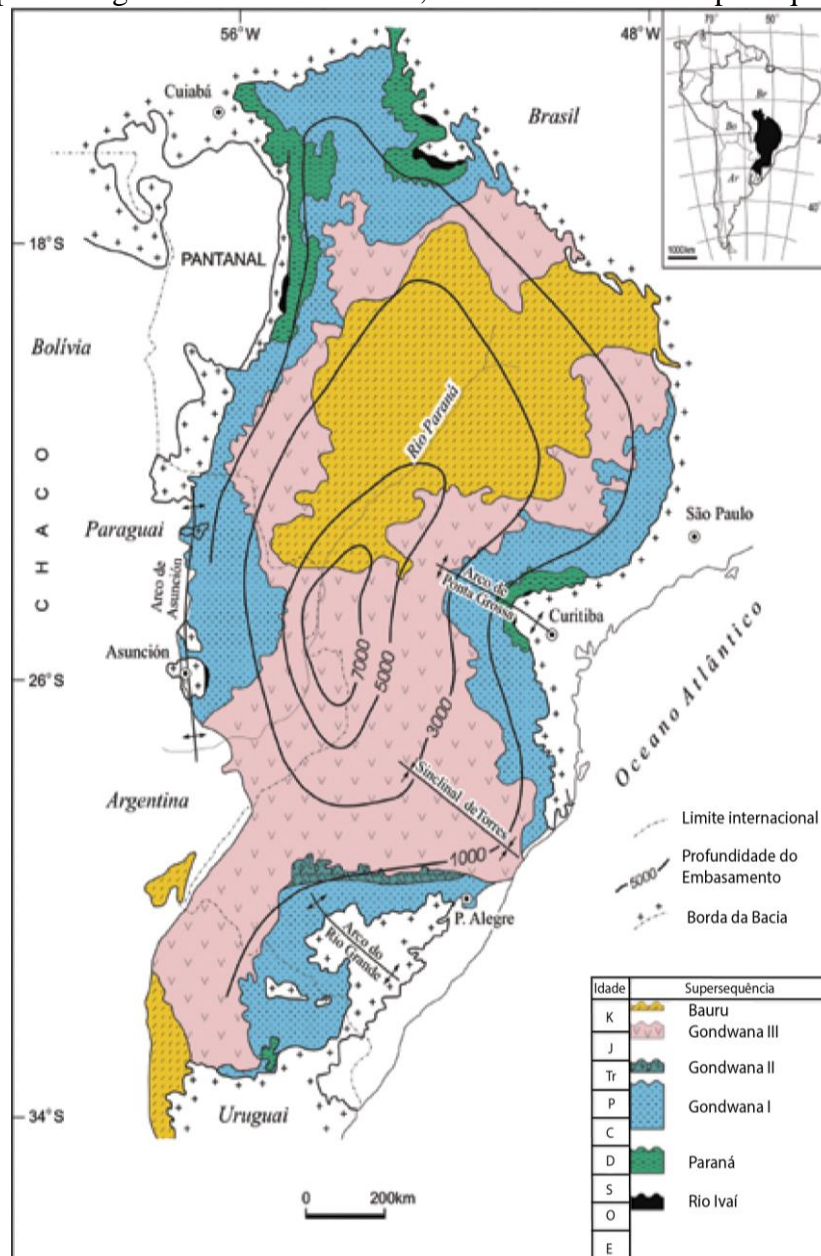


Fonte: Adaptado da base cartográfica contínua do Rio Grande do Sul (HASENACK; WEBER, 2010), imagem de satélite: LANDSAT 8.

### 3.1.1. Formação Rio Bonito

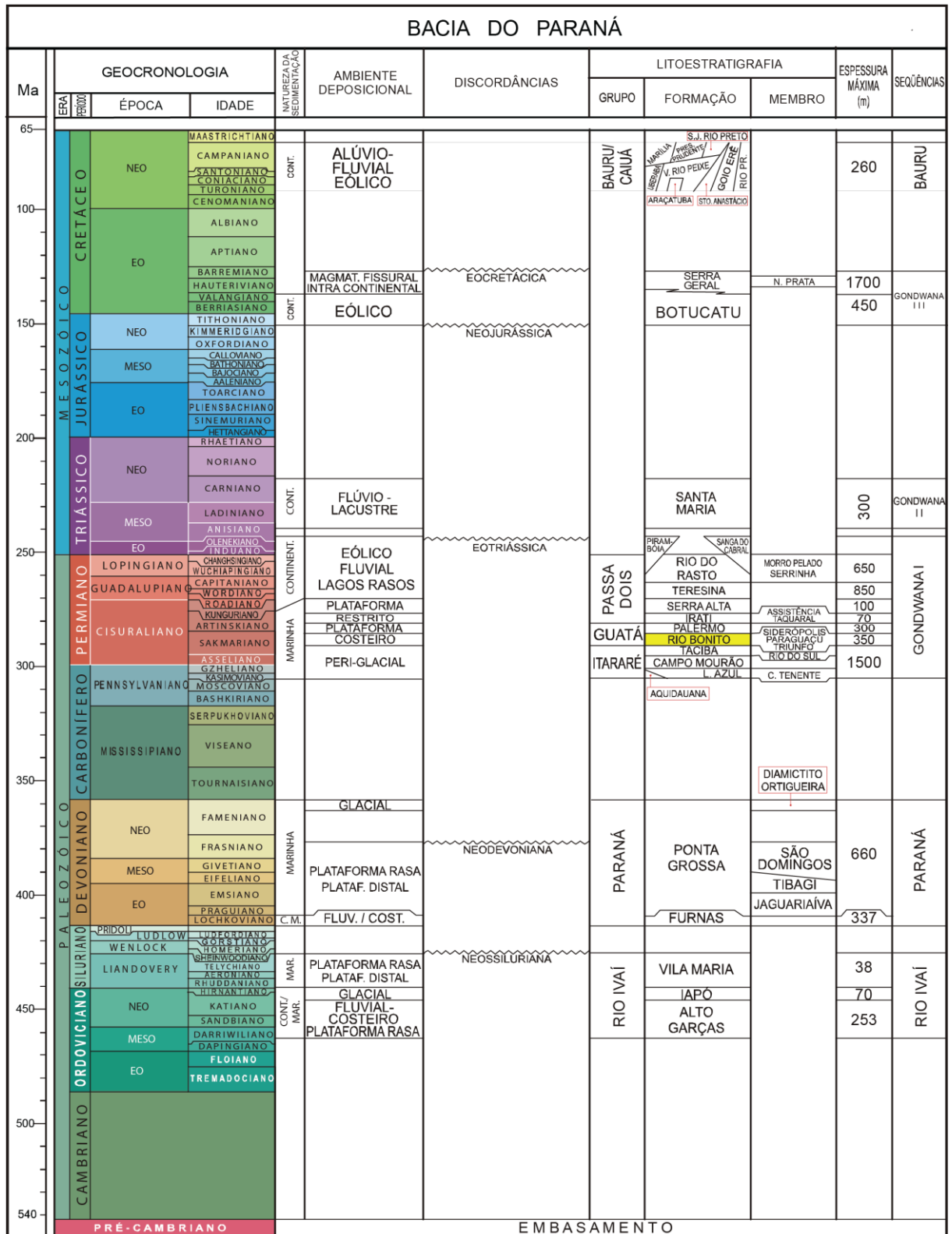
A Formação Rio Bonito, é delimitada na base pelo Grupo Itararé e no topo pela Formação Palermo (Figura 3; MILANI et al. 2007). Medeiros e Thomaz (1973) propuseram a subdivisão da Formação Rio Bonito em três intervalos nos estados do Paraná e em Santa Catarina. Posteriormente, Schneider et. al (1974) deu continuidade ao estudo e formalizou tais intervalos nomeando-os da base para o topo como Membro Triunfo, Membro Paraguaçu e Membro Siderópolis.

Figura 2 - Mapa Geológico da Bacia do Paraná, com os limites das Superseqüências.



Fonte: modificado de Milani (2004).

Figura 3 - Coluna Estratigráfica da Bacia do Paraná, com destaque na Formação Rio Bonito em amarelo.



O Membro Triunfo tem características que indicam um ambiente fluvio-deltaico (MEDEIROS; THOMAZ, 1973; SCHNEIDER et al., 1974). É composto principalmente por depósitos de arenitos esbranquiçados finos a médios e possui em menor escala conglomerados, arenitos muito finos, siltitos e camadas de carvão (MATOS, 1999). Apresenta espessuras maiores na região de São João do Triunfo, no Paraná, que vão diminuindo no sentido do centro da bacia (SCHNEIDER et al., 1974).

O Membro Paraguaçu foi formado durante um período de transgressão marinha, com planícies de maré e intercalações de depósitos deltaicos distais (MEDEIROS; THOMAZ, 1973; SCHNEIDER et al., 1974). É constituído pela intercalação de rochas carbonosas, arenitos finos, siltitos e folhelhos (SCHNEIDER et al., 1974). Possui uma gama de conteúdo fossilífero marinho, restos vegetais e palinórfos (SCHNEIDER et al., 1974).

O Membro Siderópolis é associado a sistemas deposicionais costeiro e fluviais localizados (MEDEIROS; THOMAZ, 1973; SCHNEIDER et al., 1974). Contém camadas de arenito muito fino intercaladas com pelitos, carbonatos e carvão (SCHNEIDER et al., 1974).

#### **3.1.1.1. Carvão de Candiota**

O carvão de Candiota está situado próximo a borda da Bacia do Paraná (MATOS, 1999). De acordo com Matos (1999), na região de Candiota não houve desenvolvimento de sistemas deltaicos tão significativos quanto nas zonas mais centrais da Bacia. Por esse motivo, as rochas da Formação Rio Bonito na região de Candiota apresentam algumas particularidades, como (a) a ausência do Membro Paraguaçu; (b) terem sido depositadas diretamente sobre o embasamento ou sobre as rochas do Grupo Itararé; (c) poderem estar truncadas pela Formação Santa Tecla (Cretáceo-Cenozoico; MATOS, 1999).

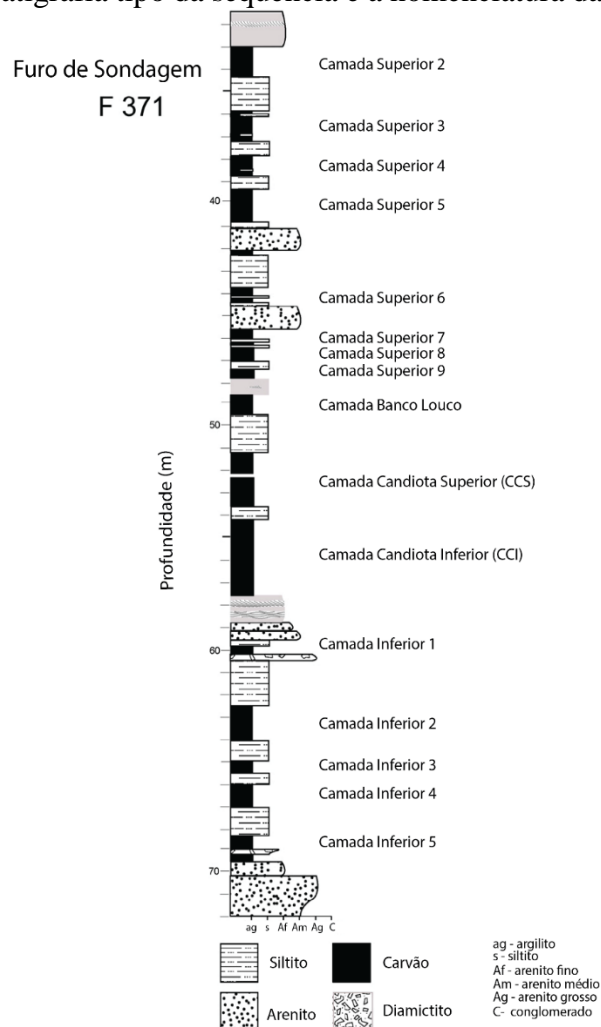
O carvão de Candiota, está inserido numa depressão morfológica, composta por três baixos topográficos: Jaguarão-Chico, Torrinhas e Candiota (FONTES; CAVA, 1980). Essas zonas mais baixas estão separadas por rochas do embasamento soerguido (FONTES; CAVA, 1980). Tais aspectos morfológicos deram origem a três bacias hidrográficas presentes na região: Jaguarão, Lageado e Jaguarão-Chico (FONTES; CAVA, 1980).

Em um contexto regional, os estratos da região de Candiota, mergulham uniformemente para W-SW (GAVRONSKI, 1997). As principais estruturas presentes são falhas, flexuras, *horsts* e *grabens*. As falhas apresentam direções preferenciais para N50°-60°E, N65-75W° e N-S (MATOS, 1999). Estas famílias de falhas estão associadas à duas estruturas regionais, são elas:

- a) Falha de Açotéia: estrutura de maior expressão na área sendo associada a falhas de direção NE; divide o depósito em duas partes, uma a oeste, onde se encontram a maior parte das camadas de carvão e outra a leste (MATOS, 1999);
- b) Torquato Severo–Pedras Altas: associada as estruturas de direção NW; possui pequenos movimentos horizontais (MATOS, 1999);
- c) Lineamento Paço do Marinheiro: associados a estruturas de direção N (MATOS, 1999).

A jazida de Candiota compreende as camadas de carvão denominadas Camadas Inferiores, Camadas Superiores, Camada Candiota (dividida em Candiota Banco Superior - CBS - e Candiota Banco Inferior – CBI; Figura 4) e a Camada Banco Louco (KALKREUTH, 2013; SÜFFERT, 1997).

Figura 4 - Representação geológica do furo de sondagem F 371, na mina Candiota, onde é possível observar a estratigrafia tipo da sequência e a nomenclatura das camadas de carvão.



Fonte: Modificado de Kalkreuth et al. (2013).

### 3.2. Ocorrências de *Coalbed Methane* na Bacia do Paraná

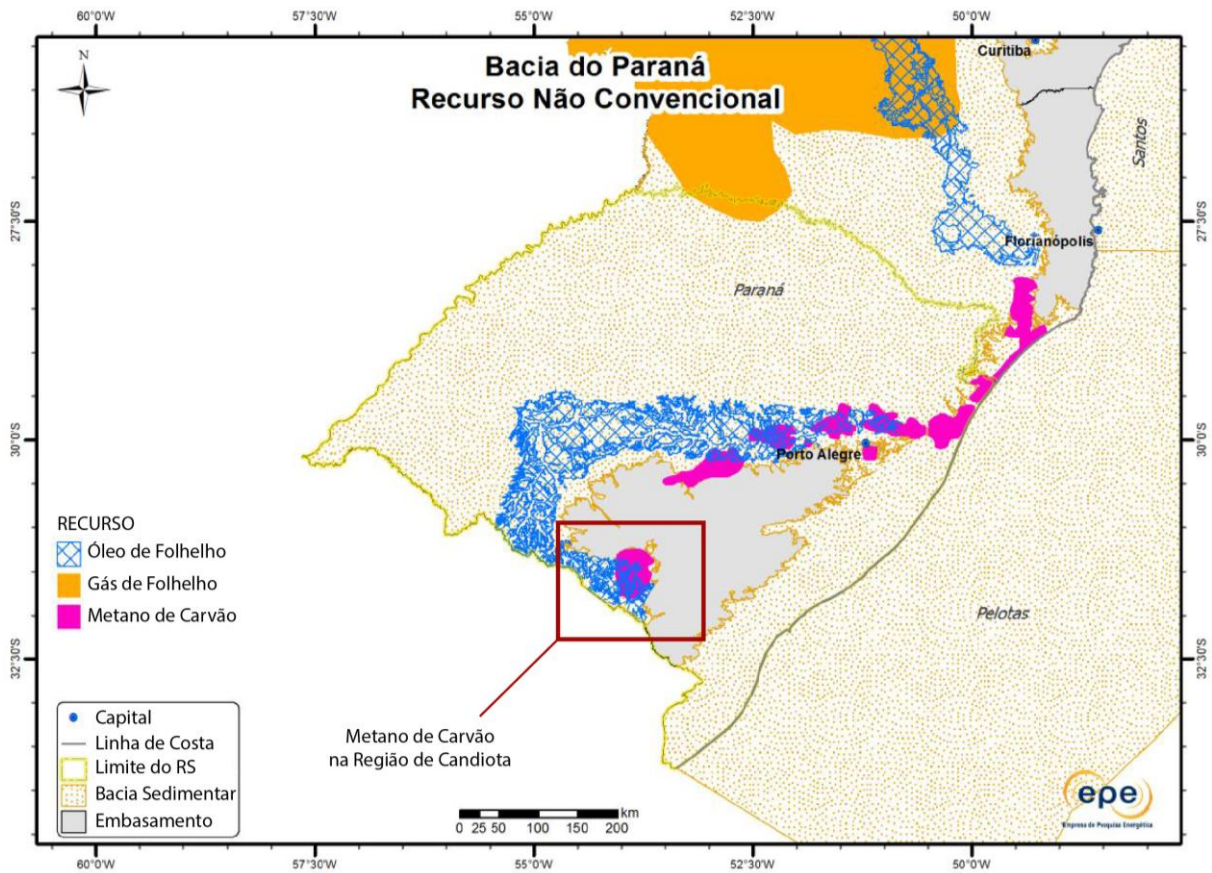
A Bacia do Paraná apresenta algumas ocorrências de *Coalbed Methane* associados a Formação Rio Bonito (KALKREUTH et al., 2008). A mais significativa delas, a Jazida Santa Teresinha, localizada no nordeste do estado do Rio Grande do Sul, possui a segundo maior reserva de carvão do Brasil, com cerca de 4.283.000 toneladas (CASAGRANDE et al., 2010). Apesar de pertencer a mesma Formação que o carvão de Candiota, as camadas de carvão da Jazida Santa Teresinha encontram-se entre 400 m a 1000 m de profundidade, tornando sua extração inviável economicamente (KALKREUTH et al., 2008; CASAGRANDE et al., 2010). Por outro lado, essas condições favoreceram a formação de metano de carvão (*coalbed methane*), devido às maiores pressões e temperaturas as quais a rocha foi submetida (CASAGRANDE et al., 2010).

Kalkreuth et al. (2008) analisaram o potencial de *coalbed methane* na Jazida de Santa Teresinha. Os resultados mostram que há ocorrência de cerca de 5,5 bilhões de metros cúbicos de gás nas camadas de carvão. O *rank* do carvão nesta região é de carvão betuminoso alto volátil e apresenta características razoáveis para concentração de *coalbed methane*.

O controle estrutural na região foi fundamental para que a jazida se destacasse entre as demais para a geração de *coalbed methane* (CASAGRANDE et al., 2010; KALKREUTH et al., 2008). Casagrande et. al (2010) se baseou em modelos digitais de terreno e mapas estruturais do embasamento para interpretar lineamentos, que mostram *trends* NE-NW. Os resultados do estudo mostram ainda que a região apresenta falhamentos normais com escalonamento para norte, com profundidades que chegam à 600 m.

Lourenzi e Kalkreuth (2014) analisaram as camadas de carvão da Formação Rio Bonito em três poços na Jazida Sul Catarinense. A pesquisa revelou que as camadas de carvão Barro Branco e Irapuá possuem as características requeridas para geração de *coalbed methane*. A Figura 5 mostra um mapa produzido pela EPE (2018), onde são identificadas regiões com ocorrências de recursos não convencionais na porção gaúcha da Bacia do Paraná. O mapa indica ocorrências de *coalbed methane* na região de Candiota.

Figura 5 - Mapa de localização das possíveis ocorrências de acumulações de hidrocarbonetos não convencionais na porção Sul da Bacia do Paraná.



Fonte: modificado de EPE (2018).

## 4. REVISÃO DA LITERATURA

A análise de esforços realizada nesse trabalho compõe uma parte da análise estrutural. A análise estrutural é baseada na análise geométrica, cinemática e dinâmica. Sendo assim, a revisão da literatura apresentada abaixo abrange os temas: análise estrutural e análise de esforços, recursos não convencionais e fraturamento hidráulico.

### 4.1. Análise Estrutural e Análise de Esforços

A análise estrutural consiste em 3 níveis de abordagem (DAVIS; REYNOLDS; KLUTH, 2011; FOSSEN, 2010) a análise geométrica, análise cinemática e análise dinâmica, detalhadas a seguir:



- a) análise geométrica: corresponde a definição da forma, tamanho, orientação e localização espacial das estruturas geológicas (DAVIS; REYNOLDS; KLUTH, 2011; FOSSEN, 2010);
- b) análise cinemática: corresponde a definição do movimento relativo entre blocos de rocha, seja o movimento *down-dip* (normal e inverso), *strike-slip* (horário e anti-horário), oblíqua ou rotacional (DAVIS; REYNOLDS; KLUTH, 2011; FOSSEN, 2010).
- c) a análise dinâmica: corresponde a diversos níveis de abordagem, incluindo a análise de distorção (*strain*), a análise tectônica, o balanceamento e restauração de seções e modelos 3D, e a análise de esforços (DAVIS; REYNOLDS; KLUTH, 2011; FOSSEN, 2010).

A análise de esforços consiste na definição da orientação e magnitude dos esforços que geraram as estruturas geológicas de uma determinada região e nos fenômenos de neoformação, reativação, tendência a dilatação e ao deslizamento (FOSSEN, 2010). A análise dos esforços atuantes em uma rocha é importante porque permite reconhecer estruturas que podem estar sob risco de reativação ou falhamento (FOSSEN, 2010). Um modelo gerado com base nesta análise possibilita avaliar o risco de vazamentos em reservatórios que não possuem rocha selante, como é o caso de reservatórios não convencionais, prever a permeabilidade e o caminho do fluxo de fluidos, planejar e atenuar riscos de ocorrência de tremores (FOSSEN, 2010).

## 4.2. Estruturas Rúpteis

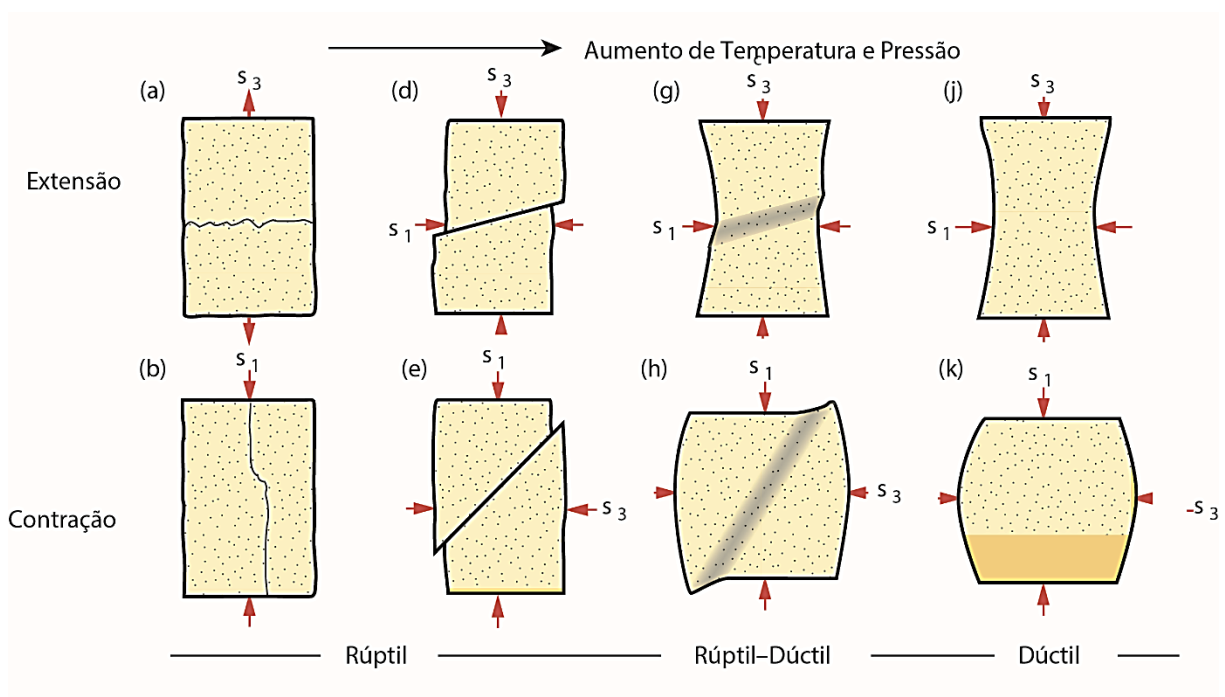
As rochas se deformam quando são submetidas a esforços que ultrapassem seus limites de resistência (FOSSEN, 2012). O modo como a deformação vai ocorrer depende da resposta da rocha a uma determinada condição de esforço (TWISS; MOORES, 2007). Diversos fatores, tais como a composição da rocha, suas propriedades mecânicas, a orientação e magnitude dos esforços e as condições físicas do ambiente, tais como pressão e temperatura, influenciam na forma como uma rocha se deforma (DAVIS; REYNOLDS; KLUTH, 2011; TWISS; MOORES, 2007). As estruturas secundárias presentes nas rochas podem ser resultado de deformações de regime rúptil, rúptil-dúctil ou dúctil (DAVIS; REYNOLDS; KLUTH, 2011).

De modo geral, considera-se que um regime dúctil quando as rochas acomodam a deformação sem perder coesão, causando alterações em sua forma, como dobramentos de camadas estratigráficas (DAVIS; REYNOLDS; KLUTH, 2011; TWISS; MOORES, 2007). Em

contrapartida, regimes rúpteis são marcados pela perda de coesão entre as superfícies da rocha, acarretando em rupturas como falhas e fraturas (FOSSSEN, 2012).

As condições físicas da crosta e a composição da rocha afetam fortemente suas propriedades mecânicas (DAVIS; REYNOLDS; KLUTH, 2011). Em regiões mais rasas da crosta onde a temperatura e a pressão são mais baixas, predominam regimes rúpteis. Em regiões mais profundas predominam regimes dúcteis (Figura 6; DAVIS; REYNOLDS; KLUTH, 2011).

Figura 6 - Relação entre regime rúptil, rúptil-dúctil e dúctil, com aumento da temperatura e pressão, sob regimes dominados por extensão e por compressão.



Fonte: Modificado de Fossen (2010)

#### 4.2.1. Fraturas

Segundo Twiss and Moores (2007), fraturas são superfícies ao longo das quais minerais e rochas perderam a coesão, resultando em sua quebra e culminando na formação de duas superfícies livres que não existiam antes. As fraturas são registros importantes que podem indicar as características físicas das rochas em que elas ocorrem além de influenciar na permeabilidade e porosidade.

As fraturas podem ser classificadas como extensionais ou cisalhantes (TWISS; MOORES, 2007; FOSSSEN, 2010). Em fraturas extensionais, o movimento relativo é perpendicular a propagação das fraturas, esse deslocamento é denominado Modo I (TWISS;

MOORES, 2007). Os Modos II e III são relacionados a fraturas cisalhantes (TWISS; MOORES, 2007). No Modo II o deslizamento ocorre perpendicular à borda da fratura enquanto que no Modo III é paralelo (TWISS; MOORES, 2007).

Fraturas extensionais podem ocorrer em conjunto ou individualmente e costumam apresentar padrões quanto ao arranjo, geometria e distribuição espacial (TWISS; MOORES, 2007; FOSSEN, 2010; DAVIS; REYNOLDS; KLUTH, 2011). Esses padrões são identificados e possibilitam a classificação das fraturas ou famílias de fraturas (TWISS; MOORES, 2007; FOSSEN, 2010; DAVIS; REYNOLDS; KLUTH, 2011). Algumas fraturas podem ser preenchidas por minerais como é o caso dos veios, outras podem ocorrer intersectadas por outras fraturas ou ainda podem apenas se distribuir paralelamente ao longo de uma rocha (TWISS; MOORES, 2007; FOSSEN, 2010; DAVIS; REYNOLDS; KLUTH, 2011).

#### 4.2.2. Falhas

Falhas são descontinuidades onde ocorre deslocamento de um plano em relação ao outro (DAVIS; REYNOLDS; KLUTH, 2011; FOSSEN, 2010; TWISS; MOORES, 2007). Desta forma, a falha quebra a rocha em dois blocos (TWISS; MOORES, 2007). As falhas podem ser classificadas quanto a geometria, orientação, cinemática (movimento) e topologia ou ainda quanto ao arranjo e interação quando se trata de um conjunto de falhas associadas ou não com fraturas (TWISS; MOORES, 2007; PEACOCK et al., 2016).

Segundo Twiss e Moores (2007) falhas com ângulos de mergulho menores que 45° são consideradas de baixo ângulo e as que apresentam mais de 45° são de alto ângulo. Fossen (2012) classifica falhas com mergulho menor do que 30° como de baixo ângulo, de 30° a 60° de mergulho como falhas de mergulho intermediário, e falhas com mergulho maior do que 60° como de alto ângulo.

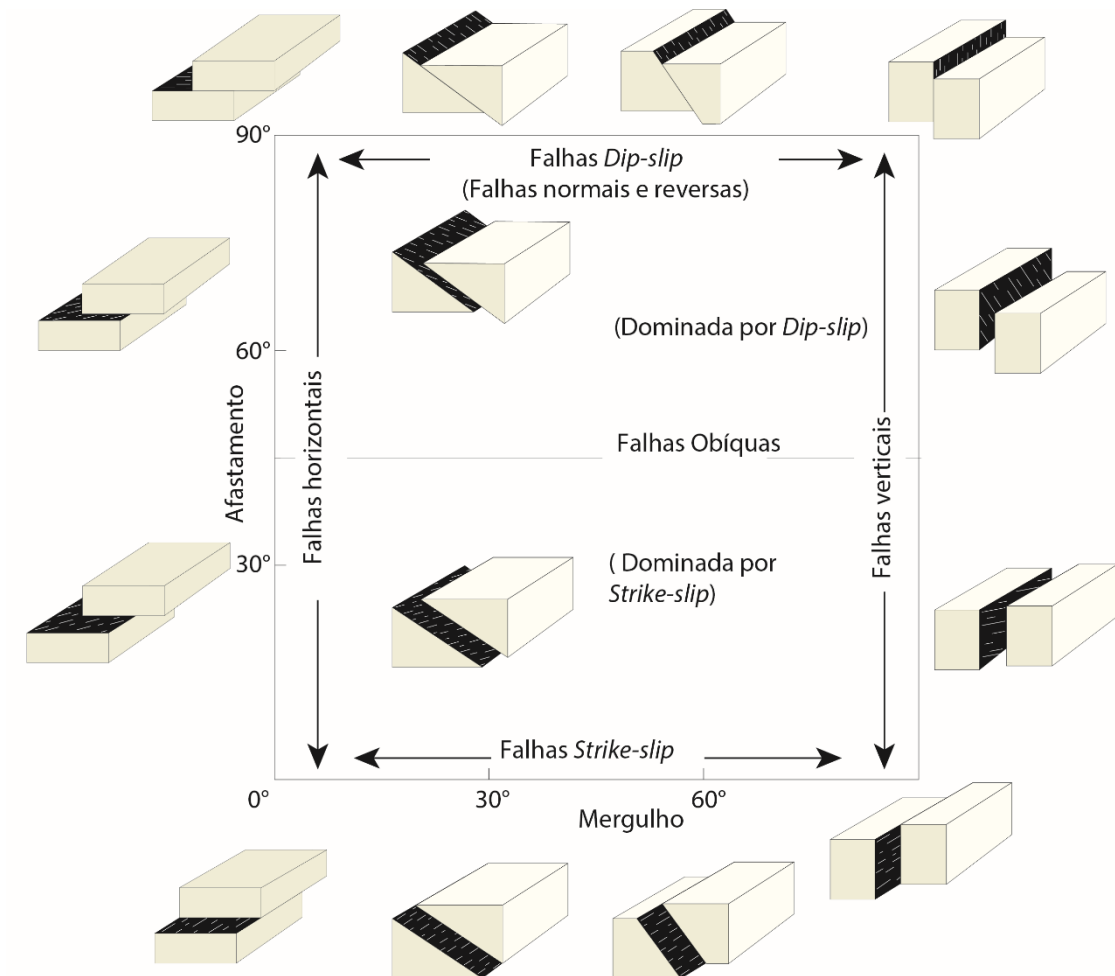
Considerando a orientação e a cinemática do plano de falha é possível classificar as falhas em quatro categorias: *dip-slip*, *strike-slip*, oblíquas e rotacionais (Figura 7; TWISS; MOORES, 2007):

- a) falhas *dip-slip*: o deslizamento é paralelo ao mergulho da falha (TWISS; MOORES, 2007). Se o bloco de cima da falha (*hanging wall*) desce em relação ao bloco de baixo (*footwall*), a falha é denominada normal; se o contrário ocorre é considerada falha inversa (TWISS; MOORES, 2007);
- b) falhas *strike-slip*: o deslocamento ocorre na horizontal. Se o movimento for para direita (sentido horário) a falha é denominada dextral, se o movimento for para

esquerda (sentido anti-horário), a falha é denominada sinistral (TWISS; MOORES, 2007);

- c) falhas oblíquas: o movimento é descrito pelo somatório das componentes *dip-slip* e *strike slip* (TWISS; MOORES, 2007);
- d) falhas rotacionais: o deslocamento muda tanto em magnitude quanto em orientação ao longo do plano de falha (DAVIS; REYNOLDS; KLUTH, 2011).

Figura 7 - Tipos de falha relacionadas a abertura e ângulo de mergulho.



Fonte: modificado de Fossen (2010).

### 4.2.3. Interação entre Fraturas e Falhas

Existe uma ampla variedade de termos que identificam diferentes tipos de fraturas e falhas e o modo como ocorrem. Peacock et al. (2016) reuniu estes termos em um glossário e classificou as fraturas e falhas em fraturas e falhas individuais, interação entre pares de fraturas e redes e populações de falhas e fraturas. Além disso, o autor, dividiu os termos considerando aspectos geológicos, geométricos, topológicos, cinemáticos e mecânicos. As terminologias relevantes neste trabalho seguem abaixo:

- a) *Horsetail*: estrutura com forma característica, onde fraturas extensionais menores são interconectadas assimetricamente a fratura principal. São frequentemente associadas a falhas de cisalhamento, porém esta afirmativa não é verdadeira para todos os casos (FOSSSEN, 2010; PEACOCK et al., 2016);
- b) Zona de dano: zona onde há uma densidade de estruturas rúpteis maior que o resto da rocha, e que margeia a superfície de uma falha (FOSSSEN, 2010);
- c) *Slickenside*: estrias ao longo do plano de falha causadas pelo deslocamento ao longo da falha.

### 4.3. Esforço

Esforço ou *stress* ( $\sigma$ ) é definido como força por unidade de área (PLUIJM; MARSHAK, 2004; ZOBACK, 2007; FOSSSEN, 2012). Em geologia, quando o esforço assume valores negativos é relacionado a eventos extensionais, e quando positivos, é associado a episódios compressivos (TWISS; MOORES, 2007; FOSSSEN, 2012).

A ação do esforço sobre um plano é quantificada como um vetor, possuindo magnitude e sentido (PLUIJM; MARSHAK, 2004). Segundo Fossen (2012), quando o vetor de esforço age perpendicularmente a uma superfície é denominado esforço normal ( $\sigma_n$ ), e quando é orientado paralelamente a superfície é chamado esforço cisalhante ( $\sigma_s$ ). Em situações onde o esforço é oblíquo ao plano, ele pode ser decomposto nas componentes de esforço normal e cisalhante (FOSSSEN; 2012).

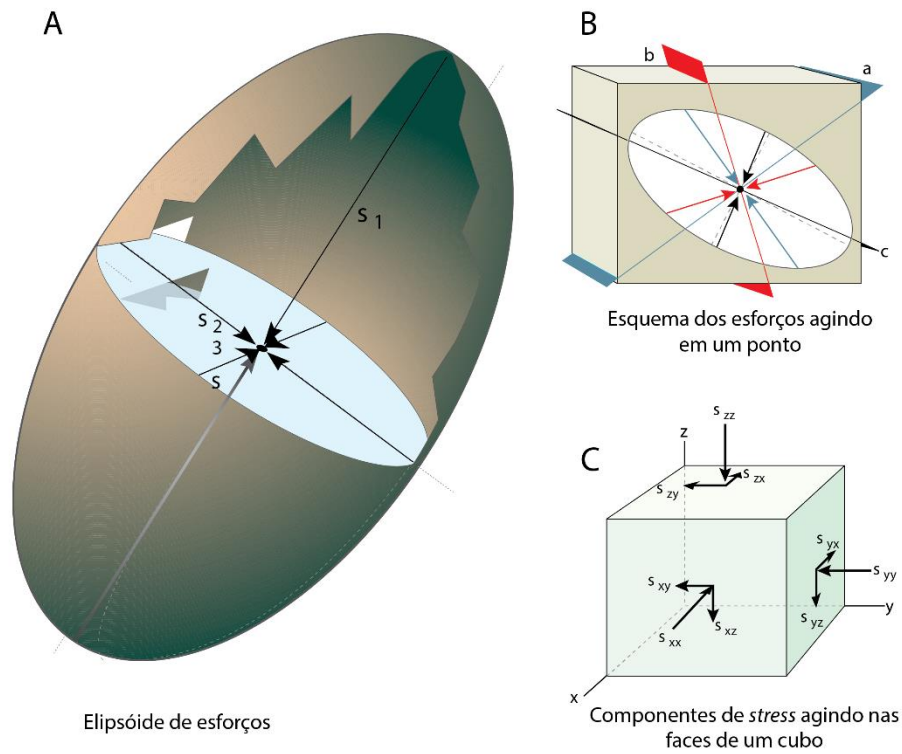
Um número infinito de planos com orientações diferentes passa através de um ponto específico em um corpo tridimensional (Figura 8; PLUIJM; MARSHAK, 2004; FOSSSEN; 2012). O estado de esforços nesse ponto pode ser definido pelo estado de esforço de todos os planos de passam por esse ponto. (PLUIJM; MARSHAK, 2004; FOSSSEN, 2012). Em um corpo homogêneo e isotrópico em profundidade, pode-se definir o estado de esforços através de nove

vetores que agem em três faces ortogonais de um cubo infinitesimal, chamados componentes de esforço (PLUIJM; MARSHAK, 2004; FOSSEN, 2012). Três vetores correspondem a esforços normais e seis vetores correspondem a esforços cisalhantes (Figura 8; PLUIJM; MARSHAK, 2004; FOSSEN, 2012).

Os planos onde ocorrem somente esforços normais, ou seja, o esforço cisalhante é zero, são denominados de planos de esforço principais (PLUIJM; MARSHAK, 2004; FOSSEN, 2012). Os polos dos planos de esforço principais são três vetores cujos eixos são perpendiculares entre si e definem os eixos de esforços principais, chamados de  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  e  $\sigma_3$  (PLUIJM; MARSHAK, 2004; FOSSEN, 2012). O elipsoide de esforços é definido por esses três eixos, e representa a magnitude dos esforços para todos os planos possíveis que passam por um ponto (PLUIJM; MARSHAK, 2004; FOSSEN, 2012). O eixo mais longo, representado por  $\sigma_1$  é o de maior esforço, enquanto que o eixo mais curto, representado por  $\sigma_3$  é o de menor esforço e é perpendicular ao plano formado por  $\sigma_1$  e  $\sigma_2$ , que é o eixo de esforço intermediário (PLUIJM; MARSHAK, 2004; FOSSEN, 2012). Assim é possível descrever os esforços de um corpo especificando a orientação e a magnitude de  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  e  $\sigma_3$  (Figura 8).

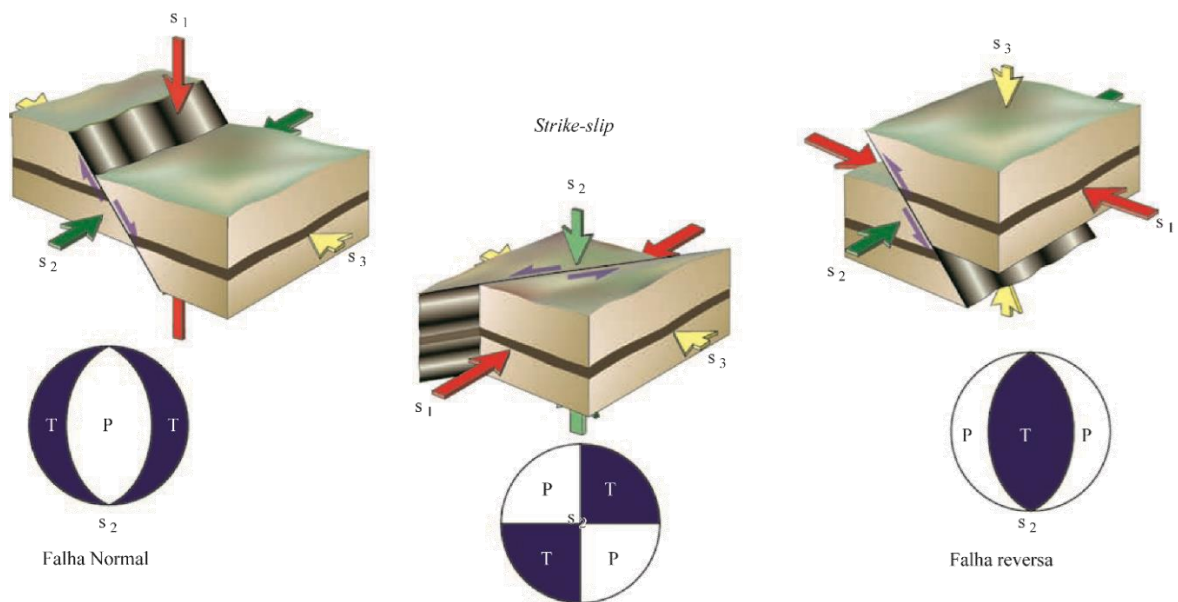
Em falhas normais,  $\sigma_1$  é vertical e  $\sigma_2$  e  $\sigma_3$  são horizontais (Figura 9; FOSSEN, 2010). Neste caso, o deslizamento ocorre quando o  $\sigma_3$  atinge valores suficientemente baixos, independente da profundidade, sendo controlado pelo  $\sigma_1$  e pela poro-pressão (ZOBACK, 2007). Em falhas inversas,  $\sigma_1$  e  $\sigma_3$  são horizontais e  $\sigma_2$  é vertical (FOSSEN, 2010). Neste caso, o cisalhamento ocorre quando o  $\sigma_2$  é consideravelmente maior que o  $\sigma_3$  (ZOBACK, 2007). Em falhas *strike-slip*,  $\sigma_1$  e  $\sigma_2$  são horizontais e  $\sigma_3$  é vertical. Quando a diferença entre  $\sigma_1$  e  $\sigma_2$  atinge valores suficientemente altos ocorre o falhamento (ZOBACK, 2007).

Figura 8 – Esforços em um ponto. A) Elipsoide de esforços. B) esquema de esforços agindo em um ponto. C) Componentes de esforços agindo nas faces de um cubo de tamanho infinitesimal.



Fonte: modificado de Fossen (2012).

Figura 9 - Tensões verticais e horizontais sobre diferentes regimes de falhamento.

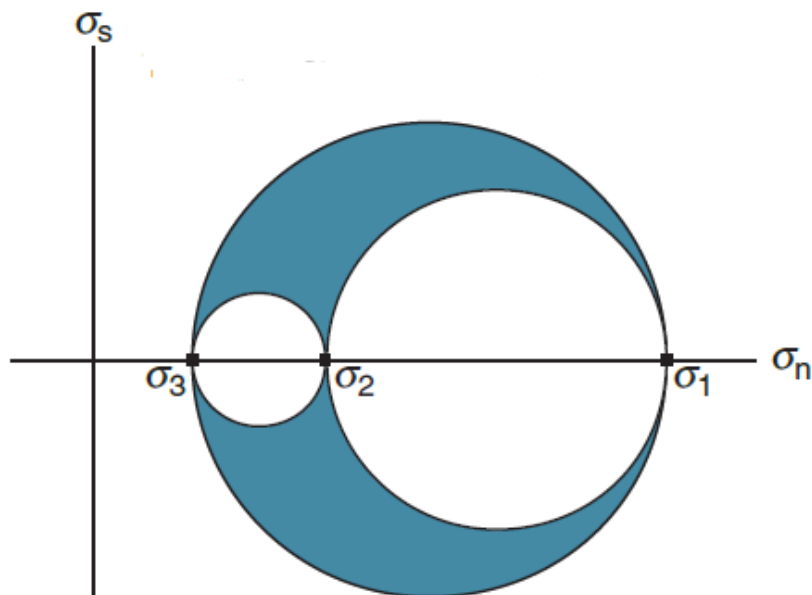


Fonte: modificado de Fossen (2010).

Uma maneira gráfica de ilustrar os esforços atuantes em um corpo é a utilização do diagrama de Mohr (Figura 10; FOSSEN, 2010). Este diagrama representa no eixo horizontal o esforço normal e no eixo vertical o esforço cisalhante (FOSSEN, 2010). Os valores do esforço máximo e mínimo ( $\sigma_1$  e  $\sigma_3$ ) são plotados no eixo horizontal, e a distância entre eles ( $\sigma_1 - \sigma_3$ ) define o diâmetro de um círculo centralizado em  $(\sigma_1 + \sigma_3)/2$ ; FOSSEN, 2010).

Através deste círculo, qualquer ponto pode ter seu esforço normal e cisalhante determinado através da leitura dos valores nos eixos (FOSSEN, 2010). Essa informação pode ser compreendida como o esforço atuando em um plano, representado por um ponto (FOSSEN, 2010).

Figura 10 - Diagrama de Mohr.



Fonte: modificado de Fossen (2010).

#### 4.3.1. Estado de Esforço

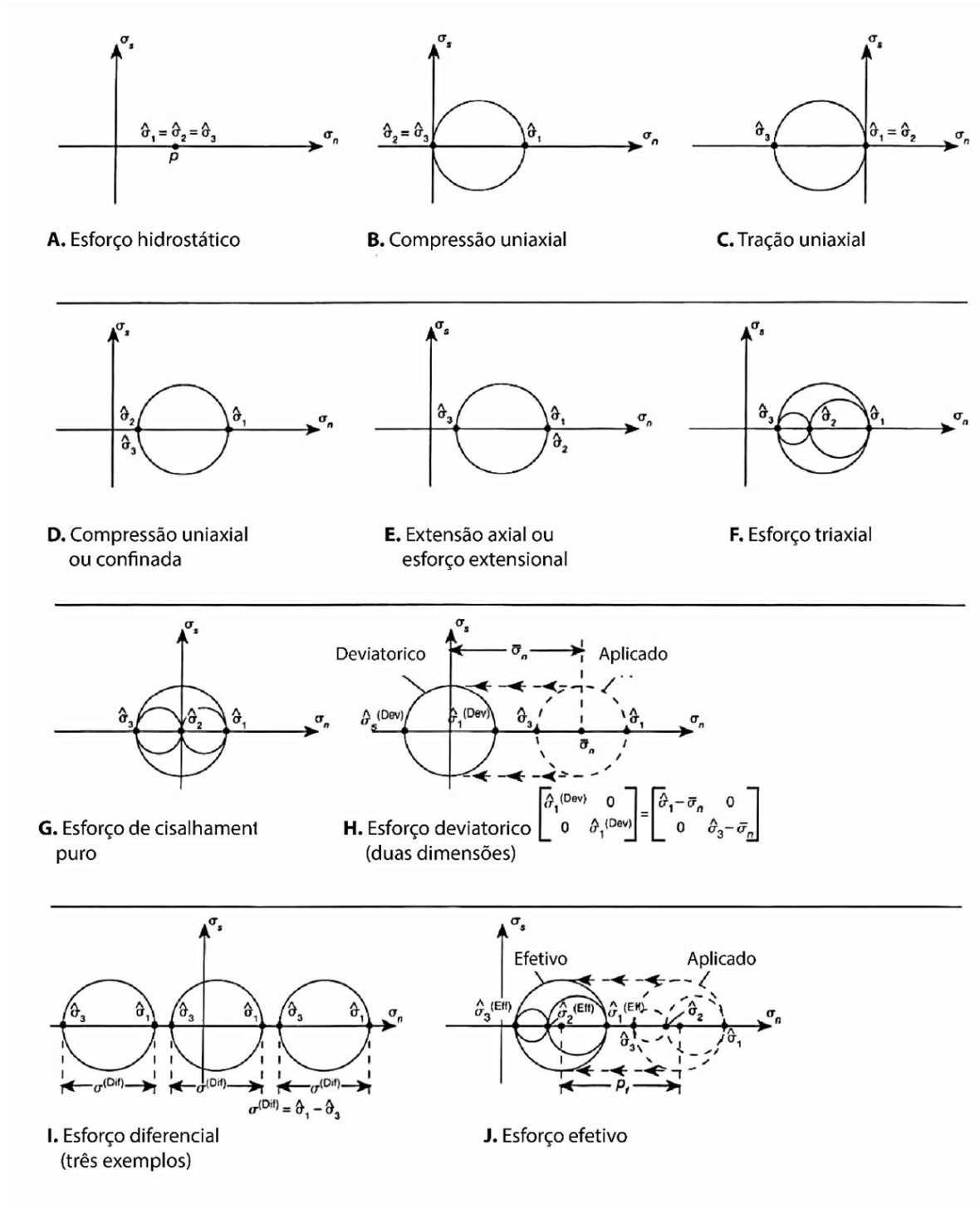
Segundo Twiss e Moores (2007), os estados de esforços (Figura 11) podem ser definidos da seguinte forma:

- a) pressão hidrostática:  $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = p$ . Todos os esforços principais são iguais e compressivos. Como os esforços cisalhantes são nulos em todos os planos, todas as coordenadas ortogonais são principais. O círculo de Mohr se reduz a um ponto no eixo de esforço normal.



- b) esforço uniaxial: esforço é um único círculo tangente a origem, com valores positivos ou negativos para  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  e  $\sigma_3$ . Desta forma, existem duas situações:
- i) compressão uniaxial:  $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3 = 0$ , onde o esforço aplicado é compressivo e em uma única direção.
  - ii) tração uniaxial:  $0 = \sigma_1 = \sigma_2 > \sigma_3$ , onde é aplicada uma tração distensiva em uma única direção.
- c) esforço de compressão axial, compressão axial ou compressão confinada: os esforços principais se comportam de maneira que  $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3 > 0$ . Assim, a compressão uniaxial ( $\sigma_1 - \sigma_3$ ) é adicionada a um estado de esforço hidrostático ( $\sigma_2 = \sigma_3$ ).
- d) esforço extensional, extensão axial ou extensão:  $\sigma_1 = \sigma_2 > \sigma_3 > 0$  é onde a tração uniaxial ( $\sigma_1 - \sigma_3$ ) é adicionada a um esforço hidrostático ( $\sigma_1 = \sigma_2$ ).
- e) esforço triaxial:  $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ , deste modo os esforços principais são todos desiguais, inclusive os sinais. Os gráficos de esforço no diagrama de Mohr se apresentam como três círculos distintos.
- f) esforço de cisalhamento puro ou cisalhamento puro:  $\sigma_1 = -\sigma_3$  e  $\sigma_2 = 0$ . Os esforços principais, máximo e mínimo, tem magnitudes iguais e sinais opostos, enquanto o intermediário é nulo. O esforço normal nos planos de máximo cisalhamento é zero. Assim, o diagrama de Mohr é centrado na origem.
- g) esforço deviatórico: é a diferença entre o esforço médio e o esforço total. Ele representa o componente de anisotropia do esforço total, sendo este o responsável pela deformação em corpos rochosos (FOSSSEN, 2010).
- h) esforço diferencial: é determinado pelo diâmetro do círculo, ou seja, pela diferença entre o  $\sigma_1$  e  $\sigma_3$ . É um importante mecanismo de fraturamento e em geral, quanto maior o esforço diferencial, maior a chance de fraturamento da rocha (FOSSSEN, 2010).
- i) esforço efetivo: é definido a partir da diferença entre a poro-pressão e qualquer componente de stress normal. Como os esforços cisalhantes são mudam, o diâmetro do círculo de Mohr permanece o mesmo.

Figura 11 - Tipos de estados de esforços.



Fonte: Twiss e Moores (2007).

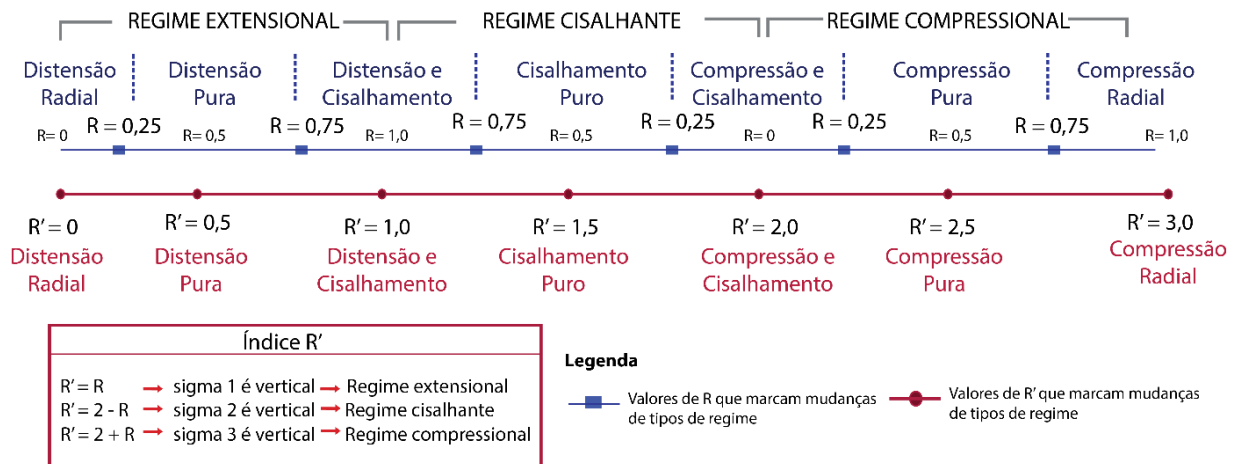
### 4.3.2. Método de Inversão de Falhas

O método de inversão de falhas permite a obtenção das possíveis orientações de paleotensores que produziram a estrutura. Este método é baseado no Método dos Diedros Retos, proposto por Anglier e Mecher (1977), que visa reconstruir o estado de esforço responsável por gerar as falhas (DELVAUX; SPERNER, 2003). Para realizar esta análise, assume-se que o escorregamento de um plano ocorre na direção de cisalhamento máximo (DELVAUX; SPERNER, 2003). Assim, de modo inverso, o estado de esforço que originou as estruturas pode ser parcialmente reconstruído se os valores de direção e sentido do deslocamento de um conjunto de planos de falha da mesma família forem conhecidos (DELVAUX; SPERNER, 2003).

A razão de esforço (R) é o quociente entre as diferenças de  $\sigma_1, \sigma_2$ , e  $\sigma_3$  e  $\sigma_1$  e  $\sigma_3$  sendo expressa em valores de 0 a 1 (DELVAUX; SPERNER, 2003). Os valores de  $\sigma_1, \sigma_2$ , e  $\sigma_3$  e R podem ser obtidos pelo método da inversão de falhas (DELVAUX; SPERNER, 2003). Quando R assume os valores próximos a 0,5, o estado de esforço é dito como puro, podendo ser extensional, cisalhante ou compressional (DELVAUX; SPERNER, 2003). Quando o valor de R for igual a 1, este pode se tratar tanto de um regime compressional radial quanto extensional radial; quando R for igual a 0 pode se tratar tanto de um regime transpressivo quanto transtrativo.

Como um mesmo valor R pode representar regimes de esforço distintos, Delvaux et al. (1997) determinaram um índice de regime de esforço (R'). Este índice expressa os regimes de esforço numa escala de 0 a 3. A relação entre o valor de R e R' (Figura 12) indica quais dos esforços principais são verticais e conseqüentemente o regime de stress atuante.

Figura 12 - Esquema ilustrativo que correlaciona valores de R (linha azul) e R' (linha rosa) a diferentes tipos de regimes de esforço. Os círculos rosas e os quadrados azuis marcam a transição entre um regime de esforço para o outro. O quadro Índice R' mostra a correlação, proposta por Delvaux et al. (1997), entre valores de R e R', orientação dos esforços e os regimes de esforço.



Fonte: autora (2018).

#### 4.4. Tendência ao Deslizamento e Tendência à Dilatação

A tendência ao deslizamento indica a probabilidade de um plano de falha se movimentar por cisalhamento. É obtida através da razão entre esforço normal e o cisalhante (Tabela 1), o deslizamento ocorre quando este valor é igual ou maior a 0,6, que é o equivalente ao coeficiente de atrito estático de uma rocha (MOVE, 2015). A probabilidade de o deslizamento ocorrer é maior quando os valores desta razão, expresso de 0 a 1, são maiores (MOVE, 2015).

A tendência a dilatação aponta planos que estão sob iminência de sofrer extensão. É resultante da razão da diferença entre o  $\sigma_1$  e o esforço normal pelo esforço diferencial (Tabela 1; MOVE, 2015). Quanto mais próximo de 1, maior a probabilidade de o plano dilatar. As condições de esforço necessárias para fraturas extensionais sofrerem dilatação são:

- a)  $\sigma_3 = \sigma_n < 0$
- b)  $\sigma_3 \geq$  resistência a tração da rocha

No caso de fraturas híbridas, decorrentes de regimes extensionais e cisalhantes, as condições de stress necessárias para que as mesmas sofram dilatação devem ser:

- a)  $\sigma_3 < \sigma_n < 0$
- b)  $\sigma_3 <$  resistência a tração da rocha

Tabela 1 – Equações e parâmetros de tendência ao deslizamento e a dilatação.

<b>Técnica</b>	<b>Equação</b>	<b>Parâmetros</b>	<b>Risco de Falhamento</b>
Tendência ao deslizamento	$\frac{\tau}{\sigma n}$	$\tau$ : esforço cisalhante $\sigma n$ : esforço normal.	Planos com maior probabilidade de falhar por cisalhamento. Geralmente a rocha falha quando o valor de 0,6 é atingido.
Tendência a dilatação	$\frac{(\sigma 1 - \sigma n)}{(\sigma 1 - \sigma 3)}$	$\sigma n$ : esforço normal em um plano particular	Planos com iminência de fraturamento extensional.
Tendência ao deslizamento e a dilatação	$\frac{\tau}{\sigma n} + \frac{(\sigma 1 - \sigma n)}{(\sigma 1 - \sigma 3)}$	Somatório dos valores de tendência ao cisalhamento e tendência a dilatação.	Planos com iminência de cisalhamento e fraturamento extensional

Fonte: modificado de MOVE, 2015

Os valores de tendência a dilatação e ao deslizamento, quando somados, resultam em valores de 0 a 2 que indicam planos que tem maior possibilidade de sofrer cisalhamento e fraturamento extensional. Quanto maior o valor, maior a probabilidade de o plano sofrer extensão e cisalhamento.

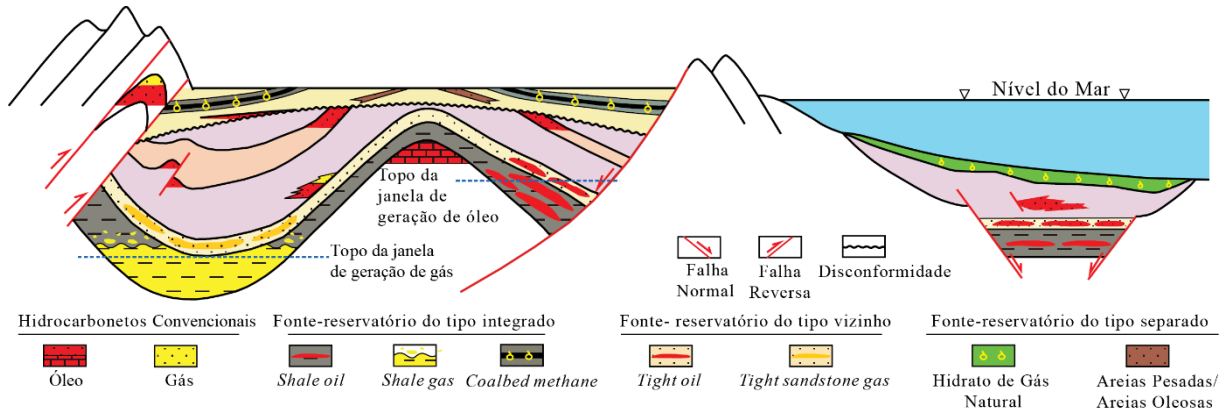
#### 4.5. Recursos Não Convencionais

O conceito de recurso não convencional, apresenta diversas definições, que abrangem tanto o ponto de vista econômico quanto o geológico (LAW; CURTIS, 2002). A princípio, recursos não convencionais são aqueles que se tornam inviáveis economicamente devido à dificuldade e alto custo de extração (LAW; CURTIS, 2002). Sob uma perspectiva geológica, considera-se que reservatórios não convencionais possuem baixa permeabilidade (menor que 0,1 mD) e acumulações regionais contínuas, independentes de armadilhas estruturais ou estratigráficas (Figura 13; ANP, 2014; LAW; CURTIS, 2002).

Allen e Allen (2015) definem recursos de óleo não convencional (óleo pesado e betuminoso) como hidrocarbonetos convencionais que alcançaram um estado de alteração tão avançado que exigem métodos incomuns de extração e produção. Ainda, podem ser definidos, segundo Zou et al. (2013), de acordo com os mecanismos de migração (Figura 14), podendo

ser *in situ* (*shale oil* e *coalbed methane*), migração primária difusa (*coalbed methane*) e migração secundária difusa de curta distância (*tight gas*, *shale oil*, *tight oil*, reservatórios carbonáticos fraturados e vulgares, reservatórios ígneos e areias oleosas e óleo pesado).

Figura 13 - Tipos de reservatórios de hidrocarbonetos convencionais e não convencionais.



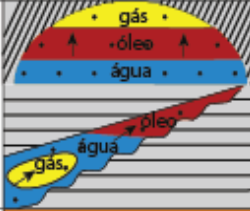







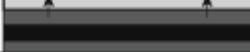
Fonte: modificado de Zou et al. (2013).

#### 4.6. Coalbed Methane

O *coalbed methane* (metano adsorvido no carvão) é um tipo de hidrocarboneto não convencional, presente em camadas de carvão (ANP, 2010; ALLEN, P; ALLEN, J, 2013; ZOU et al., 2013). Esses reservatórios são distribuídos de forma contínua e extensiva (ZOU et al., 2013). Segundo Zou et al. (2013) o gás está presente nas camadas de carvão em 3 estados: adsorvido, livre e dissolvido.

A adsorção ocorre quando o gás metano adere as superfícies de carvão devido a força de atração entre as moléculas do metano e da rocha carbonosa (ZOU et al., 2013). Quando a pressão diminui, ocorre a dessorção e o gás muda para o estado gasoso, ou seja, livre (ANP, 2010). O gás livre migra por difusão através dos poros até alcançar a rede natural de fraturas (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**). O metano torna-se dissolvido ao entrar em contato com a água (ZOU et al., 2013).

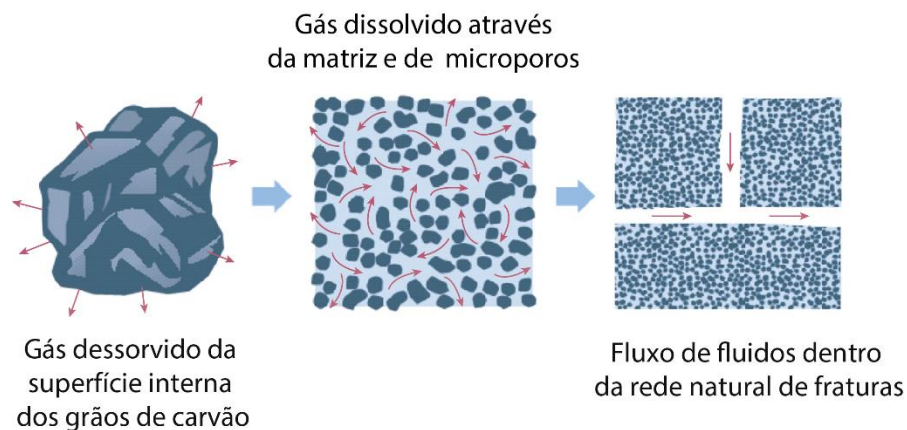
Figura 14 - Classificações dos tipos de hidrocarbonetos não convencionais a partir de mecanismos de migração.

Tipos de recursos de hidrocarbonetos		Estado de Acumulação	Mecanismo de Migração	Padrões de Acumulação	Proporção do Recurso	Exemplos
Piscinas Litológicas Estratigráficas			Migração de fluviabilidade secundária de longa distância	Armadilhas Convencionais	20% ±	Cretáceo, Changhuan na Bacia Songliao Jurássico, NW Bacia Junggar
Óleo e Gás Não Convencionais	Descontínuos		Migração secundária de curta distância	Reservatórios Não Convencionais	80% ±	Neógeno, Oeste Declive de Liaohe
	Areias oleosas + óleo pesado					Cretáceo, Bacia Songliao
	Reservatórios ígneos					Ordoviciano, Bacia Tarim
	Reservatórios carbonáticos fraturados e vugulares					Triássico, Bacia Ordos
	Contínuos		Migração primária difusa			Carbonífero-Permiano, Bacia Ordos
	Tight oil		In-situ			Cambriano – Ordoviciano Bacia Sichuan
	Shale oil					
Tight gas						
Coal bed methane						
Shalegas						

Fonte: modificado de Zou et al. (2013).

É comum que as redes de fraturas naturais das camadas de carvão sejam preenchidas com água (ANP,2010). Ao retirar essa água, há queda de pressão, e o metano estocado nos poros e dissolvido na água se torna gasoso sendo liberado pela rede de fraturas (ANP, 2010). Segundo Zou et al. (2013) primeiramente o metano se encontra adsorvido, depois dissolvido, e por fim é liberado como gás.

Figura 15 - Mecanismos de migração do metano nas camadas de carvão até as fissuras.

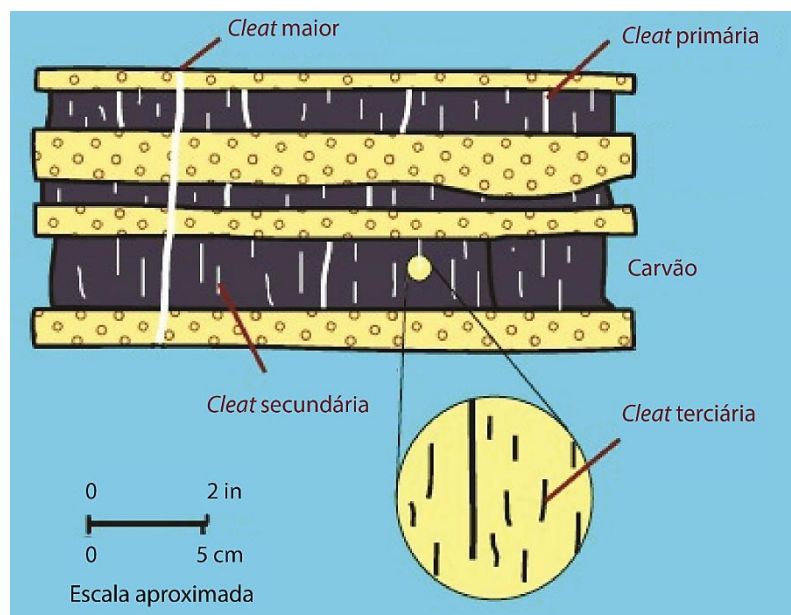


Fonte: Zou et al (2013).

Os poros do carvão e o sistema de fraturas naturais influenciam diretamente na permeabilidade. Segundo Zou et al. (2013) as fraturas são afetadas pelo metamorfismo do carvão. Quando o metamorfismo é intermediário, os carvões se tornam brilhosos ou semi-brilhosos, estando associados à presença de *coalbed methane* (ZOU et al., 2013).

A profundidade pode afetar a abertura de micro e nano fraturas, denominadas “*cleats*”, que são necessárias para conectar zonas de adsorção e escoar gás do reservatório para o poço (Figura 16; CRAIN, 2018). Se as camadas de carvão se encontrarem em profundidade acima de 2.000 m, as fissuras podem se fechar devido ao sobrepeso das camadas sobrejacentes (CRAIN, 2018). As *cleats*, podem também se encontrar preenchidas por minerais que obstruem a passagem dos hidrocarbonetos diminuindo a permeabilidade da rocha (CRAIN, 2018).

Figura 16 - Representação gráfica de ocorrência de micro e nanofraturas (*cleats*) existentes nas camadas de carvão.



Fonte: modificado de Crain (2018).

#### 4.7. Fraturamento Hidráulico

O fraturamento hidráulico é considerado um método de estimulação, amplamente usado para extrair hidrocarbonetos não convencionais, aumentando sua produção (STOECKHERT et al., 2015). Além disso, pode ser usado para medição do esforço, alívio do esforço para túneis e ainda para técnicas de mineração de subsuperfície (STOECKHERT et al., 2015). Este



procedimento consiste na inserção de fluidos pressurizados (com volumes acima de 3000m<sup>3</sup>), compostos por água, areia e aditivos químicos, em um poço, com o objetivo de extrair hidrocarbonetos (Figura 17; ANP, 2014).

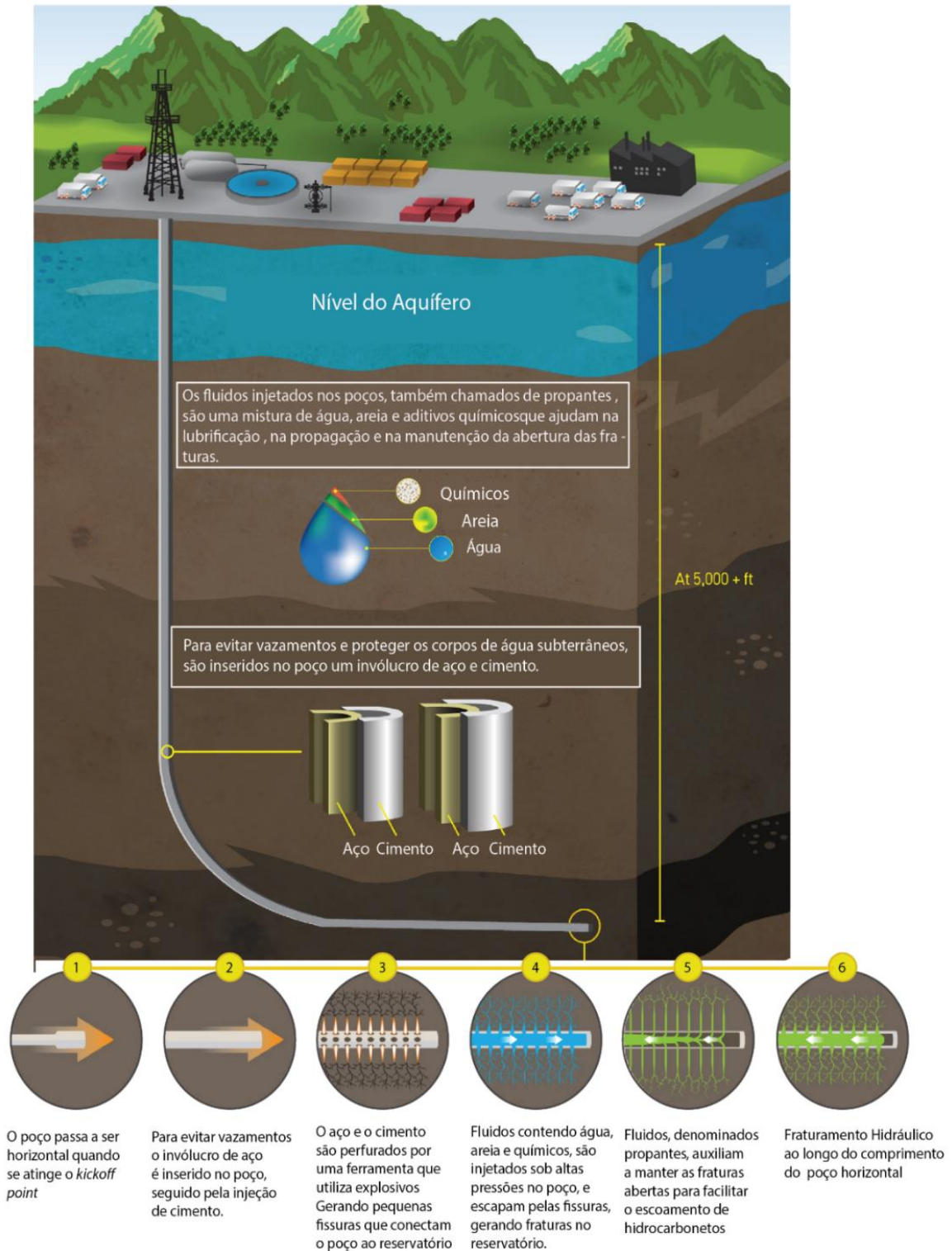
Para efetuar a técnica de fraturamento hidráulico, primeiramente um poço vertical é perfurado (MENDONÇA; JERÔNIMO, 2014; TAVARES, 2010). O equipamento de perfuração é retirado quando ultrapassa a profundidade do aquífero, e no lugar dele é colocado um invólucro de aço (SOUZA FILHO, 2017). Após a substituição pelo cano de aço, é injetado cimento no furo (MENDONÇA; JERÔNIMO, 2014; TAVARES, 2010). Quando o cimento chega na base do furo, ele é impulsionado para cima, preenchendo o espaço entre o aço e a parede do furo, criando uma barreira de proteção entre o poço e fontes de água subterrâneas (MENDONÇA; JERÔNIMO, 2014; TAVARES, 2010). A perfuração vertical continua até atingir o chamado ponto de desvio KOP (*kickoff point*), onde o furo passa a ser horizontalizado (SOUZA FILHO, 2017). A perfuração horizontal cessa ao chegar na distância desejada, assim, o equipamento de perfuração é retirado, e o processo anterior se repete: é colocado um invólucro de aço adicional e é injetado cimento (MENDONÇA; JERÔNIMO, 2014; TAVARES, 2010).

Após a perfuração inicia-se a etapa de completção, que consiste na preparação do poço para que possa ser iniciada a produção (MENDONÇA; JERÔNIMO, 2014; TAVARES, 2010). Durante a completção, são feitos alguns ajustes no poço, para eliminar possíveis irregularidades provenientes do processo de perfuração, também são realizadas análises para certificar que a produção no poço é viável (TAVARES, 2010). Ainda na etapa de completção, é realizada uma técnica chamada canhoneio, que visa criar uma conexão entre o invólucro e o reservatório usando uma ferramenta que é carregada com explosivos, que quando ativada, gera fissuras entre o invólucro, o cimento e a rocha reservatório, conectando o reservatório ao furo (MENDONÇA; JERÔNIMO, 2014). Essas fissuras tem um comprimento muito pequeno e não são sentidas na superfície.

As fraturas no reservatório são geradas pela injeção no furo de sondagem de areia, argila e químicos que saem pelas fissuras geradas anteriormente na rocha (GSA, 2016; TAVARES, 2010). A iniciação e propagação destas fraturas são controladas pela pressão e pelas características dos fluidos, assim como pelas tensões atuantes na rocha (TAVARES, 2010). As areias contidas no fluido permanecem nas fraturas, mantendo elas abertas quando a pressão do fluido é removida, permitindo que o óleo ou gás flua para o furo mais facilmente (GSA, 2016; TAVARES, 2010). Então, é inserido um *pecker* de isolamento e o processo é repetido durante toda a seção horizontal do furo (NELSON, 2016; STEVENSON et al., 2001). Quando toda a extensão do furo estiver fraturada, os *pecker* de isolamento serão abertos, e haverá drenagem

dos hidrocarbonetos e o processo é repetido durante toda a seção horizontal do furo (NELSON, 2016; STEVENSON et al., 2001).

Figura 17 - Procedimento utilizado para perfuração de poços horizontais e *fracking*.



Fonte: modificado de Energy From Shale (2017).

#### 4.7.1. Relação do esforço com Fraturamento Hidráulico

O esforço necessário para haver ruptura da rocha vai depender da poro-pressão (FOSSEN, 2010). A presença de fluidos nos poros da rocha provoca um aumento da pressão confinante, devido à expansão dos mesmos com o aumento da temperatura (FOSSEN, 2010). Essa pressão faz com que a rocha se enfraqueça e o esforço necessário para fratura-la seja menor (FOSSEN, 2010). Assim, define-se esforço efetivo, que é a diferença entre os esforços aplicados a rocha e a poro-pressão (FOSSEN, 2010).

A sobrepressão ocorre quando a poro-pressão excede a pressão hidrostática (esforço cisalhante nulo e esforço normal isotrópico), e pode se dar de forma natural ou artificial (FOSSEN, 2010; DAVIS; REYNOLDS; KLUTH, 2011). Em rochas mais profundas, o sobrepeso das camadas subjacentes, os esforços verticais tendem a ser maiores que os horizontais, fazendo com que as fraturas se desenvolvam num plano vertical (TAVARES, 2010; ZOBACK; 2007). Entretanto em rochas que se encontram mais próximas a superfície, as tensões horizontais podem prevalecer sobre as verticais, fazendo com que as fraturas se propaguem em planos horizontais (TAVARES, 2010; ZOBACK; 2007).

Em rochas porosas, confinadas entre rochas impermeáveis, os fluidos ficam presos nos poros, somado a isto, o aumento da pressão causada pelo soterramento resulta na sobrepressão (DAVIS; REYNOLDS; KLUTH, 2011; FOSSEN, 2010). Em rochas impermeáveis, a sobrepressão pode ser provocada artificialmente, através da injeção de altos volumes de fluidos, que aumentam a pressão hidrostática e fraturam a rocha em um dado intervalo de um poço (FOSSEN, 2010). Fraturas artificiais tendem a se propagar perpendicularmente ao plano de menor tensão efetiva (TAVARES, 2010; ZOBACK; 2007). As tensões exercidas pelo fluido durante o fraturamento hidráulico devem ultrapassar as tensões mínimas e a resistência de tração da rocha para que haja fraturamento inicial (TAVARES, 2010; ZOBACK; 2007).

Em reservatórios do tipo *coalbed methane*, tanto o mecanismo de fraturamento inicial, quanto a morfologia e a propagação ainda não são bem compreendidas (ZHANG et al., 2018). Zhang et al. (2018), em sua pesquisa, estudou os fatores que atuam no fraturamento hidráulico em reservatórios de *coalbed methane*. Os resultados mostraram que a pressão inicial é inversamente proporcional ao esforço horizontal, e positivamente relacionada a razão de fratura de fluido. Quando o esforço vertical é constante, a pressão inicial e a largura da fratura diminuem com o aumento da variação de esforço horizontal. Segundo o mesmo autor fraturas naturais podem ser conectadas pelas fraturas principais quando propagadas perpendicularmente

a direção de *Shmin*, então a rede de fraturas e de fraturas secundárias são formadas no reservatório

## 5. MATERIAIS E MÉTODOS

Para o desenvolvimento deste trabalho foram realizadas análise estrutural e análise de stress das estruturas geológicas que ocorrem na região da Mina da CRM em Candiota. A análise estrutural consistiu na análise geométrica, cinemática e dinâmica.

As etapas realizadas foram:

- a) aquisição de dados estruturais e fotográficos em campo;
- b) processamento das fotografias para a construção de MVA;
- c) processamento dos dados estruturais de campo;
- d) interpretação estrutural dos MVA;
- e) integração de dados de campo com os MVA;
- f) análise da orientação dos paleotensores;
- g) análise de stress das estruturas rúpteis mapeadas.

Abaixo, cada etapa é detalhada.

### 5.1. Aquisição de Dados Estruturais e Fotográficos em Campo

A primeira etapa deste trabalho se deu através de saídas de campo onde foram coletados dados estruturais e fotografias terrestres e aéreas. Durante o trabalho de campo as estruturas foram classificadas quanto a sua geometria, distribuição espacial e cinemática. A obtenção de medidas estruturais foi feita através de uma bússola do tipo *Brunton*, cuja notação utilizada foi *Dip – Direction* e as coordenadas de cada ponto foram obtidas por meio de um *Global Positioning System* (GPS).

A aquisição de fotografias aéreas foi realizada com câmera acoplada a Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT) marca DJI modelo *Phantom 4* (Tabela 2; Figura 18). As fotografias obtidas com VANT, em conjunto com um sistema de medição fotogramétrico, permite reconstruir digitalmente exposições de afloramentos em três dimensões com alta resolução (CAWOOD et al., 2017; VOLLGER; CRUDEN, 2016).

Tabela 2 - Especificações técnicas do VANT utilizado.

<b>Veículo Aéreo Não Tripulado da Marca DJI</b>	
<b>Modelo</b>	Phantom 4
<b>Câmera</b>	Sensor: Complementary Metal-Oxide Semiconductor (CMOS), 11mm
	Resolução: 12 megapixels (4000 x 3000)
	Tamanho de pixel: 1.55 x 1.55 $\mu\text{m}$
	Lente: 20mm
	Distância focal: 3,61mm
	Campo de visão: 94°

Fonte: autora.

Figura 18 - Veículo Aéreo Não Tripulado marca DJI modelo Phantom 4.



Fonte: modificado de DJI (2018)

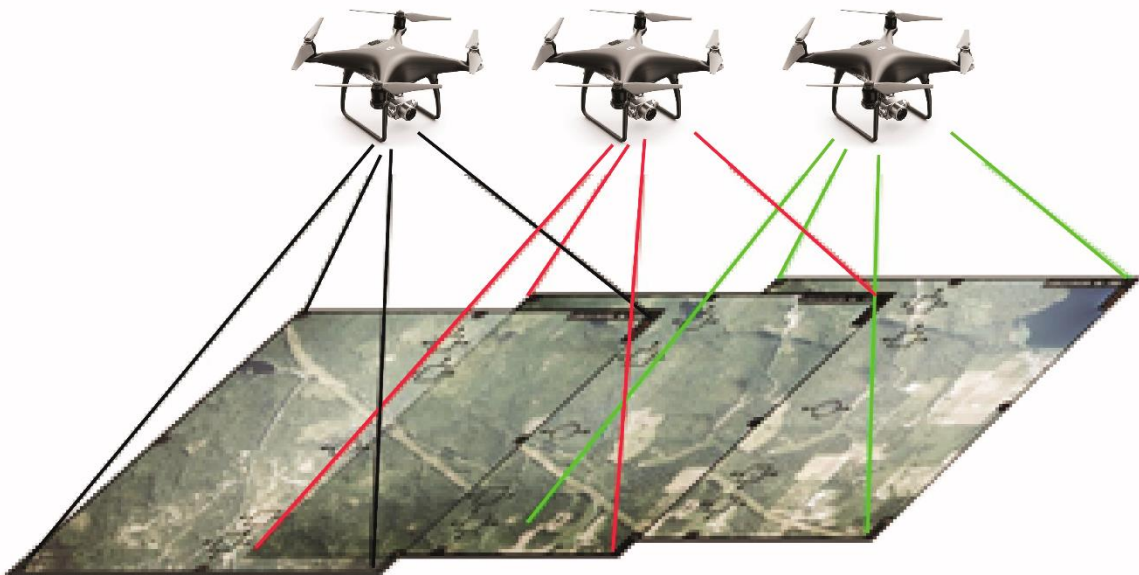
Foram realizados 12 voos com o objetivo de produzir MVA de áreas distintas na mina em afloramentos em planta, como lajedos, ou em perfil, nos taludes da mina. Os voos realizados em planta, foram programados para adquirir as imagens de forma autônoma, utilizando o *software UgCS*. Este software ajusta rotas de voo de acordo com a área a ser fotografada, resolução e sobreposição desejada.

As fotografias dos taludes da mina foram realizadas de forma manual. Neste caso, a sobreposição foi feita de modo empírico, e o VANT foi deslocado em trajetórias horizontais e verticais. A aquisição terrestre, foi realizada com uma câmera digital, e correspondeu a apenas um afloramento. O modo como as fotografias foram coletadas foi semelhante ao método manual utilizando o VANT.

A resolução do MVA depende dos seguintes fatores:

- a) resolução das fotos: é determinada pela quantidade de pixels que compõe a imagem. Este valor é subordinado a especificações técnicas da câmera utilizada. Desta maneira, quanto maior o número de pixels, melhor a resolução;
- b) distância entre o objeto e a câmera: a distância entre o afloramento e a distância focal da câmera vai determinar o *Ground Sample Distance* (GSD). O GSD é uma relação entre o tamanho do pixel em unidades de terreno, quanto menor o seu valor, melhor a resolução (VOLLGER; CRUDEN, 2016);
- c) sobreposição: a taxa de sobreposição é dada em porcentagem. A taxa de sobreposição necessário para a construção de um modelo deve estar entre 60% e 80% (Figura 19). Entretanto, o processamento pode ser comprometido com valores elevados de sobreposição, devido ao grande volume de fotos (AGISOFT, 2018).

Figura 19 - Esquema ilustrativo de aquisição de fotos aéreas sobrepostas para realização de aerofotogrametria.



Fonte: modificado de Himak1 Mapping Construction Machine (2010)

## 5.2. Processamento das fotografias

A construção dos MVA foi realizada com o *software Agisoft PhotoScan 1.4.2*. Este *software* utiliza algoritmos chamados *Structure From Motion-Multi View Stereo*. Os algoritmos utilizam conjuntos de pares de fotografias sobrepostas, obtidas em diferentes posições, e calcula as coordenadas (x, y, z) de pontos (pixels) em comum entre elas (TAVANI et al., 2014). A partir da localização da câmera, relacionada ao deslocamento aparente do objeto, é possível calcular o efeito de paralaxe, que dá o aspecto de profundidade ao modelo (TAVANI et al., 2014).

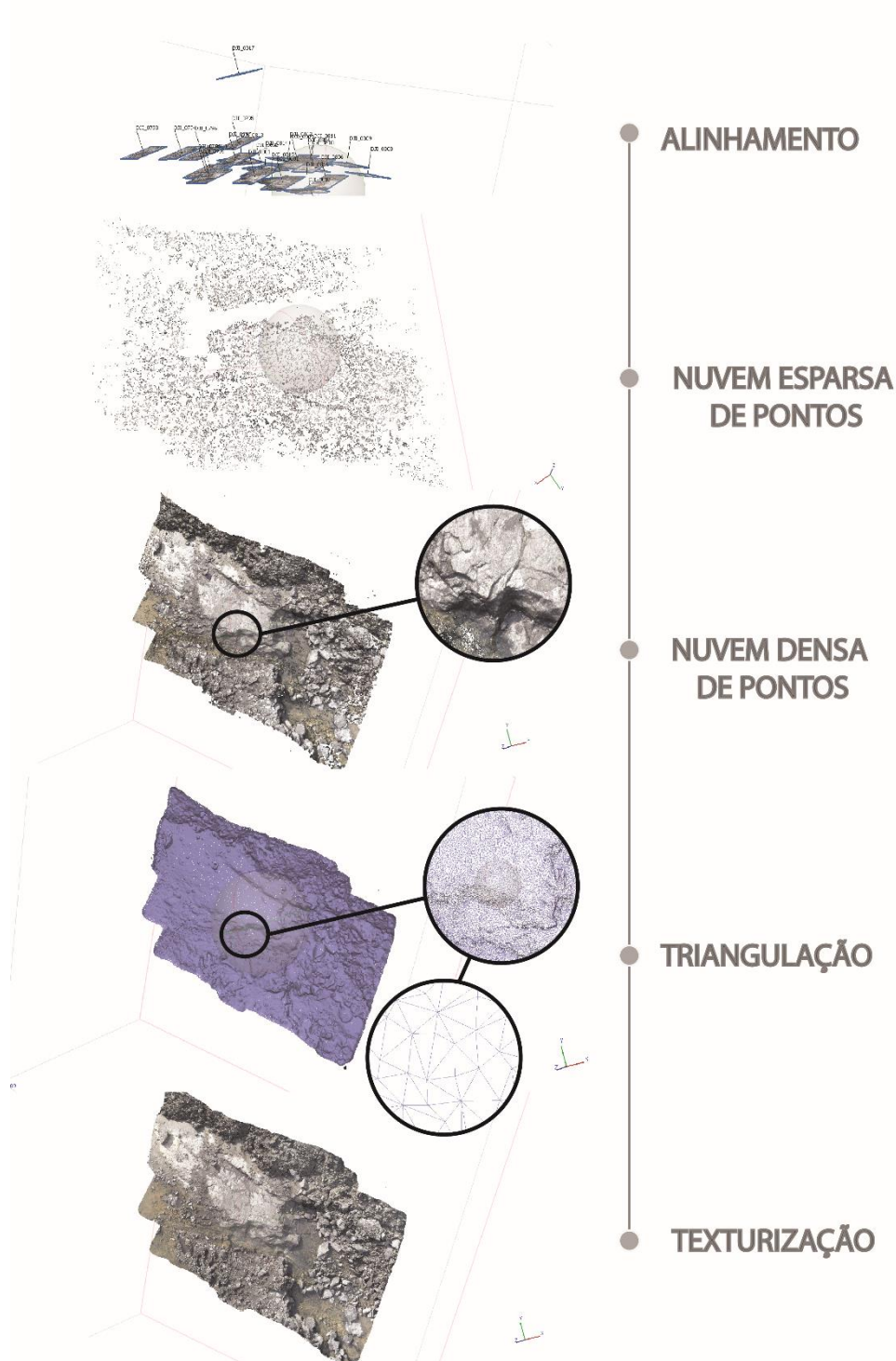
Para a confecção dos MVA, foi utilizado o método descrito por Tavani et al. (2014). O processamento das fotografias para a criação dos MVA, se deu através de quatro etapas principais (Figura 20):

- 1) alinhamento das fotos;
- 2) construção da nuvem densa de pontos;
- 3) triangulação;
- 4) texturização.

Primeiramente as fotos foram alinhadas utilizando o algoritmo *Structure From Motion* que reconhece pontos iguais em diferentes imagens sobrepostas, gerando uma nuvem esparsa de pontos (TAVANI et al., 2014). Posteriormente são estimados ao mesmo tempo, a geometria da cena 3D, a posição das imagens e os parâmetros internos da câmera formando uma nuvem de pontos densa. (CARRIVICK; SMITH; QUINCEY, 2016).

Estes pontos são unidos por um processo chamado de triangulação. Esta etapa ocorre através da conexão entre três pontos vizinhos gerando pequenos triângulos irregulares, formando uma malha triangulada (VOLLGER; CRUDEN, 2016). Por fim é feita a texturização, que consiste em reconstruir a textura sobre a malha triangulada. Neste estágio o programa reconhece as coordenadas dos 3 vértices de cada triângulo da malha, e associa aos pontos de mesma coordenada nas fotografias. A textura da foto é então colada no triângulo correspondente.

Figura 20 - Etapas do processamento de imagens para construção de Modelos Virtuais de Afloramento.



Fonte: autora.



### 5.3. Processamentos dos Dados Estruturais de Campo

Os dados estruturais foram compilados e organizados em planilhas no *software Excel*. Foram confeccionadas diferentes planilhas para medidas de atitudes de planos (falhas, fraturas, veios, acamamentos) e linhas (estrias de falha). A planilha contém informações de coordenadas, tipo de estrutura, azimute, mergulho e cinemática.

Para interpretação foram confeccionados esterogramas separados para planos e linhas. Ainda, os dados de falha com suas respectivas estrias e cinemática foram inseridos no *software Wintensor*, afim de extrair a orientação dos paleotensores principais.

### 5.4. Integração dos Dados de Campo com os Modelos 3D

A integração dos dados de campo com o modelo 3D foi realizada conforme o seguinte processo:

- i) importação dos MVA no *software Move 2018*. Este *software* possui uma série de ferramentas que permitem analisar e construir modelos com restrições geométricas e análise cinemática em 2D e 3D (MIDLAND VALLEY, 2018).
- ii) importação de medidas de falhas e fraturas coletadas em campo e o reconhecimento das mesmas nos modelos. Assim, foi possível plotar pontos com valores de *dip* e azimute destas estruturas. A partir dos pontos plotados foram geradas superfícies, como planos de falhas e fraturas.

### 5.5. Coleta de Medidas Estruturais a Partir dos MVA

No *software Move 2018* é possível extrair medidas estruturais diretamente no MVA e gerar planos em 3D. Existem diversas formas de fazer tal procedimento. Neste trabalho foram utilizados dois métodos:

- a) A partir do *dip*: Seleciona-se uma determinada área, como um plano de falha por exemplo, e partir dela, o programa reconhece os pontos que a compõe. O *software* reconhece os valores de *dip* e azimute de todos os pontos selecionados, através geometria da superfície. Esta ferramenta fornece ainda um sumário estatístico dos dados extraídos. Assim, cria-se um único ponto utilizando a ferramenta *Dip*, e atribui-se a ele, o valor médio das atitudes, fornecida pelo

sumário estatístico gerado anteriormente. Uma vez plotado o valor do *dip*, é possível gerar a superfície 3D (Figura 21).

- b) A partir de linhas: traça-se uma linha sobre uma estrutura, como um plano de fratura por exemplo, e a partir dela cria-se a superfície. Posteriormente é possível extrudir a linha e ajustar sua orientação manualmente.

Figura 21 - Processo para extrair medidas dos MVA e gerar planos.



Fonte: Autora

## 5.6. Definição dos Paleotensores

A determinação dos paleotensores foi realizada a partir das atitudes de falhas e de suas respectivas estrias e cinemática. As medidas foram inseridas no *software WinTensor*, a para cada estrutura foi definido tipo, cinemática, nível de confiança, ativação e intensidade da estria. As medidas são primeiramente processadas e separadas automaticamente pelo *software*, que considera a família de falhas mais representativa e exclui as demais. Posteriormente, o programa calcula de acordo com o Método de Inversão de Falhas, a orientação dos paleoesforços principais, o valor de  $R$ ,  $R'$ , e os índices de qualidade dos dados QRw e QRd (DELVAUX; SPERNER, 2003)

Os índices de qualidade QRw e QRd são referentes a qualidade dos dados, e são proporcionais a quantidade de medidas utilizadas e a similaridade entre elas (DELVAUX; SPERNER, 2003). Estes índices são expressos em 5 conceitos, A, B, C, D, E, sendo A o melhor e E o pior. A qualidade permanece razoável se pelo menos um dos dois índices obtiver no mínimo o conceito D. Se ambos os índices apresentarem conceito E a qualidade da análise não é representativa (DELVAUX; SPERNER, 2003).

Foram inseridas 20 medidas estruturais, e apenas 8 foram utilizadas na primeira análise. Esta família de fraturas foi denominada Grupo 1. Posteriormente o processo foi repetido para

uma segunda família de fraturas, denominadas Grupo 2. O Grupo 2 foi separado manualmente, e consistia em 6 medidas de falha, das quais apenas 4 foram utilizadas.

### 5.7. Análise de Stress

Neste trabalho foi utilizado o módulo *Stress Analysis* do *software Move 2018*, que permite calcular os parâmetros Tendência ao Deslizamento, Tendência à Dilatação e Tendência a Dilatação e ao Deslizamento através das orientações e magnitudes dos esforços principais ( $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ , e  $\sigma_3$ ). Estes parâmetros indicam quais planos tendem a sofrer cisalhamento e dilatação sob determinado regime de esforço.

Para realizar a análise de esforço, as medidas estruturais de falha e fraturas contidas nos modelos foram compiladas e importadas no programa. Foram realizadas simulações de esforço para distintos cenários para cada um dos parâmetros citados anteriormente. O objetivo desta etapa, foi analisar o comportamento das estruturas, quando submetidas a estados de esforços triaxiais e a mecanismos de esforço híbridos entre tração e compressão. O mecanismo de tração ocorre quando  $\sigma_3$  é normal ao plano da estrutura e menor que zero. Para haver tração pura,  $\sigma_1$  e  $\sigma_2$  também precisam ser negativos, caso contrário, mecanismos de compressão atuam em conjunto com os de tração (FOSSSEN, 2010). Devido a este fator, em todos os cenários foram adotados valores positivos para  $\sigma_1$  e negativos para  $\sigma_3$ . Estas condições foram escolhidas porque se assemelham com que aconteceria na realidade e simulam mecanismos de esforços que causariam a geração de fraturas abertas, que é essencial para o escoamento dos hidrocarbonetos.

Para a orientação dos planos foram analisados os valores de mergulho e azimute, que apresentaram maiores frequências. Os ângulos de mergulho com maior frequência foram de aproximadamente 10°, 50°, 60°, 80°. Os ângulos de azimute com maior frequência, foram 220°, 270° e 150°. Estes valores foram combinados formando 12 (Tabela 3 e Tabela 4) orientações de planos de falhas e fraturas. Desta forma, para cada cenário o  $\sigma_3$  foi orientado ortogonalmente aos planos estabelecidos (Tabela 3 e 4).

Foram produzidos 24 cenários (Tabela 5, Tabela 6, Tabela 7) para Tendência a dilatação, Tendência ao deslizamento, e Tendência a dilatação e deslizamento. Em 9 destes cenários, as orientações dos esforços principais foram fixadas e as magnitudes foram variadas. Este arranjo teve como finalidade analisar como as estruturas respondem a esforços com mesma orientação e magnitudes diferentes (Tabela 3). Nos 15 cenários restantes, os valores de magnitude foram

fixados e a orientação dos mergulhos de  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ , e  $\sigma_3$  foram variadas (Tabela 4). Esta combinação teve o objetivo de simular como as estruturas respondem a esforços de magnitudes iguais e diferentes orientações.

Tabela 3 – Combinações de ângulos de mergulho e azimute das estruturas. Arranjo utilizado para construir os cenários em que a as orientações de esforços foram fixadas e magnitude variadas.

Atitude da estrutura (Dip direction)	Esforços	Az	Dip	Magnitude 1 (Mpa)	Magnitude 2 (Mpa)
<b>220/60</b>	$\sigma_1$	220	60	60	25
	$\sigma_2$	310	0	6	-20
	$\sigma_3$	040	30	-3	-10
<b>270/60</b>	$\sigma_1$	270	60	60	25
	$\sigma_2$	0	0	6	-20
	$\sigma_3$	90	30	-3	-10
<b>150/60</b>	$\sigma_1$	150	60	60	25
	$\sigma_2$	240	0	6	-20
	$\sigma_3$	330	30	-3	-10

Fonte: autora.

Tabela 4 - Combinações de ângulos de mergulho e azimute das estruturas. Arranjo utilizado para construir os cenários em que a as orientações de esforços foram variadas e magnitude fixadas.

Atitude da estrutura (Dip direction)	Esforços	Az	Dip	Magnitude 1 (Mpa)	Magnitude 2 (Mpa)
<b>220/10</b>	$\sigma_1$	220	10	60	25
	$\sigma_2$	310	0	6	-20
	$\sigma_3$	040	80	-3	-10
<b>220/50</b>	$\sigma_1$	220	50	60	25
	$\sigma_2$	310	0	6	-20
	$\sigma_3$	040	40	-3	-10
<b>220/80</b>	$\sigma_1$	220	80	60	25
	$\sigma_2$	310	0	6	-20
	$\sigma_3$	040	10	-3	-10
<b>270/10</b>	$\sigma_1$	270	10	60	25
	$\sigma_2$	0	0	6	-20
	$\sigma_3$	90	80	-3	-10
<b>270/50</b>	$\sigma_1$	270	50	60	25
	$\sigma_2$	0	0	6	-20
	$\sigma_3$	90	40	-3	-10
<b>270/80</b>	$\sigma_1$	270	80	60	25
	$\sigma_2$	0	0	6	-20
	$\sigma_3$	90	10	-3	-10

<b>150/10</b>	$\sigma_1$	150	10	60	25
	$\sigma_2$	240	0	6	-20
	$\sigma_3$	330	80	-3	-10
<b>150/50</b>	$\sigma_1$	150	50	60	25
	$\sigma_2$	240	0	6	-20
	$\sigma_3$	330	40	-3	-10
<b>150/80</b>	$\sigma_1$	150	80	60	25
	$\sigma_2$	240	0	6	-20
	$\sigma_3$	330	10	-3	-10

Fonte: autora.

Tabela 5 – Cenários para estruturas com azimute 220°

<b>Cenários</b>	<b>Estruturas</b>	<b>Esforços</b>	<b>Orientação</b>	<b>Mergulho</b>	<b>Magnitudes</b>
<b>1a</b>	220/60	$\sigma_1$	220	60	60
		$\sigma_2$	310	0	6
		$\sigma_3$	40	30	-3
<b>1b</b>	220/60	$\sigma_1$	220	60	25
		$\sigma_2$	310	0	-20
		$\sigma_3$	40	30	-10
<b>1c</b>	220/80	$\sigma_1$	220	80	25
		$\sigma_2$	310	0	-20
		$\sigma_3$	40	10	-10
<b>1d</b>	220/50	$\sigma_1$	220	50	25
		$\sigma_2$	310	0	-20
		$\sigma_3$	40	40	-10
<b>1e</b>	220/10	$\sigma_1$	220	10	25
		$\sigma_2$	310	0	-20
		$\sigma_3$	40	80	-10
<b>1f</b>	220/80	$\sigma_1$	220	80	60
		$\sigma_2$	310	0	6
		$\sigma_3$	40	10	-3
<b>1g</b>	220/50	$\sigma_1$	220	50	60
		$\sigma_2$	310	0	6
		$\sigma_3$	40	40	-3
<b>1h</b>	220/10	$\sigma_1$	220	10	60
		$\sigma_2$	310	0	6
		$\sigma_3$	40	80	-3

Fonte: Autora

Tabela 6 - Cenários para estruturas com azimute 270°

<b>Cenários</b>	<b>Estruturas</b>	<b>Esforços</b>	<b>Orientação</b>	<b>Mergulho</b>	<b>Magnitudes</b>
<b>2a</b>	270/60	$\sigma_1$	270	60	60
		$\sigma_2$	0	0	6
		$\sigma_3$	90	30	-3
<b>2b</b>	270/60	$\sigma_1$	270	60	25
		$\sigma_2$	0	0	-20
		$\sigma_3$	90	30	-10
<b>2c</b>	270/80	$\sigma_1$	270	80	25
		$\sigma_2$	0	0	-20
		$\sigma_3$	90	10	-10
<b>2d</b>	270/50	$\sigma_1$	270	50	25
		$\sigma_2$	0	0	-20
		$\sigma_3$	90	40	-10
<b>2e</b>	270/10	$\sigma_1$	270	10	25
		$\sigma_2$	0	0	-20
		$\sigma_3$	90	80	-10
<b>2f</b>	270/80	$\sigma_1$	270	80	60
		$\sigma_2$	0	0	6
		$\sigma_3$	90	10	-3
<b>2g</b>	270/50	$\sigma_1$	270	50	60
		$\sigma_2$	0	0	6
		$\sigma_3$	90	40	-3
<b>2h</b>	270/10	$\sigma_1$	270	10	60
		$\sigma_2$	0	0	6
		$\sigma_3$	90	80	-3

Fonte: Autora

Tabela 7 - Cenários para estruturas com azimute 150°

<b>Cenários</b>	<b>Estruturas</b>	<b>Esforços</b>	<b>Orientação</b>	<b>Mergulho</b>	<b>Magnitudes</b>
<b>3a</b>	150/60	$\sigma_1$	150	60	60
		$\sigma_2$	0	0	6
		$\sigma_3$	330	30	-3
<b>3b</b>	150/60	$\sigma_1$	150	60	25
		$\sigma_2$	0	0	-20
		$\sigma_3$	330	30	-10
<b>3c</b>	150/80	$\sigma_1$	150	80	25
		$\sigma_2$	0	0	-20
		$\sigma_3$	330	10	-10
<b>3d</b>	150/50	$\sigma_1$	150	50	25
		$\sigma_2$	0	0	-20
		$\sigma_3$	330	40	-10
<b>3e</b>	150/10	$\sigma_1$	150	10	25
		$\sigma_2$	0	0	-20
		$\sigma_3$	330	80	-10

<b>3f</b>	150/80	$\sigma_1$	150	80	60
		$\sigma_2$	0	0	6
		$\sigma_3$	330	10	-3
<b>3g</b>	150/50	$\sigma_1$	150	50	60
		$\sigma_2$	0	0	6
		$\sigma_3$	330	40	-3
<b>3h</b>	150/10	$\sigma_1$	150	10	60
		$\sigma_2$	0	0	6
		$\sigma_3$	330	80	-3

Fonte: Autora

## 6. RESULTADOS

Os resultados obtidos com a análise estrutural de campo e dos modelos 3D e da análise de stress são apresentados abaixo.

### 6.1. Modelos Virtuais de Afloramento

Foram confeccionados um total de 13 Modelos Virtuais de Afloramento. Os modelos M1A, M1B, A1, A2 e A3, são Modelos Virtuais de Afloramento de porções da Mina de Candiota vista em mapa. Os modelos M2, M3, M4, M5, M6, M7 e M8, são correspondentes a afloramentos em perfil da Mina de Candiota, e foram gerados com o objetivo de interpretar e analisar as estruturas em três dimensões. O modelo D1, é uma porção do modelo M2 em maior detalhe, e é o único cuja aquisição das fotografias foi terrestre. Na Tabela 5 estão informações de cada modelo relativas a data da aquisição de fotos, o horário, tempo de duração de cada vôo e o número de fotografias utilizadas.

Tabela 8 - Relação entre os modelos, data de obtenção, duração de voo e número de fotos.

ÁREA	CÓDIGO	DATA	INICIO	FIM	DURAÇÃO	FOTOS
MODELO 1	M1A	17/04/2018	11:15	11:32	00:17	298
MODELO 1	M1B	17/04/2018	11:36	11:56	00:20	422
MODELO 2	M2	19/07/2018	14:17	14:21	00:04	40
MODELO 3	M3	19/07/2018	14:11	14:15	00:04	30
MODELO 4	M4	19/07/2018	14:04	14:05	00:01	12
MODELO 5	M5	19/07/2018	14:16	14:17	00:01	15
MODELO 6	M6	06/08/2018	11:29	11:53	00:24	200
MODELO 7	M7	06/08/2018	13:33	13:47	00:14	77

MODELO 8	M8	06/08/2018	14:08	14:23	00:15	204
AÉREO	A1	06/08/2018	12:05	12:25	00:20	271
AÉREO	A2	06/08/2018	13:18	13:32	00:14	281
AÉREO	A3	06/08/2018	14:54	15:10	00:16	334
DETALHE	D1	19/07/2018	12:01	13:43	01:42	142
TOTAL	12 VOOS + 1 TERRESTRE				02:30	2,326

Fonte: autora.

Os MVA de afloramentos em perfil, tem resoluções mais altas, de aproximadamente 0,02 cm/pixel. Enquanto os MVA em mapa, que abrangem áreas mais extensas da mina, as resoluções são de aproximadamente de 8 cm/pixel. Dentre os modelos gerados, apenas os modelos M2, M3 e M6 tiveram as estruturas interpretadas neste trabalho. Na Figura 22 os modelos M1, M2, M3, M4, M5 e M6, estão dispostos em mapa, localizados sobre o modelo aéreo A2.

O Modelo 2 (M2) possui aproximadamente 61,2 m de comprimento e 10 m de altura e o Modelo 3 (M3) possui dimensões de 7,7 m x 4,5 m, ambos estão orientados na direção NW-SE. O Modelo 6 (M6) tem aproximadamente 117,3 m x 6,1 m e está orientado na direção N-S.

## 6.2. Análise Estrutural

Foram medidas 110 estruturas planares e lineares ao longo do trabalho de campo. Entre elas, foram observadas falhas normais, transcorrentes (*strike-slip*), estrias, degraus, dobras, *horsetail*, fraturas com preenchimento de minerais e veios de pirita. Além das estruturas observadas em campo, falhas e fraturas também foram interpretadas nos MVA. Foram 12 falhas e 12 fraturas extraídas do modelo M2; 2 falhas e 20 fraturas foram obtidas no modelo M3; 10 falhas e 16 fraturas foram obtidas no modelo M6; totalizando 172 estruturas obtidas em campo e nos MVA.

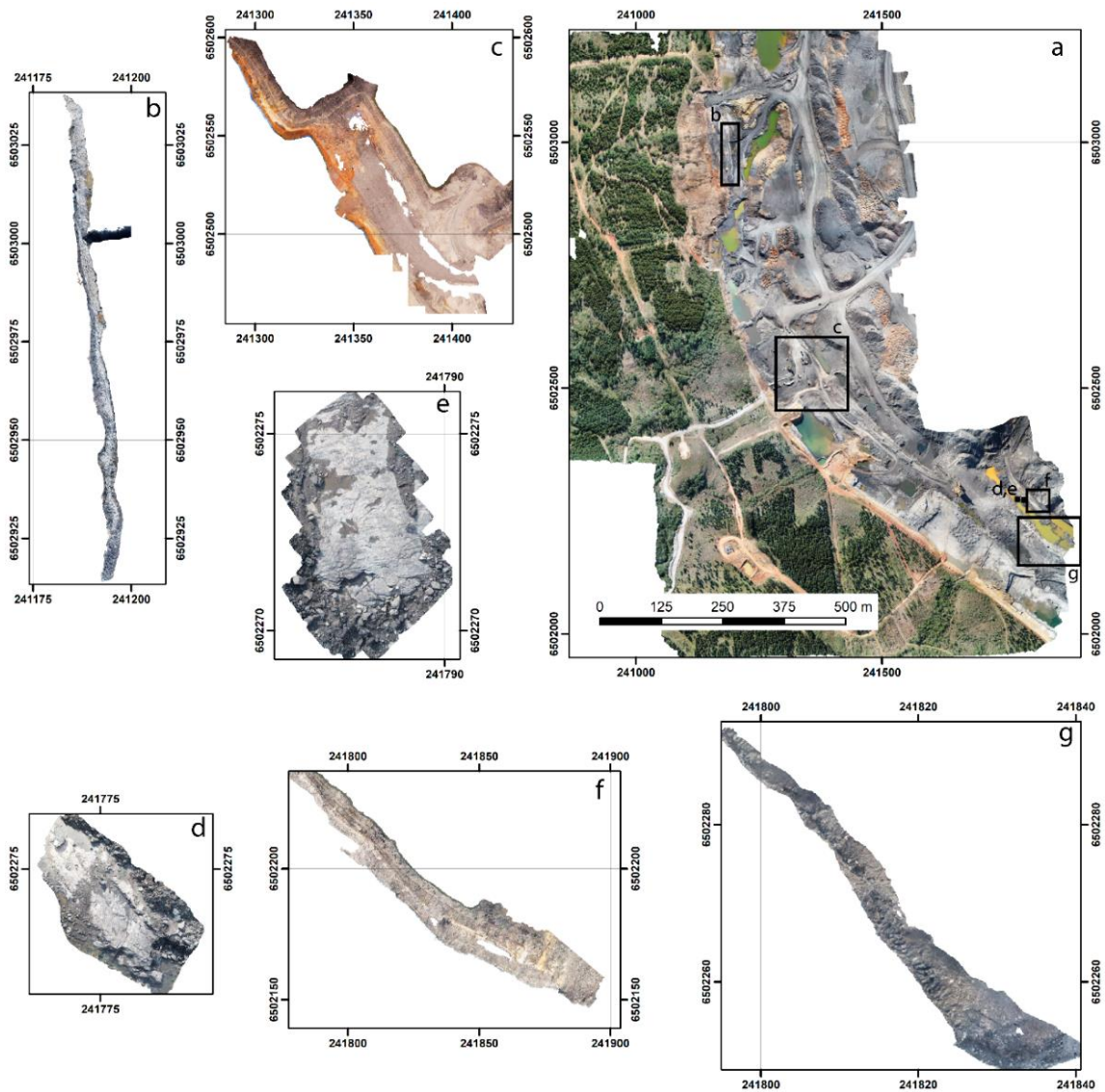
## 6.3. Modelo 2 (M2)

O afloramento correspondente ao modelo M2 apresenta fraturas irregulares, com espaçamento centímetro a decimétrico, distribuídas pelo afloramento de forma homogênea. As fraturas ocorrem com as direções NW e NE (Figura 24) com médios a altos ângulos de mergulho.



Os planos de falha observados são marcados por estrias e possuem rejeito visível (Figura 22). Ocorrem falhas normais indicadas pela presença de degraus em zonas pontuais. As falhas apresentam forma irregular e orientação preferencial para SE, enquanto os ângulos de mergulho

Figura 22 -Vista em mapa dos modelos gerados neste trabalho. a) A2 b) M6 c) M1 d) M3 e) M5 f) M4 g) M2.



Fonte: autora.

variam entre médio e alto (Figura 23). Se distribuem por todo o afloramento, com concentrações mais expressivas na porção central e a noroeste. Foram identificados em campo um número inexpressivo de pequenos planos de falha (cerca de 8cm x 6cm) horizontalizados, porém, devido ao seu posicionamento não foi possível coletar medidas.

Há presença de veios preenchidos por pirita (Figura 25), que se distribuem de forma descontínua ao longo do afloramento. Os veios têm direção aleatória e possuem mergulho predominantemente verticalizado. Subordinadamente, alguns veios estão orientados horizontalmente entre as camadas, outros estão associados a falhas normais e ainda ocorrem em zonas de dano.

#### **6.4. Modelo 3 (M3)**

No afloramento representado pelo modelo M3 foram observadas fraturas orientação predominante para SE, com distribuição descontínua e dimensões entre 0,02 m e 2 m (Figura 25). Apresentam maior densidade em determinados pontos, onde há presença de *horsetailing* e em zonas mais próximas aos planos de falha (Figura 25). A interação entre as fraturas é variada, onde em certas porções se intersectam formando nós em Y em diferentes escalas, e em outras apresentam crescimento ortogonal entre si. Algumas fraturas apresentam preenchimento, indicando movimentos extensionais.

No mesmo afloramento, há presença de falhas identificadas por estrias e degraus com crescimento de minerais de pirita. Ambas apresentam orientação preferencial para NE e cerca de 0,4 m de comprimento. O posicionamento das fraturas em relação as falhas e a ocorrência de indicadores cinemáticos, denotam falhamentos tipo *strike-slip*, orientadas para NW – SE, evidenciados pela orientação dos degraus, e estruturas como *horsetailing* (Figura 26). Ao passo que, também foi observado um plano de falha normal, mergulhando para S, coincidindo com a direção de abertura das fraturas.

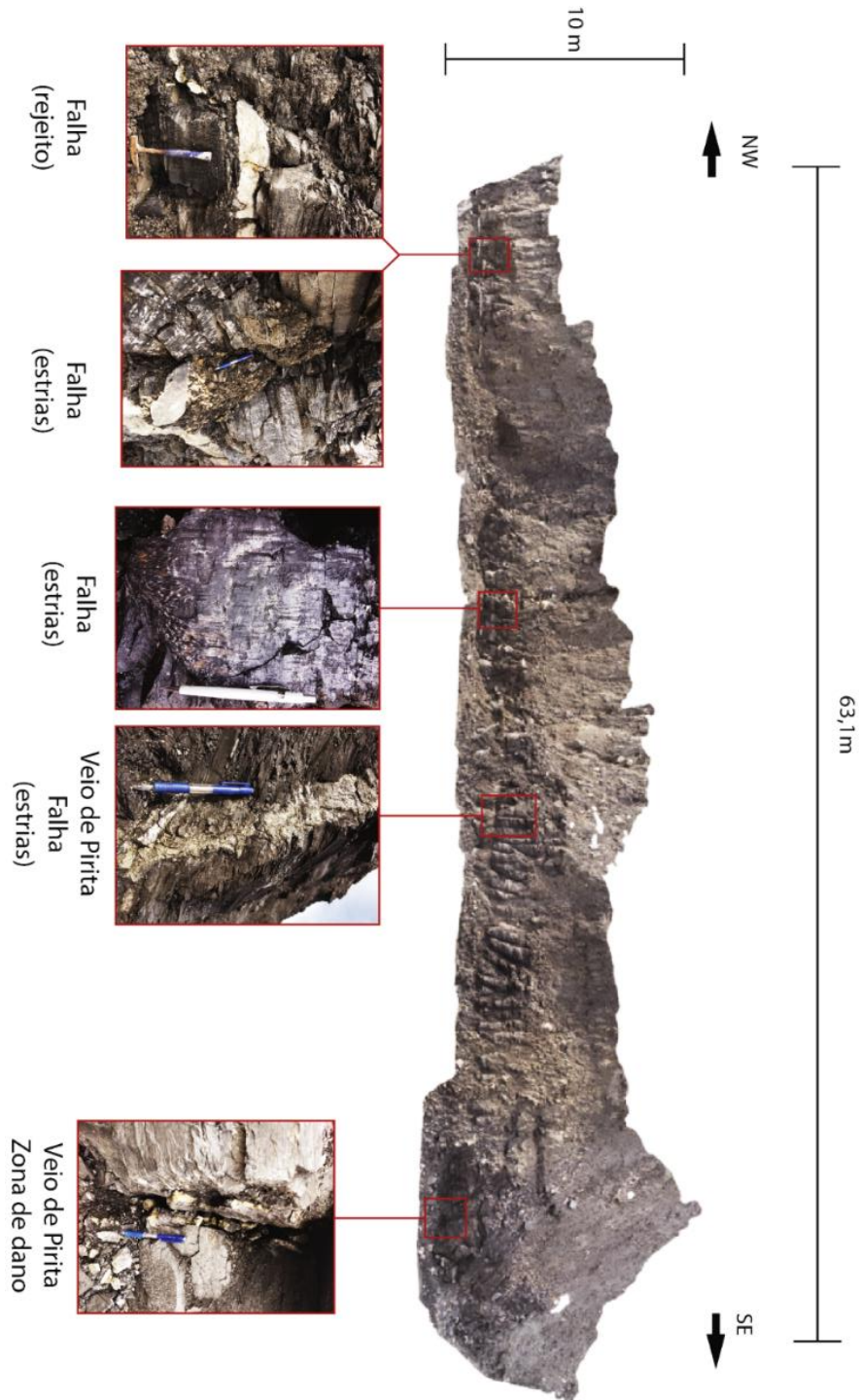
#### **6.5. Modelo 6 (M6)**

No afloramento correspondente ao modelo 6 (M6), há a presença de um grande plano de falha, com rejeito de aproximadamente 2,8 m. As fraturas estão orientadas predominantemente para N-S, SW-NE (Figura 31). As fraturas que possuem orientações mais próximas do eixo E-W apresentam ângulos de mergulho médio ( $30^\circ < \alpha < 60^\circ$ ), enquanto as demais são consideradas de alto ângulo ( $<60^\circ$ ). Apresentam espaçamento centimétrico, forma irregular, e se distribuem homogeneamente ao longo de todo afloramento

As falhas são predominantemente normais e apresentam rejeito expressivo em maior ou menor escala, além outros indicadores cinemáticos como degraus e estrias de falha. As falhas

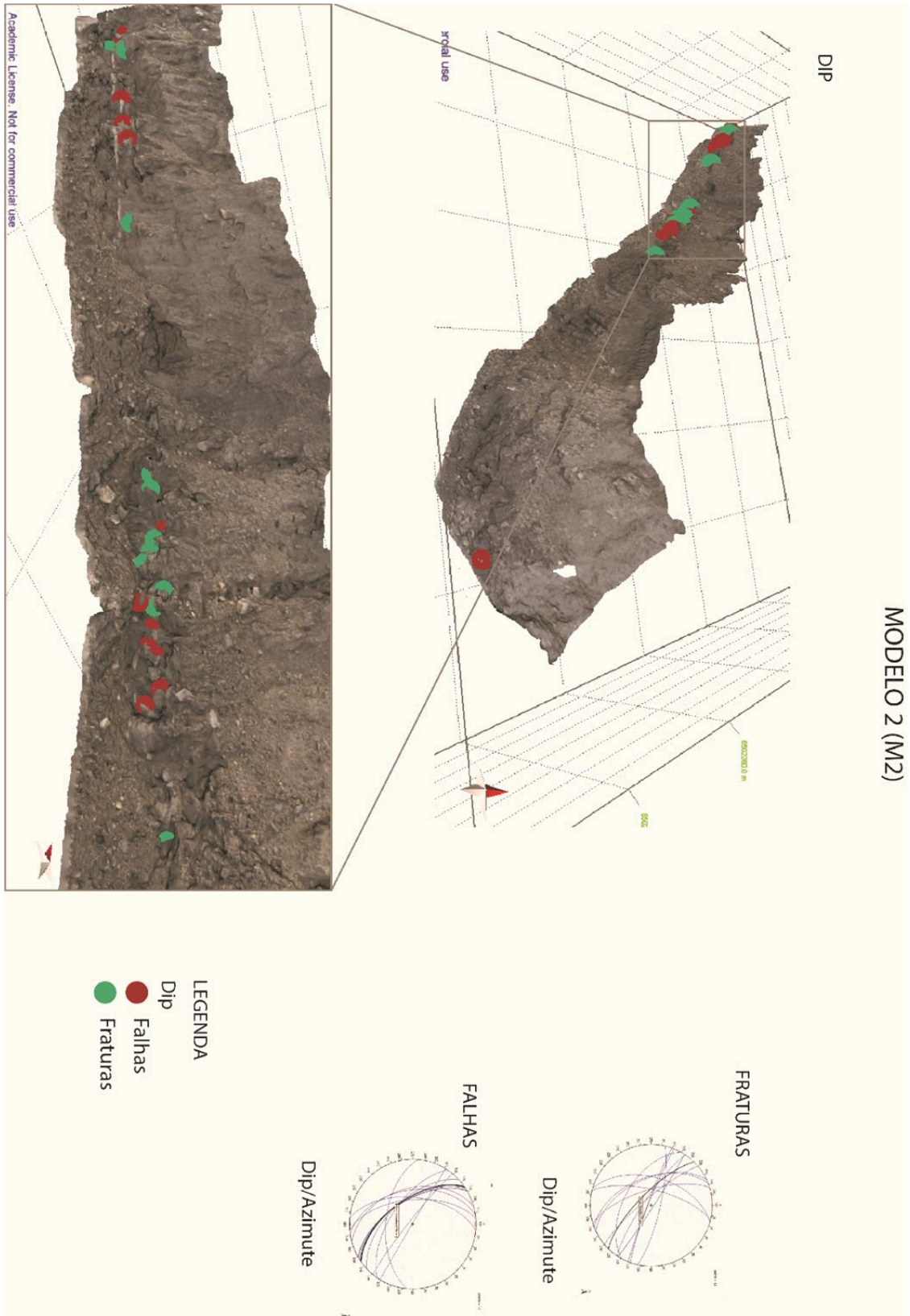
possuem direção preferencial N-S (Figura 29, Figura 30). Nas regiões adjacentes à área correspondente ao modelo M6 foram observadas dobras de arraste.

Figura 23 - Ortofotomosaíco mostrando a localização das estruturas observadas no afloramento M2.



Fonte: autora.

Figura 24 -Modelo do afloramento M2 interpretado. As medidas de falha estão representadas em vermelho e as de fraturas em verde.



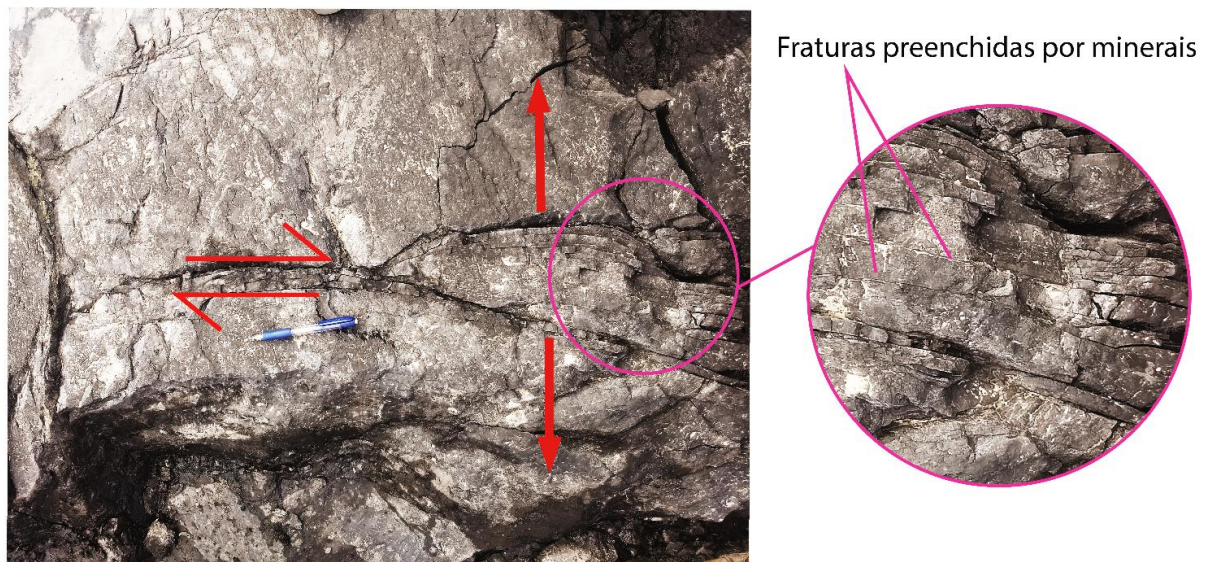
Fonte: Autora.

Figura 25 - Veio de Pirita relacionado a plano de falha no afloramento M2.



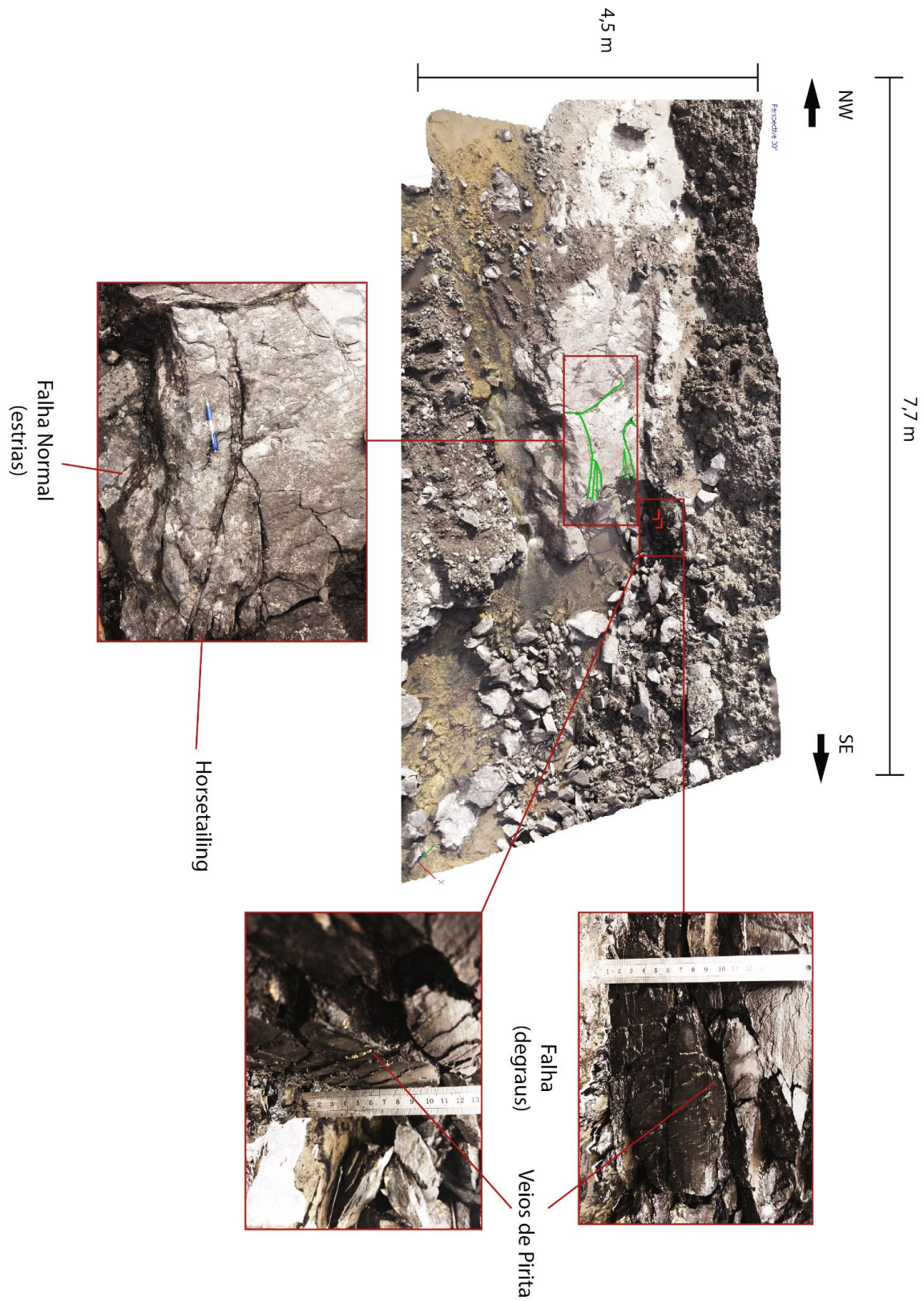
Fonte: autora.

Figura 26 - *Horsetail*. Fraturas preenchidas por minerais caracterizando um regime extensional no afloramento M3.



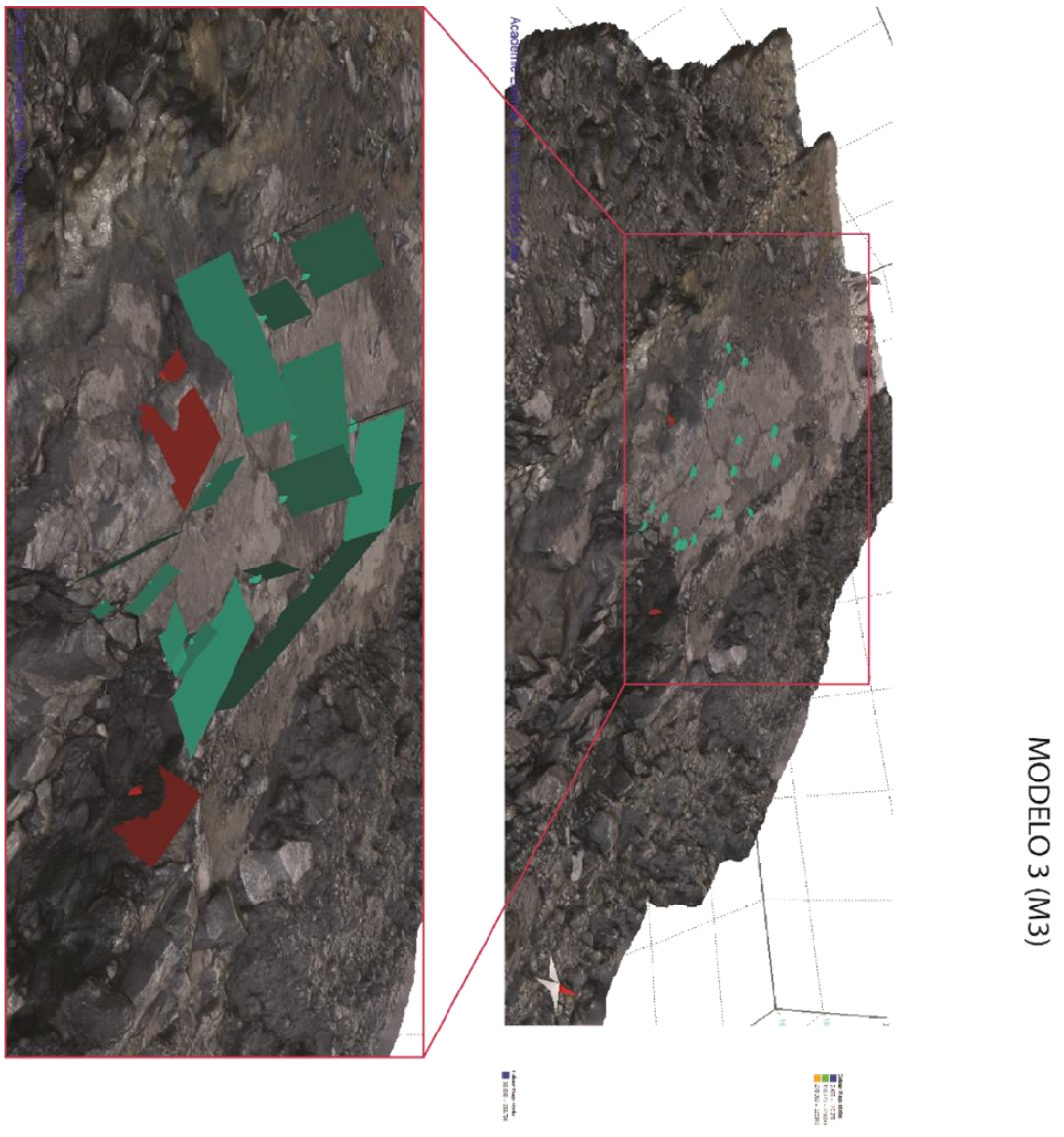
Fonte: Autora.

Figura 27 – Localização das estruturas no Modelo M3, com destaque as falhas, veios de pirita e *horsetailing*.



Fonte: autora.

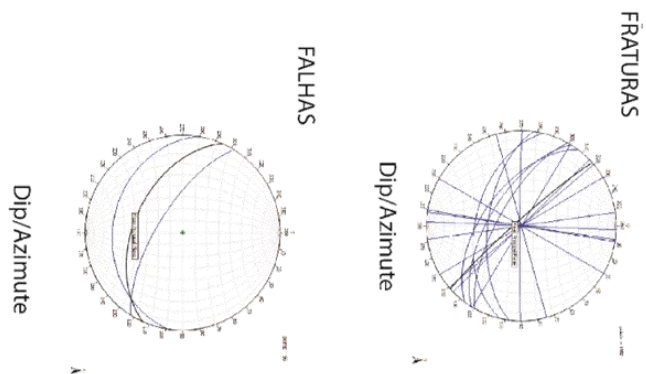
Figura 28 - Modelo do afloramento M3 interpretado. As medidas de falha estão representadas em vermelho e as de fraturas em verde.



MODELO 3 (M3)

Legenda:  
Planos  
Falhas  
Fraturas

Dip  
Falhas  
Fraturas

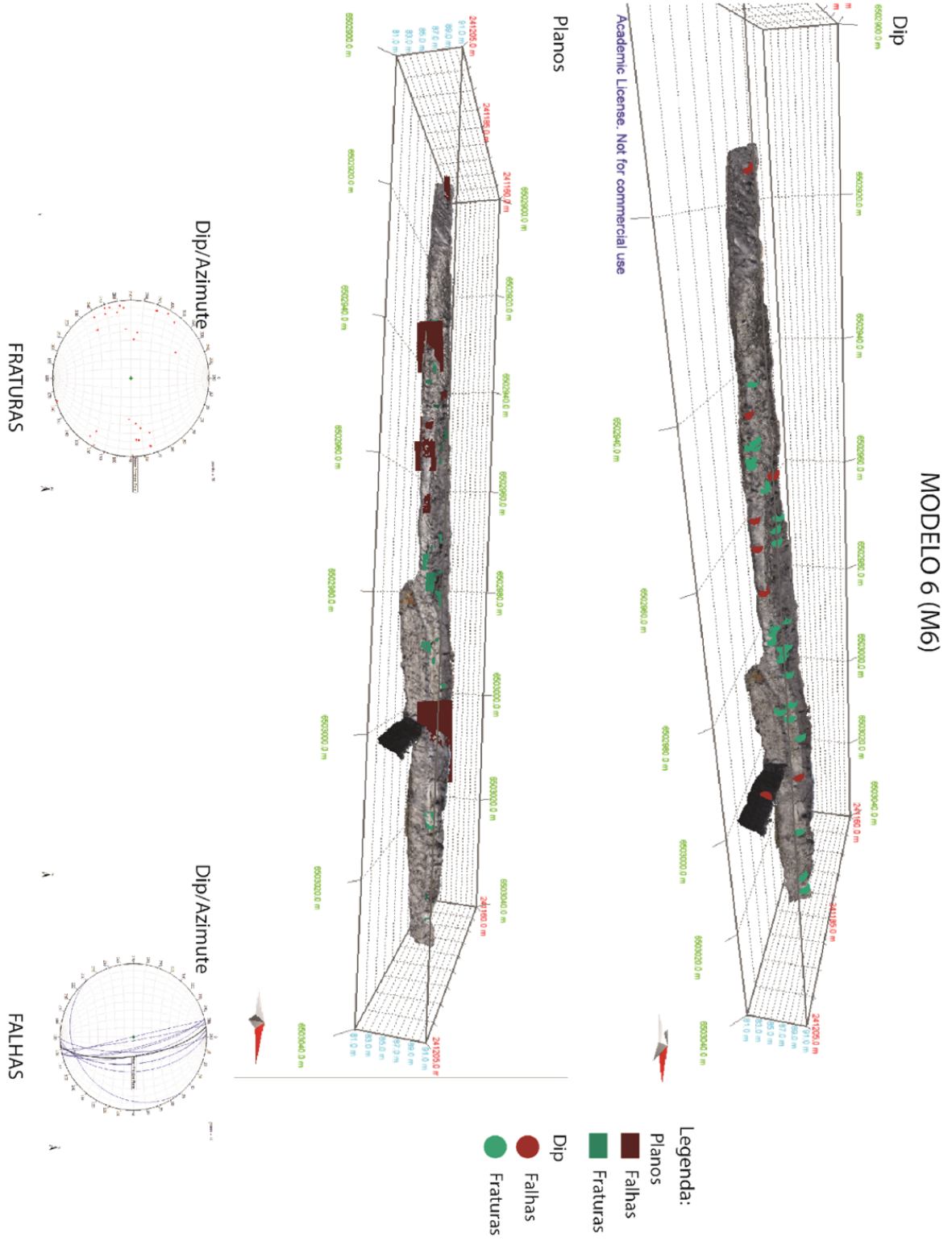


Fonte: autora.



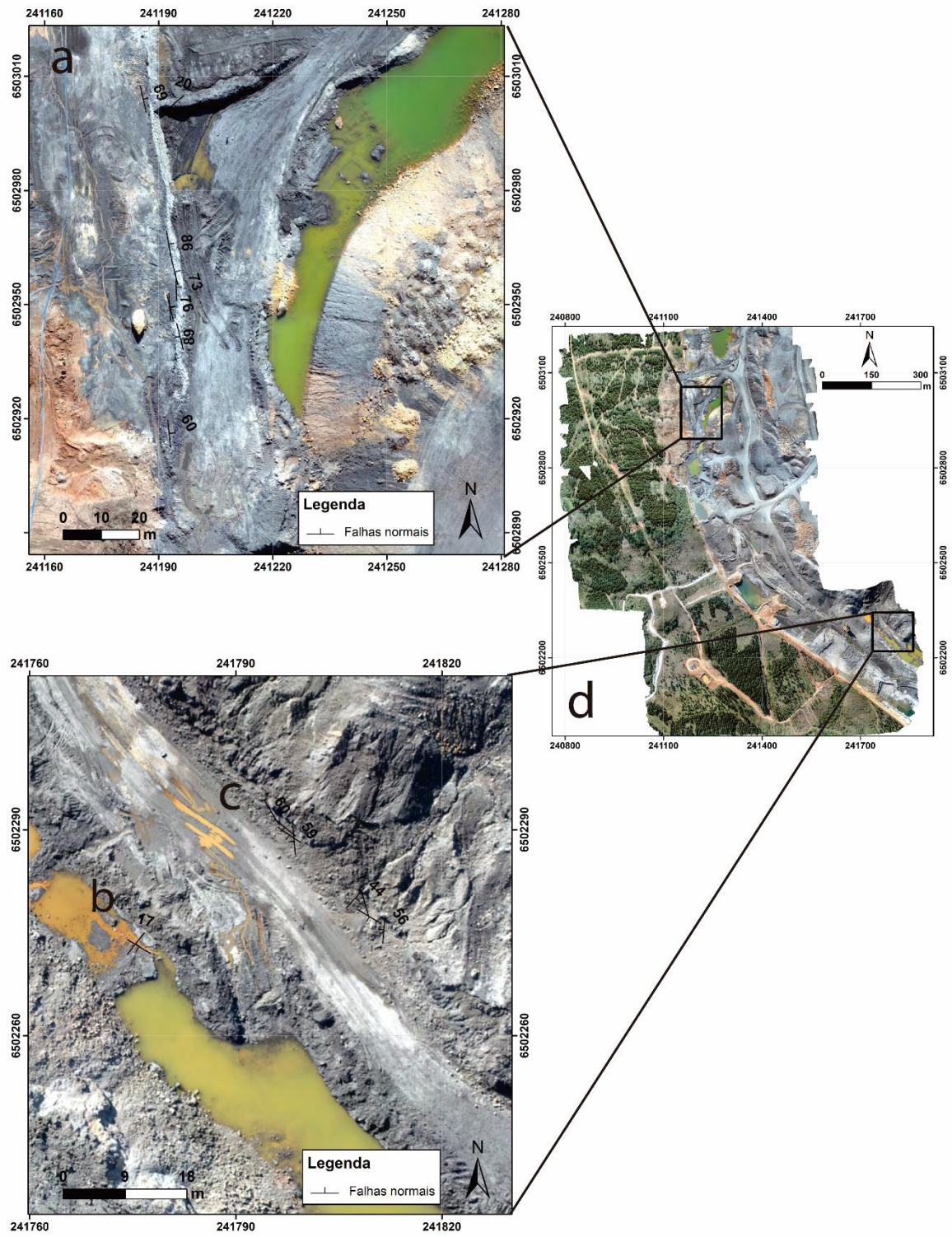


Figura 30 – Modelo 6 (M6). Planos de falha e fratura interpretados e estereogramas das respectivas estruturas.



Fonte: Autora.

Figura 31 - Mapa Estrutural da Falhas. a) Modelo 06, b) Modelo 03, c) Modelo 02, d) Modelo Aéreo 01

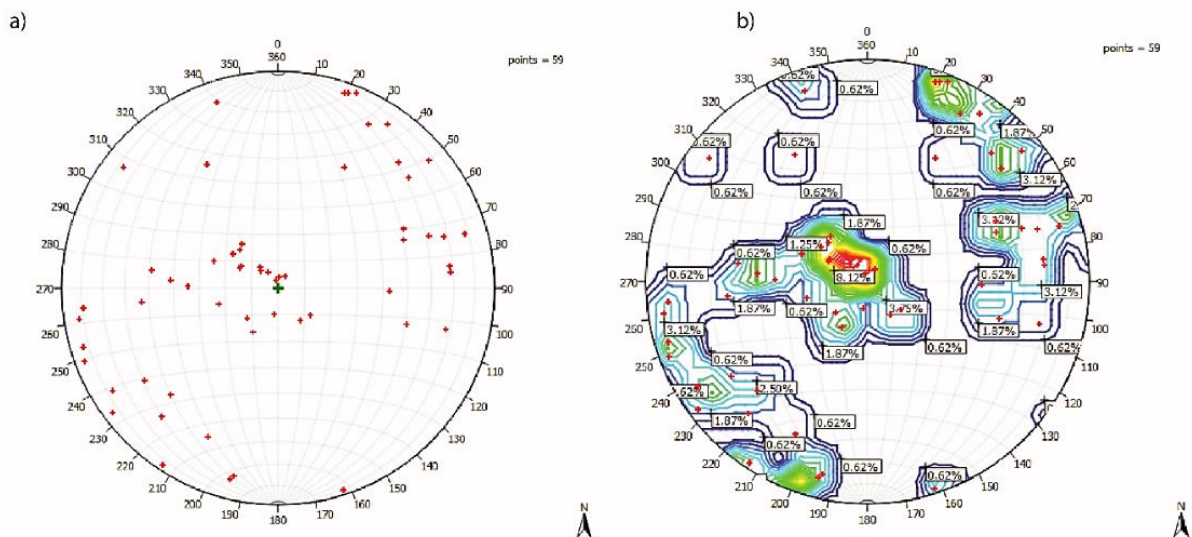


Fonte: Autora

## 6.6. Geometria e Cinemática

As fraturas medidas em campo e obtidas nos MVA possuem orientação variada (Figura 32). Embora existam quantidades significativa de fraturas orientadas em diversas direções pode-se destacar as direções NW, N e NE como principais.

Figura 32 – Estereograma das fraturas medidas em campo e obtidas nos MVA. a) estereograma de polos dos planos de fratura; b) estereogramas de contorno dos polos dos planos de fratura.



Fonte: Autora.

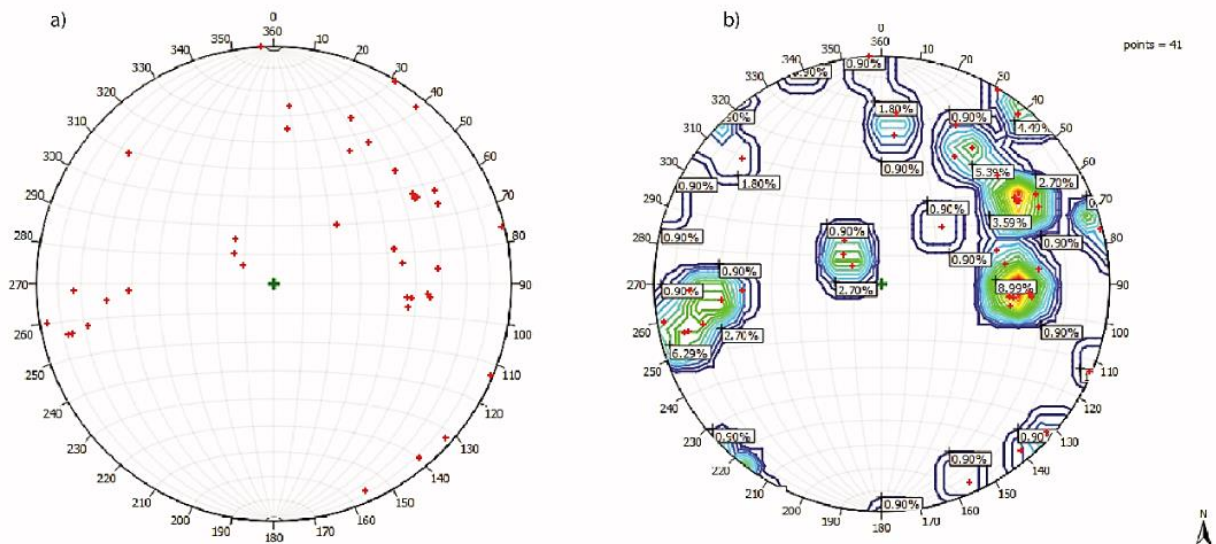
As falhas coletadas em campo e obtidas no MVA possuem direção principal N, mergulhando alto ângulo para W e para E; e NW mergulhando com ângulos intermediários a altos para SW (Figura 33). Subordinadamente ocorrem falhas com direção NE mergulhando alto ângulo para NW e baixo ângulo para SE. Nos afloramento foram observadas estrias de falha, que marcam o movimento de descida do bloco de cima (*hanging wall*) sobre o de baixo (*foot wall*), caracterizando falhas normais.

## 6.7. Paleotensores

As medidas estruturais de falhas e suas respectivas estrias foram divididas em duas famílias, denominadas neste trabalho de Grupo 1 (Figura 34) e Grupo 2 (Figura 35). Para análise

do Grupo 1, foram utilizadas 8 falhas, com orientação NW- SE e N-S. O valor de R foi igual a 0,25 e do índice de regime de *stress* R' foi de 0,47. Os índices de qualidade QRw e QRt foram iguais a D e E, respectivamente.

Figura 33 – Estereograma das falhas medidas em campo e obtidas nos MVA. a) estereograma de pólos dos planos de falha, b) estereogramas de contorno dos polos dos planos de falha.



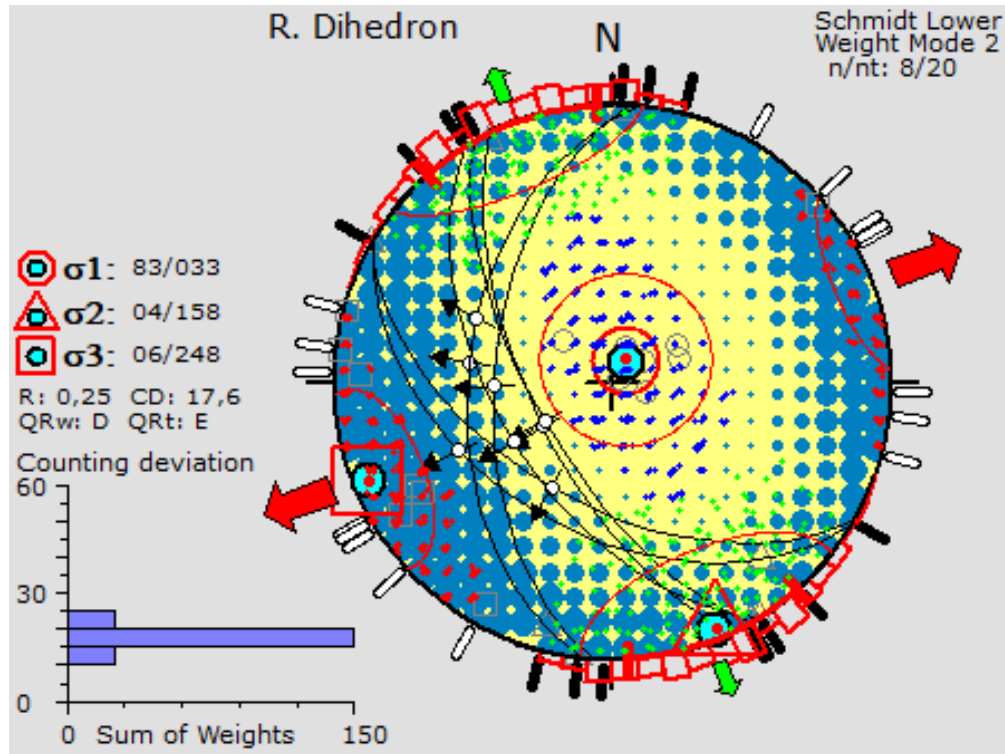
Fonte: Autora.

A orientação de  $\sigma_1$  foi de 83/033, de  $\sigma_2$  foi de 04/158 e  $\sigma_3$  06/248. Os resultados indicam regime extensional puro, cuja orientação do deslocamento maior foi de NE-SW e menor de NW-SE.

As medidas descartadas pelo *software* na primeira análise, foram separadas e analisadas no Grupo 2, no qual a orientação predominante das estruturas era NE-SW. A orientação dos paleotensores, neste caso é de 64/316 para  $\sigma_1$ , 26/138 para  $\sigma_2$  e 01/047 para  $\sigma_3$ . Os valores de R e R' também indicam um regime extensional puro. Contudo, devido ao baixo número de estruturas o resultado da análise não é suficientemente representativo.

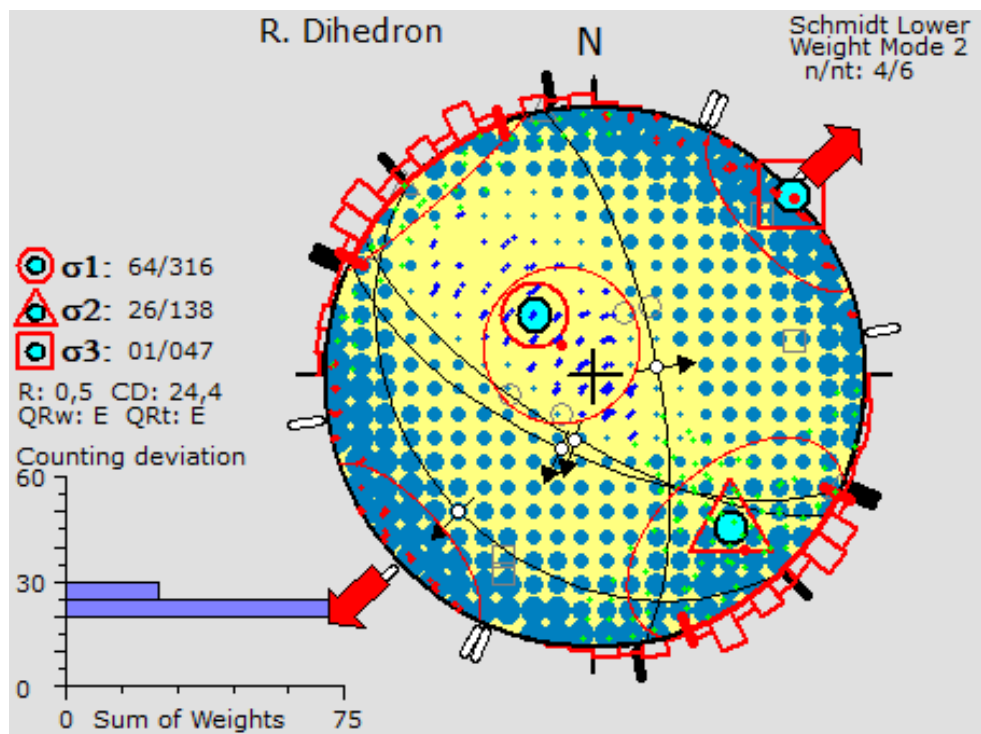
Considerando os dois resultados (independente de QRw e QRt), em ambos os casos, são apontados regimes extensionais puros. Desta forma, sugere-se que os regimes que geraram as duas famílias de falhas podem estar associados. Outra possibilidade é que as duas famílias tenham se formado sob o mesmo regime.

Figura 34 - Orientação dos paleotensores do Grupo 1.



Fonte: Autora.

Figura 35 - Orientação dos paleotensores do Grupo 2.

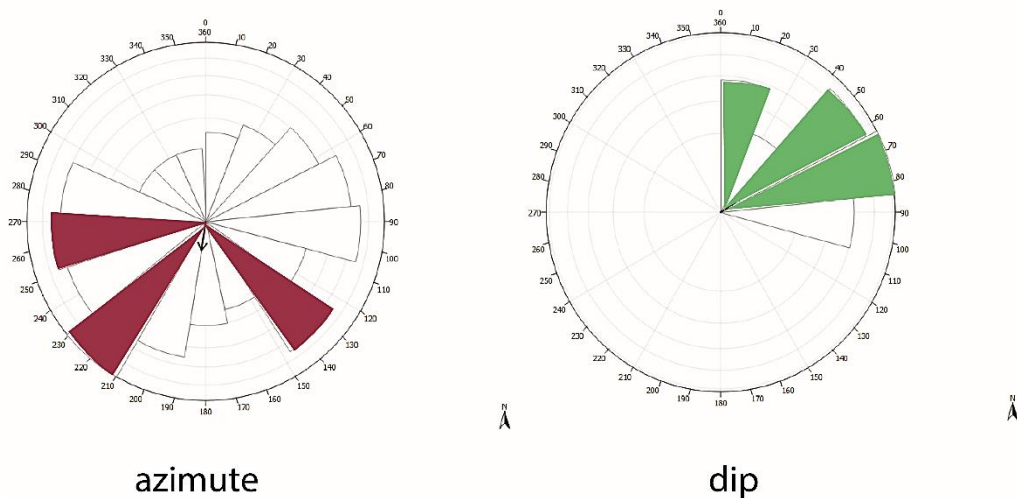


Fonte: Autora.

## 6.8. Análise de stress

A análise de esforço foi realizada com base na identificação das orientações dos planos de falhas e fraturas, com valores de mergulho e azimute mais frequente. Os valores de azimute e mergulho foram combinados de modo a estabelecer 24 planos, utilizados para obtenção de diferentes orientações de esforços principais. Os valores de mergulho escolhidos foram 10°, 50°, 60° e 80° e os valores de azimute foram 220°, 270° e 150° (Figura 36).

Figura 36 - Orientação de azimute e *dip* de maior frequência.



Fonte: autora.

Foram realizados 24 cenários para Tendência ao Deslizamento, Tendência a Dilatação e Tendência ao Deslizamento e a Dilatação. Tanto a tendência a dilatação quanto a tendência ao deslizamento são expressas em valores que variam de zero a um, e a tendência ao deslizamento e a dilatação varia de zero a dois. Em ambos os casos, quanto maior o valor, maior a probabilidade das estruturas sofrerem dilatação, deslizamento, ou os dois em conjunto. O estado de esforço utilizado foi o triaxial, em que os valores de  $\sigma_1$  são maiores que os de  $\sigma_2$ , que são maiores que os de  $\sigma_3$ . Em todas as situações o  $\sigma_3$  é ortogonal aos planos de falhas e fraturas e menor que zero, enquanto  $\sigma_1$  teve a mesma atitude dos planos e é positivo.

Nos cenários em que apenas  $\sigma_3$  é negativo (Figura 37, Figura 39, Figura 40, Figura 42, Figura 43 e Figura 45) a quantidade de estruturas que estão mais propensas a deslizar e a dilatar é menor que em regimes onde as magnitudes de  $\sigma_2$  também é menor que zero (Figura 37, Figura 38, Figura 40, Figura 41, Figura 43 e Figura 44). Isto acontece porque, quanto mais o Círculo de Mohr estiver deslocado para a esquerda, maior será o caráter distensivo do regime. O

movimento das estruturas presentes em zonas mais propensas a sofrer dilatação, tende a causar compressão nas demais. Quando o ângulo de mergulho de  $\sigma_3$  é muito alto, as estruturas com maior probabilidade de sofrer dilatação se concentram nas regiões centrais do estereograma entre duas zonas de baixa tendência a dilatação.

Em geral as estruturas que mergulham com direções opostas ao  $\sigma_1$  possuem menor tendência a dilatar e a deslizar. Quando o valor de magnitude de  $\sigma_2$  é próximo aos valores de  $\sigma_3$ , os planos de alto ângulo de mergulho e com azimutes em direções opostas entre si tem menor tendência a sofrer dilatação e deslizamento.

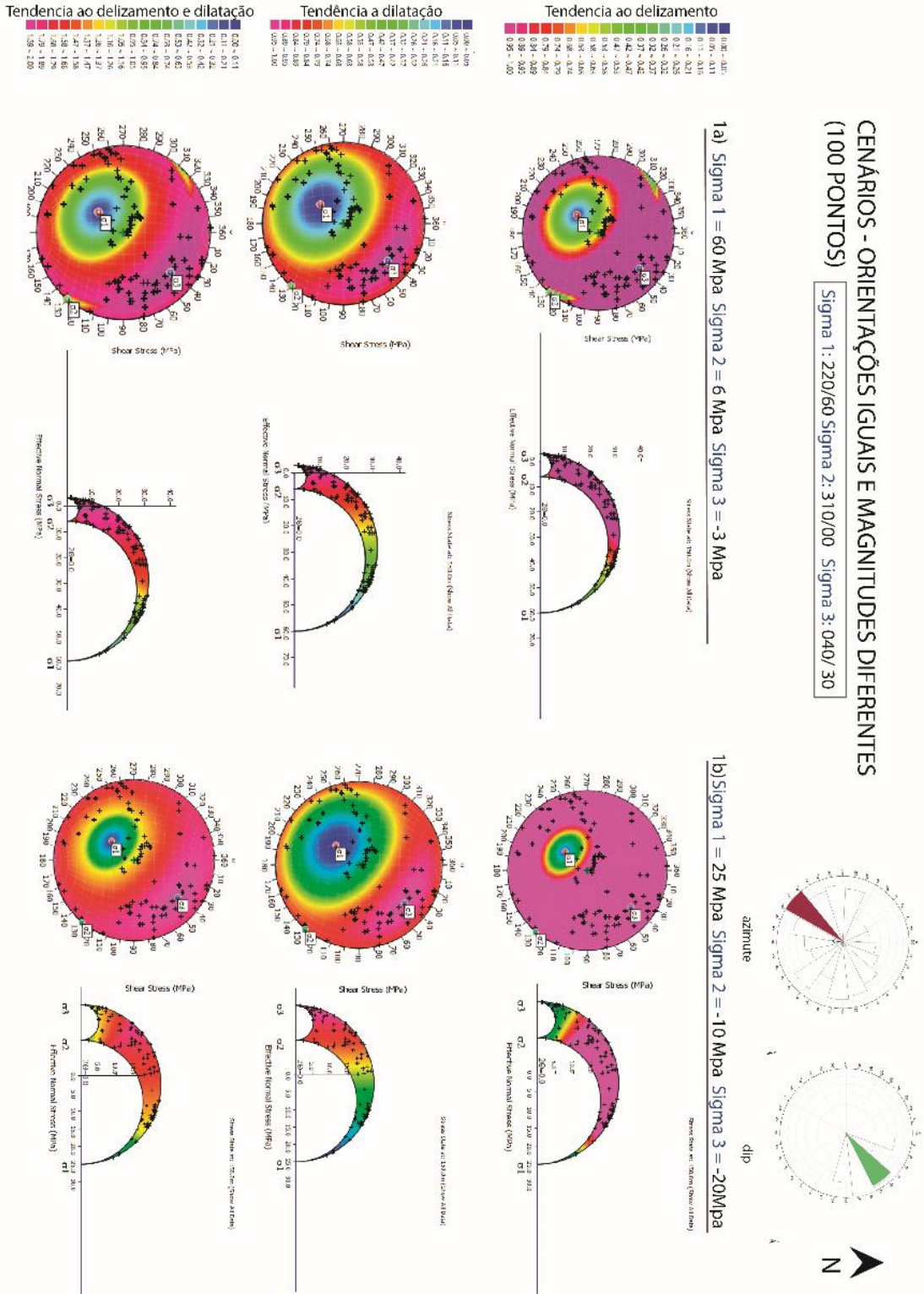
### 6.8.1. Cenários para Estruturas com Azimute 220

Quando os esforços apresentam orientações fixadas e magnitudes variantes, nota-se que nas situações onde  $\sigma_2$  é negativo, a tendência das estruturas a sofrer deslizamento é maior, ao passo que a tendência a dilatação não varia muito de um estado de esforços para o outro. As estruturas menos propensas a dilatar e a deslizar são as que mergulham para NE, com a direção de mergulho oposta a  $\sigma_1$ . Nas situações em que  $\sigma_2$  é positivo, estruturas de baixo e médio ângulo que mergulham para NE tem menor tendência a deslizar e dilatar e também a somente deslizar

Conforme o ângulo de mergulho de  $\sigma_1$  aumenta, a área do estereograma que marca menor tendência a dilatação e deslizamento se desloca para SW. Isto quer dizer que quanto maior o mergulho, as estruturas mais a NE vão ser menos propensas a dilatar e a deslizar. Ainda, quando o mergulho de  $\sigma_3$  é verticalizado, estruturas de alto ângulo para NE e SW possuem menor tendência a dilatar e a deslizar. Por outro lado, quando o ângulo de mergulho de  $\sigma_3$  é baixo, a área do estereograma que marca menor tendência a dilatação e a deslizamento tende a se localizar nas regiões centrais. Neste caso, as estruturas de baixo ângulo passam a ter menor tendência ao deslizamento e a dilatação.

Sendo assim, a variação dos sinais de  $\sigma_2$  influencia no tamanho da área do estereograma que sofrerá menor tendência a deslizar e a deslizar e a dilatar ao mesmo tempo. Quando  $\sigma_2$  é negativo, a área diminui de tamanho, abrangendo apenas estruturas de orientações de mergulho opostas à de  $\sigma_1$ . Nos casos em que  $\sigma_2$  é positivo, esta área aumenta, e alcançando um número maior de estruturas.

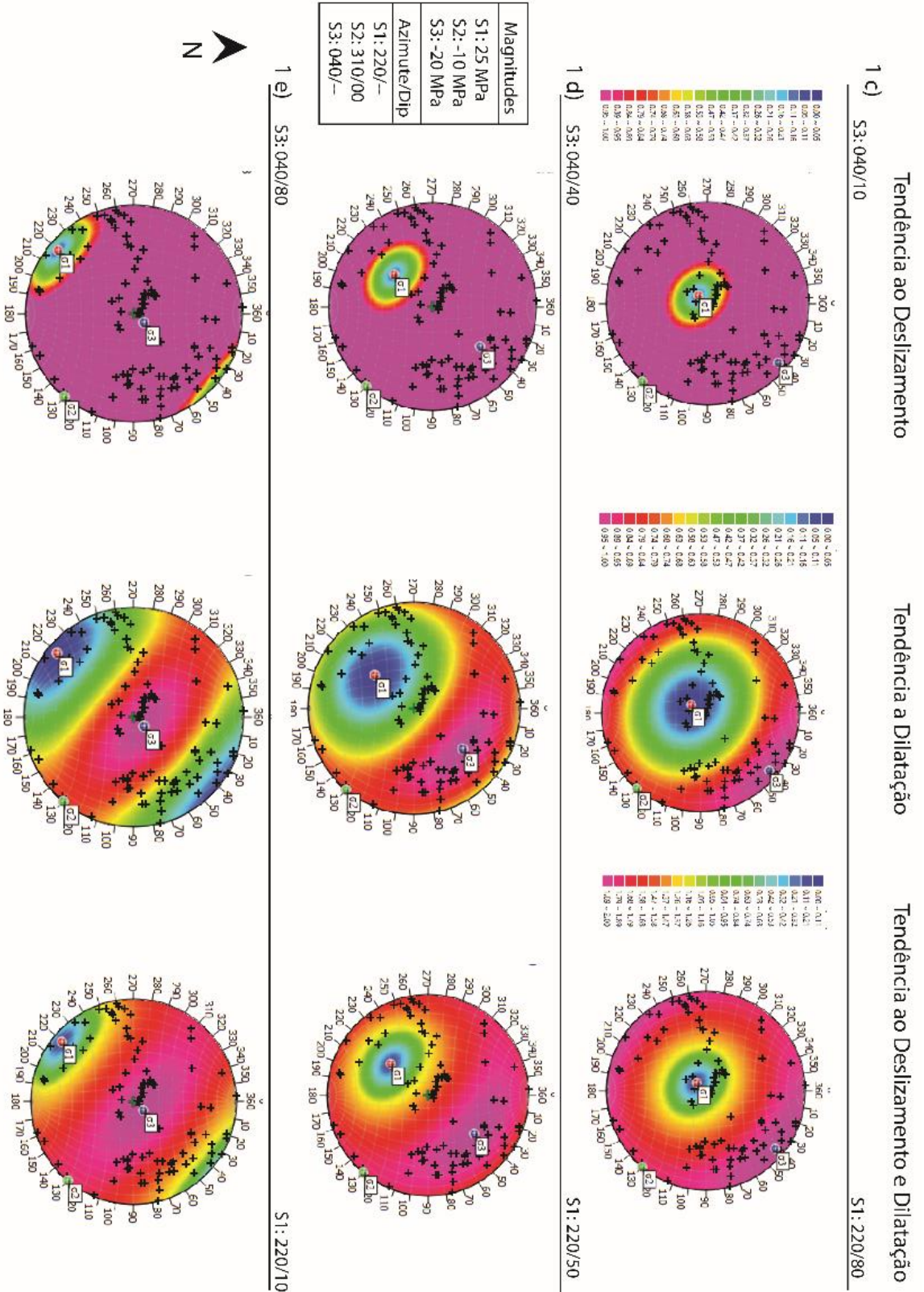
Figura 37 - Cenários 1a e 1b. Os esforços principais estão orientados em relação a estruturas cujo azimute é 220° e ângulo de mergulho é 60°. No cenário 1a a magnitude do  $\sigma_1$  é 60 Mpa,  $\sigma_2$  é -6 Mpa,  $\sigma_3$  é -3 Mpa. No cenário 1b é  $\sigma_1$  é 25 Mpa,  $\sigma_2$  é -10Mpa e  $\sigma_3$  é -20 Mpa.



Fonte: Autora

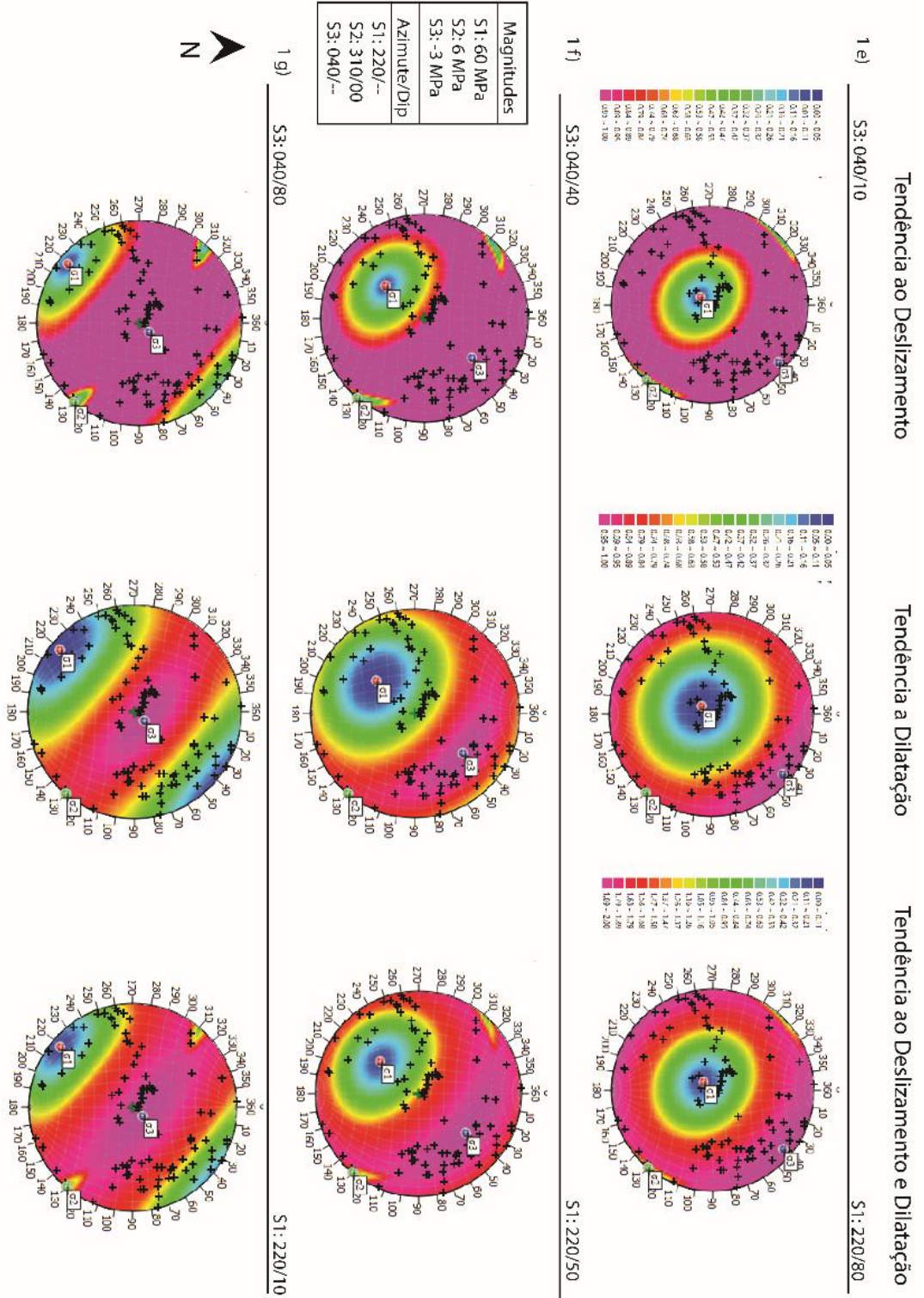


Figura 38- Cenários 1c, 1d, 1e. Os esforços principais estão orientados em relação a estruturas cujo azimute é 220° e ângulos de mergulho variando entre 10°, 50° e 80°. O valor de  $\sigma_1$  é 25 MPa, de  $\sigma_2$  é -10 MPa e  $\sigma_3$  é -20 MPa.



Fonte: Autora

Figura 39 - Cenários 1e, 1f, 1g. Os esforços principais estão orientados em relação a estruturas cujo azimute é 220° e ângulos de mergulho variando entre 10°, 50° e 80°. O valor de  $\sigma_1$  é 60 MPa, de  $\sigma_2$  é 6 MPa e  $\sigma_3$  é -3 MPa.



Fonte: Autora

### 6.8.2. Cenários para Estruturas com Azimute 270

Nos cenários em que  $\sigma_2$  é negativo (Figura 36; Figura 37), um maior número de estruturas tende a sofrer dilatação e deslizamento. Nos cenários em que os mergulhos permanecem iguais (Figura 36), a tendência a dilatação não apresenta mudança expressiva. As estruturas de baixo ângulo e as que mergulham para E e NE são menos propensas a dilatar e a deslizar quando  $\sigma_2$  é negativo. Em contrapartida, quando  $\sigma_2$  é maior do que zero (Figura 36; Figura 38), as estruturas que tem menos probabilidade de dilatar e deslizar são as de baixo e médio ângulo que mergulham para E, NE e SE.

Nos cenários em que o ângulo de mergulho varia, a tendência ao deslizamento é menor para estruturas cuja orientação são opostas a  $\sigma_1$ . Quando o mergulho de  $\sigma_1$  é baixo, as estruturas que mergulham para E possuem menor tendência a sofrer deslizamento e dilatação. Quando  $\sigma_2$  é negativo e  $\sigma_3$  é de alto ângulo, as estruturas de médio e alto ângulo cujo azimute é orientado para E, NE, SE, W, SW e NW, apresentam menor tendência a sofrer deslizamento do que as que mergulham para N-S.

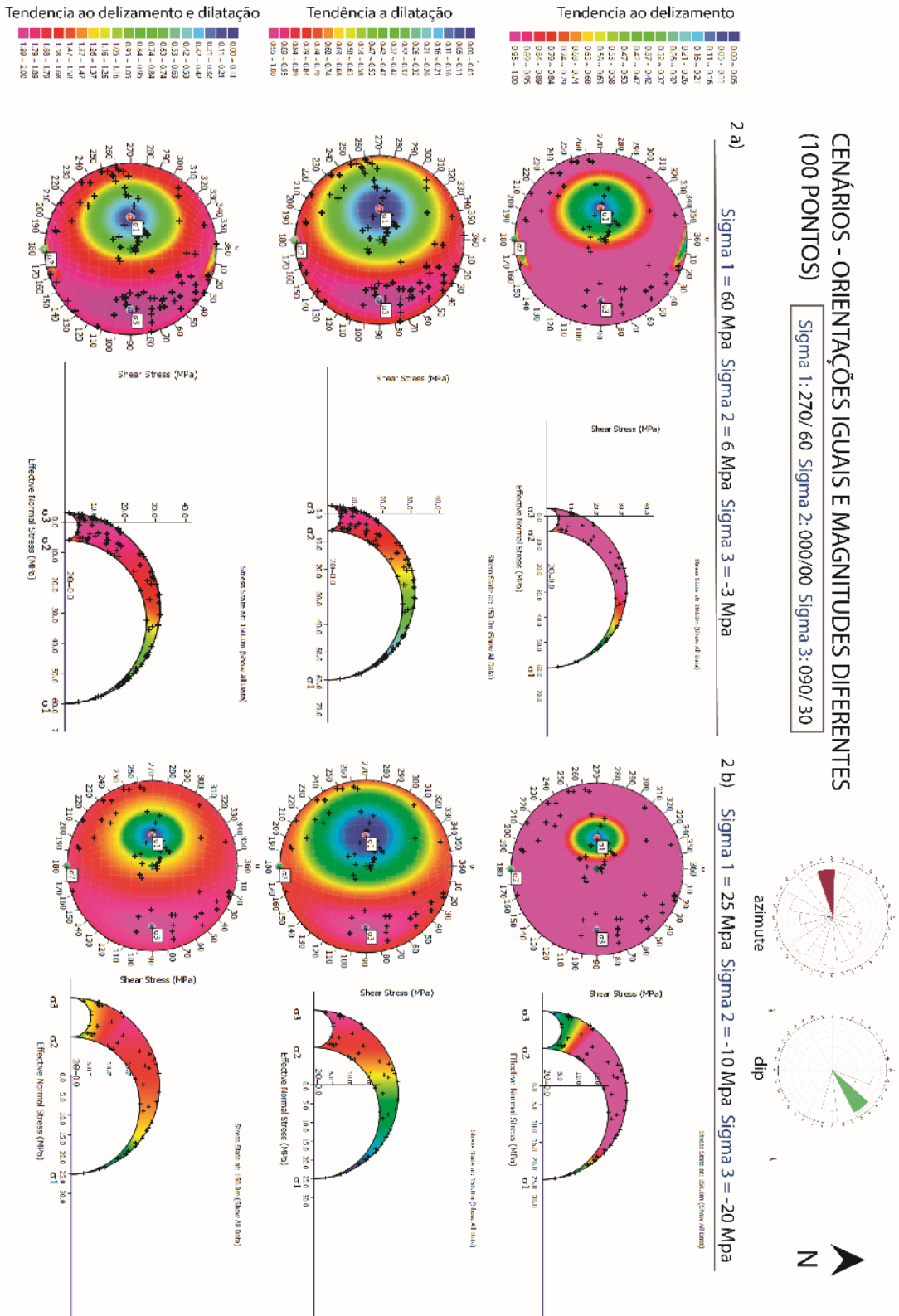
### 6.8.3. Cenários para Estruturas com Azimute 150

Quando o  $\sigma_2$  é negativo, uma maior quantidade de estruturas possui alta tendência a sofrer deslizamento. A tendência a dilatação permanece igual independente do sinal da magnitude de  $\sigma_2$ . As estruturas menos propensas a dilatar e a deslizar são as que mergulham baixo, médio e alto ângulo para NW, em direção oposta a  $\sigma_1$ . Nas situações em que  $\sigma_2$  é positivo estruturas de baixo e médio ângulo que mergulham para NW tem menor tendência a deslizar e deslizar e dilatar.

Conforme o ângulo de mergulho de  $\sigma_1$  diminui, a área do estereograma que marca menor tendência a dilatação e deslizamento se desloca para SE. Isto quer dizer, que quanto maior o mergulho, as estruturas que mergulham para NW vão ser menos propensas a dilatar e a deslizar. Ainda, quando o mergulho de  $\sigma_3$  é verticalizado, estruturas de alto ângulo cujo azimute é orientado para NW e SE possuem menor tendência a dilatar e a deslizar.

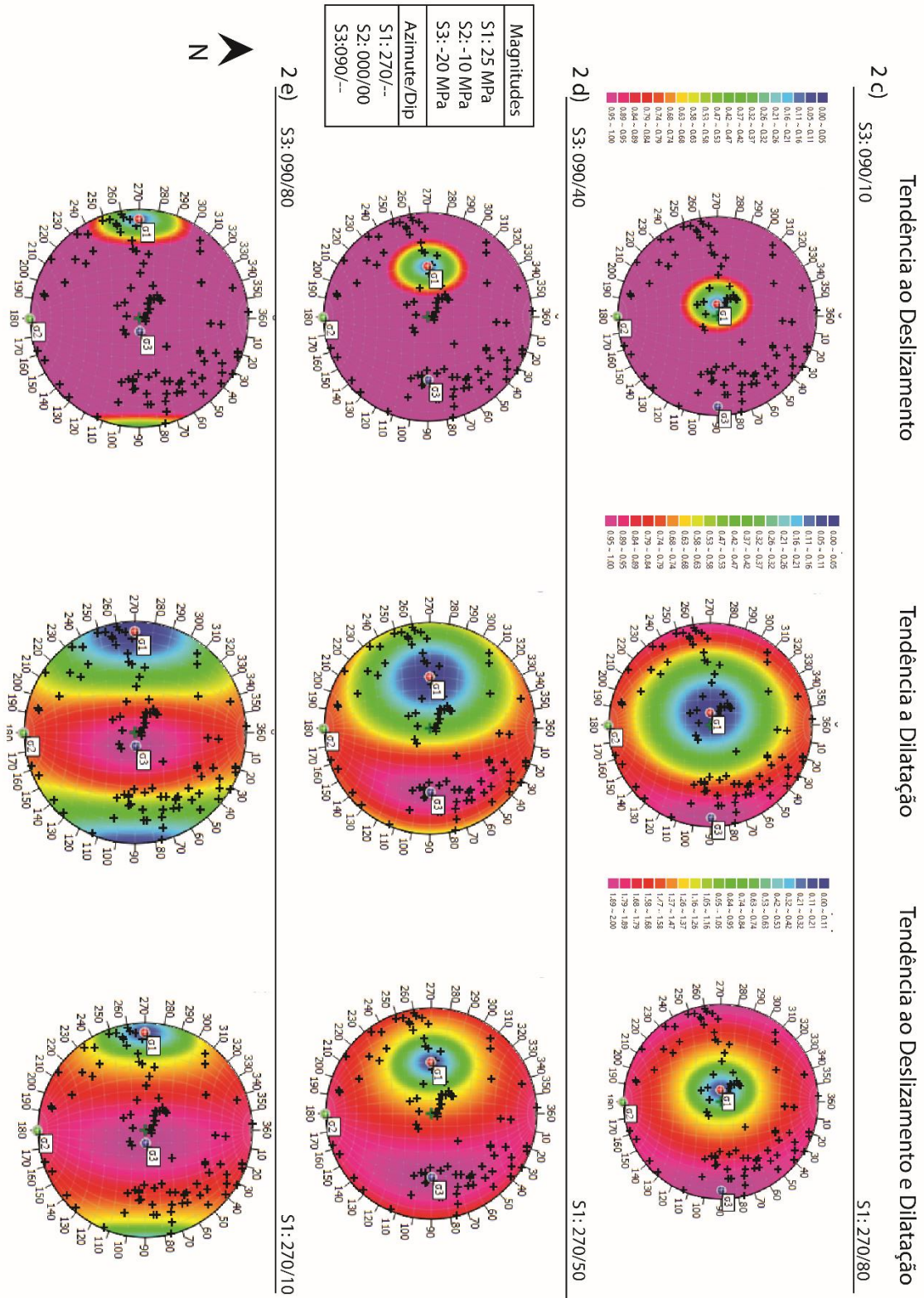
Quando o ângulo de mergulho de  $\sigma_1$  é alto, a área do estereograma que marca menor tendência a dilatação e a deslizamento, tende a se localizar nas regiões centrais. Neste caso, as estruturas de baixo ângulo passam a ter menor tendência ao deslizamento e a dilatação.

Figura 40 - Cenários 2a e 2b. Os esforços principais estão orientados em relação a estruturas cujo azimute é 270° e ângulo de mergulho é 60°. No cenário 1a a magnitude do  $\sigma_1$  é 60 Mpa,  $\sigma_2$  é -6 Mpa,  $\sigma_3$  é -3 Mpa. No cenário 1b é  $\sigma_1$  é 25 Mpa,  $\sigma_2$  é -10Mpa e  $\sigma_3$  é -20 Mpa.



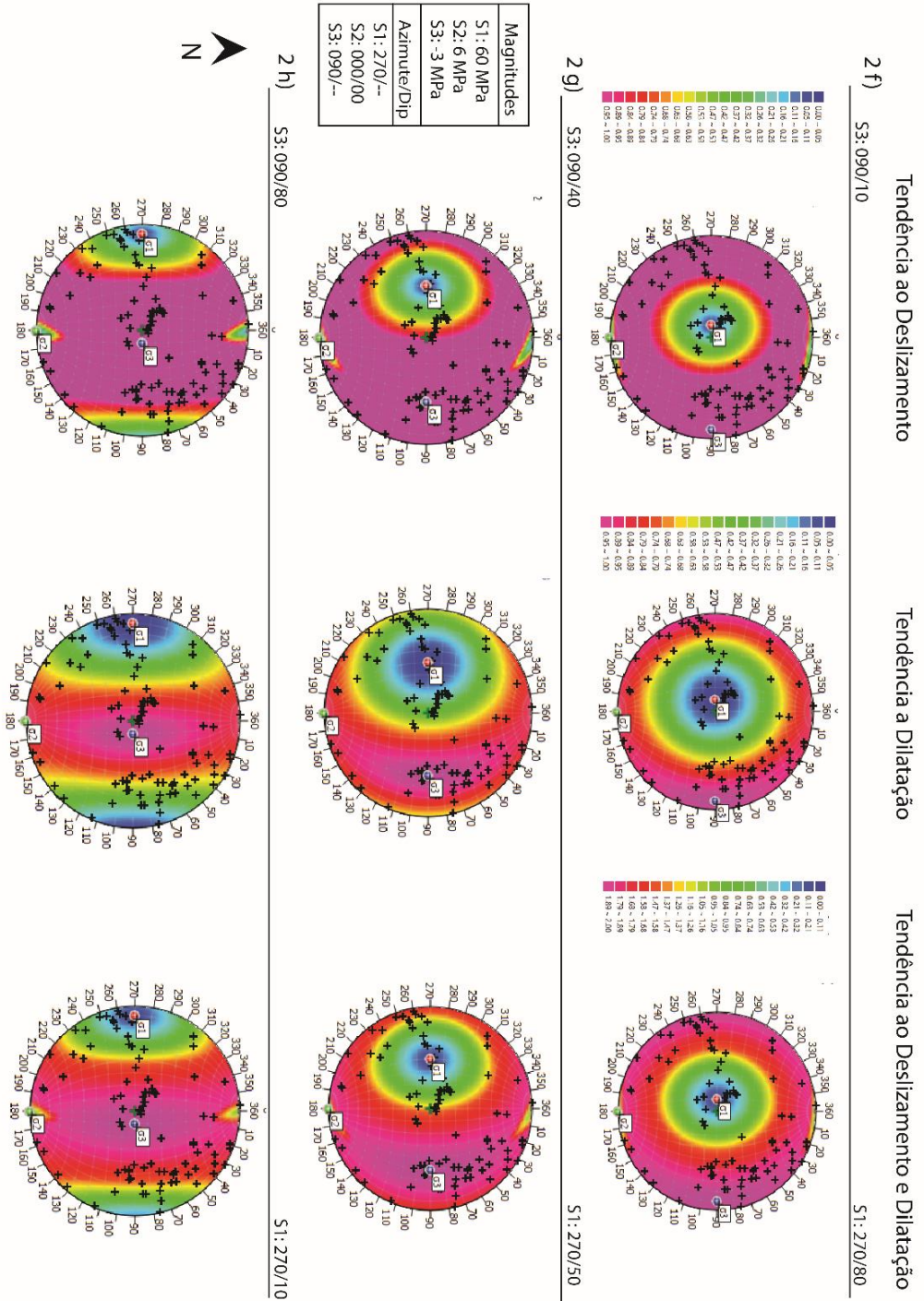
Fonte: Autora.

Figura 41 - Cenários 2c, 2d, 2e. Os esforços principais estão orientados em relação a estruturas cujo azimute é 270° e ângulos de mergulho variando entre 10°, 50° e 80°. O valor de  $\sigma_1$  é 25 MPa, de  $\sigma_2$  é -10 MPa e  $\sigma_3$  é -20 MPa.



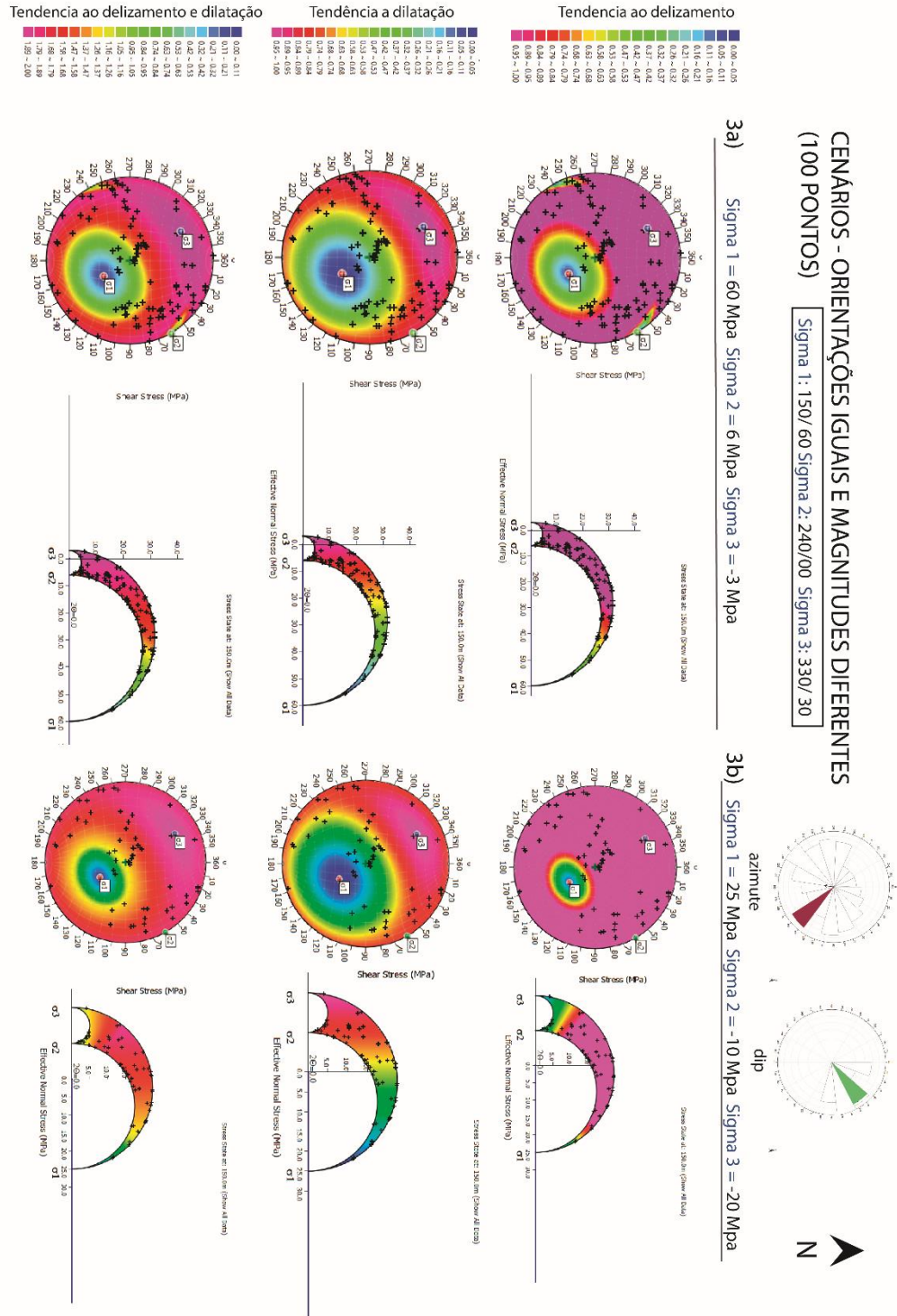
Fonte: Autora.

Figura 42 - Cenários 2e, 2f, 2g. Os esforços principais estão orientados em relação a estruturas cujo azimute é 270° e ângulos de mergulho variando entre 10°, 50° e 80°. O valor de  $\sigma_1$  é 60 MPa, de  $\sigma_2$  é 6 MPa e  $\sigma_3$  é -3 MPa.



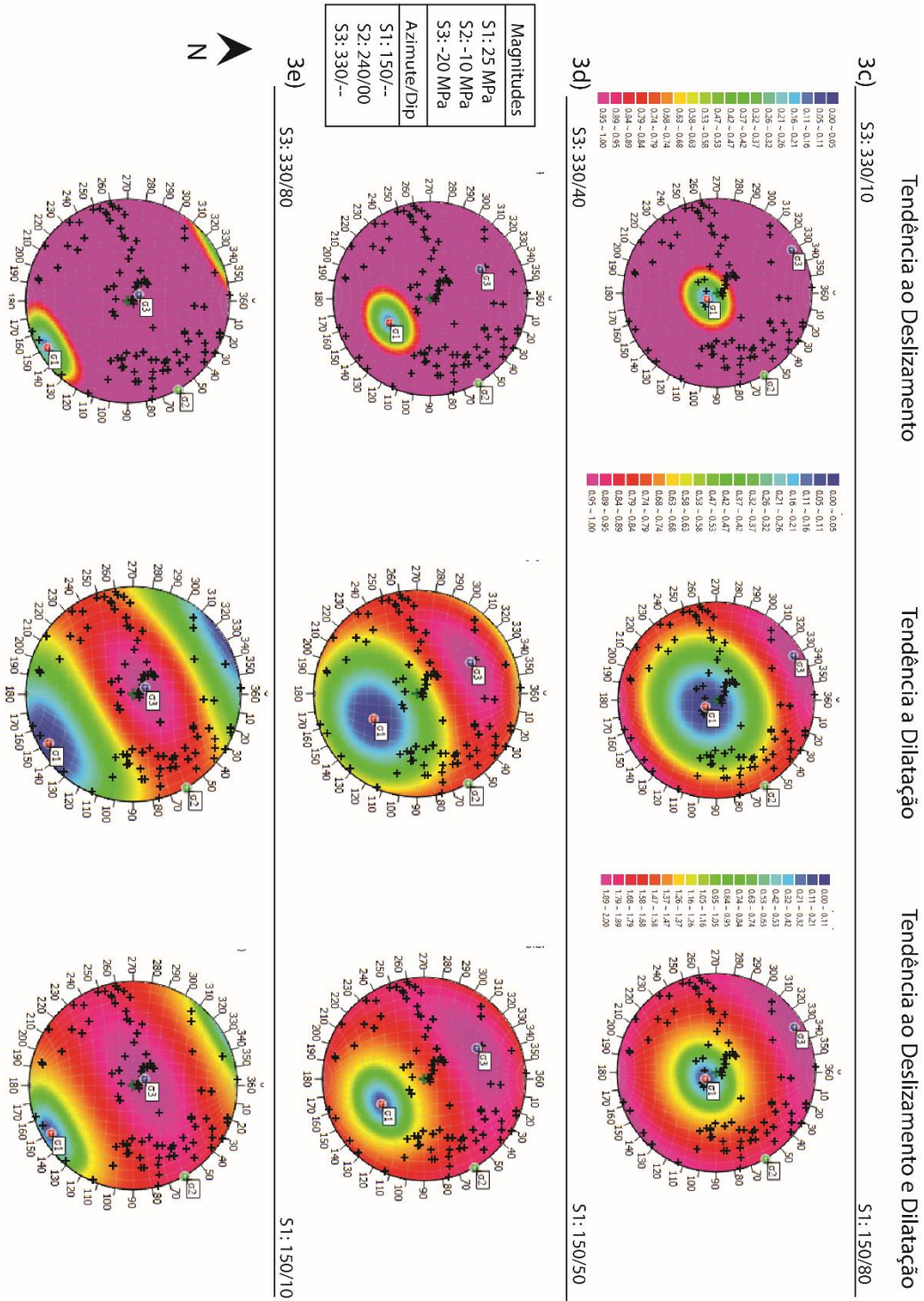
Fonte: Autora.

Figura 43 - Cenários 3a e 3b. Os esforços principais estão orientados em relação a estruturas cujo azimute é 150° e ângulo de mergulho é 60°. No cenário 1a a magnitude do  $\sigma_1$  é 60 Mpa,  $\sigma_2$  é -6 Mpa,  $\sigma_3$  é -3 Mpa. No cenário 1b é  $\sigma_1$  é 25 Mpa.



Fonte: Autora

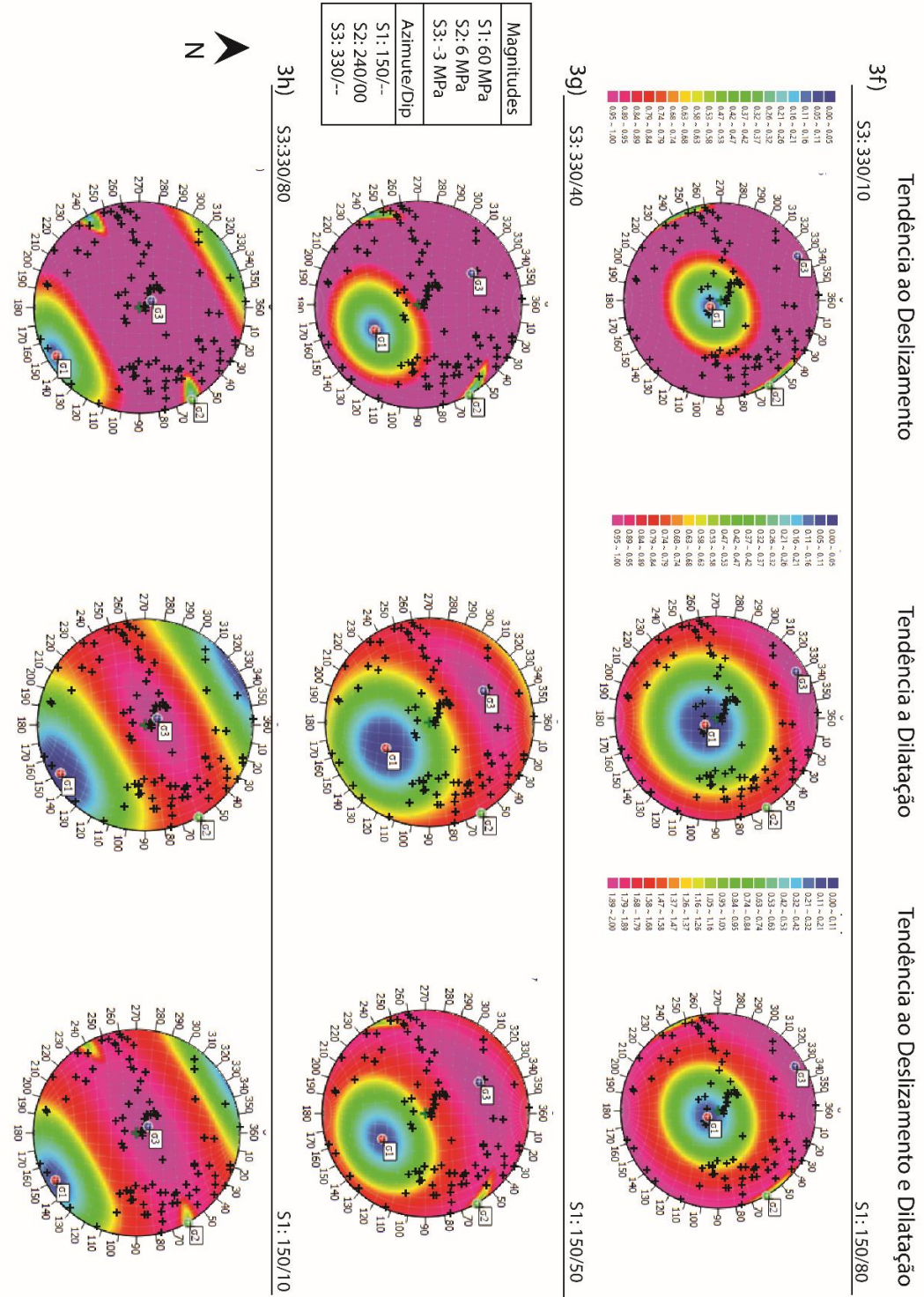
Figura 44 - Cenários 3c, 3d, 3e. Os esforços principais estão orientados em relação a estruturas cujo azimute é 150° e ângulos de mergulho variando entre 10°, 50° e 80°. O valor de  $\sigma_1$  é 25 MPa, de  $\sigma_2$  é -10 MPa e  $\sigma_3$  é -20 Mpa.



Fonte: Autora



Figura 45 -- Cenários 3e, 3f, 3g. Os esforços principais estão orientados em relação a estruturas cujo azimute é 150° e ângulos de mergulho variando entre 10°, 50° e 80°. O valor de  $\sigma_1$  é 60 MPa, de  $\sigma_2$  é 6 MPa e  $\sigma_3$  é -3 MPa.



Fonte: Autora.

## 7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As estruturas analisadas apresentaram diferentes padrões de orientações. Entretanto, houve um predomínio de falhas normais em todos os afloramentos, decorrentes de um regime predominantemente extensional, conforme mostra a análise de paleotensores. Na região correspondente ao modelo M6, a orientação das falhas é majoritariamente N-S. Contudo, nos afloramentos dos modelos M2 e M3, que estão mais próximos um do outro, as falhas possuem orientação NW-SE. Tais orientações, condizem com estruturas regionais importantes, elucidadas na bibliografia: o Lineamento Passo do Marinheiro (N-S) e Torquato Severo- Pedras Altas, associados a estruturas NW. Embora se saiba que na região há ocorrência de estruturas NE associadas a Falha de Açotéia, não foram observadas falhas com essas orientações.

Os cenários analisados para Tendência a Dilatação, Tendência ao Deslizamento e Tendência ao Deslizamento e Dilatação, apresentaram alguns padrões. Em todos os cenários as estruturas com orientações de azimute opostas a  $\sigma_1$  e ângulos mergulho semelhantes a  $\sigma_3$  apresentavam menor tendência a deslizar e a dilatar. A área do estereograma que marca menor tendência a dilatação e deslizamento era maior conforme o aumento da magnitude de todos os esforços. Em situações em que o Círculo de Mohr se apresentou mais à esquerda do eixo vertical, o caráter distensivo do regime era mais forte, fazendo com que maior parte das estruturas tendessem a deslizar. A tendência a dilatação não apresentou variação significativa com o aumento ou diminuição dos esforços. Nas situações onde  $\sigma_3$  é verticalizado, as zonas com menor tendência a dilatação abrangem estruturas de alto e médio ângulo que mergulham para direções opostas a  $\sigma_1$  como também para direções iguais ao mesmo.

O estudo de análogos de afloramento é muito útil para compreensão da geometria das estruturas em profundidade, assim como suas interações e os regimes tectônicos que as causaram. Desta forma, é possível através da integração de dados em subsuperfície e de afloramentos prever a reação das estruturas sob determinadas condições de pressão, bem como sua propagação. No caso de *coalbed methane* o entendimento aprofundado das particularidades das macroestruturas e microestruturas naturais e de suas possíveis interações com fraturas artificiais, são fatores de grande relevância na determinação da permeabilidade da rocha.

O módulo *Stress Analysis* do *software Move 2018* permite estudar diversos outros parâmetros como estabilidade de fraturas, fator de vazamento, etc. Estas análises necessitam de dados geofísicos de poços, como poro-pressão (Pp), densidade (ROHB), saturação em água (Sw); medições locais de *stress*, dados de coesão e ângulo de fricção interna.

Sendo assim, sugere-se para estudos futuros:

- a) estudo de microestruturas rúpteis relacionadas as estruturas de maiores escalas.
- b) realização de testes triaxiais em amostras coletadas em campo para determinação de valores de coesão e ângulo de fricção interna.
- c) integralização dos MVA com dados de perfilagem geofísica de densidade (ROHB), poro-pressão (Pp) e saturação em água (Sw) e dados de esforços *in situ*.

## REFERÊNCIAS

\_\_\_\_\_. Resolução ANP Nº 21, de abril de 2014: Regulamenta os Requisitos a Serem Cumpridos pelos Detentores de Direitos de Exploração e Produção de Óleo e Gás Natural que Executarão a Técnica de Fraturamento Hidráulico. Publicado DOU de 11/4/2014. Disponível em: <http://www.anp.gov.br>. Acessado em: 19 fev. 2018.

AGISOFT PHOTOSCAN PROFESSIONAL, 2018

ALLEN, P. A.; ALLEN, J. R. **Basin Analysis: Principles and Application to Petroleum Play Assessments**. 3ª. ed. [S.l.]: Wiley Blackwell, 2013. 373 p.

ANGELIER, J. T.; MECHLER, P. **Sur une method graphique de recherche des contraentes principales egalement utilisables em tectonique et em seismologie: la method des diedres droits**. Bulletin de la Societé géologique de France, n. 6, p. 1309-1318, 1977.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE PETRÓLEO. **Gás natural não-convencional**. Superintendência de Comercialização e Movimentação de Petróleo, seus Derivados e Gás Natural. Nota Técnica nº09/2010-SCM.Rio de Janeiro,2010. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/movimentacao-estocagem-e-comercializacao-de-gas-natural/transporte-de-gas-natural/estudos-e-notas-tecnicas>>. Acesso em: 19 fev. 2018.

BISDOM, K.; BERTOTTI, G.; HAMIDREZA M. N. The Impact of in-situ stress and outcrop-based fracture geometry on hydraulic aperture and upscale permeability in fractured reservoirs. **Tectonophysics**, v. 690, p. 64-75, 2016.

CARRIVICK, J.L.; SMITH, M.W.; QUINCEY, D.J. Structure from motion in geoscience. Nova Iorque, Willey – Blackwell, 2016.

CASAGRANDE, J. Análise Estratigráfica e Estrutural do Intervalo Carbonoso Portador de CBM - Eo Permiano da Bacia do Paraná. Tese de Mestrado. 2010, 135p. (Programa de Geologia do Petróleo Convênio UFRGS/ANP) Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Geociências, Porto Alegre, 2010.

CAWOOD, A.; BOND, C.E.; HOWELL, J.A.; BUTLER, R.W.H.; TOTAKE, Y. LiDAR, UAV or compass-clinometer? Accuracy, coverage and the effects on structural models. **Journal of Structural Geology**, v. 98, p. 67-82, 2017.

COLOMER, M.; ALMEIDA, E. **Desafios da Produção de Gás Não-Convencional no Brasil**. Rio de Janeiro: 5th Latin American Energy Meeting, 2015.10p.

CRAIN, E.R.; Crain's Petrophysical Handbook. Disponível em: <<http://spec2000.net/>>. Acesso em: dezembro, 2018.

DAVIS, G. H.; REYNOLDS, S. J.; KLUTH, C. F. **Structural Geology of Rocks and Regions**. 3ª ed. Estados Unidos, 2011. 839 p.

DELVAUX, D. et al. Paleostress reconstructions and geodynamics of the Baikal region, Central Asia. Part II: Cenozoic tectonic stress and fault kinematics. **Tectonophysics**, 282(1-4),1-38, 1997.

DELVAUX D.; SPERNER B. **New aspects of tectonic stress inversion with reference to the TENSOR program**. In: D.A Nieuwland (ed.) New insights into structural interpretation and modelling. Geological Society, London, Special Publications, v. 212, p. 75-100, 2003.

DJI. Disponível em: <<https://www.dji.com/phantom-4>> China. Acesso em: 11 de dezembro de 2018.

ENERGY FROM SHALE. **This Is How Fracking Works**. HuffPost. 06 dez. 2017. Disponível em:<[https://www.huffingtonpost.com/2014/12/06/howfrackingworks\\_n\\_5978486.html?1418047948](https://www.huffingtonpost.com/2014/12/06/howfrackingworks_n_5978486.html?1418047948)> . Acesso em: 20 maio 2018

EMPRESA DE PESQUISAS ENERGÉTICAS – EPE; Ministério de Minas Energia. **Estudo Regional da Porção Gaúcha da Bacia do Paraná: Parte 1 – Análise do Zoneamento Nacional de Recursos de Óleo e Gás**. Nota Técnica DPG-SPT nº01/2018. Rio de Janeiro, jan. 2018. 30 p.

FONTES, L.C. DA S.; CAVA, L.T. Análise Ambiental Preliminar do Gondwana na Região da Candiota, Rio Grande do Sul. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA**, 31, Camburiú, 1980, *Anais*, Camburiú, SBG, v.2, p. 755-765, 1980.

FOSSSEN, H. **Geologia Estrutural**. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2012. 575 p.

FOSSSEN, H. **Structural Geology**. 1. ed. Cambridge: University Press, 2010. 361 p.

GAVRONSKI, J. D. Mina de Candiota Alternativas de Produção. Tese de Mestrado. 1997, 70 p. (Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas Metalúrgica e dos Materiais – PPGEM). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Porto Alegre, 1997.

HASENACK, H.; WEBER, E. (org.) **Base cartográfica vetorial contínua do Rio Grande do Sul** - escala 1:50.000. Porto Alegre: UFRGS Centro de Ecologia. 2010. 1 DVD-ROM. (Série Geoprocessamento n.3). ISBN 978-85-63483-00-5 (livreto) e ISBN 978-85-63843-01-2 (DVD).

HIMAK1 MAPPING CONSTRUCTION MACHINE. **Projects**. Turquia. Disponível em: <[http://www.himak.com.tr/e\\_projects.html](http://www.himak.com.tr/e_projects.html)>. Acesso em: 12 de dez 2018

HODGIN, J.E; HARREL, D.R. **The Selection, Application, and Masapplication of Reservoir Analogs for the Estimation of Petroleum Reserves**. Houston, Texas: Society of Petroleum Engineers, 2006. 15 p

KALKREUT, W. et al. O Potencial de CoalBed Methane (CBM) na Jazida de Santa Terezinha – Modelagem 3D e avaliação do poço de exploração CBM001-ST-RS. Revista Brasileira de Geociências. [S.I] v. 38, n. 2 - suplemento, p. 3- 17, jun. 2008

KALKREUT, W. et al. The lower and upper coal seams of the Candiota Coalfield, Brazil — Geological setting, petrological and chemical characterization, and studies on reactivity and beneficiation related to their combustion potential. **International Journal of Coal Geology**, [S.I.] v. 111, n.1, p. 53-66, mai. 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.coal.2012.09.013>>. Acesso em: 15 mai. 2018.

LAW, B. E.; CURTIS, J. B. Introduction to unconventional petroleum systems. **AAPG Bulletin**, [S.I.], v. 86, n. 11, p. 1851-1852, nov. 2002. Disponível em: <<https://doi.org/10.1306/61EEDDA0-173E-11D7-8645000102C1865D>>. Acesso em: 19 fev. 2018.

LOURENZI, P. S.; KALKREUTH, Wolfgang. O potencial de geração CBM (Coalbed Methane) na jazida Sul Catarinense: 1. Características petrográficas e químicas das camadas de carvão da Formação Rio Bonito, Permiano da Bacia do Paraná. **Brazilian Journal of Geology**, [S.I.], v. 44, n. 3, p. 471-491, set. 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.5327/Z2317-4889201400030009>>. Acesso em: 21 mar. 2018.

MATOS, S. L. F. **História deposicional e idade do intervalo portador de carvão da Formação Rio Bonito, permiano da Bacia do Paraná, no depósito de carvão Candiota, RS.** 1999. 158 p. Tese de doutorado (Pós-Graduação em Recursos Minerais e Hidrogeologia) - Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências, São Paulo, 1999.

MEDEIROS, R. A.; THOMAZ FILHO, A. Fácies e ambientes deposicionais da Formação Rio Bonito. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA**, 27, 1973, Aracaju, *Anais* v.3 p.2-32, 1973.

MENDONÇA, L. V. L.; JERÔNIMO, C. E. Análise quantitativa de risco: Paiol de explosivos utilizados no processo de canhoneio de um poço de petróleo. Revista do Centro do Ciências Naturais e Exatas - UFSM, Santa Maria. Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental – REGET, v. 18, n. 1, p. 361-372, abr. 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.5902/2236117012425>>. Acesso em: 14 jun. 2018.

MILANI, E. J.; RAMOS, Victor A. Orogenia paleozóicas no domínio sul-ocidental do Gondwana e os ciclos de subsidência da Bacia do Paraná. **Revista Brasileira de Geociências**, [S.I.], v. 28, n. 4, p. 473-484, dez. 1998

MILANI, E. J. Comentários sobre a origem e evolução tectônica da Bacia do Paraná. In: MANTESSO NETO, Virgínio; BARTORELLE, Andrea; CARNEIRO, Celso Dal Ré; BRITO - NEVES, Benjamim Blay (Org.), **Geologia do Continente Sul Americano: Evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida**. São Paulo: Beca, 2004. p. 265-279.

MILLANI, E. J. et al. Bacia do Paraná. **Boletim de Geociências da Petrobrás**, Rio de Janeiro, v. 5, n. 2, p. 265-287, maio. 2007. Disponível em: <<http://vdpf.petrobras.com.br/vdpf/index.jsp>>. Acesso em: 19 fev. 2018.

MOVE™2015. Tutorial 26: Stress Analysis 2015. In: **2015 Tutorials**. Midland Valley. Glasgow, UK. 2015. 35 p.

MOVE. (2018). UK: Midland Valley Exploration.

NELSON, S. G. Hydraulic isolations methods and well casin plugs for re-fracturing horizontal multizone wellbores. US 2016/0003021 A1, 7 jan. 2016.

PEACOCK, D. C. P.; NIXON, C. W.; ROTEVATN, A.; SANDERSON, D. J.; ZULUAGA, L. F. Glossary of fault and other fracture networks. **Journal of Structural Geology**, v. 92, p. 12-29, 2016.

PLUIJM, B. A. D.; MARSHAK, S.. **Earth Structure**. 2ª. ed. Unit States of America: W.W. Norton & Company, 2004. 656 p.

SCHNEIDER, R. L. et al., Revisão Estratigráfica da Bacia do Paraná. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA**, 28, Porto Alegre, 1974. *Anais*. Porto Alegre, SBG, v. 1, p. 41-65, 1974.

SOUZA FILHO, O. J. L. Evoluções tecnológicas no setor de óleo e gás- Um estudo de caso da exploração, produção e viabilidade econômica do Tigh Oil nos Estados Unidos.2017. 69 p. Projeto de Graduação (Departamento de Engenharia Mecânica). Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro Projeto de Graduação, Rio de Janeiro. 2017.

STEVENSON, K. F. Degenhardt Jack et al. Isolate and Stimulate Individuals Pay Zones. Schulumberger.2001. 77 p.

STOEKHERT, F. et al. Fracture propagation in sandstone and slate – Laboratory experiments, acoustic emissions and fracture mechanics. **Journal of Rock Mechanics an Geotechnical Engineering**, China, v. 7, n. 3, p. 237-249, jun. 2015. Disponível em <<https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2015.03.011>>. Acesso em: 10 jun. 2018.

SÜFFERT, T. **Carvão nos estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. Porto Alegre, nov. 1997. 39 p.

TAVANI, S. et al. Building a virtual outcrop, extracting geological information from it, and sharing results in Google Earth via OpenPlot and Photoscan: An example from the Khaviz Anticline (Iran). **Computers & Geosciences**, v. 63, p. 44-53, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cageo.2013.10.013>>. Acesso em: 15 jun. 2018.

TAVARES, L. S. **Estado da Arte da Operação de Fraturamento Hidráulico**. 2010. 87 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia do Petróleo) - Universidade Federal Fluminense, Niterói, RJ, 2010. Disponível em: <<https://app.uff.br/riuff/bitstream/1/1571/1/Lucas%20Silveira%20Tavares.pdf>>. Acesso em: 13 jun. 2018

THE GEOLOGICAL SOCIETY OF AMERICA- GSA. (EUA). **GSA Critical Issue: Hydraulic Fracturing: Hydraulic Fracturing Defined**. 2016. Disponível em: <[https://www.geosociety.org/GSA/Science\\_Policy/Critical\\_Issues/hf/GSA/Policy/issues/hf/defined.aspx](https://www.geosociety.org/GSA/Science_Policy/Critical_Issues/hf/GSA/Policy/issues/hf/defined.aspx)>. Acesso em: 20 maio 2018.

TWISS, R. J.; MOORES, E M. **Structural Geology**. 2ª. ed. New York, USA: W.H. Freeman and Company, 2007. 711 p.

U.S ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION. U.S. Department of Energy. **International Energy Outlook 2016: With Projections for 2040**. Washington, mai. 2016. 276 p. Disponível em < <https://www.eia.gov/outlooks/ieo/>>. Acesso em: 10 jun. 2018.

VOLLGER, S. A.; CRUDEN, A.R. Mapping fold and fractures in basement and cover rocks using UAV photogrammetry, Cape Liptrap and Cape Paterson, Victoria, Australia. **Journal of Structural Geology**, v. 85, p. 168-187, 2016.

ZHANG, F. et al. Experimental analysis of multiple factors on hydraulic fracturing in coalbed methane reservoirs. **Plos One**, China, v.5, p. 1-15, abr. 2018. Disponível em <<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0195363>>. Acesso em: 17 jun. 2018.

ZOBACK, M. D. **Reservoir Geomechanics**. 1<sup>a</sup>. ed. New York, USA: Cambridge University Press, 2007. 449 p.

ZOU, C. et al. **Unconventional Petroleum Geology**. 1<sup>a</sup>. ed. San Diego, CA, USA: Elsevier, 2013. 373 p.