

## 4

### Modelo Estrutural

O modelo estrutural é outro componente importante para a caracterização do maciço rochoso. O objetivo é descrever a orientação e distribuição espacial dos defeitos estruturais no depósito de minério que vão influir na estabilidade de taludes. O modelo estrutural deve incluir tanto as falhas de grande escala, assim como também as falhas de menor escala. Segundo a escala das falhas podemos dividir o modelo estrutural em dois sub-modelos:

- *Modelo de falhas de grande escala:* Inclui as falhas maiores que podem ser desde dezenas de metros até quilômetros e podem incluir falhas e dobras que podem ser usadas para subdividir a mina em domínios com características similares e cada domínio a sua vez pode ter famílias de juntas com propriedades similares. Outros fatores que influem na seleção dos domínios estruturais são os limites litológicos e a forma da cava econômica final da mina.

Em geral as falhas de grande escala por ser de soma importância para a estabilidade global da mina e por existir em geral em pequena quantidade são modeladas usando métodos determinísticos para sua modelagem. Na presente dissertação se modelaram falhas lítricas deterministicamente usando o método dos polígonos. Utilizaram-se seções transversais interpretadas pelos geólogos da mina contendo a localização das possíveis falhas lítricas que posteriormente foram importadas no modelo 3D para sua modelagem, estas variam aproximadamente desde os 170 m. até os 810 m no seu comprimento maior.

- *Modelo de falhas e juntas de menor escala:* Estão formadas pelas juntas e falhas de menor escala, que podem variar numa escala de centímetros até dezenas de metros e podem ser importantes para a estabilidade de taludes na escala de bancada ou inter-rampa.

As falhas, descontinuidades de esta categoria existem em um número muito grande além de ser geometricamente complexas, com que faria impossível a sua modelagem deterministicamente com a limitada informação obtida das sondagens e dos mapeamentos de afloramento.

Esses motivos levaram a utilizar métodos estocásticos como o bem conhecido *Discrete Fracture Network* (DFN), assumindo que os parâmetros geométricos das fraturas (orientação, comprimento, densidade, abertura, etc.) são estatisticamente distribuídos (Priest, 1993). A incerteza pode ser reduzida quanto maior seja o número de realizações no DFN baseado na função de distribuição probabilística dos parâmetros.

Na mina em estudo para a presente dissertação o modelo estrutural se baseou no relatório de análise de campo geológico (Nelson, 2006). Na figura 4.1 se mostra a interpretação com características estruturais do depósito. Observa-se que existe uma tendência linear noroeste das estruturas. Também existem falhas normais com orientação norte-sul, parte destas falhas está relacionada às falhas lítricas, que serão modeladas deterministicamente e tomadas em conta para a análise de estabilidade de taludes.

Também se realizou a modelagem das falhas de menor escala usando o modelo estocástico DFN (*Discrete Fracture Network*). Utilizou-se o programa Petrel (versão 2010.1). Os dados usados para a modelagem foram obtidos da informação de nove sondagens geomecânicas orientados e 50 estações de mapeamento superficial que foram realizadas ao longo da área em estudo.

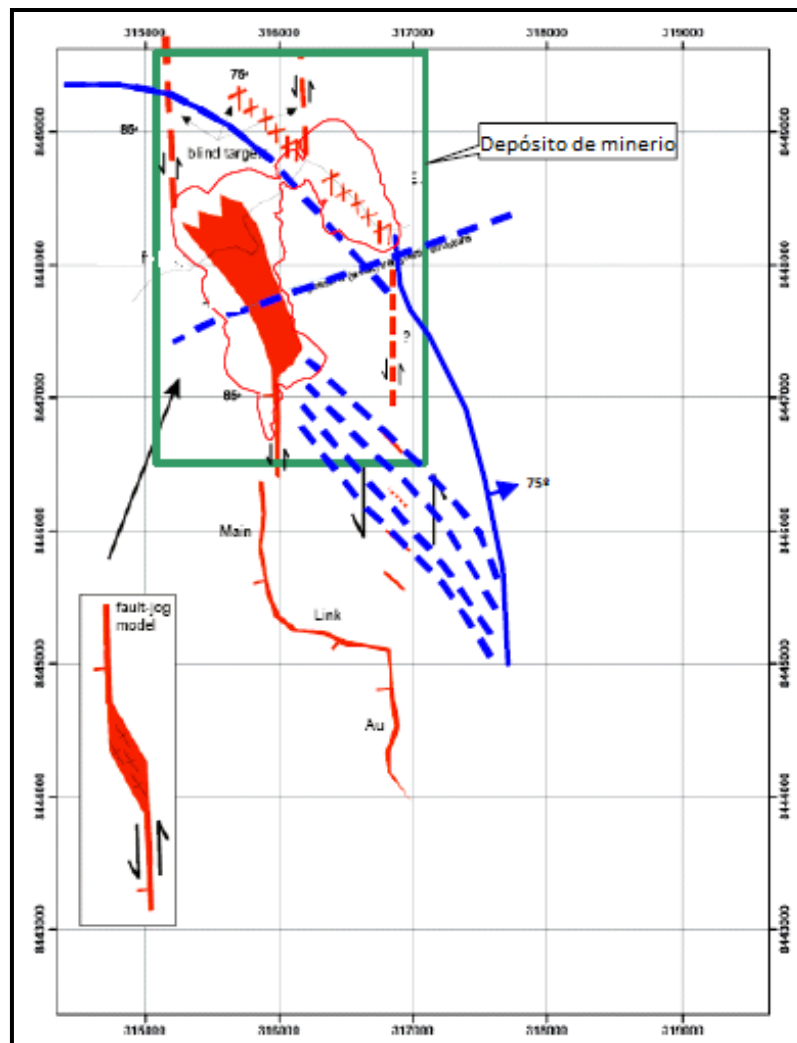


Figura 4.1 – Características estruturais do depósito de minério (Modificado de Nelson, 2006).

#### 4.1. Modelagem de falhas de grande escala (Determinístico)

As falhas de grande escala encontradas no depósito que foram modeladas são as falhas lítricas, que foram propostas por (Nelson, 2006), para explicar a mineralização encontrada no depósito. Ele disse o seguinte: “O modelo de falhas lítricas, eu acho, apropriado para explicar algumas características estruturais da zona, particularmente a quantidade de brecha, as zonas de veias de *stockworks*, e a largura das áreas mineralizados. É provável que as altas condições de pressão dos fluidos tenham sido necessárias para a formação de falhas normais de ângulos baixos, isto explicaria a presença destas características estruturais.”

“Além disso, essas características estruturais se ajustam ao modelo de fraturamento, falhas, e brechas associadas com falhas antitéticas (mergulhos opostos à falha principal) no teto da falha lítrica principal”.

As falhas lítricas são estruturas geológicas extremamente complexas e sua origem está diretamente relacionado às zonas de mineralização. Em geral, sua presença indica uma zona de deslocamento distensional que foi formado por zonas de falhas normais. Na figura 4.2 se apresenta uma ilustração da formação das falhas lítricas. Este tipo de falhas origina zonas de alto fraturamento.

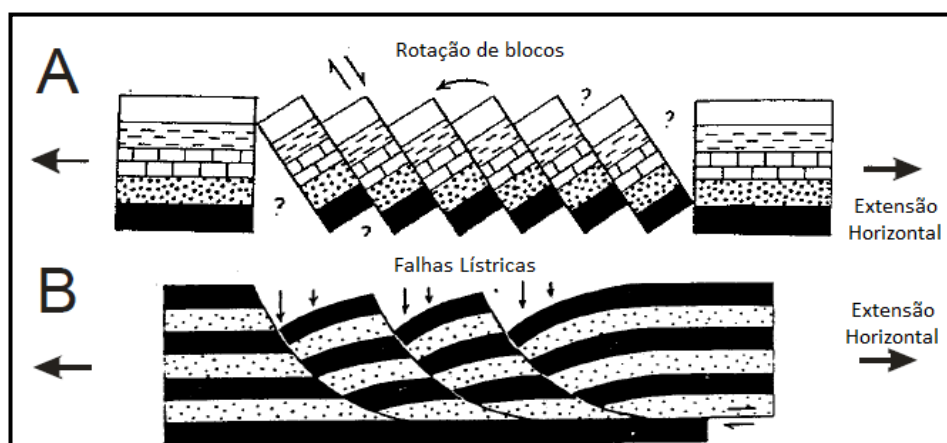


Figura 4.2 – Modelos de rotação de camadas relacionadas à (A) rotação das falhas e camadas, e (B) quando as falhas lítricas normais nas quais as camadas sofrem rotação devido à natureza da superfície curva (Modificado de Nelson, 2006).

Para a modelagem das falhas lítricas se utilizou o programa computacional *Minesight* (versão 3.5) seguindo o mesmo procedimento utilizado na modelagem geológica, mediante seções transversais. Os dados utilizados para a modelagem foram seções transversais interpretadas pelos geólogos da mina mostrando as possíveis falhas lítricas. Na figura 4.3 se mostra as seções transversais contendo as possíveis falhas lítricas (azul) interpretadas pelos geólogos da mina, posteriormente algumas foram descartadas por falta de informação ou por falta de continuidade.

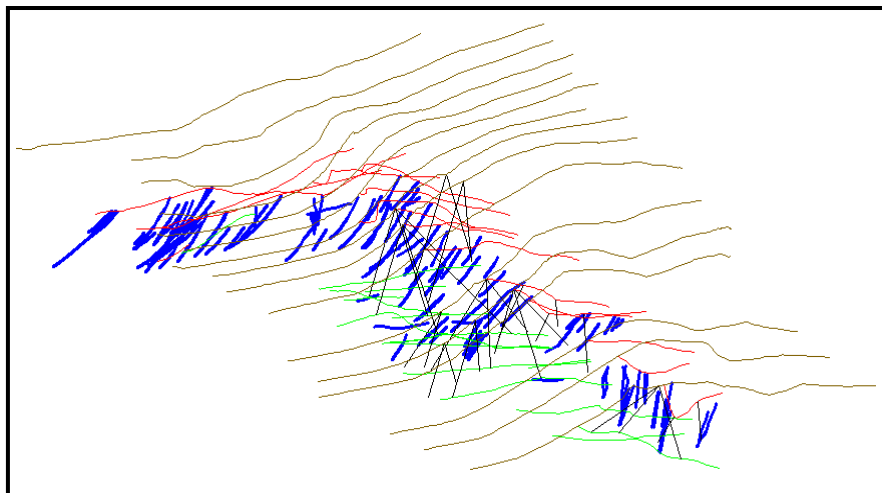


Figura 4.3 – Vista das seções transversais contendo a seguinte informação: topografia (marrom), contacto pré mineral - mineral (verde), contacto mineral - pós mineral (vermelho) e as falhas lítricas (azul).

O resultado da modelagem nas zonas este, norte e sul da cava econômica final da mina se apresentam na figuras 4.4, 4.5 e 4.6.

Na cava da zona este se pode observar que as falhas lítricas têm um mergulho não favorável para a estabilidade de taludes, já nas cavas das zonas *norte* e *sul* as falhas lítricas interceptam as paredes de taludes com mergulhos que não afetaram à estabilidade de taludes. Na figura 4.7 se mostra a cava econômica final da mina com as falhas lítricas modeladas, assim como a superfície sedimentar (Pré-mineral).

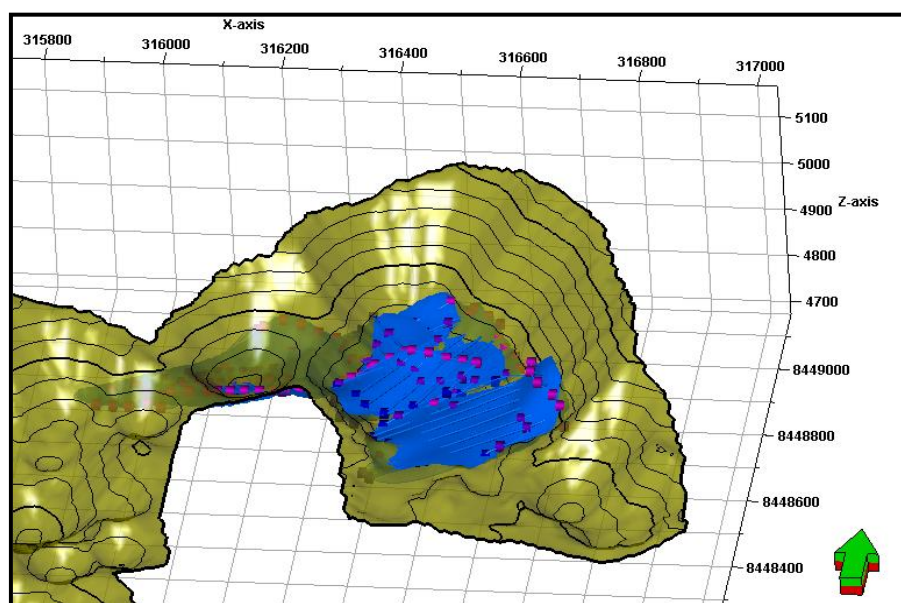


Figura 4.4 – Falhas lítricas localizadas na cava este.

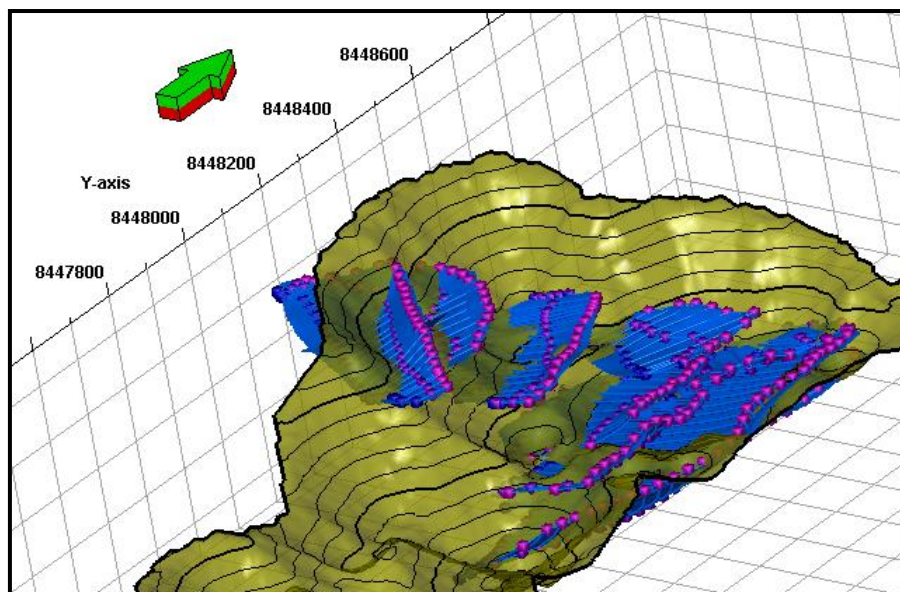


Figura 4.5 – Falhas lítricas localizadas na cava norte.

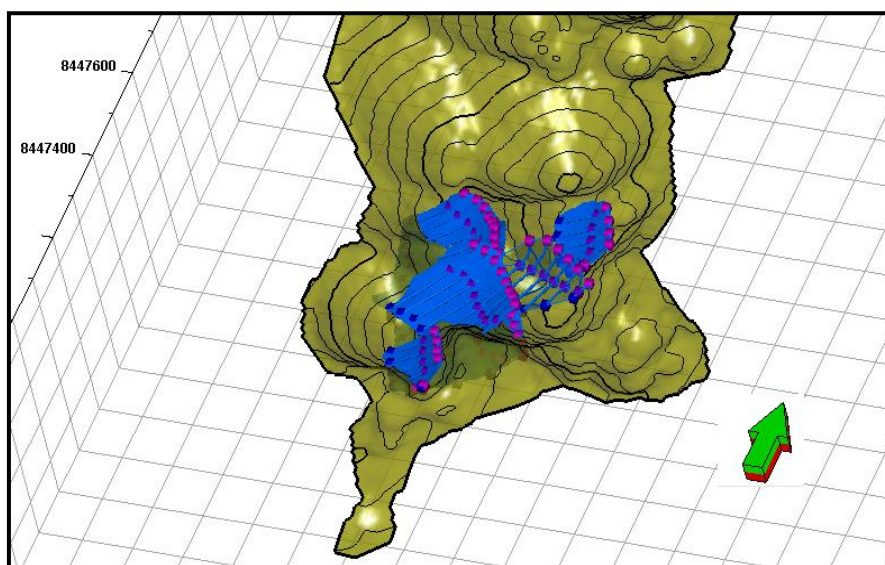


Figura 4.6 – Falhas lítricas localizadas na cava sul.



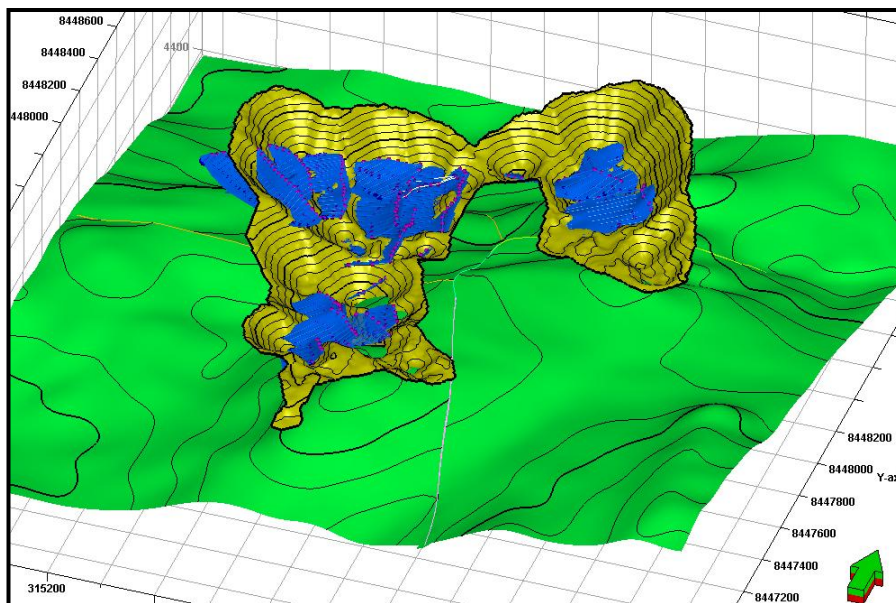


Figura 4.7 – Falhas lútricas interceptando a cava econômica final da mina.

#### 4.2.

##### **Modelagem de descontinuidades de menor escala (DFN – Modelo estocástico)**

Para as descontinuidades de menor escala (de centímetros até dezenas de metros), devido ao seu grande número não podem ser representadas por métodos determinísticos, e devido a que os parâmetros geométricos das fraturas são estatisticamente distribuídos (Priest, 1993), podem-se modelar utilizando o método bem conhecido *Discrete Fracture Network* (DFN).

Para a modelagem DFN se utilizou a ferramenta computacional Petrel, na versão 2010.1. Este programa tem diversos módulos e dentro de cada módulo podem se desenvolver diversos processos desde a modelagem estratigráfica e análise geofísico até a simulação de reservatórios. Devido a sua capacidade, este programa é utilizado por diferentes especialistas como: engenheiros geofísicos, geólogos, engenheiros de exploração, engenheiros de reservatório, etc. Na presente dissertação foi utilizado para a modelagem de fraturas para cada domínio estrutural.

Domínio estrutural é o volume ou região de um maciço rochoso dentro do qual as estruturas (descontinuidades) têm propriedades geométricas (comprimento, orientação, forma, abertura), propriedades físicas (densidade, umidade, porosidade, etc.) e propriedades mecânicas (resistência, dureza) similares devido a que sofreram os mesmos processos geodinâmicos em tempos geológicos similares.

A modelagem de fraturas é um processo de várias etapas, que envolve diversas disciplinas. A primeira etapa consiste em definir os domínios estruturais. Algumas características que ajudam a definir os domínios estruturais são as seguintes:

- Mudanças na litologia na escala de mina (contactos geológicos).
- Falhas regionais ou da escala da mina que pode dividir a mina em blocos estruturais diferentes.
- Estruturas metamórficas da escala da mina, com ênfase na mudança da orientação.
- Falhas na escala de bancada e inter rampa, dobras e estruturas metamórficas.

Todas essas características devem ter sido registradas nos mapeamentos estruturais e sondagens realizadas.

Definidos os domínios estruturais e com informação obtida das sondagens, mapeamento estrutural nos afloramentos rochosos a seguinte etapa consiste em transferir a informação da intensidade da fratura a 3D. Em cada domínio podem existir várias famílias de fraturas identificadas, que podem ser resultado de diferentes eventos tectônicos.

Uma vez que os dados têm sido identificados, analisados e classificados, se utiliza geoestatística para determinar a intensidade das fraturas em toda a grelha 3D previamente construída, finalmente se faz uso do método estocástico para modelar e representar as outras propriedades das fraturas como comprimento, orientação, abertura, forma.

Para a modelagem DFN se utilizou informação das sondagens geomecânicas orientadas com informação das estruturas como: orientação, espaçamento, forma, rugosidade, abertura, etc. também se utilizaram os dados dos registros do mapeamento estrutural (50 estações) realizado ao longo da área de estudo.

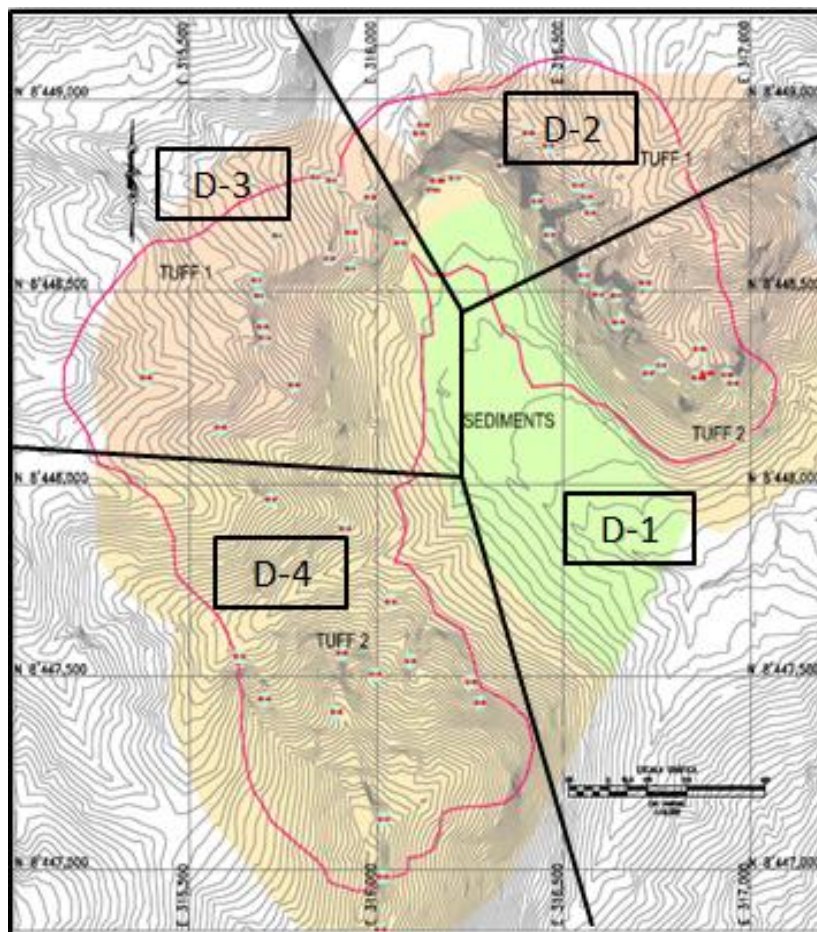
#### **4.2.1.**

##### **Definição de Domínios Estruturais**

Realizou-se uma análise estereográfica filtrada pela localização e tipo de mineralização: tufo pré-mineral, tufo mineral e tufo pós-mineral. Inicialmente se definiram quatro domínios estruturais (D-1, D-2, D-3 e D-4) como mostrados na



figura 4.8 e para cada zona se realizaram estereogramas. Para a análise estereográfica se utilizou o programa computacional Dips (versão 4.0) da Rocscience.



*Figura 4.8 – Vista em planta mostrando os limites da cava da mina, a topografia, as estações de mapeamento e os domínios estruturais definidos inicialmente.*

Uma vez realizados os estereogramas nos quatro domínios definidos inicialmente e para cada tipo de mineralização, observou-se similaridade entre as famílias dos domínios D-1 e D-2, assim como os domínios D-3 e D-4. Os estereogramas se mostram na figura 4.9 e 4.10.

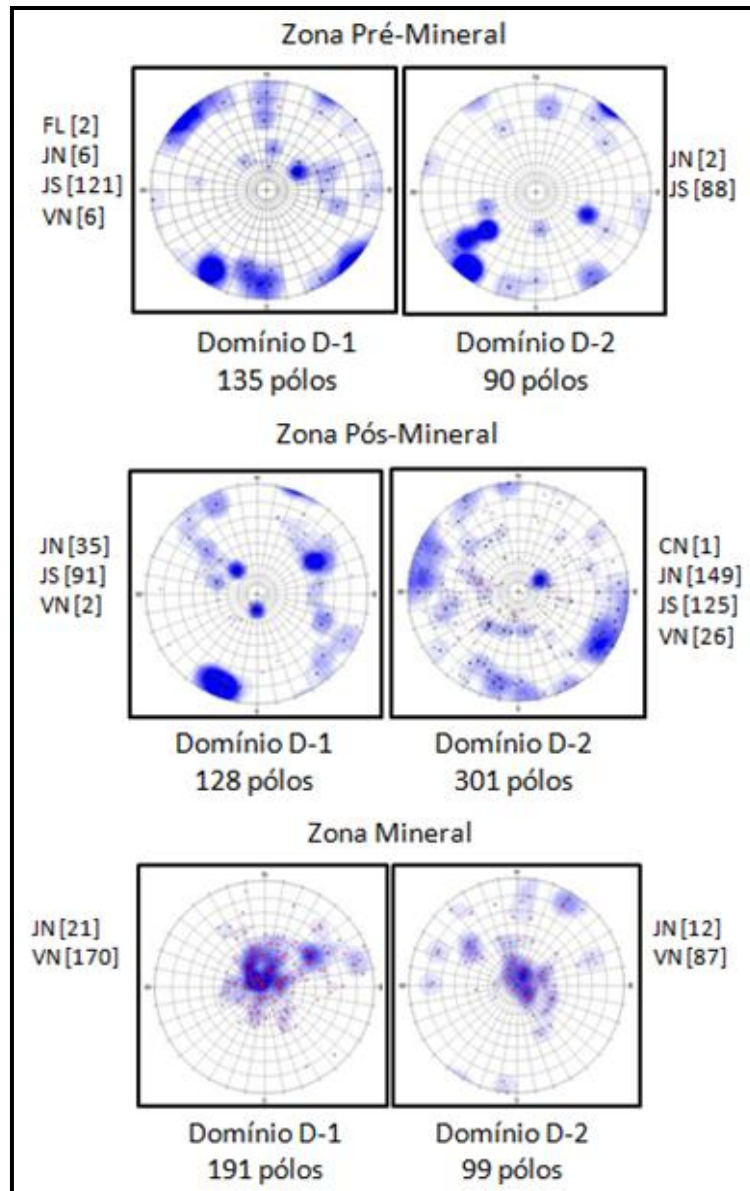


Figura 4.9 – Estereogramas realizados segundo o tipo de mineralização para os domínios estruturais D-1 e D-2. Legenda: FL: Falha, JN: Junta, JS: Família de juntas, CN: Contactos, VN: Veias.

Observa-se da figura 4.9 que na zona pré-mineral as estruturas são em sua maioria verticais e as estruturas mapeadas estão conformadas por juntas, nesta zona se encontraram duas possíveis falhas. Na zona mineralizada a maioria das estruturas mapeadas são veias contendo minerais como pirita, argila, óxidos e manganês. As estruturas nesta zona são horizontais. Na zona pós-mineral as principais famílias são verticais e estão conformadas por juntas e veias.

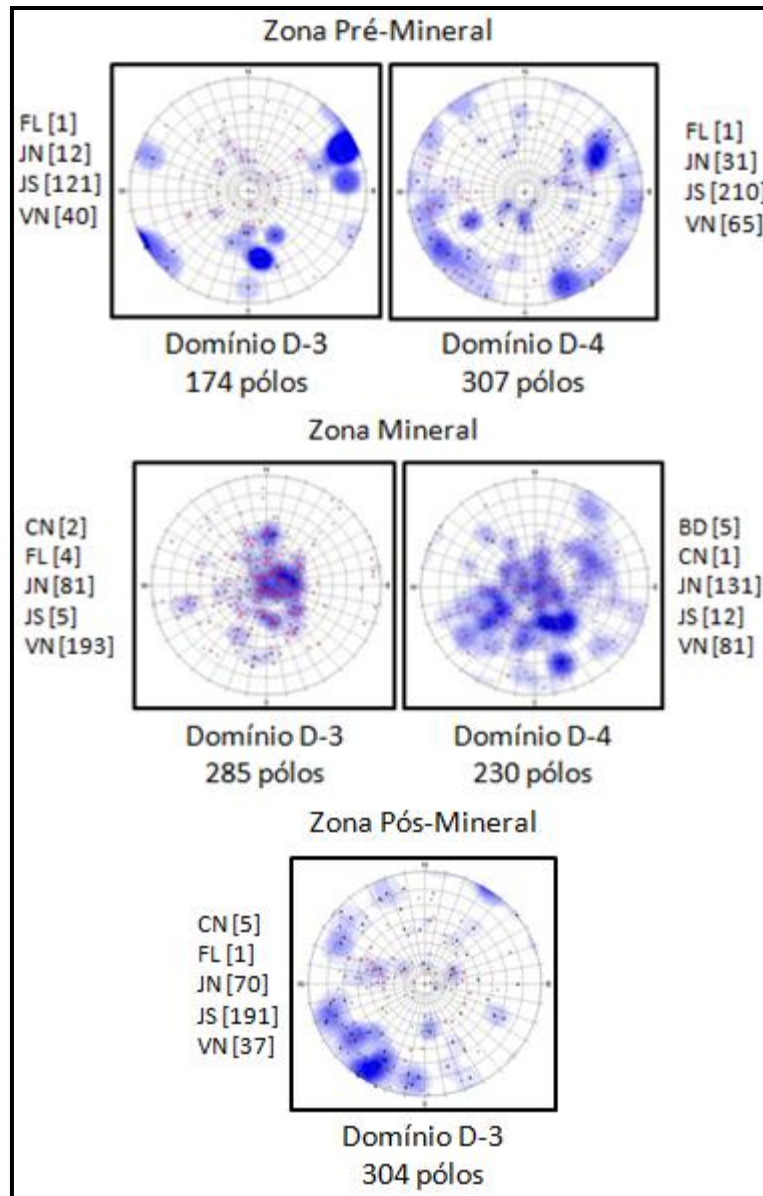


Figura 4.10 – Estereogramas realizados segundo o tipo de mineralização para os domínios estruturais D-3 e D-4. Legenda: FL: Falha, JN: Junta, JS: Família de juntas, CN: Contactos, VN: Veias, BD: Estratificação.

Observa-se na figura 4.10 que não se tem informação na zona pós-mineral para o domínio D-4. Na zona mineral se tem uma grande dispersão dos pólos, sendo a maioria veias contendo minerais como: pirita, óxidos, manganês, argila. Na zona pré-mineral as famílias principais são verticais e estão conformadas por juntas e veias.

Das figuras anteriores se pode concluir que os domínios D-1 e D-2 são na realidade o mesmo domínio, já que as estruturas encontradas nesses domínios apresentam as mesmas características geométricas. Da mesma maneira conclui-se que os domínios D-3 e D-4 são o mesmo domínio.

#### 4.2.2.

#### Preparação e importação de dados no Petrel

Os dados obtidos dos registros das sondagens geomecânicas orientadas e dos mapeamentos de afloramento devem ser preparados num formato adequado antes de ser importados no *Petrel*.

O processo seguido para a importação das sondagens mostrando informação geomecânica contínua (RQD) ou discreta (litologia) ou mostrando informação pontual das fraturas é a seguinte:

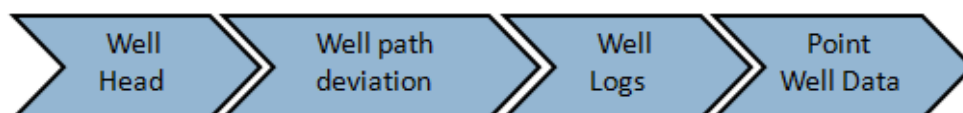


Figura 4.11 – Processo de importação das sondagens no Petrel.

Inicialmente se deve criar o arquivo ASCII *well head* contendo informação organizada em colunas. Os atributos ingressados para cada sondagem são os seguintes: Nome, Coordenada UTM no eixo X, Coordenada UTM no eixo Y, altura e comprimento da sondagem.

# Petrel well head				
VERSION 1				
BEGIN HEADER				
Name	Surface X	Surface Y	KB	TD (MD)
END HEADER				
VH-01	315848	8447262	5080	252.65
VH-02	315675	8447818	4985	257.25
VH-03	315924	8447889	4935	200
VH-04	315435	8448274	5055	251
VH-05	315820	8448288	4965	310
VH-06	315754	8448515	4950	265
VH-07	316114	8448829	4910	195
VH-08	316483	8448800	4990	280
VH-09	316784	8448408	4990	235

Figura 4.12 – Arquivo ASCII *well head*.

Se as sondagens fossem verticais, não se precisa criar o arquivo de trajetória *well path deviation*, já para o caso de sondagens com um determinado azimute e mergulho se deve criar um arquivo como mostrado na figura 4.13

indicando o nome da sondagem, o azimuth, o mergulho e a profundidade final do poço.

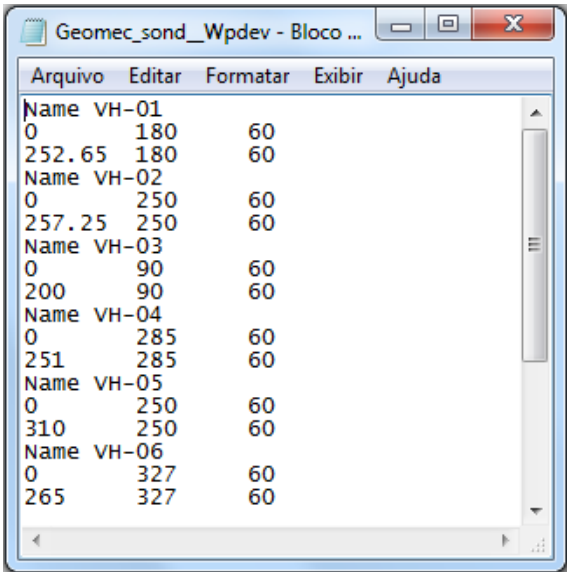


Figura 4.13 – Arquivo ASCII well path deviation.

Uma vez que as sondagens têm as suas trajetórias reais, se procede a importar a informação geomecânica (obtida dos registros) dentro de cada sondagem e em cada intervalo. Na figura 4.14 se observa o arquivo ASCII contendo a Litologia, RQD (*Rock Quality Designation*), Dureza (R) e RMR (*Rock Mass Rating*) para cada intervalo da sondagem VH-01. Os intervalos sem informação eram preenchidos com o valor negativo (-1) para reconhece-os.

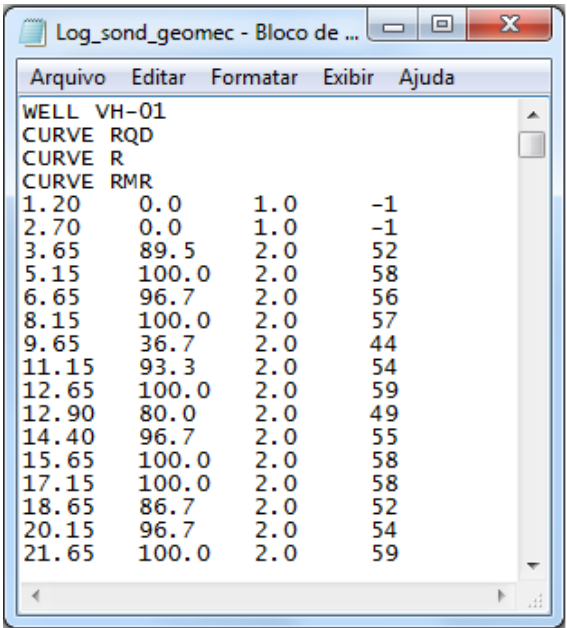
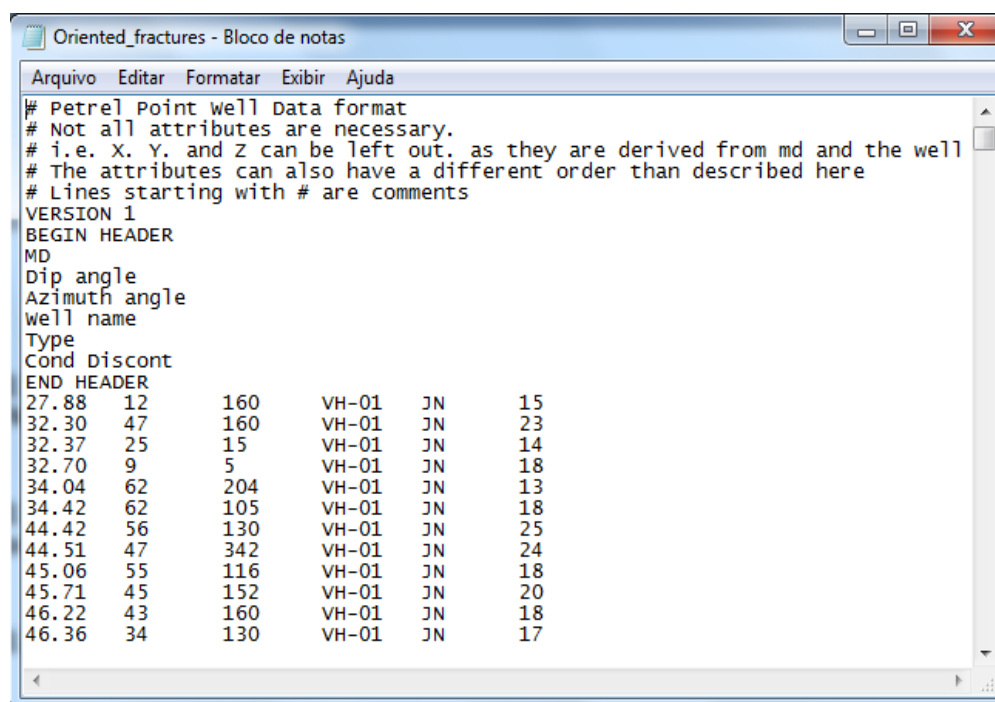


Figura 4.14 – Arquivo ASCII well log para a distribuição dos dados ao longo da sondagem VH-01.



Para importar informação pontual das fraturas dos registros geomecânicos orientados se necessita criar um arquivo ASCII *point well data* e pode conter informação continua e/ou descontinua. Na figura 4.15 se mostra o arquivo com a informação das descontinuidades encontradas na sondagem VH-01: profundidade da fratura, ângulo de mergulho, azimuth, nome da sondagem, tipo de junta e condição da descontinuidade.



```

# Petrel Point well Data format
# Not all attributes are necessary.
# i.e. X, Y, and Z can be left out, as they are derived from md and the well
# The attributes can also have a different order than described here
# Lines starting with # are comments
VERSION 1
BEGIN HEADER
MD
Dip angle
Azimuth angle
well name
Type
Cond Discont
END HEADER
27.88 12 160 VH-01 JN 15
32.30 47 160 VH-01 JN 23
32.37 25 15 VH-01 JN 14
32.70 9 5 VH-01 JN 18
34.04 62 204 VH-01 JN 13
34.42 62 105 VH-01 JN 18
44.42 56 130 VH-01 JN 25
44.51 47 342 VH-01 JN 24
45.06 55 116 VH-01 JN 18
45.71 45 152 VH-01 JN 20
46.22 43 160 VH-01 JN 18
46.36 34 130 VH-01 JN 17
  
```

Figura 4.15 – Arquivo ASCII *point well data*.

É apresentado na figura 4.16 o resultado da importação das sondagens com os registros geomecânicos, neste caso o valor do RQD. Pode se observar que em geral os valores de RQD são bons (entre 60 e 90). No entanto, existem algumas zonas no interior das cavas com valores de RQD menores (entre 0 e 40), estas zonas de maior fraturamento poderiam estar associadas as falhas lístricas ou a zonas de maior mineralização.

Na figura 4.17 se mostra a informação pontual das fraturas encontradas ao longo de nove sondagens geomecânicos orientados contendo informação importante como: azimuth, mergulho, tipo de descontinuidade e a condição da descontinuidade.

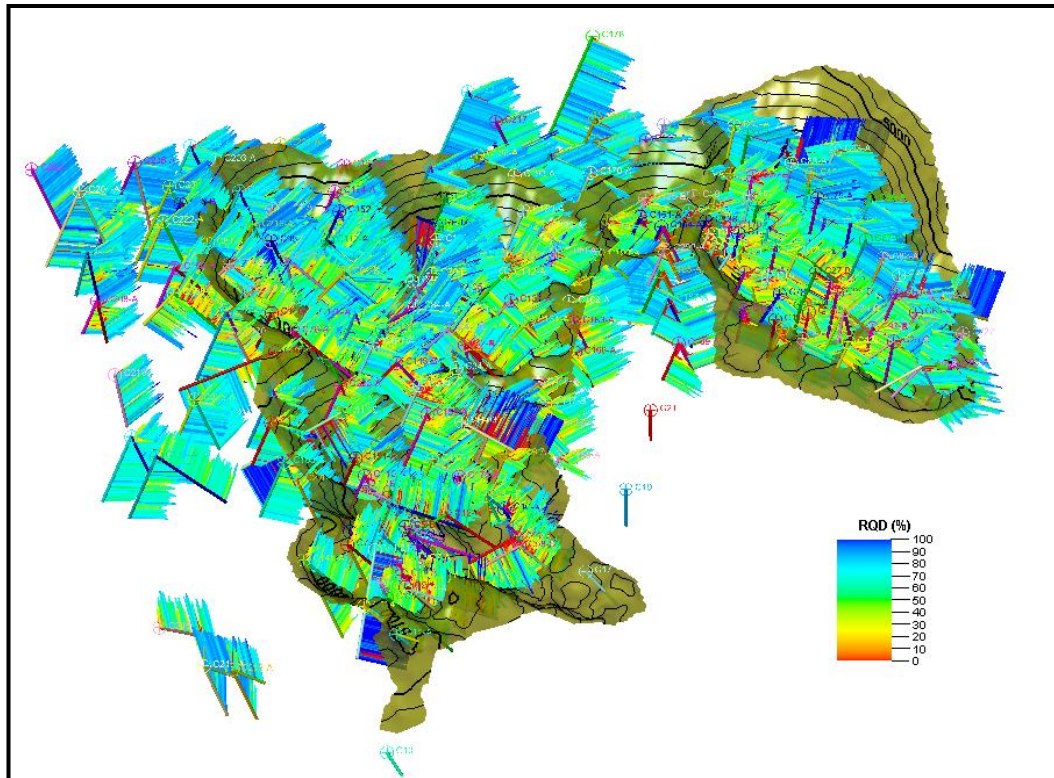


Figura 4.16 – Sondagens mostrando a variação do RQD com a profundidade.

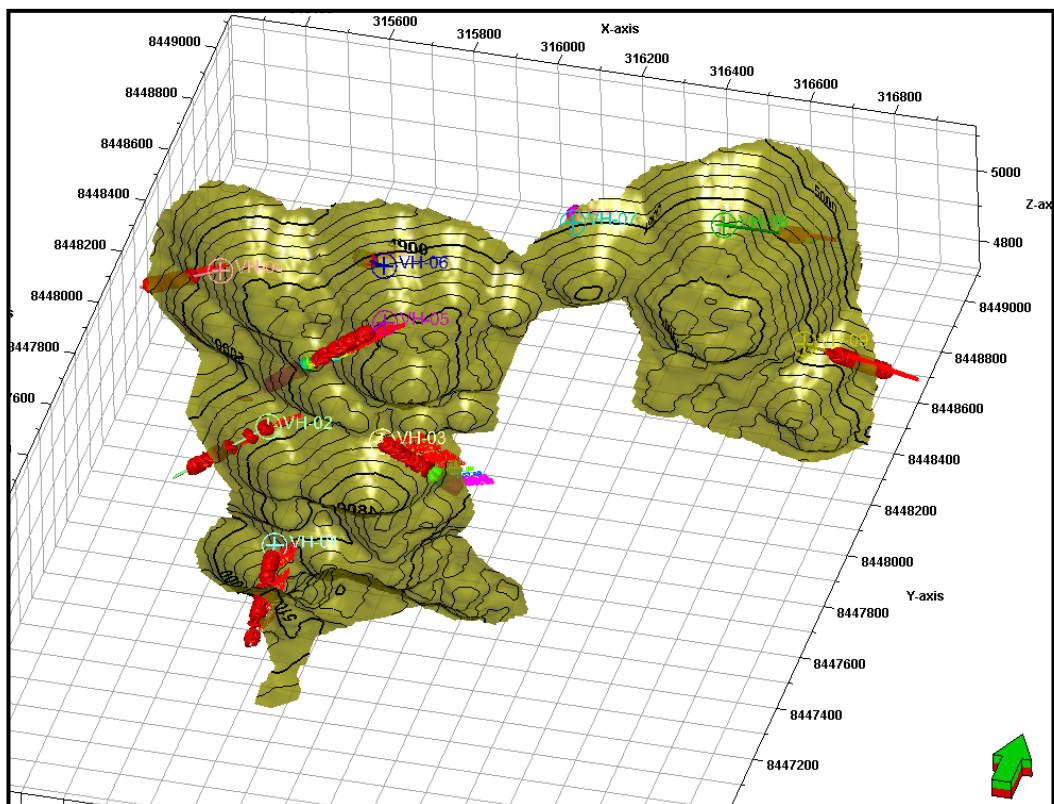


Figura 4.17 – Sondagens geomecânicas orientadas mostrando informação pontual das falhas encontradas (point well data).



Outros dados importantes que foram importados são as superfícies dos contactos litológicos e das falhas lítricas geradas no programa *Minesight*, assim como também a topografia e a cava econômica final da mina, como se mostra na figura 4.18.

Estas superfícies foram exportadas em arquivos \*.dxf e devido a que o *Petrel* não importa arquivos \*.dxf se teve que utilizar o programa *Isatis* (Versão 10.04) que permite importar arquivos \*.dxf e exportá-los em formato ASCII de pontos, compatíveis com o *Petrel*. Uma vez que os pontos foram importados, se geraram as superfícies. Seguindo este procedimento se importaram as seguintes superfícies:

- Topografia.
- Cava econômica final.
- Contactos litológicos: sedimentar (pré-mineral) – tufo (mineral) e tufo (mineral) – tufo (pós-mineral).
- Falhas lítricas localizadas nas zonas norte, sul e este.

Para a modelagem estrutural 3D se necessitava definir os limites no eixo z, pelo que se gerou um plano horizontal  $z=4600$  m.

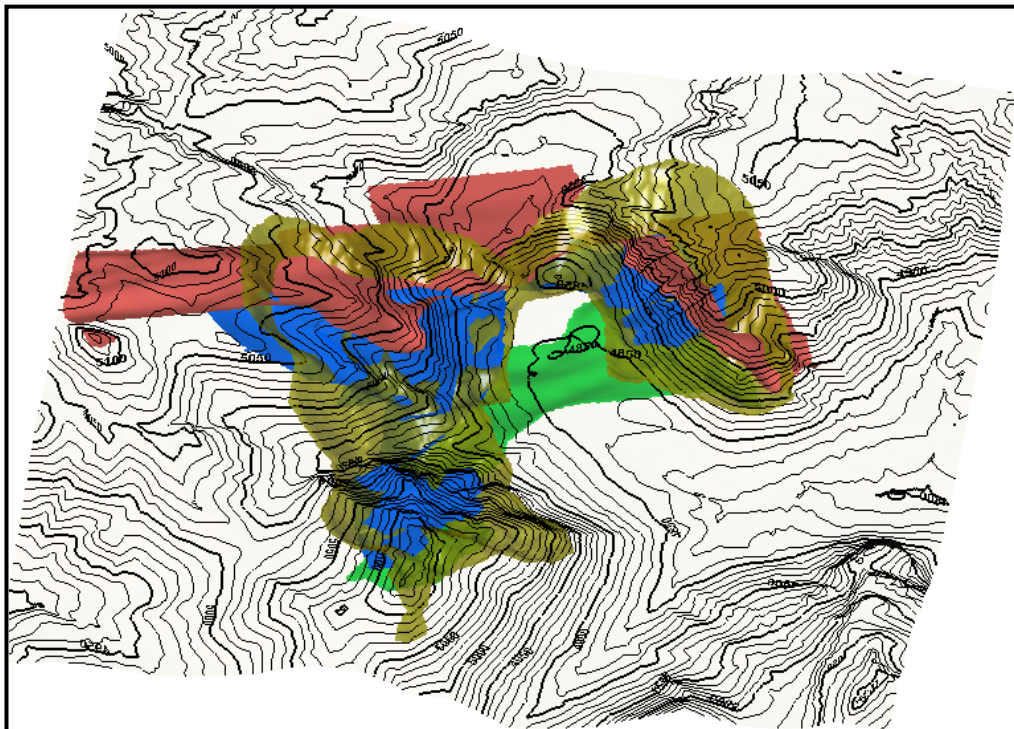


Figura 4.18 – Superfícies importadas no *Petrel*: curvas de nível da topografia, contactos litológicos (verde e rosa), cava econômica final da mina (ouro) e as falhas lítricas (azul).

#### 4.2.3.

#### Criação da grelha geométrica 3D

Uma vez terminada a importação dos dados de entrada, iniciou-se o processo de modelagem geométrica, que consiste em construir uma grelha 3D que represente o volume do maciço rochoso do projeto. O programa *Petrel* tem um processo chamado *point grid corner* para a geração da grelha geométrica 3D, este processo, por sua vez, está sub-dividido em quatro partes como se mostra na figura 4.19. A continuação se realiza uma breve descrição de cada uma das etapas.

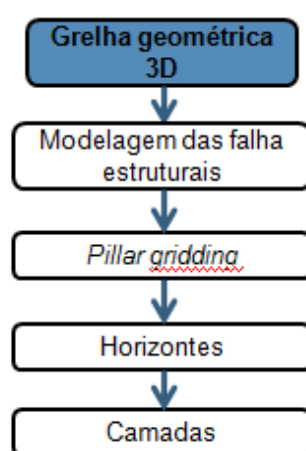


Figura 4.19 – Fluxograma para a geração da grelha geométrica 3D.

1. Modelagem das falhas: Consiste em definir as falhas geológicas do modelo que serão a base para gerar a grelha 3D. Estas falhas vão definir as quebras no *grid*, linhas ao longo da qual os horizontes inseridos posteriormente podem ser deslocados. Na presente dissertação se criaram cinco falhas com a finalidade de dividir a área em estudo para formar os domínios estruturais como visto anteriormente na figura 4.8, as falhas modeladas se apresentam na figura 4.20.
2. *Pillar Gridding*: Gera a grelha a partir do modelo de falhas. Os limites da geometria podem ser definidos durante o processo. Também se podem criar tendências para as orientações da grelha. Na figura 4.21 se mostra o resultado do *pillar gridding*, observa-se que a grelha foi gerada tomando em conta as falhas criadas na etapa anterior.
3. Horizontes: Nesta etapa são construídas as camadas verticais no modelo e se define o deslocamento nas falhas. Na dissertação se construíram quatro horizontes: a topografia da área em estudo, o contacto geológico

sedimentos (pré-mineral) – tufos (mineralizados), o contacto geológico tufos (mineralizados) – tufos (pós- mineral) e o plano definido para limitar o limite inferior no eixo z com cota de elevação 4600 m. Ver figura 4.22.

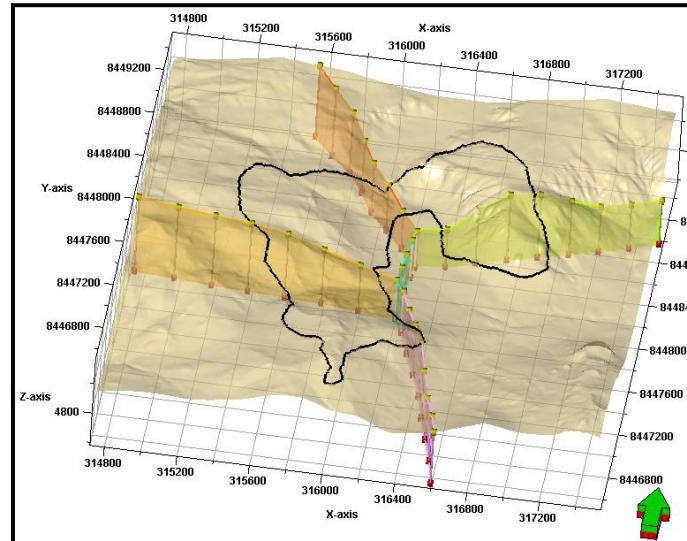


Figura 4.20 – Falhas modeladas para a divisão em domínios estruturais (as falhas têm como limite superior e inferior a topografia e o plano horizontal de cota de elevação 4600 m. respectivamente).

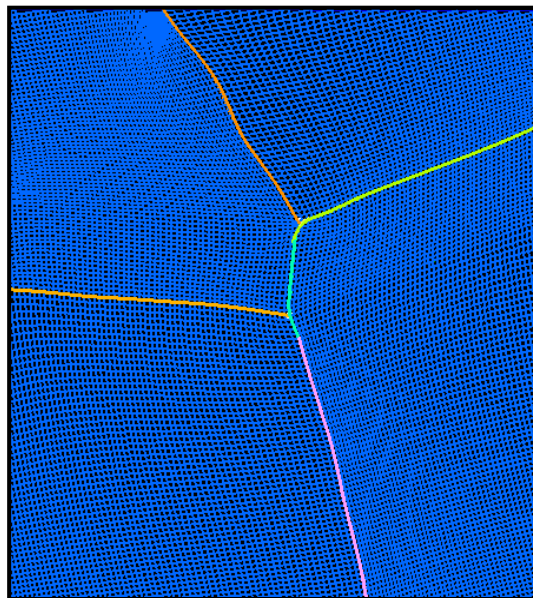


Figura 4.21 – Vista em planta do Pillar gridding mostrando as falhas geológicas geradas anteriormente.

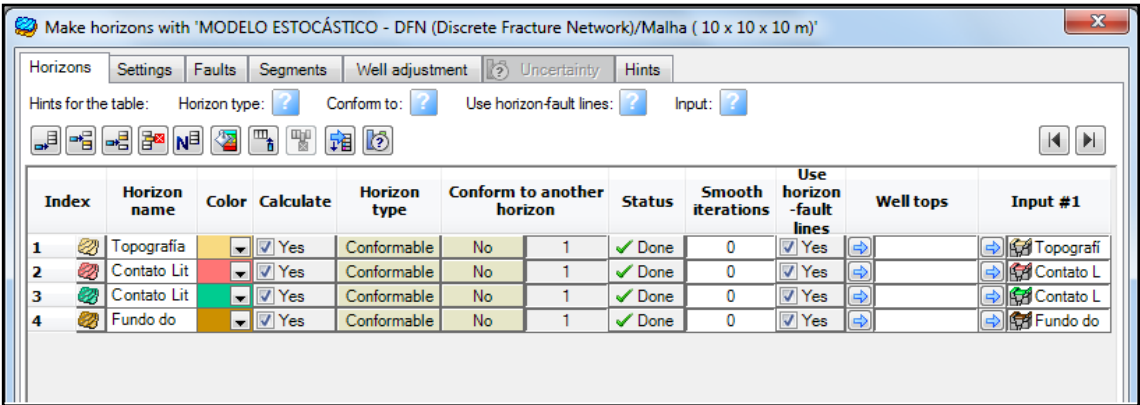


Figura 4.22 – Geração de horizontes.

A figura 4.23 mostra os horizontes gerados, nesta etapa as superfícies definidas como horizontes foram expandidas até os limites do volume. Esta expansão é realizada mantendo a tendência das superfícies, mas devemos sempre distinguir entre as zonas confiáveis que foram modeladas e as zonas de extensão criadas com a finalidade de gerar volumes para modelar dentro de cada um deles as fraturas para cada domínio.

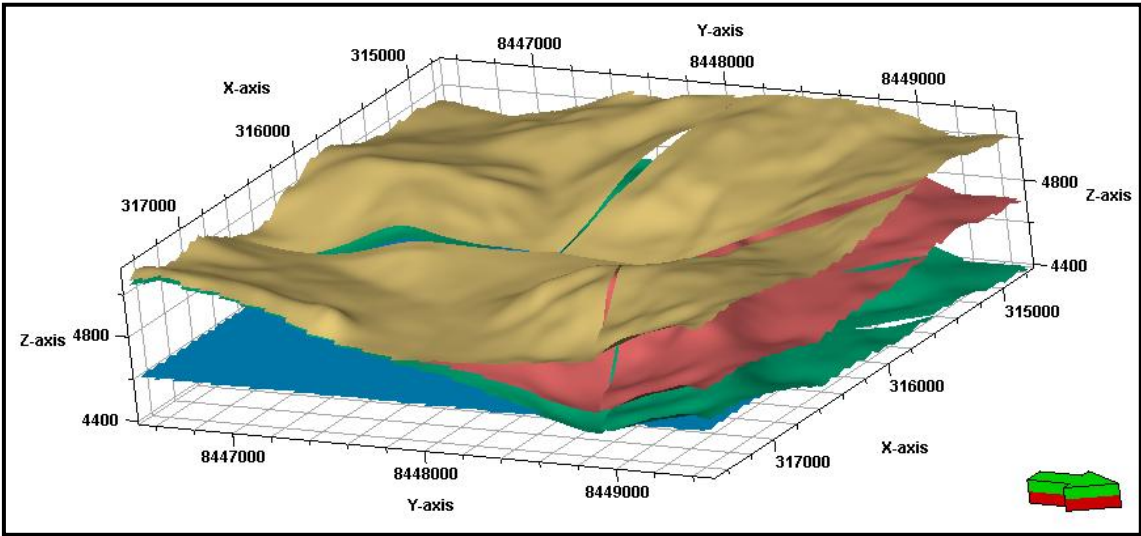


Figura 4.23 – Horizontes definidos: topografia (marrom), contacto pré-mineral – mineral (verde), contacto mineral – pós-mineral (rosa) e fundo do modelo (azul claro).

- 4. Camadas: Esta etapa define a resolução vertical na grelha 3D estabelecendo a espessura ou o número de camadas desejado. Na figura 4.24 se mostra o resultado.



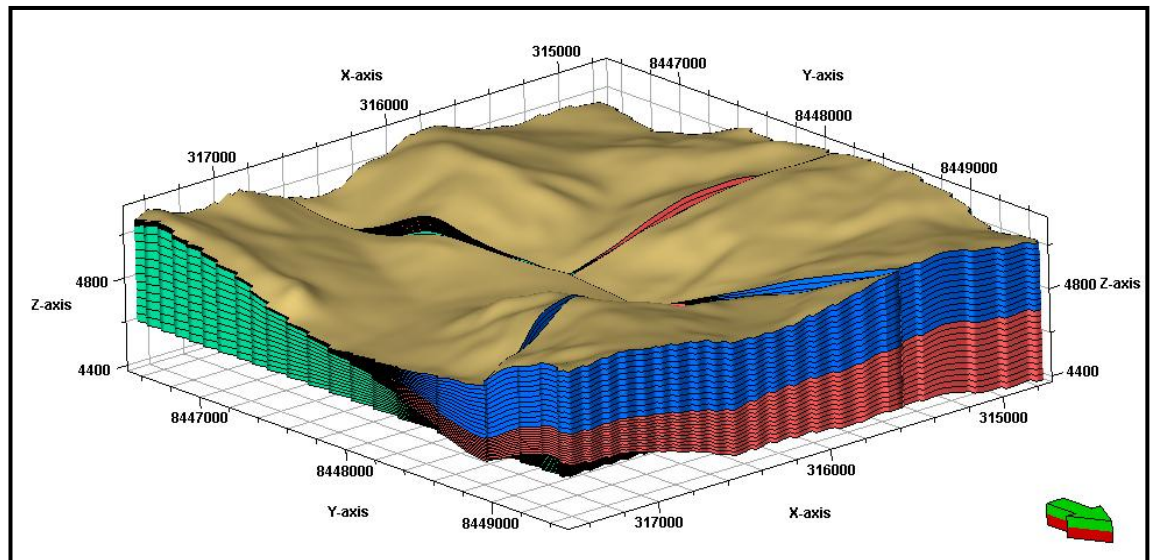


Figura 4.24 – Camadas geradas para cada zona.

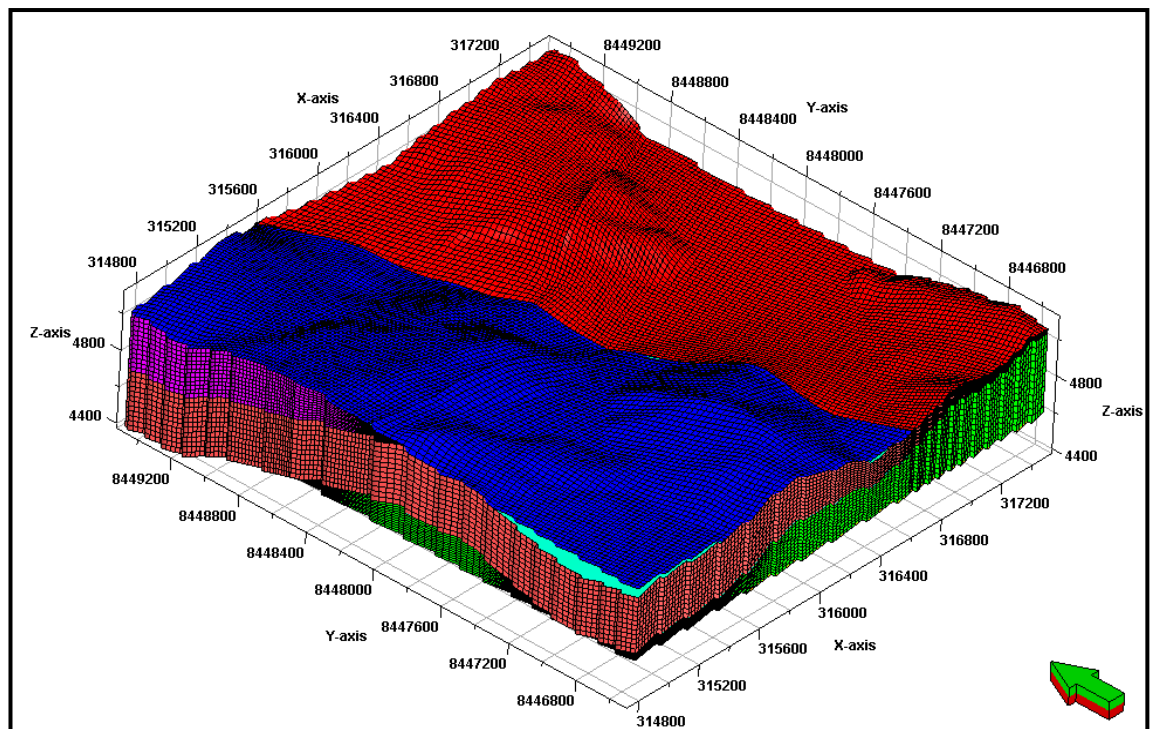


Figura 4.25 – Grelha 3D mostrando as zonas (mineral, pré-mineral e pós-mineral) e também os domínios do modelo (vermelho e azul).

#### 4.2.4.

#### Modelagem de propriedades

A modelagem de propriedades consiste no preenchimento dos blocos com propriedades contínuas como a densidade de fraturas  $P_{32}$ . A modelagem 3D das fraturas consiste em distribuir as fraturas espacialmente em função das propriedades geométricas registradas das sondagens orientadas e dos mapeamentos estruturais. A intensidade de fraturas é a propriedade de interesse para a modelagem e representa a quantidade de fraturas por unidade de volume. Existem várias formas de representar a intensidade das fraturas, entre as mais comuns estão:  $P_{30}$  que é o número de fraturas por unidade de volume,  $P_{31}$  que é o comprimento médio da fratura por unidade de volume e  $P_{32}$  que representa a área da fratura por unidade de volume. As definições destes três tipos de representação são completamente diferentes. O resultado do *upscaling* das observações corrigidas pela orientação da sondagem ( $P_{10c}$ ) é igual que a área de fratura por unidade de volume.

A densidade  $P_{32}$  pode ser computada das análises das interseções entre as fraturas e as sondagens, se os ângulos entre as fraturas e o poço são tomados em conta (se eles são corrigidos dividindo-os pelo cosseno do ângulo entre a linha da sondagem e a normal da fratura). Este valor do número de fraturas por unidade de volume corrigido é chamado usualmente de  $P_{10c}$ . Em Petrel,  $P_{10c}$  ( $\sim P_{32}$ ) é computado usando a opção inserir “registro de intensidade” com a opção “corrigir para desvio da sondagem”.

Previamente se importou as sondagens contendo informação geomecânica das fraturas com os arquivos *point well data*, a próxima etapa consiste em uma boa visualização dos dados para seu posterior análise. Para a visualização dos pólos das fraturas se usam os estereogramas (Figura 4.26). Os pólos foram filtrados para cada família de fraturas definidas anteriormente com a ajuda do programa Dips 3.5 de Rocscience. Na figura 4.28 se mostra a filtragem realizado para o domínio “1 & 2”. Se realizou o mesmo para o domínio “3 & 4”.

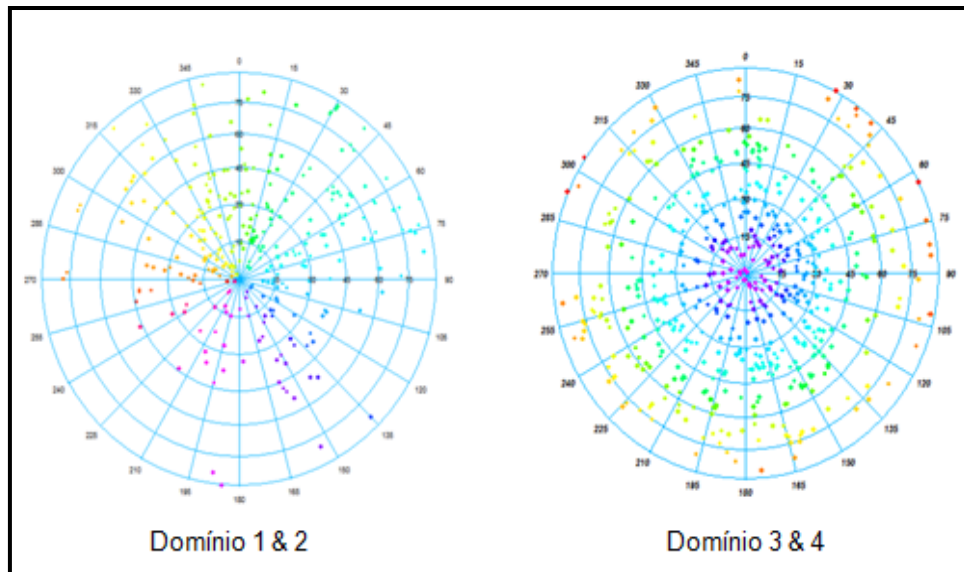


Figura 4.26 – Estereogramas mostrando os pólos dos domínios estruturais para a zona mineralizada.

Outra forma de visualizar é mediante os *tadpoles* que permitem ver a variação da orientação e o mergulho com a profundidade. Os *tadpoles* se mostram na figura 4.27, também se apresenta o estereograma a cada 25 m. mostrando a concentração dos pólos das fraturas.

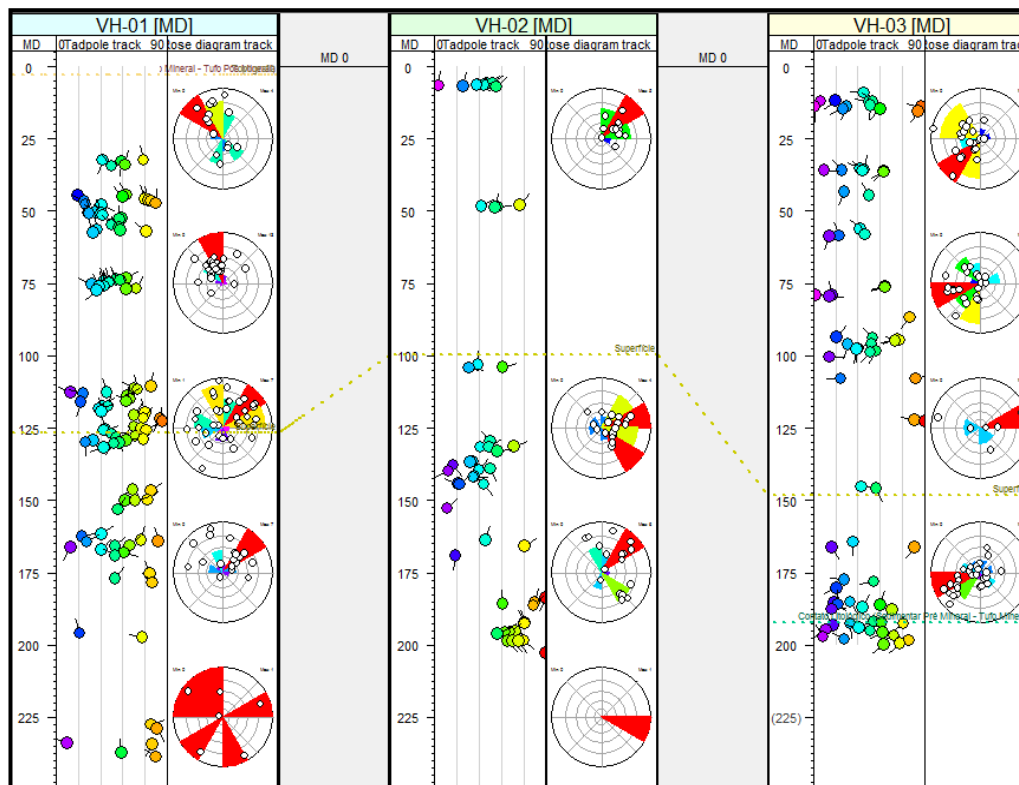


Figura 4.27 – Sondagens VH-01, VH-02 e VH-03 mostrando os *tadpoles* das fraturas e os estereogramas a cada 50 metros.



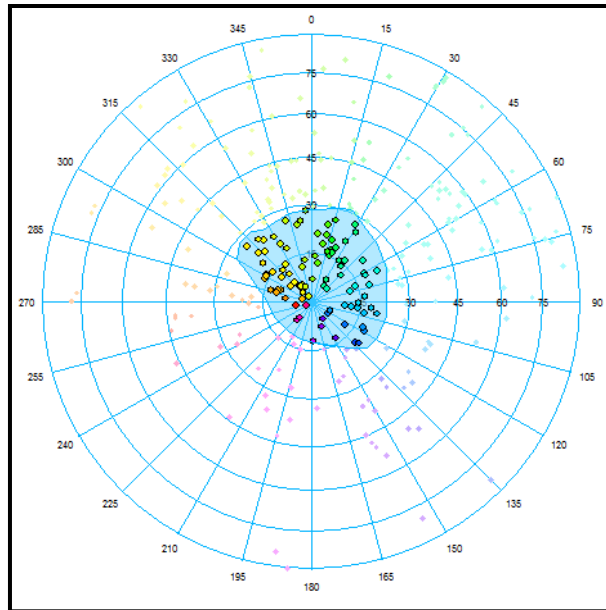


Figura 4.28 – Filtragem dos pólos das fraturas para o domínio “1 & 2” definidos anteriormente no programa Dips 3.5

#### 4.2.4.1.

##### Criação de registros (logs) das fraturas

Com a informação pontual das fraturas obtida das sondagens, podem ser criados registros (*logs*) como: registros de contagem cumulativa de fratura, de intensidade de fratura e de propriedades das fraturas.

As fraturas podem ser ponderadas, baseadas na orientação relativa das fraturas ao desvio da sondagem. Os registros podem ser criados para cada família de fraturas.

A intensidade de fraturas é a propriedade de interesse para a modelagem, o registro (*log*) desta propriedade será *upscaled*, modelado e usado como a informação básica para a criação da rede de fraturas. A criação do registro é o processo de tomar as observações discretas e transforma-ás em valores estatísticos que descrevam as fraturas.

O registro da intensidade de fraturas foi criado para cada sondagem e família de fraturas dentro do domínio, usou-se uma janela de comprimento de 7.5 m. que é o intervalo para calcular a média dos valores de intensidade das fraturas. O uso desta janela é um método de suavizado, e em vez de mostrar valores pontuais, se mostra a média da intensidade num ponto.

A intensidade de fraturas é calculada usando o registro cumulativo como se vê a continuação. O registro cumulativo tem um valor de MD (distância desde o topo do poço até um ponto da sondagem, neste caso até a fratura) para cada fratura na família da fratura. Por padrão, o valor do registro é incrementado por 1 para cada fratura, também pode ser multiplicado por um valor definido pelo usuário. Um exemplo se mostra na figura 4.29, sendo  $w$  o comprimento da janela.

$$\text{Intensidade (md)} = (\text{cumulativa (md + w/2)} - \text{cumulativa (md - w/2)}) / w$$

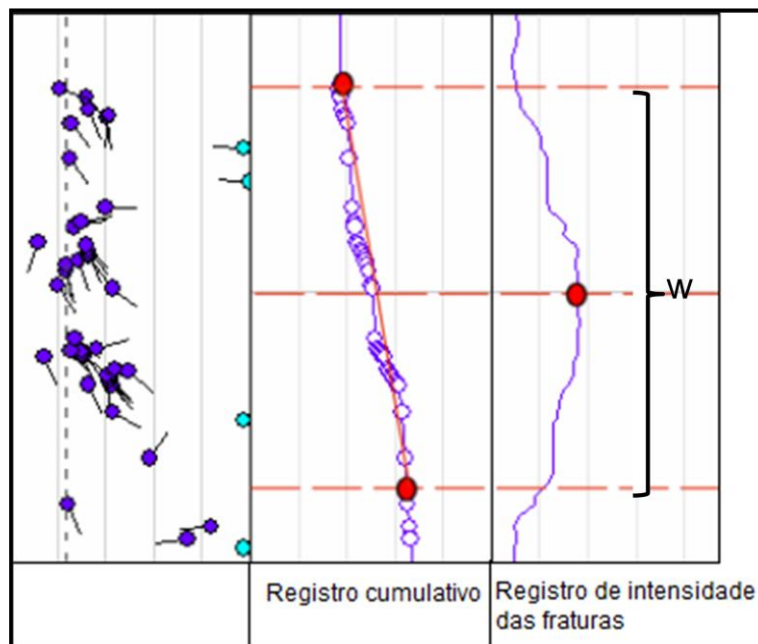


Figura 4.29 – Fraturas mostradas na seção do poço junto ao registro cumulativo das fraturas e a intensidade de fraturas. As linhas vermelhas mostram a janela usada para o cálculo da intensidade. A intensidade no ponto vermelho é calculada como a gradiente do registro cumulativo entre os outros dois pontos vermelhos no registro cumulativo (separado pelo comprimento da janela).

Os registros das intensidades de fraturas geradas para as sondagens VH-01 e VH-02 são mostradas a continuação na figura 4.30.

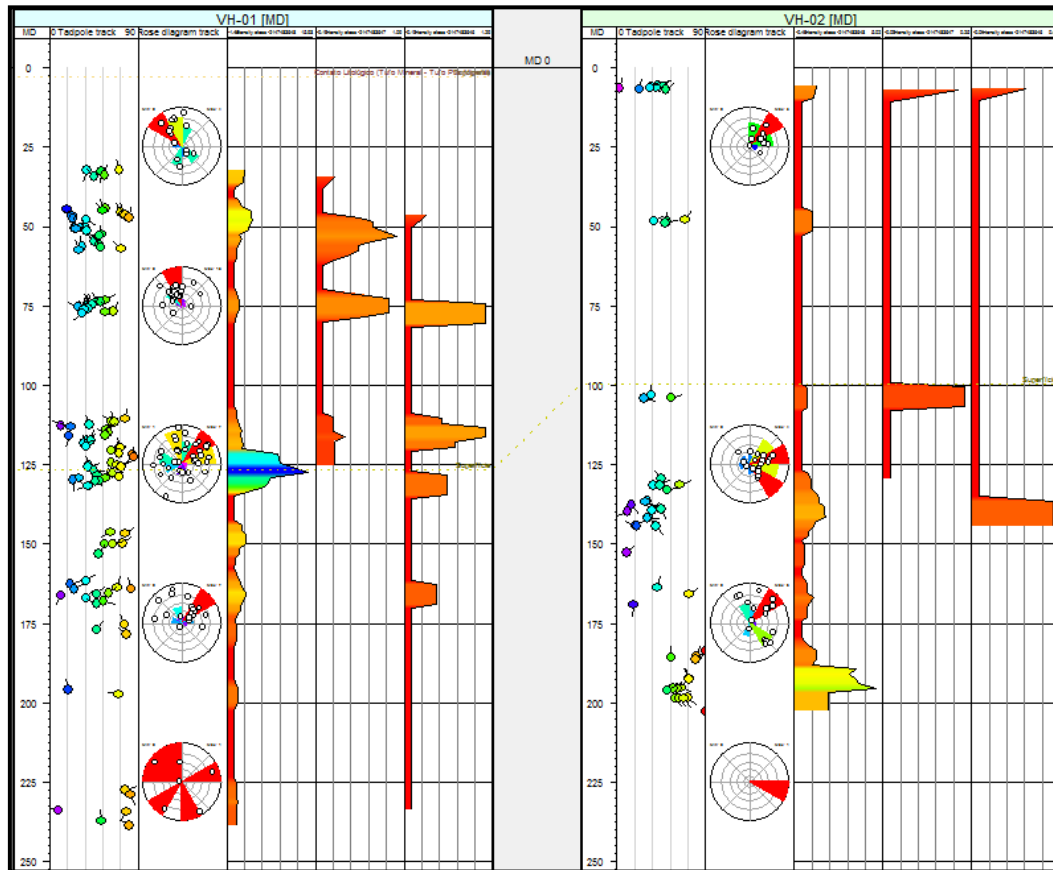


Figura 4.30 – Registros das intensidades de fraturas para cada família de fraturas para as sondagens VH-01 e VH-02.

#### 4.2.4.2.

##### **Upscaling da intensidade das fraturas**

O *upscaling* consiste em levar a intensidade de fraturas distribuídas ao longo dos furos às células (blocos) que cruzam as trajetórias e que foram criadas anteriormente na etapa de modelagem geométrica.

Para a intensidade de fraturas foi realizado o *upscaling*, no qual se realizam cálculos de média com o valor da propriedade estudada (Ver figura 4.31). A função *scale up* tem diferentes métodos para os cálculos da média nos blocos, tais como a “Média Aritmética”, “Média Harmônica”, “Média Geométrica”, etc. Podendo-se escolher o método e a forma como se deseja que os dados sejam tratados. Utilizou-se o método de cálculo chamado “Média Aritmética” e os logs foram tratados como linhas.

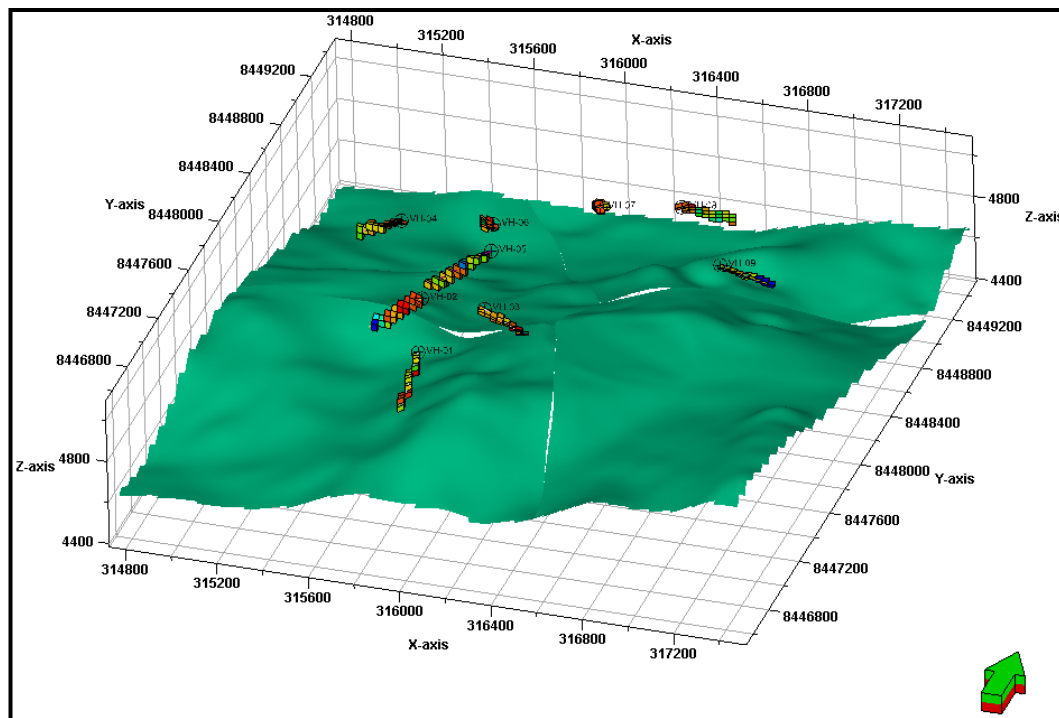


Figura 4.31 – Upscaling dos dados de intensidade das fraturas nas nove sondagens geomecânicas orientadas.

#### 4.2.4.3.

##### **Análise geoestatística e modelagem 3D da intensidade das fraturas**

Uma vez realizado o *upscaling* se deve preparar os dados de entrada para poder realizar a análise geoestatística. Este processo é chamado de *Data analysis* no Petrel 2010.1, é um processo de controle da qualidade de dados, exploração de dados, e preparação dos dados de entrada para a modelagem das propriedades. Os objetivos do processo de transformação da data são:

- Eliminar a tendência espacial para que a data seja estacionária, e
- Transformar a data em uma distribuição normal padrão (com uma média de 0 e uma desvio padrão de 1).

A análise de dados da propriedade continua, como por exemplo, a intensidade de fraturas, consiste em transformar a data e gerar variogramas. A transformação de dados permite que os dados sejam estacionários e normalmente distribuídos, que são requerimentos da maioria dos algoritmos geoestatísticos padrões.

Após a realização das estimativas, estas tendências são reaplicadas nas propriedades modeladas, garantindo sua preservação. Isto ocorre de forma automática, sobre o resultado da modelagem, exatamente na ordem inversa em que as transformações foram aplicadas, para preservar as tendências espaciais e a distribuição original dos dados no resultado final das propriedades.

A seqüência de transformações aplicadas aos dados de intensidade de fraturas foi a seguinte:

- *Input*: Esta transformação é aplicada para o truncamento de valores dos dados de entrada e não serão representados no final. Utiliza-se no caso em que os dados de entrada tenham valores que ficam fora dos limites reais da propriedade.
- *The Cox-Box*: É utilizada para eliminar a assimetria da distribuição. O fator lambda expressa o grau de assimetria e está no intervalo de -16 a 16.
- *1D Trend*: Transformação que permite gerar uma função de tendência (dos dados de entrada) especificando um vetor no espaço. No entanto, as tendências devem ser usadas com cuidado quando a correlação não é boa (pelo menos no intervalo de 0.3-0.5) que é provavelmente um valor débil para ser estatisticamente válido.
- *Shift scale*: Usada para escalar e mudar os dados de tal forma que a média seja igual a 0 (zero), e o desvio padrão 1 (um). Deve ser aplicada depois das transformações espaciais como (*Cox-Box*, *Logarithmic* ou *Trend*). Esta transformação não muda a forma da distribuição, o histograma já deve ter a forma da distribuição normal antes de ser usada esta transformação.
- *Normal Score*: Força qualquer distribuição a ficar normalizada. A distribuição normal da data significa que a maioria das amostras em um conjunto de dados é próxima da média, enquanto poucas amostras tendem a ficar em um dos extremos.

A figura 4.32 mostra as transformações utilizadas dentro do processo *Data analysis* para a zona mineral e para uma das famílias das fraturas do domínio “3 & 4”.

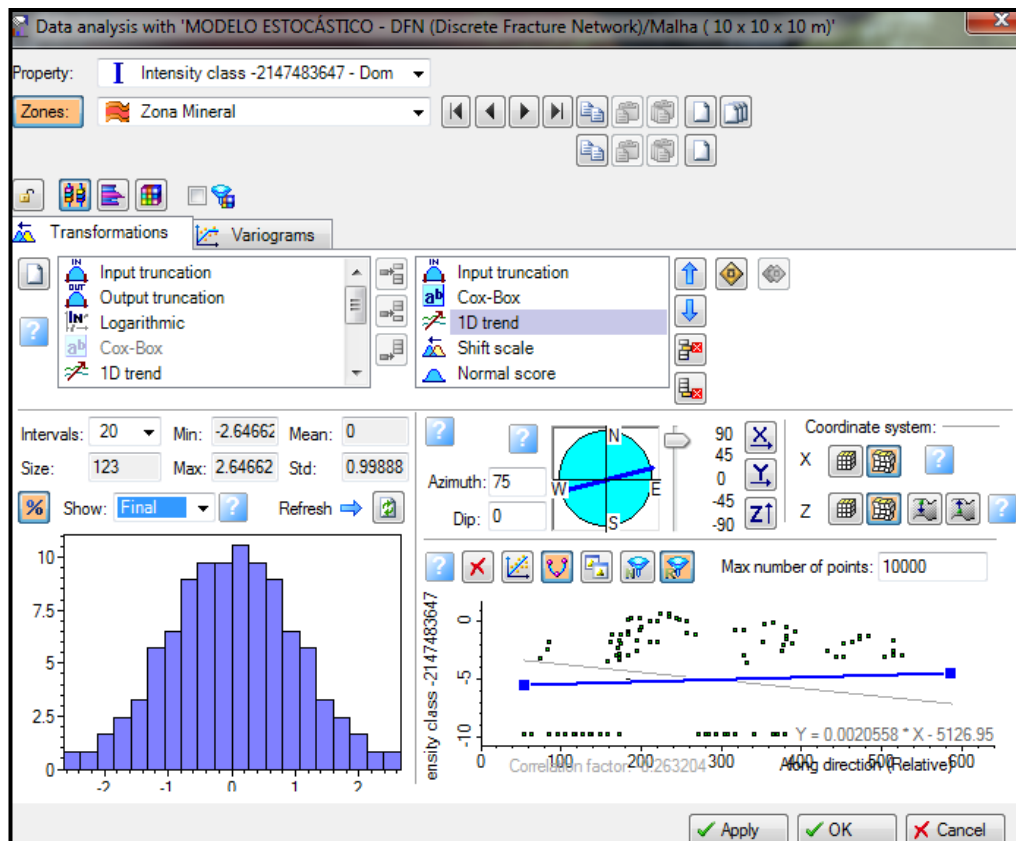


Figura 4.32 – Análise de dados da intensidade de fraturas para a zona mineral. Mostra-se o histograma final com a forma de uma distribuição normal.

Depois de realizar as transformações para que os dados sejam estacionários e com distribuição normal, pode-se realizar a análise dos variogramas. O variograma é uma função que descreve a variabilidade espacial de uma propriedade contínua ou descontínua. Está baseada no princípio que amostras com maior proximidade entre si terão maior probabilidade de ter maior correlação que amostras com menor proximidade entre elas, e que existe um ponto de mínima correlação no qual a distância não é mais importante.

Esta correlação espacial pode ser anisotrópica e pode ser necessária a geração de muitos variogramas orientados em diferentes direções para poder descrever a variação da propriedade espacialmente. O variograma clássico é calculado mediante a seguinte equação:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} (x_i - y_i)^2$$

Onde:

- $(h)$ : valor do variograma.
- $N(h)$ : número de pares
- $x_i$  e  $y_i$ : valores das coordenadas  $x$  e  $y$  para o par  $i$

Na figura 4.33 se mostra o variograma típico com seus parâmetros. A continuação se descreve cada um deles.

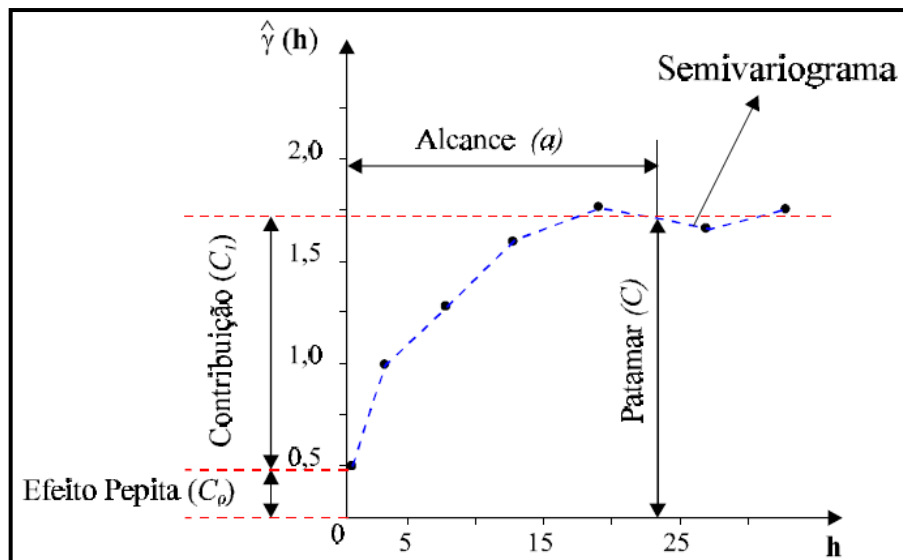


Figura 4.33 – Semivariograma mostrando os parâmetros (de Camargo, 1997)

- Alcance ( $a$ ): Distância dentro da qual existe uma correlação espacial entre as amostras. No caso da figura 4.33 o alcance seria de 25 m. significa que até os 25 metros as amostras apresentam correlação espacial.
- Patamar ( $C$ ): Valor do semivariograma respeito ao alcance ( $a$ ).
- Efeito pepita ( $C_0$ ): Duas amostras localizadas num mesmo ponto deveriam ter o mesmo valor, mas devido a erros de medição ou à descontinuidade intrínseca da propriedade de medição aparece este efeito pepita.
- Contribuição ( $C_1$ ): É a diferença entre o patamar ( $C$ ) e o efeito pepita ( $C_0$ ).

Para a análise dos dados se buscaram os variogramas com maior e menor alcance no plano  $xy$ , geralmente existe uma anisotropia geométrica, que tem a característica de apresentar um patamar similar para diferentes alcances. Na figura 4.34 se mostra a anisotropia geométrica, na qual o alcance é maior no eixo  $X'$  e menor no eixo  $Y'$ , significa que o grau de correlação da propriedade é maior no eixo  $X'$  e a correlação é menor no eixo  $Y'$ .



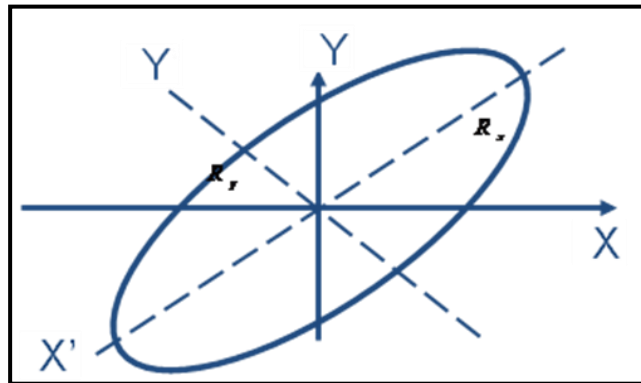


Figura 4.34 – Anisotropia geométrica.

O variograma para a maior direção se mostra na figura 4.35. Também se gerou o variograma vertical para ver a correlação espacial em função da profundidade que se apresenta na figura 4.36.

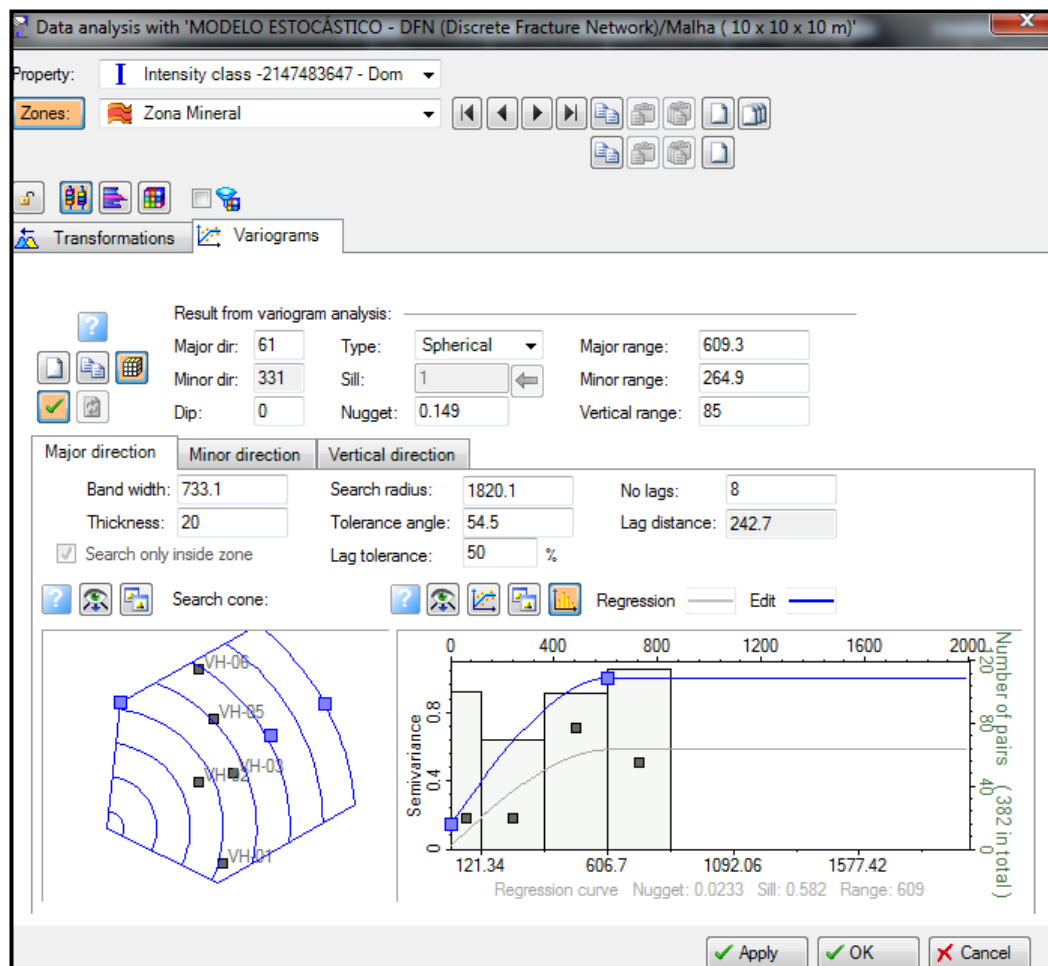


Figura 4.35 – Variograma da intensidade de fraturas na maior direção.

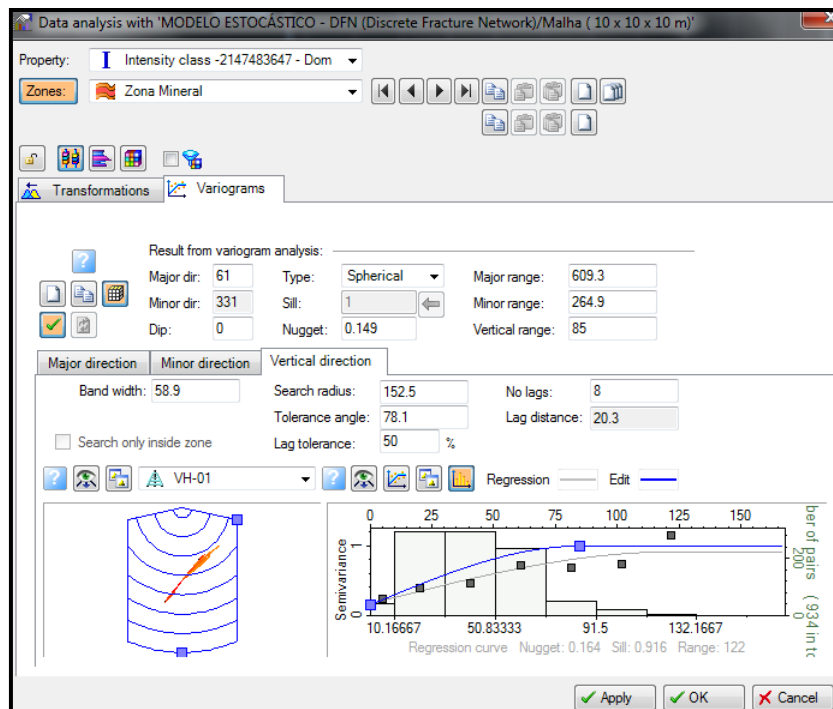


Figura 4.36 – Variograma da intensidade de fraturas na direção vertical.

No lado esquerdo da figura 4.35 pode se observar a distribuição dos furos de sondagem na zona de estudo com cor cinza e a janela de busca de cor azul. Esta janela de busca pode ser rotada, assim como aumentar ou diminuir os seus limites de tamanho e angular, com a finalidade de obter o maior valor de alcance. Uma vez obtida a direção de maior alcance, a direção de menor alcance se encontra ortogonalmente (Isto é realizado automaticamente pelo programa).

A continuação se procede com a interpolação ou simulação da data continua através do modelo geométrico (blocos gerados). Este processo é chamado *Petrophysical modeling* no Petrel, o processo conta com diversos algoritmos como a bem conhecida krigagem, média móvel, simulação de Gauss, etc.

O algoritmo utilizado foi a simulação sequencial de Gauss, que é um método estocástico de interpolação baseado na krigagem. Pode utilizar dados de entrada, distribuições de entrada, variogramas e tendências. Durante a simulação, valores altos e baixos serão gerados entre as localizações de dados de entrada com que se geraram os variogramas.

Na figura 4.37 se mostra os dados a janela para criar o modelo para a zona mineral utilizando a simulação sequencial de Gauss, os variogramas e transformações dos dados usadas foram as realizadas na etapa *Data Analysis* previamente vista. Na figura 4.38 se mostra o resultado da modelagem estocástica.

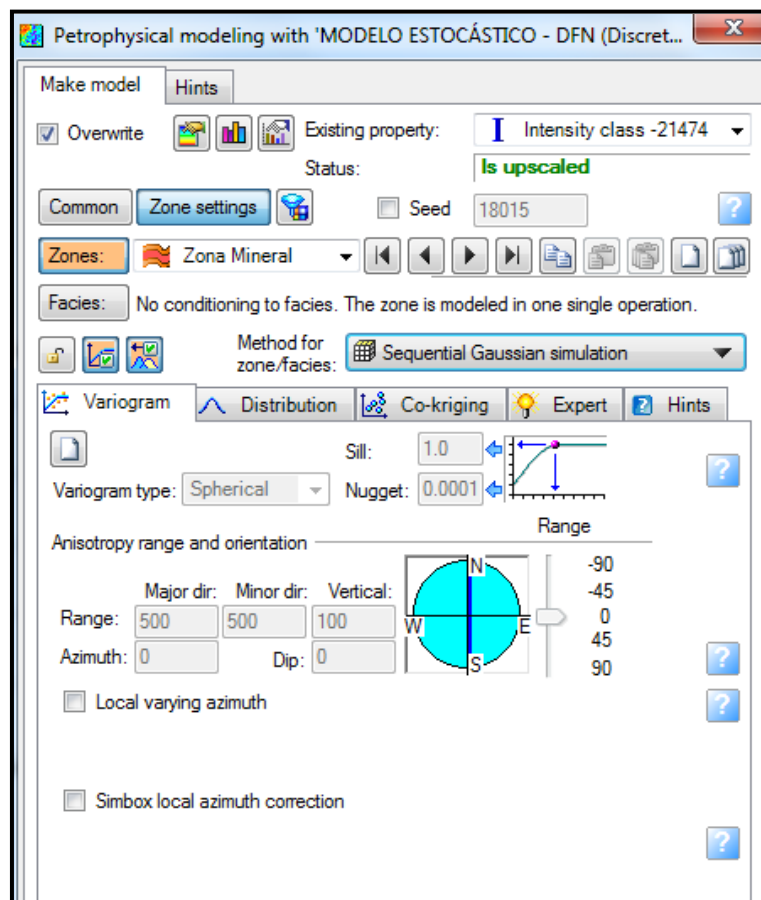


Figura 4.37 – Janela para realizar o Petrophysical modeling para a intensidade de fraturas ( $P_{32}$ ) na zona mineral para o domínio “3 & 4”

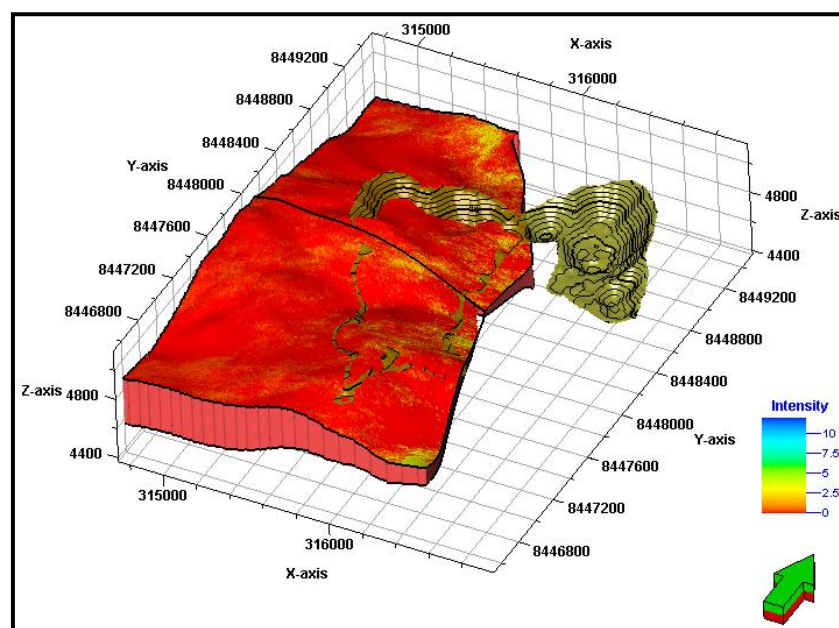


Figura 4.38 – Distribuição espacial estimada da intensidade de fratura ( $P_{32}$ )

#### 4.2.5.

##### **Criação da rede de fraturas**

A rede de fraturas é um grupo de planos que representam as fraturas. As fraturas do mesmo tipo (mesmas propriedades geométricas, mecânicas, etc.) são agrupadas em famílias de fraturas. Em um mesmo domínio podem existir mais de uma família de fraturas. No caso do domínio “3 & 4” o número de famílias definido foi de duas. Para cada uma delas se realizou os procedimentos anteriormente mencionados.

Para modelar as fraturas estocasticamente se usou a propriedade da grelha 3D e devido a que o método é estocástico, se requiere de um *seed point* obtido de um gerador de número aleatório. Se o *seed* é fixo, o programa gerará o mesmo resultado. Se não, o programa criará outra rede de fraturas igualmente provável, cumprindo com as distribuições de função de probabilidade das propriedades das fraturas. Os seguintes dados de entrada são necessários para criar a rede de fraturas.

##### 4.2.5.1.

##### **Distribuição**

Podem ser definidas numericamente ou como propriedades da grelha. No caso da presente dissertação a os dados de entrada para a distribuição das fraturas foi utilizando a intensidade de fraturas ( $P_{32}$ ) gerada anteriormente, o  $P_{32}$  é definido como a área da fratura / volume do bloco. Em cada bloco do modelo, O  $P_{32}$  dá uma estimativa do valor da área de fraturas dentro do bloco dividido pelo volume do bloco.

A propriedade de intensidade 3D pode ser filtrada para cada domínio e zona gerada anteriormente.

##### 4.2.5.2.

##### **Geometria das fraturas**

Na realidade as fraturas são consideradas como elipses, no Petrel a forma das fraturas é considerada como um polígono e se deve definir o número de lados do polígono e também um índice de alongação, que está definido como o comprimento horizontal do polígono dividido pelo comprimento vertical. Quanto

maior seja o número de lados, o tempo computacional será maior. O número de lados usados na dissertação foi de 6 e o índice de alongação de 1.

#### **4.2.5.3.**

##### **Comprimento da fratura**

O comprimento da fratura é um parâmetro difícil de determinar e geralmente é obtido do mapeamento estrutural, este parâmetro vai definir a distribuição do comprimento das fraturas no nosso modelo, pode ser descrito utilizando distribuição normal, exponencial, log-normal ou constante com um valor máximo e mínimo. As fraturas do nosso estudo foram modeladas utilizando uma distribuição exponencial com um valor médio de 5 m e um valor máximo de 15 m.

#### **4.2.5.4.**

##### **Orientação**

A orientação é definida dando o valor médio do mergulho e azimuth, assim como a concentração das fraturas. Estes dados são utilizados para utilizar o modelo de Fisher (O equivalente angular de uma distribuição normal quando a concentração se iguala ao desvio padrão).

Uma vez definidos os parâmetros, se cria a rede de fraturas para cada domínio e zona definida anteriormente. Na figura 4.39 e 4.40 se mostra as redes de fraturas para o domínio “3 & 4” para a família 1 e 2 encontradas nesse domínio.

Na figura 4.41 se mostra a rede das fraturas das outras zonas e domínios do depósito. Na figura 4.42 se apresenta a seção transversal mostrando a litologia e as estruturas encontradas.

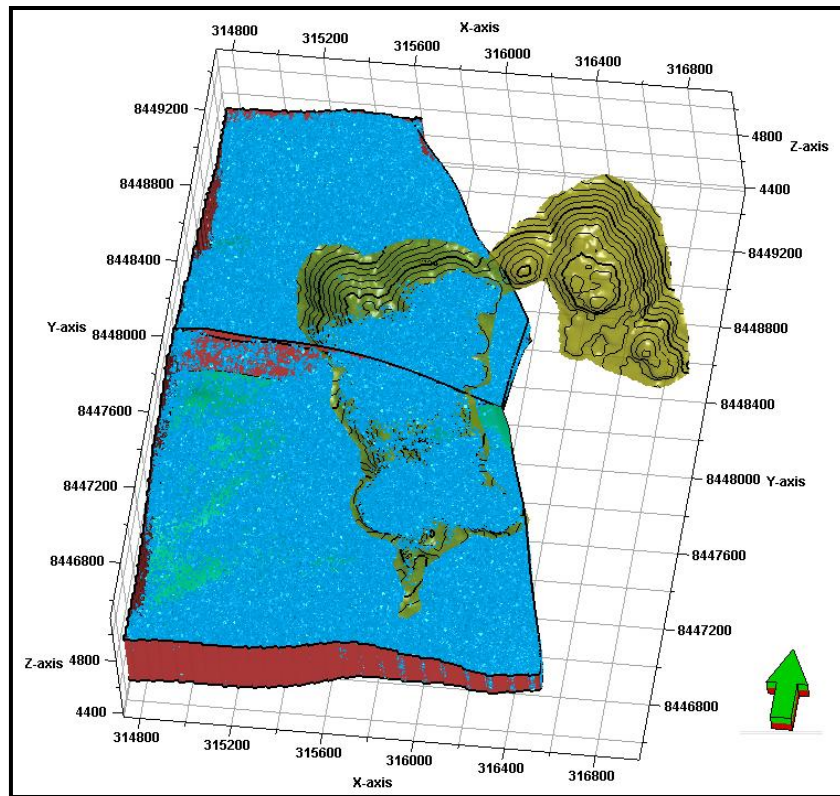


Figura 4.39 – Rede de fraturas da família (1) geradas para a zona mineral e nos domínios “3 & 4”.

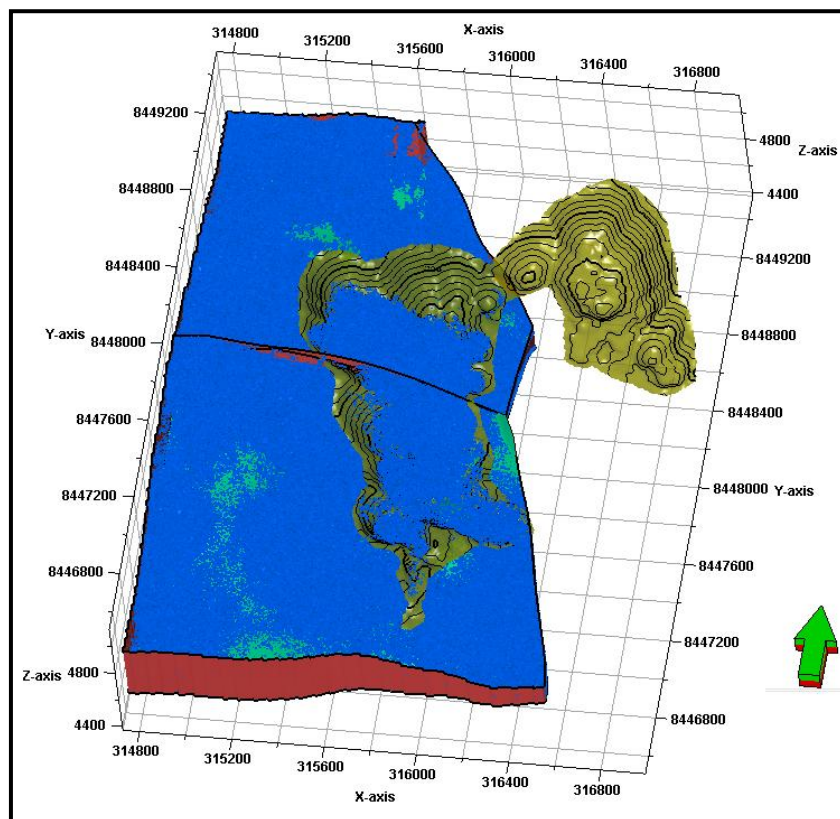


Figura 4.40 - Rede de fraturas da família (2) geradas para a zona mineral e nos domínios “3 & 4”.



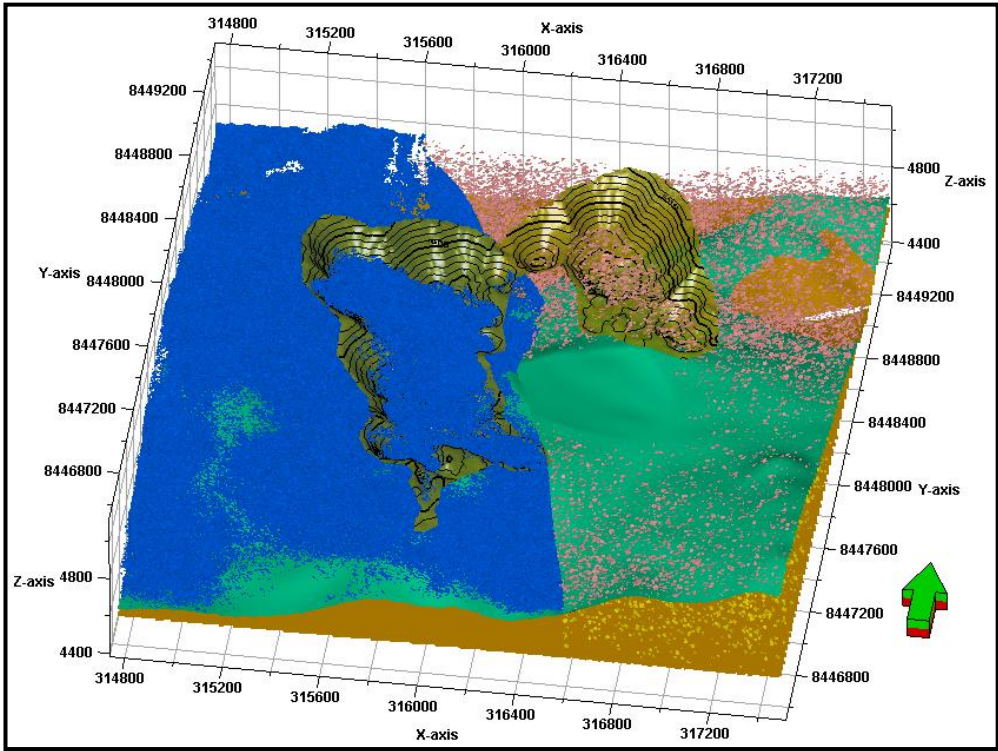


Figura 4.41 – Rede de fraturas geradas para os domínios “1 & 2” e “3 & 4” e as zonas Mineral e Pré-mineral.

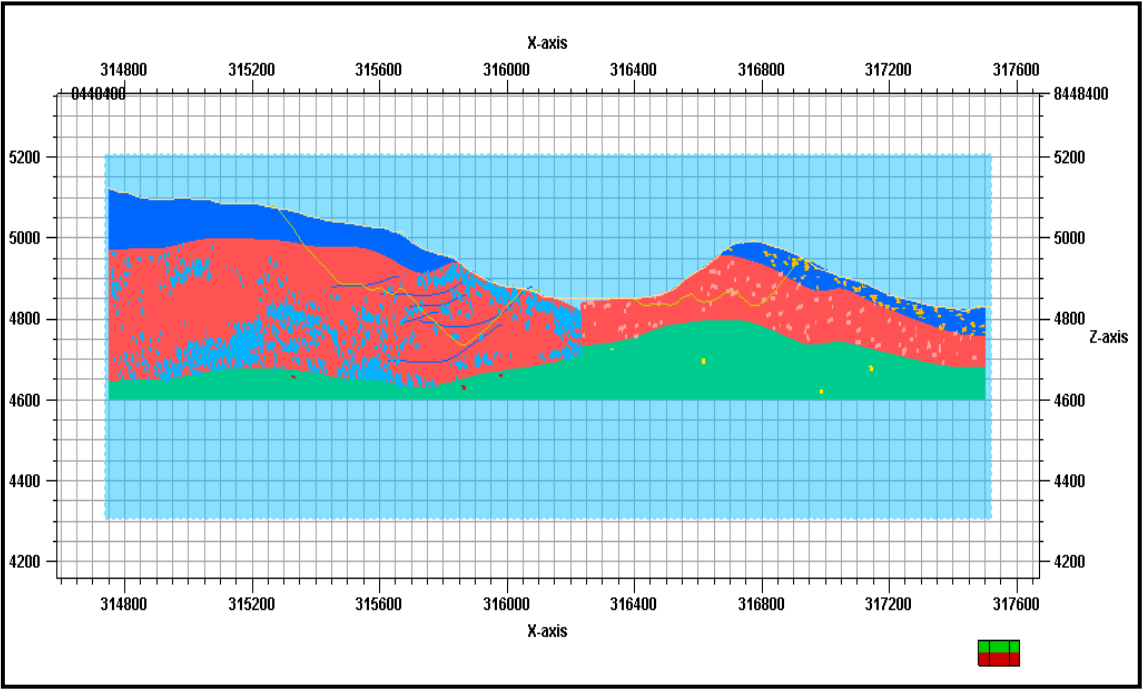


Figura 4.42 – Seção transversal Oeste - Este a utilizar para a análise de estabilidade de taludes.