



**SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS / FACULDADE DE GEOLOGIA
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM LAVRA E TECNOLOGIA MINERAL**

Rogério Aguirre Dias

Sistemas de Classificação Geomecânica

Classificações Geomecânicas aplicadas aos Domínios Estruturais na Rampa de Exploração e Túnel de Drenagem na Mina de Chuquicamata - Chile

Belém
2012

Rogério Aguirre Dias

Sistemas de Classificações Geomecânicas

Classificações Geomecânicas Aplicadas aos Domínios Estruturais na Rampa de Exploração e Túnel de Drenagem na Mina de Chuquicamata - Chile

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Especialização *Lato Sensu* do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará, como requisito parcial à obtenção de grau de Especialista em Pós *lato sensu* em Lavra e Tecnologia Mineral.

Belém
2012

RESUMO

Esta monografia apresenta os resultados obtidos na caracterização dos domínios estruturais e a classificação geomecânica dos maciços rochosos interceptados pela abertura da Rampa de Exploração e Túnel de Drenagem realizada na Mina de Chuquicamata no Chile pela Companhia Coldeco Norte. As descontinuidades geológicas (falhas, fraturas e juntas) foram tratadas com o uso do software *Dip's* da Rocscience versão 5.108 utilizado na confecção das redes estereográficas de Schmidt-Lambert para cada domínio geológico-estrutural individualizado, determinando o padrão da distribuição das estruturas descontínuas mapeadas. A partir dos dados estruturais foram definidos 8 (oito) domínios estruturais, sendo que cada domínio apresenta características distintas. Também foram realizadas as classificações geomecânicas do maciço rochoso interceptado pelas escavações subterrâneas, utilizando-se o sistema de classificação geomecânica de Barton, N.; 1974. O sistema-Q de Barton foi correlacionado ao sistema de classificação geomecânica de Bieniawski; 1989 (RMR) para a definição das condições geomecânicas e a qualidade do maciço rochoso interceptado ao longo das escavações subterrâneas realizadas. As informações dos valores obtidos na classificação geomecânica nos diferentes sistemas são apresentadas em 2-D e 3-D, obtendo-se uma melhor visualização espacial da qualidade do maciço escavado na implantação dessas estruturas estimando o suporte necessário a sua estabilização. O propósito dessas classificações foi estabelecer um paralelo entre os parâmetros metodológicos utilizados e os resultados obtidos - em que se observou uma grande dependência da compartimentação geomecânica ao modelo geológico. As representações dos resultados por meio de plantas e do modelo em 3D de dos valores de RMR e do Q-system se mostrou muito úteis para a localização das zonas de fraqueza (menor qualidade) dos maciços rochosos, favorecendo, sobremaneira, o planejamento da lavra do Projeto Mina Chuquicamata Subterrânea. O início das operações mineiras está prevista para 2018, em uma configuração macroblocos de lavra, com o uso do método de "*Block Caving*".

Palavras Chaves: Classificação geomecânica, Escavações Subterrâneas, Suportes.

ABSTRACT

This monograph presents the results obtained in the characterization of structural domains and the geomechanical classification of rock mass intercepted by means of an exploration ramp and drainage tunnel. This work was carried out in the Chuquicamata mine which is found along the Coldeco Norte Company in Chile. Geological discontinuities (faults, fractures and joints) were studied with the aid of Dip's 5.108 Rocscience software. This software was used in the drawing up of Schmidt-Lambert stereographic networks for every individual geological-structural domain. Subsequently, the distribution pattern of the discontinued structures that were mapped was determined. Based on the structural data, it was possible to define eight (8) structural domains, each having different characteristics. Additionally, an examination of the rock mass - intercepted by underground excavations - was also carried out for the purpose of geomechanical classification. The Barton, N. (1974) system of geomechanical classification was used. In order to define the geomechanical conditions as well as the quality of the rock mass which was intercepted along the subterranean excavations, Barton's Q-system was correlated to Bieniawski's geomechanical classification system (RMR, 1989). The values obtained regarding the geomechanical classification of these different systems are presented in 2D and 3D. These representations provide better spatial visualization of the quality of the mass excavated during the implementation of these structures, which were used for estimating the support necessary for stabilization. The purpose of establishing these classifications was to create a parallel between the methodological parameters applied and the results obtained. It was possible to observe a considerable dependency of the geomechanical partition on the geological model. These results, represented by mean of layouts and the 3D model of RMR and Q-system values, proved to be useful in locating zones of weakness (lower quality) in the rock mass. This largely favored the extraction planning executed by the Chuquicamata Underground Project, a mining operation scheduled to start in 2018. During this operation, the block caving method will be used to allow for bulk mining.

Keywords: Geomechanical classification, subterranean excavation, support.

“Não são as coisas que você não sabe que você terá problemas, são as coisas que você pensa que sabe, com certeza”.

Winston Churchill

Rogério Aguirre Dias

Sistemas de Classificações Geomecânicas

Classificações Geomecânicas Aplicadas aos Domínios Estruturais na Rampa de Exploração e Túnel de Drenagem na Mina de Chuquicamata - Chile

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Especialização *Lato Sensu* do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará, como requisito parcial à obtenção de grau de Especialista em Pós lato sensu em Lavra e Tecnologia Mineral.

Data da aprovação:...../...../.....

Conceito: _____

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Tony Carlos Dias da Costa
Universidade Federal do Pará

(Membro da banca)
(Titulação e área. Ex: Doutor em Geologia)
(Instituição Ex: Universidade Federal do Pará)

(Membro da banca)
(Titulação e área. Ex: Doutor em Geologia)
(Instituição Ex: Universidade Federal do Pará)

AGRADECIMENTOS

Agradeço às pessoas e entidades que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho. Meu reconhecimento:

- À **Toniolo, Busnello S.A** pelo incentivo e motivação no desenvolvimento deste trabalho; Aos diretores, colegas e colaboradores, o meu muito obrigado;
- **Prof. Dr. Tony Carlos Dias da Casta**, pela orientação, estímulo e apoio no desenvolvimento desta monografia e pela disponibilidade da ajuda requerida;
- Ao coordenador do LTM **Prof. Dr. Francisco de Assis Matos de Abreu**, exemplo de educador, motivador, pelo esforço e coragem na implantação do curso de Lavra e Tecnologia Mineral junto aos órgãos competentes.
- **Aos Professores do LTM** - Curso de Especialização em Lavra e Tecnologia Mineral, pelo incentivo e oportunidade de novos conhecimentos obtidos no decorrer do curso;
- À secretária do LTM, **Laís Corrêa Torres**, pelas incansáveis informações e esclarecimentos no decorrer do curso;
- **CODELCO NORTE** - pela disponibilidade dos dados coletados do mapeamento geológico-geotécnico da rampa de exploração e túnel de drenagem na mina de Chuquicamata-Chile;
- Aos grandes amigos **João Luis Oliveira Simões e Franco Falcão Penteado**, pelo apoio gráfico dado no desenvolvimento deste trabalho;
- A minha família, **Cláudia e Filipe**, que ao darem um novo significado a minha vida, proporcionaram-me coragem e incentivo para que eu prosseguisse na realização do meu sonho e souberam entender a minha ausência em momentos importantes de suas vidas, pelo apoio incondicional durante meu exercício acadêmico e profissional.

ANEXOS

LISTA DE FIGURAS

Figura 03- Plano de Exploração da Mina de Chuquicamata-Chile

Figura 16- Unidade Geológico-Geotécnica do Jazimento de Chuquicamata-Chile

Figura 20 – Domínio Estrutural do Jazimento de Chuquicamata-Chile

Figura 75- Planta de locação da Rampa de Exploração e Túnel e Drenagem

Figura 78- Distribuição das Classes Geomecânica, segundo Barton, N. 1974

Figura 79- Distribuição das Classes Geomecânica, segundo Bieniawski, 1989

Figura 80- Modelagem Geomecânica 3D da Rampa de exploração e Túnel de Drenagem, segundo Barton, N. *et al.*, 1974

Figura 81- Modelagem Geomecânica 3D da Rampa de exploração e Túnel de Drenagem, segundo RMR de Bieniawski, 1989

PRANCHAS

PRANCHA 01- Sistemas de Classificação Geomecânica

PRANCHA 02- Mapeamento Geológico-Geotécnico da Rampa de Exploração

PRANCHA 03- Mapeamento Geológico-Geotécnico do Túnel de Drenagem

TABELAS

Tabela 01- Domínio Estrutural Fortuna Norte

Tabela 02- Domínio Estrutural Fortuna Sul

Tabela 03- Domínio Estrutural Americana

Tabela 04- Domínio estrutural Balmaceda

Tabela 05- Domínio Estrutural Estanques Blancos

Tabela 06- Domínio Estrutural Noroeste

Tabela 07- Domínio Estrutural Mesabi

Tabela 08- Domínio Estrutural Zaragoza

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
2 Objetivos Gerais.....	17
2.1 Objetivos Específicos.....	17
3 METODOLOGIA	18
4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
4.1 Geologia do Jazimento Chuquicamata	20
4.2 Litologias.....	20
4.2.1 Granodiorito Leste.....	22
4.2.2 Unidade Metassedimentar.....	22
4.2.3 Granodiorito Elena.....	23
4.2.4 Granodiorito Fortuna (Fiesta).....	23
4.2.5 Complexo Intrusivo Chuquicamata (Chuqui).....	24
4.2.6 Pórfiro Oeste.....	25
4.2.7 Pórfiro Branco.....	25
4.2.8 Gravas (Cascalhos).....	25
4.3 Aspectos Estruturais do Jazimento	26
4.3.1 Falha Oeste.....	26
4.3.2 Sistema de Orientação N-NE (Sistema Mesabi).....	28
4.3.3 Zona de Deformação Leste.....	29
4.3.4 Falha Americana.....	30
4.3.5 Falha Zaragoza.....	30
4.3.6 Falha C-2.....	31
4.3.7 Sistema de Falhas Estanques Blancos.....	31
4.3.8 Falhas de Orientação N-NW.....	32

4.3.9 Alteração e Mineralização Hipogênica.....	35
5 MATERIAS E MÉTODOS	36
5.1 Caracterização Geotécnica do Jazimento Chuquicamata	36
5.2 Unidades Geotécnicas.....	36
5.2.1 Unidade Geotécnica Granodiorítica Fortuna (GDF).....	37
5.2.2 Unidade Geotécnica Zona de Cisalhamento Intenso (SZI).....	38
5.2.3 Unidade Geotécnica Zona de Cisalhamento Moderado (SZM).....	39
5.2.4 Unidade Geotécnica Rocha Quartzo Sericítica (RQS).....	40
5.2.5 Subunidade Geotécnica Quartzo maior que Sericita (Q>S).....	40
5.2.6 Subunidade Geotécnica Quartzo igual à Sericita (Q=S).....	41
5.2.7 Subunidade Geotécnica Quartzo menor que Sericita (Q<S).....	42
5.2.8 Unidade Geotécnica Pórfiro Leste Sericítico (PES).....	42
5.2.9 Unidade Geotécnica Pórfiro Leste Potássico (PEK).....	43
5.2.10 Unidade Geotécnica Pórfiro Leste Clorítico (PEC).....	44
5.2.11 Unidade Geotécnica Metassedimentar (MET).....	45
5.2.12 Unidade Geotécnica Granodiorítica Elena Sul (GES).....	45
5.2.13 Unidade Geotécnica Granodiorítica Lixiviado (LIX).....	46
5.2.14 Unidade Geotécnica Brecha entre Falha (BEF).....	47
6 Domínios Estruturais do Jazimento de Chuquicamata	47
6.1 Modelo Conceitual da Falha Oeste.....	47
6.2 Caracterização dos Domínios Estruturais.....	50
6.2.1 Domínio Estrutural Fortuna Norte.....	54
6.2.2 Domínio Estrutural Fortuna Sul.....	58
6.2.3 Domínio Estrutural Americana.....	61
6.2.4 Domínio Estrutural Balmaceda.....	64
6.2.5 Domínio Estrutural Estanques Blancos.....	67
6.2.6 Domínio Estrutural Noroeste.....	70

6.2.7 Domínio Estrutural Mesabi.....	73
6.2.8 Domínio Estrutural Zaragoza.....	76
7 Caracterização Geomecânica – Conceitos e Definições.....	79
7.1 Influência da Geometria nas Aberturas Subterrâneas.....	87
8 Classificação de Barton (Sistema Q).....	88
9 Classificação de Bieniawski (Sistema RMR).....	92
10 RESULTADOS.....	97
10.1 Classificação Geomecânica da Rampa de Exploração.....	97
10.2 Classificação Geomecânica do Túnel de Drenagem.....	100
10.3 Análise Estrutural das Descontinuidades.....	103
10.4 Controle das Instabilidades nas Escavações Subterrâneas.....	108
10.5 Suporte e Reforço nas Escavações.....	117
11 CONCLUSÃO.....	125
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	128

1 INTRODUÇÃO

O Depósito de Chuquicamata é conhecido desde século XIX, corresponde o principal depósito de cobre e molibdênio da Divisão da Codelco Norte, localizado na pré-cordilheira do Norte do Chile. A partir do ano 1915 se inicia a exploração na escala industrial dos óxidos, mediante a abertura da cava de Chuquicamata. Desde a década de 1930 se incorporou o beneficiamento de minerais mistos (óxidos e sulfetos de cobre).

Nos anos cinquenta, com a implantação da planta de flotação começa a exploração dos sulfetos de cobre. Atualmente, a mina de Chuquicamata tem produzido aproximadamente mais 34 milhões de tonelada de cobre fino.

O progressivo aprofundamento e expansão lateral do cava de Chuquicamata tem resultado num incremento da relação estéril /minério, que nos primeiros anos de exploração era muito baixa (por exemplo, 1 : 0,6 em 1952). A relação estéril/minério que se projeta para o futuro de exploração é economicamente inviável, sendo que a Mina de Chuquicamata, hoje, apresenta uma profundidade mais de 1.000 metros, conforme ilustra a figura abaixo:



Figura 01 - Perspectiva em **3D** da cava da Mina de Chuquicamata – Chile.



Figura 02 - Mapa de localização do Jazimento de Chuquicamata - Chile.

Entre os anos de 2003 e 2005 foram realizadas as escavações de aproximadamente **6.200 metros** de túneis, correspondendo a **Rampa de Exploração, Túnel de Drenagem e travessas** na mina de Chuquicamata, localizada no Deserto do Atacama, no Chile a **1.600 km** ao norte da capital chilena, Santiago.

As escavações subterrâneas se desenvolveram inicialmente na direção nordeste, no flanco leste da cava principal, a partir do emboque, localizado no **Banco M-3 da cava**, na cota de elevação 2.400 metros acima do nível no mar (a.n.m), onde foram desenvolvidos 540,95 metros, com orientação N30°E até atingir a elevação 2.318,86 metros acima do nível do mar (a.n.m).

A partir deste nível foi realizado o desenvolvimento da rampa com um raio de curvatura de forma descendente, com extensão de 1.012,94 metros, na direção S35°W até atingir a elevação 2.166,92 a.n.m. Sendo posteriormente, desenvolvidos 1.700,85 metros em rampa descendente na direção N20°E até atingir a cota de elevação 1.911,79 a.n.m.

Posteriormente, a partir da elevação 2.318,86 a.n.m foi desenvolvido o túnel de drenagem com uma inclinação de 15,79% de forma descendente, até atingir a cota de fundo 1.911,79 a.n.m.

Entre os anos 2004 e 2005, como parte do plano de drenagem e despressurização do talude Este da Mina de Chuquicamata, foi realizada a escavação de um túnel de drenagem com 2.577,90 metros comprimento, com uma seção de 18,08 m² (4,5 x 4,5). O túnel de drenagem teve início na estaca 540,59 metros da Rampa de Exploração principal, ou seja, na elevação 2.318,86 a.n.m., conforme demonstrado na figura 03.

A soma dos dois projetos permite estabelecer um total de 5.832,64 metros de escavação sem ter sido considerada as travessas aberta ao longo dos eixos de escavação, onde foi atingida a cota de fundo em 1.911,79 metros (a.n.m). O desenvolvimento das escavações, em sua maior parte, foi realizado na periferia Este do corpo mineralizado dos Sulfuros Profundos.

A mina Chuquicamata subterrânea é um projeto estrutural e estratégico que representa parte importante do futuro da Codelco Norte e consiste na transformação do maior *pit* a céu aberto do mundo em uma gigantesca operação subterrânea que permitirá a exploração de parte dos recursos minerais que se encontram abaixo da cava existente.

O projeto subterrâneo de Chuquicamata previsto é a exploração de macro blocos, pelo o método denominado de **“block caving”**, sendo propostos quatro níveis de produção, um túnel de acesso com numa rampa principal de 7.500 metros, cinco rampas de entrada de ar limpo e pontos de extração.

Este método se configura em uma lavra por grandes fatias ou blocos desmontados na base do corpo de minério, onde são criadas instabilidades geotécnicas dentro do próprio depósito. Tal método induz a degradação ou quebra do minério e do estéril por “*breakdown*” e, posteriormente, esse material é mobilizado do nível superior (base do corpo do minério) para um nível inferior da mina, onde o minério é carregado por um sistema de “*drawbells*”, conforme se mostra nas figuras abaixo.

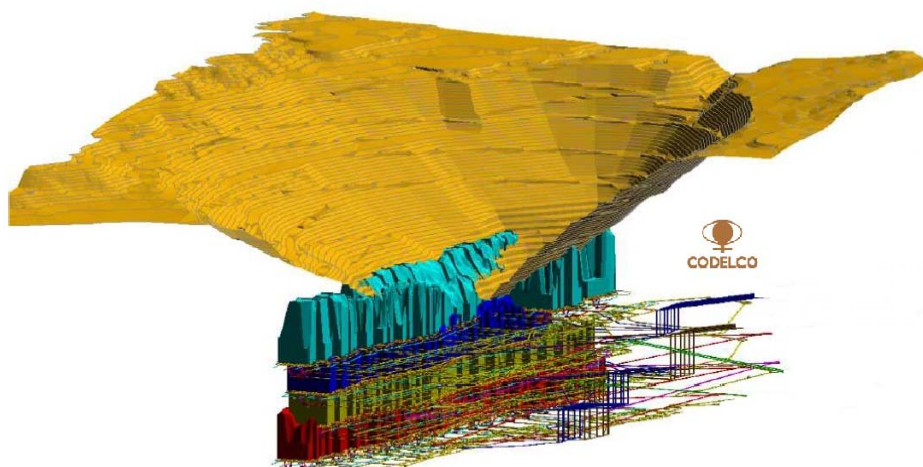


Figura 04 - Método de lavra “*block caving*”, mostrando os quadros macroblocos a serem lavrados.



Figura 05 - Método de lavra “*block caving*”, mostrando os *drawbells* e os acessos aos pontos de carregamento do minério desmontado nos níveis superiores do depósito.

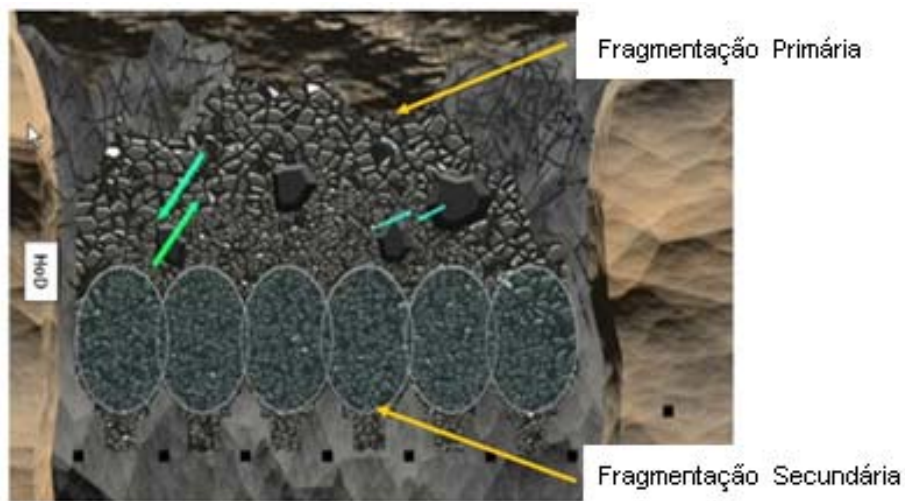


Figura 06 – Detalhe dos macroblocos desmontados na base do corpo do minério com fragmentações distintas causadas pelo desmonte e pela própria queda do material desmontado.

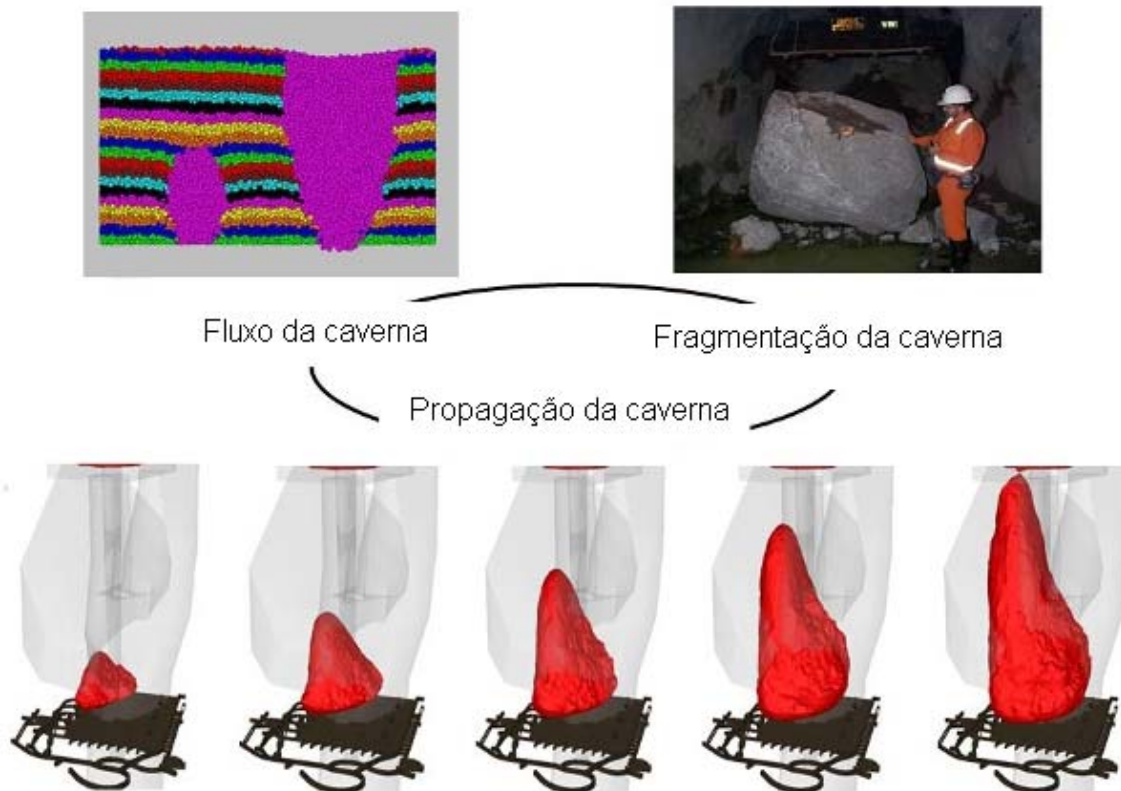


Figura 07 – Simulação técnica da previsão do comportamento da formação da caverna.

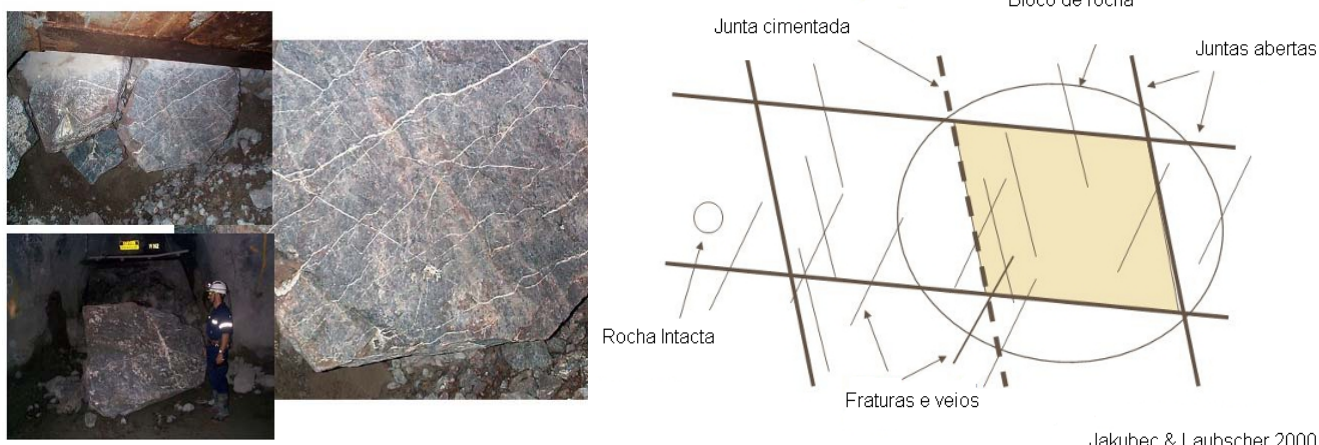


Figura 08 – Blocos de rocha é o primeiro bloco delimitado por juntas abertas ou cimentadas que irão formar os defeitos internos, os quais influenciam na resistência do material rochoso.

Esse método de lavra é favorecido pelo padrão natural das discontinuidades presentes na massa rochosa e pela sua baixa resistência mecânica, sendo assim, são criadas tensões ativas no entorno da área de lavra, devido à redistribuição das tensões “*in situ*” no entorno das aberturas. Essas aberturas levam o maciço a não suportar as tensões ativas rompendo-se, pois a resistência da rocha não é uma limitação do método de lavra, mas importante. As dimensões do corpo do minério são necessárias para que o método tenha um bom resultado e desempenho na fragmentação do minério.

Como o “*lay-out*” dos blocos de lavra depende do tamanho e da forma das aberturas, as características geomecânica do maciço são importantes nesta definição. Busca-se, a partir dos dados coletados pela equipe de geotecnia da Codelco Norte, **uma correlação entre as classificações geomecânicas aplicada ao maciço rochoso**, utilizando a classificação de Bieniawski **RMR (Rock Mass Rating; 1989)** e o **sistema Q** de Barton (1974), inicialmente utilizado na caracterização do maciço rochoso escavado na implantação da rampa de exploração e túnel de drenagem na Mina de Chuquicamata para o projeto futuro de exploração subterrânea em Chuquicamata.

2 Objetivos Gerais

Caracterizar as condições geotécnicas e estruturais do maciço rochoso, no qual se desenvolveu os **5.832 metros** de escavação subterrânea, totalizado pela ***Rampa de Exploração e Túnel de Drenagem***.

2.1 Objetivos Específicos

- Compilar o levantamento dos dados geológico-geotécnicos da Rampa de Exploração e do Túnel de Drenagem, disponibilizados pela Dirección de Geotecnia, Codelco Norte, aplicando o sistema de classificação geomecânica de Barton (Barton *et al.*, 1974), (*Tunneling Quality Index Q*) e correlacioná-la a classificação de Bieniawski, RMR (Rock Mass Rating., 1989).
- Analisar a distribuição das estruturas regionais e a sua relação com as condições de estabilidade das escavações subterrânea, de acordo com as características geológicas e geotécnicas da área em estudo.

3 METODOLOGIA

A metodologia de pesquisa utilizada foi a compilação e revisão dos dados existentes e o planilhamento dos mesmos para posterior tratamento e classificação dos dados pelo método do sistema Q de Barton (1974) e RMR de Bieniawski (Rock Mass Rating; 1989), para posterior uso de softwares específicos na representação dos dados do projeto.

A caracterização dos dados geotécnicos e geomecânicos do maciço rochoso foram realizadas em duas visitas técnicas a Santiago do Chile no ano de 2010 e 2011, onde os dados e relatórios de campo foram concedidos pela equipe de geotecnia da Codelco Norte, além da obtenção de relatórios e artigos publicados.

Os dados foram obtidos a partir do cadastramento de campo realizado pela equipe de geotecnia da Codelco Norte, sendo que os elementos e os parâmetros do maciço rochoso foram medidos a cada avanço da escavação de forma sistemática, a partir da “*scaline*” medida ao longo das paredes e no teto da escavação, além dos elementos estruturais presentes dentro de cada domínio petrotectônico no jazimento, ou seja, nas unidades litológicas distintas interceptadas pela própria escavação no subterrâneo. O levantamento geológico-geotécnico consistiu-se no mapeamento sistemático de todas as descontinuidades dentro de cada domínio homogêneo do maciço rochoso aflorante, de acordo com os parâmetros geotécnicos necessários para a classificação, por exemplo:

Resistência a compressão uniaxial, litologias, alteração, frequência das fraturas, grau de alteração, presença d’água, preenchimento das fraturas, orientação do eixo de escavação, zonas de falha, determinação do índice de qualidade da rocha RQD %, (Deere *et al.*, 1967), índice Q (Barton *et al.*, 1974) e o RMR de Bieniawski (*Rock Mass Rating*, 1989).

A partir do planilhamento dos dados do levantamento, os mesmos foram processados e tratados em softwares específicos, sendo utilizando o software DIP’s versão 5.108 da *Rocscience* para a geração da rede estereográfica de *Schmidt-Lambert* de igual área (1%), hemisfério inferior.

O modelamento da geometria das cunhas instáveis presentes na Rampa de Exploração será utilizado o software Unwedge versão 4.0 da *Rocscience* para a análise de pontos de instabilidade potenciais ao longo da escavação, para a definição dos tratamentos e suportes necessários a partir da caracterização geomecânica do maciço.

No reconhecimento geológico-geotécnico de uma escavação subterrânea sempre existirá certo grau de incerteza que deverá ser minimizados de acordo com as fases de estudo (estudo prévio, anteprojeto, projeto) e das características específicas de cada mina.

As incertezas geológicas e o risco geotécnico devem ser resolvidos com certa flexibilidade e sensibilidade para que se obtenha segurança e garantia no método de escavação a ser utilizado, evitando conseqüências econômicas desastrosas, devido à falta de um melhor conhecimento das características geomecânica do maciço rochoso a ser escavado ou de interpretações mal realizadas.

A importância da caracterização e da classificação geomecânica dos maciços rochosos é compreender os parâmetros intrínsecos de cada domínio geológico para evitar erros, pois a partir dos dados iniciais podem-se minimizar as incertezas geológicas e geotécnicas muitas vezes encontradas numa determinada mina.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 Geologia do jazimento Chuquicamata

Chuquicamata é um depósito alongado na direção Norte / Nordeste (NNE), com 4,5 km de comprimento e largura entorno de 300 a 900 metros no sentido leste-oeste, estende-se de sul para norte.

Apresenta uma coluna vertical mineralizada de 1.800 metros, sendo 900 metros abaixo do fundo da cava atual, dos quais aproximadamente 700 metros correspondem o corpo mineralizado do Sulfuros Profundos de Chuquicamata, com uma reserva medida da ordem de 4.200 milhões de toneladas, com um teor de cobre contido de 0,71% e 310 ppm de molibdênio, sendo que sua vida útil está projetada para 40 anos.

A descrição geológica do jazimento de Chuquicamata foi definida no ano de 2005 (Modelo geológico, além da estimativa do recurso do depósito Chuquicamata subterrâneo). A atualização geológica do Projeto de Transição da Mina a céu Aberto para a Mina Subterrânea no ano 2006, ambos foram os trabalhos realizados pelo departamento de geologia da Codelco Norte.

4.2 Litologias

As unidades litológicas que se encontram no jazimento Chuquicamata são: Granodiorito Leste, Grandiorito Elena Sul, Unidade Metassedimentar, Granodiorito Fortuna (Fiesta) que está intrudida por corpos irregulares de pórfiros aplíticos La Tetera e San Lorenzo, complexo intrusivo Chuquicamata, em que se diferenciam as unidades Pórfiro Leste, Pórfiro Oeste e Pórfiro Banco e finalmente as unidades Gravas (cascalhos) (Ossandón *et al.*, 2001 em Camus, 2003). As distribuições dessas unidades mostram-se na figura 09

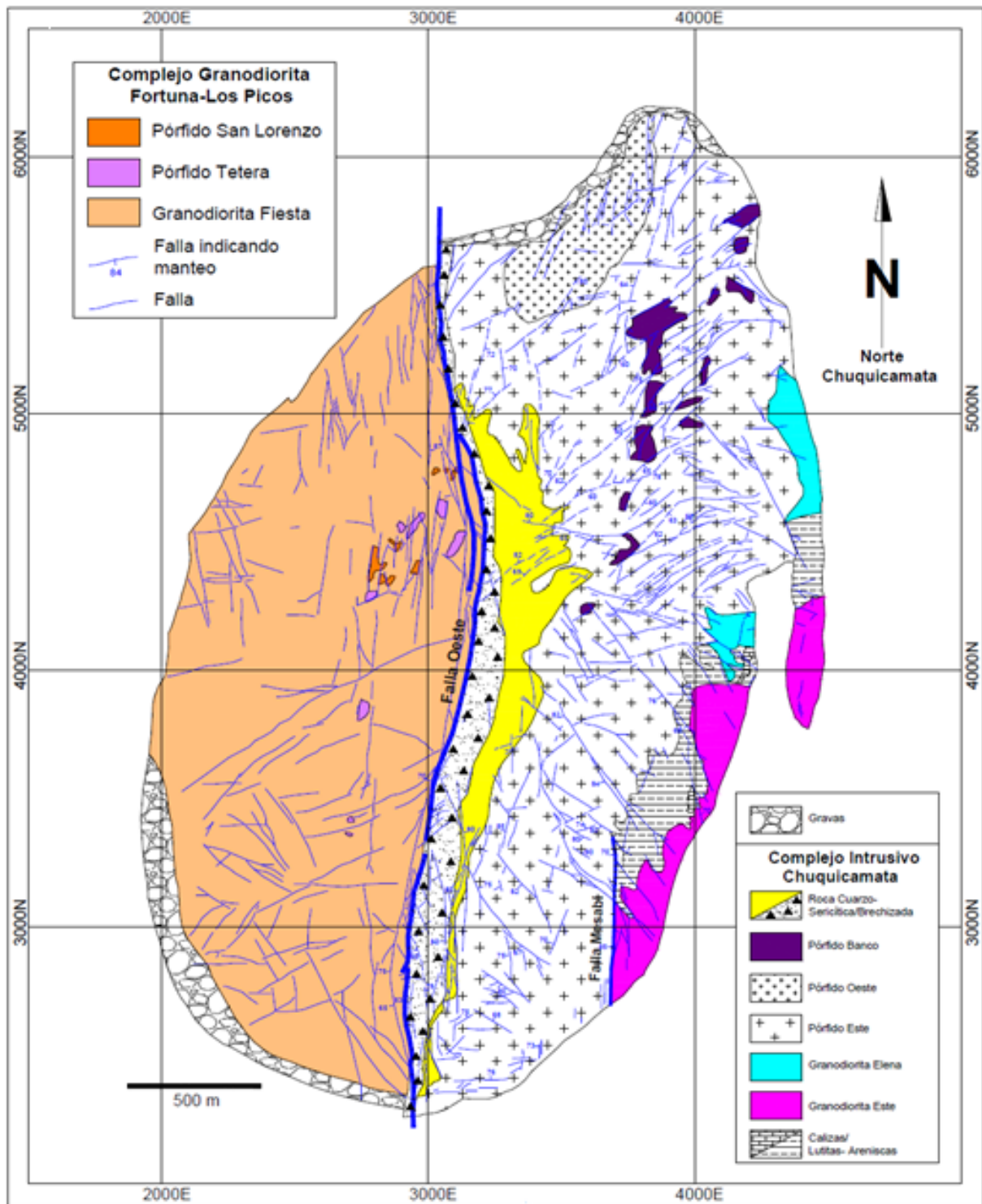


Figura 09 - Mapa geológico da Mina de Chuquicamata - Chile.

4.2.1 Granodiorito Leste

Essa litologia localiza-se na parte sul oriental do jazimento com uma disposição geral Norte-Sul. Na borda ocidental é limitada pela falha Mesabi e pela Zona de Deformação Leste que se coloca em contato com o Pórfiro Leste e pela Unidade Metassedimentar.

Petrograficamente, este maciço corresponde a um granodiorito a biotita e hornblenda, com textura hipidiomórfica equigranular, de grão médio e grosso. Para essa unidade se têm obtido idades a partir de datações radiométricas valores que permitam determinar a idade desse corpo intrusivo ao Triássico Médio. (Tomlinson *et al.*, 2001).

4.2.2 Unidade Metassedimentar

A unidade Metassedimentar se apresenta com uma disposição geral Norte - Nordeste, sendo compostos, principalmente, por lutitos, arenitos e calizas (rochas composta por calcita) associadas à Formação Quehuita (Hettangiano-Kimmeridigiano), que se encontram afetadas por metamorfismo de contato e dínamo-termal pela Zona de Deformação Leste. Os lutitos apresentam-se com tons cinza escuros a pretos, com mineralização de pirita e alto grau de fissibilidade.

Os arenitos apresentam tons claros. Devido à intensa deformação tectônica que afeta essa unidade não é possível reconhecer os diferentes níveis estratigráficos que constituem essa seqüência sedimentar. Esta unidade mostra-se deformada e dobrada, com o desenvolvimento local de faixas miloníticas e brechas tectônicas cloritizadas.

Essas rochas são afetadas por metamorfismo dínamo-termal e se apresentam estéreis, em algumas sondagens profundas tem-se seccionado esses metassedimentos com mineralizações do tipo *skarn* de calcopirita e magnetita, segundo informações obtidas da equipe de geologia da mina.

4.2.3 Granodiorito Elena

Esta unidade ocorre na margem oriental do jazimento, com uma disposição geral Norte-Sul. Este corpo encontra-se intrudido pelo Pórfiro Leste, onde o contato é litologicamente difuso e tem sido motivo de controvérsia geológica, devido à grande similaridade macroscópica existente entre o granodiorito Elena e o Pórfiro Este. Esta unidade se diferencia petrograficamente, pois o granodiorito Elena é equigranular de grão médio e não apresenta megacristais de feldspato potássico. Datações radiométricas indicam uma idade de cristalização de 37,7 Ma (Ballard, 2001). Esta idade junto às características petrográficas sugere que esse corpo intrusivo poderia ser o precursor do Pórfiro Chuqui, segundo informações do departamento de geologia da mina, 2006.

4.2.4 Granodiorito Fortuna (Fiesta)

Na porção Oeste, o Pórfiro Chuqui está truncado pela falha Oeste, quebrando o contato com a unidade estéril Granodiorítica Fortuna de idade de aproximadamente 39 Ma (Ballard, 2001), que forma parte do Complexo Granodiorítico Fortuna - Los Picos (Ossandón *et al.*, 2001). O Granodiorito Fortuna é composto por horblenda e biotita, com textura fanerítica, de grão médio a grosseiro apresenta variações locais.

No entorno da Falha Oeste, esta unidade está afetada por forte brechação por cisalhamento dúctil-rúptil, com abundantes veios de calcita e hematita. Os minerais máficos estão geralmente cloritizados, com uma alteração de baixa intensidade não estão correlacionados aos eventos mineralizadores que ocorrem no Pórfiro Chuqui.

É possível reconhecer dentro desta unidade litológica a presença de apófises de intrusivos porfirídicos menores, que correspondem os denominados Pórfiro Dan Lorenzo e Pórfiro Aplítico Tetera.

4.2.5 Complexo Intrusivo Chuquicamata (Pórfiro Chuqui)

O depósito Chuquicamata está encaixado integralmente no Complexo Porfírico Chuquicamata (Pórfiro Chuqui), que se divide em três litotipos principais cuja composição geral é granodiorítica a monzodiorítica: **Pórfiro Leste, Pórfiro Banco e Pórfiro Oeste**, dos quais, o primeiro é o mais importante volumetricamente.

O complexo intrusivo Pórfiro Chuqui ocorre como um grande dique subvertical, limitado por importantes falhas que são: A falha Oeste, a falha Mesabi e da Zona de Deformação Leste e para Sul, este complexo intrusivo trunca e se acunha estruturalmente, até alcançar a forma de um pequeno dique com espessura de 30 a 40 metros de potência apoiado na falha Oeste.

O Pórfiro Leste é a principal unidade litológica do Pórfiro Chuqui, apresenta uma disposição geral Norte-Sul. Corresponde a um granodiorito a monzodiorito quartzoso a biotita, com textura fanerítica a incipiente porfírica, de grão médio. Apresenta esporadicamente mega-cristais centimétricos de feldspato potássico, com textura poiquilítica, com plagioclásio subédrico e escassas horblenda.

Como acessórios se reconhece magnetita, esfero e zircão. A idade de cristalização do Pórfiro Leste esta datada em 34 Ma (Ballard *et al.*, 2001). Esta unidade encontra-se afetada por alterações dos tipos clorítica, sericítica, potássica e quartzo-sericítica. Esta última alcança a maior intensidade obliterando totalmente a rocha, formando uma franja alongada Norte-Sul denominada Rocha Quartzo-Sericítica que se demonstra no mapa geológico figura 09.

Ao norte, o complexo intrusivo tem continuidade mais distante do depósito Chuquicamata, em globando o Projeto Chuqui Norte e o jazimento Radomiro Tomic, conforme pode ser observado na figura 10.

4.2.6 Pórfiro Oeste

Corresponde a uma unidade litológica diferenciada do Pórfiro Chuqui, se apresenta no extremo Norte do jazimento. Sua litologia corresponde um monzogranito, com textura porfirítica fina (Aracena, 1981). Sua mineralogia é formada por fenocristais de quartzo, feldspato e plagioclásio imersos numa matriz aplítica de quartzo e feldspato. Apresenta-se afetada por alteração potássica e com intensa lixiviação.

4.2.7 Pórfiro Banco

Esta unidade apresenta menor distribuição na área do Pórfiro Chuqui, sua disposição se caracteriza por ser filoneana, se coloca principalmente no setor Nordeste do jazimento, intrudindo-se no Pórfiro Leste. Sua composição é muito similar ao Pórfiro Leste, se distingue por apresentar plagioclásio em sua massa fundamental, sendo seu contato nítido e abrupto.

4.2.8 Gravas (Cascais)

Corresponde aos sedimentos quaternários semi a pouco consolidado, depósitos sobre a superfície de erosão desenvolvida sobre o Granodiorito Fortuna na porção Sudoeste (SW) da Mina Chuquicamata e sobre o Pórfiro Chuqui para o Nordeste (NE) da mesma.

Os clastos que formam esta unidade apresentam uma variedade de tamanhos e irregularidade de suas bordas, imerso a numa matriz areno-limonítica, onde localmente, se reconhece a presença de sulfato como material cimentante.

4.3 Aspectos Estruturais do Jazimento

As estruturas mais relevantes do jazimento de Chuquicamata de acordo com os estudos estruturais de Lindsay *et al.*, (1995); Reutter *et al.*,(1996) e Collado *et al.*, (2005) são descritos a seguir:

4.3.1 Falha Oeste

A Falha Oeste apresenta sua orientação Norte-Sul a Norte-Nordeste com caimento de 75° a 80° para oeste, que decresce levemente em profundidade, essa estrutura é a melhor reconhecida no depósito e é a mais sistemática e consistente interpretada no modelo geológico da mina.

No interior do depósito aparece, principalmente, como uma falha pós-mineralização, com deslocamento sinistral inverso e que limita abruptamente o jazimento por Oeste, truncando o Pórfiro Chuqui e colocando a mineralização em contato com o Granodiorito Fortuna estéril.

Há evidência, em sondagens profundas da simetria mineralógica, teor e de alteração, entre a borda Leste e Oeste do depósito, indicando que esta falha pós-mineralização não se aloja no eixo do depósito, mas que está deslocada para oeste do respectivo centro da mineralização hipogênica e, por tanto, a franja dissecada é perdida pelo deslocamento da falha seria muito menor.

Por outro lado a falha Oeste apresenta uma divergência angular com o eixo principal de alteração e mineralização do depósito, que é aproximadamente NE, no qual indicaria que eventos tardios controlam a mineralização (sericita/pirita/enargita) que seguem aproximadamente sua posição de trocas, dissecando e obliterando os eventos principais. (Collado *et al.*, 2005).

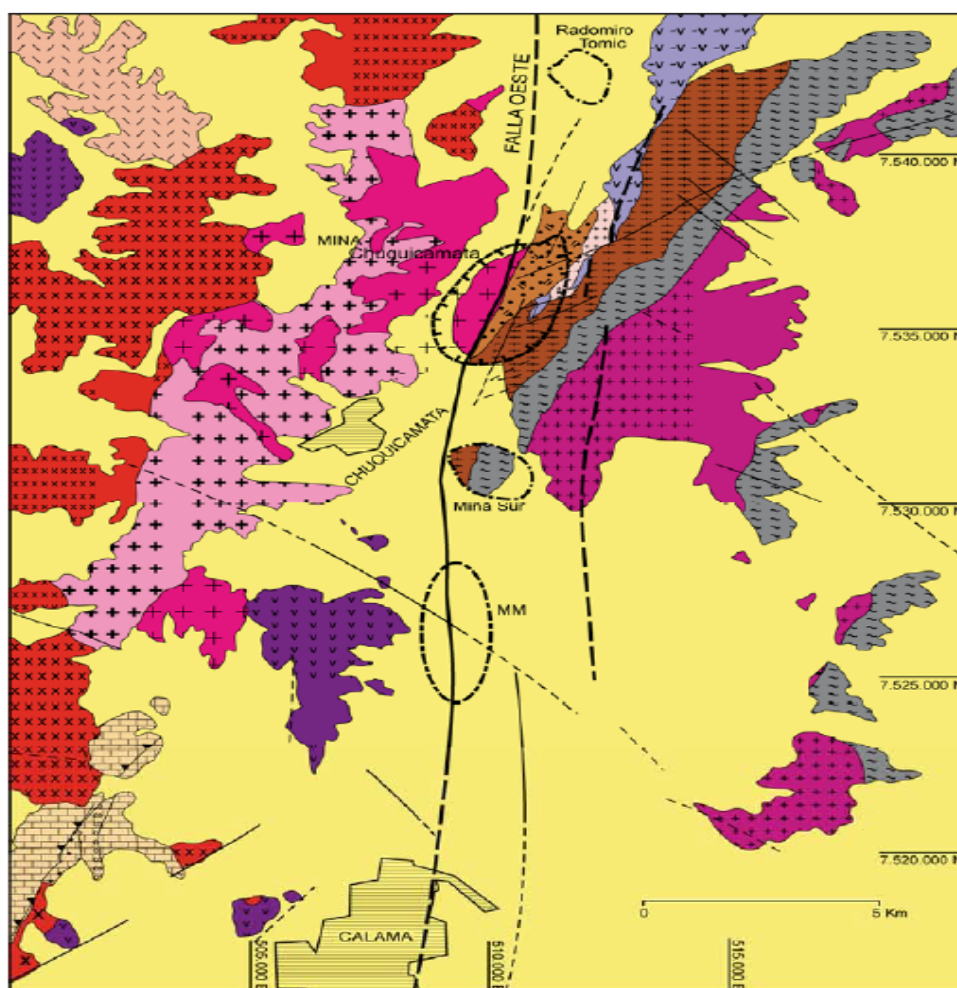


Figura 10 - Mapa geológico regional da Mina de Chuquicamata - Chile. (modificado de Chong & Pardo (1993), Lindsay (1997) e Becerra (2001)).

A falha Oeste constitui um segmento norte do sistema de falha Domeyko e é conhecida por sua exposição na cava de Chuquicamata; Corresponde a uma estrutura regional, constituída por um arranjo de falhas transcorrentes e inversas paralelas ao arco magmático, de provável idade cenozóica (Ossandón *et al.*, 2001).

Esta estrutura se estende por vários quilômetros ao norte do Chile e apresenta um “comportamento dinâmico segmentado”, ou seja, os movimentos dependem da posição geográfica e do contexto geológico local. Os jazimentos do distrito Chuquicamata estão distribuídos ao longo desta grande estrutura.

Evidências de atividade transcorrente N-S desta falha existem ao norte de los Cerros de Paqui, correspondem a um desenvolvimento de falhas de direção Norte - Nordeste, não se conecta diretamente, os indicadores cinemáticos de cisalhamento mostram-se uma movimentação dextral (Tomlinson e Blanco, 1997).

O alojamento dos pórfiros, os eventos de alteração e mineralização do jazimento apresentam um forte controle estrutural dentro da mina, esta estrutura (falha Oeste) é a mais importante, em função de suas características, tanto a nível regional como local.

4.3.2 Sistema de Orientação N-NE (Sistema Mesabi)

Neste sistema inclui-se o grupo da Zona de Deformação Leste associada à falha Mesabi, falha Americana, falha C-2 e a falha Zaragoza. Estes conjuntos de estruturas estão ligados inicialmente à evolução do depósito e, provavelmente, controlaram o alojamento do Pórfiro Chuqui e de suas etapas iniciais de mineralização, que são relevantes na quantidade do aporte de cobre e molibdênio presentes no depósito.

Este sistema corresponde a um conjunto de falhas mais antigas do jazimento formada no contato entre os pórfiros Chuquicamata e o granodiorito Elena, com direção N-NE e com um ângulo de caimento para W e NW. É constituída por bandas de cisalhamento, composta por milonitos, cataclasitos e brechas de falhas recristalizadas, com espessuras variadas, em função do alto grau de deformação sofrido pelo protólito.

Rojas e Lindsay, 1997; Lindsay, 1997; Faunes *et al.*, 2005, esses autores atribuem um forte controle estrutural no posicionamento do Complexo Intrusivo Chuquicamata, assim como os subseqüente eventos de alteração hidrotermal sofridos pelo mesmo.

Também se evidencia movimentos transcorrentes dextral e encurvado a oeste da falha Portezuelo, estando relacionados à falha Oeste com os eventos tardios na evolução do jazimento Chuquicamata.

Outras falhas dentro do jazimento são identificadas, por exemplo, falha Americana, falha Zaragoza, falha C-2, falha Estanques Blancos, falha Balmaceda, falha Portezuelo e Domínios de falhas NW, cuja gênese e desenvolvimento estariam ligados à falha Oeste e a falha Mesabi. Neste caso essas estruturas estão associadas a uma bacia de “*pull-apart*” e também as fraturas do tipo Riedel. Esta interpretação está embasada nos esforços sofridos no Eoceno-Oligoceno, segundo Ossandón *et al.*, 2001, entre outros autores, conforme a figura abaixo.

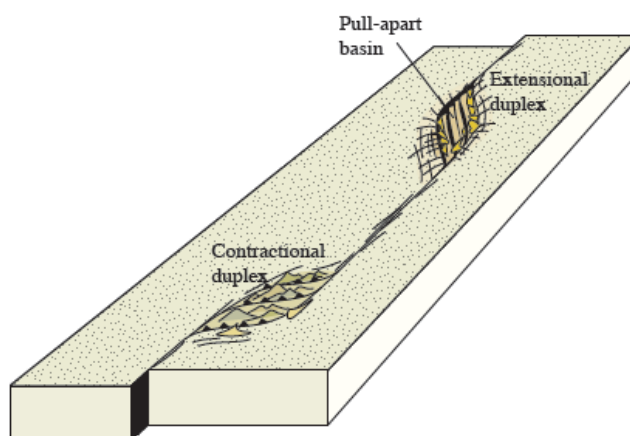


Figura 11 - Modelo estrutural de duplexes extensionais (transtracionais) e contracional (transpressionais) desenvolvidos em curvas em um sistema de falhas de rejeito direcional

4.3.3 Zona de Deformação Leste

A zona de deformação Leste (ZDE) tem sido reconhecida e interpretada de maneira contínua no setor central Leste do depósito, conformando o contato entre o Pórfiro Chuqui e o Granodiorito Elena. Esta zona é composta por rochas de falhas coesivas como: milonitos, cataclasitos e brechas de falha recristalizada, de potência variável, com mantos abruptos para Oeste (+/- 80°).

As brechas contêm fragmentos de todos os tipos litológicos intrusivos e quartzosos que se encaixam em uma matriz recristalizada de clorita, feldspato e magnetita. Este tipo de material é próprio de um protólito ígneo.

No material brechóide se observa uma sobreposição de uma fábrica dúctil e penetrativas de milonitos, ambas litologias estão às vezes cortadas por veios e pequenas brechas tardias de specularita, com esporádicas ocorrências de piritas e calcopiritas. Essas características ocorrem similarmente numa extensão para o Sul na zona de contato da unidade Metassedimentar com o Pórfiro Chuqui na margem Nordeste do depósito. As relações geológicas de contato observadas entre a milonitização, brechação, fragmentação de quartzo e o Pórfiro Chuqui permitem inferir que esta zona de deformação existia antes da intrusão do Pórfiro e teve reativações posteriores ao seu alojamento, deformando-se nas etapas intraminerais e confinando o sistema hidrotermal para Leste (Dirección de geologia, 2006).

4.3.4 Falha Americana

A falha Americana é outra estrutura importante do sistema N-NE. Trata-se de uma estrutura subvertical, cuja maior expressão está na parte Sul do jazimento e se manifesta como uma zona de brecha que fratura e tectoniza, principalmente, os veios de quartzo-molibdênio. Esta zona estrutural controla fortemente o alojamento dos pulsos de alteração quartzo-sericita tardia.

4.3.5 Falha Zaragoza

A falha Zaragoza localiza-se no extremo Norte do depósito, com direção Norte e Nordeste, com inclinação subvertical pode-se considerar de alguma maneira similar a falha Americana no setor Sul. Entre o sistema Zaragoza e a falha Oeste, ocorre o Pórfiro Chuqui, com seus máficos cloritizados e escassas mineralizações de muito baixo teor de cobre, mostrando em seguida o fechamento e a simetria original do depósito no seu extremo NW.

4.3.6 Falha C-2

O sistema de falha C-2 constitui numa estrutura importante no controle da mineralização primária e secundária, incluindo zonas de oxidação de cobre, no extremo Norte da Mina Chuquicamata, onde estas falhas apresentam uma direção Norte-Sul e Norte / Nordeste, onde adquirem maior penetratividade local.

Com esse sistema se evidencia que o conjunto dessa falha também é antigo na evolução do depósito mineral participando do controle e alojamento da mineralização, no entanto ocorreram reativações subseqüentes ao episódio.

4.3.7 Sistema de falhas Estanques Blancos

Este sistema corresponde a falhas de orientação geral Nordeste / subvertical, que se apresenta ao longo de todo o depósito. Este sistema mostra-se penetrativo na parte Central-Norte do depósito, onde se localiza a falha Estanques Blancos (Domínio Estanques Blancos de Lindsay *et al.*, 1995), esta falha é reconhecida pelo seu deslocamento dextral a nordeste da cava da mina.

No setor Central-Norte do jazimento, o sistema Estanque Blancos exerce um importante controle estrutural sobre a alteração e a mineralização, que se reflete na orientação das diversas zonas de alteração apresentando uma notável anisotropia de veios e vênulas mineralizadas, o que indica que este sistema estrutural é antigo e está presente na evolução do depósito. Paralelamente, numerosas evidências procedem de estudo estruturais anteriores, os quais citam que a reativação pós-mineral, num sentido de movimento dextral.

O sistema Estanques Blancos tem um comportamento normal importante, com o bloco Sul de cada falha do sistema descendo com relação ao bloco Norte, de tal forma que desde o Norte de Chuquicamata para a bacia do rio Loa, se verifica um escalonamento estrutural progressivo.

Este fato explicaria algumas diferenças na mineralização e alteração existente entre o extremo Norte e Sul de Chuquicamata, assim como a preservação do jazimento **MMH** (Mansa Mina) de alteração argílica avançada, mas tardia e superficial, em contraste com a Mina Radomiro Tomic, que representa outro extremo, mais profundo, com escassa alteração fílica e a total ausência de associações argílicas avançadas (Dirección de Geología, 2006).

4.3.8 Falhas de orientação N-NW

Este conjunto de falhas com orientação Norte - Noroeste subverticais, a qual se apresenta em todo o depósito. Este padrão estrutural ocorre com alta frequência no setor Central e Sul do depósito (Domínio Noroeste de Lindsay *et al.*, 1995).

Nos estudos estruturais realizados dentro do jazimento evidenciam que o sistema N-NW é um sistema pós-mineral e tardio na evolução do depósito, devido à ocorrência de deslocamento sinistral métricos que cortam os veios mineralizados, as falhas sinistrais N-S e os contatos geológicos em uma forma geral. Tem-se evidenciado que as falhas N-NW cortam as falhas Oeste, deslocando-a em alguns metros no sentido sinistral.

No interior do jazimento existem inúmeros veios e vênulas mineralizadas, das diferentes etapas evolutivas do jazimento, embora tardias (pirita-enargita), que são controladas por essas estruturas.

Por tanto, pode-se supor que esse conjunto de estruturas já existia e provavelmente foram reativadas durante a formação do depósito, constituindo um conjunto conjugado do sistema Estanques Blancos, sendo posteriormente, reativados em etapa pós-mineral e/ou recente. Conforme figuras 12 e 13.



Figura 12 – Configuração estrutural da falha Oeste e Mesabi a nível regional na mina de Chuquicamata - Chile.

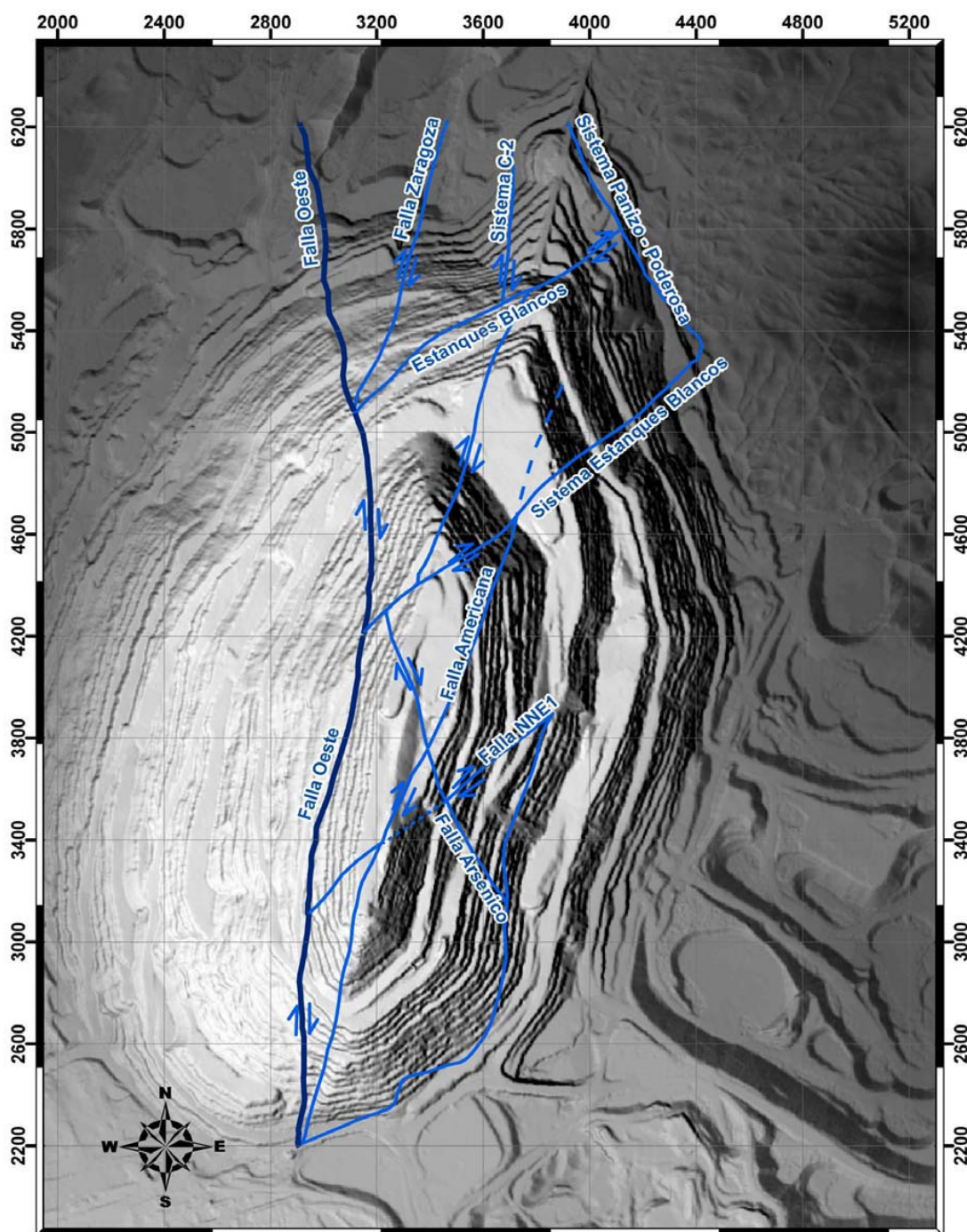


Figura 13 - Principais falhas dentro da cava da Mina de Chuquicamata (Collado *et al.*, 2005, modifica).

4.3.9 Alteração e Mineralização Hipogênica

A grande parte a mineralização de cobre foi introduzida pelo sistema hidrotermal de Chuquicamata como componentes de associações de alterações iniciais. Sendo posteriormente obliteradas pelas alterações tardias.

Os eventos de alteração hipogênica têm sido dadas temporalmente, as iniciais de baixo conteúdo de pirita e aquelas tardias que aportam associações de minério com abundante conteúdo de pirita, conforme a figura 14.

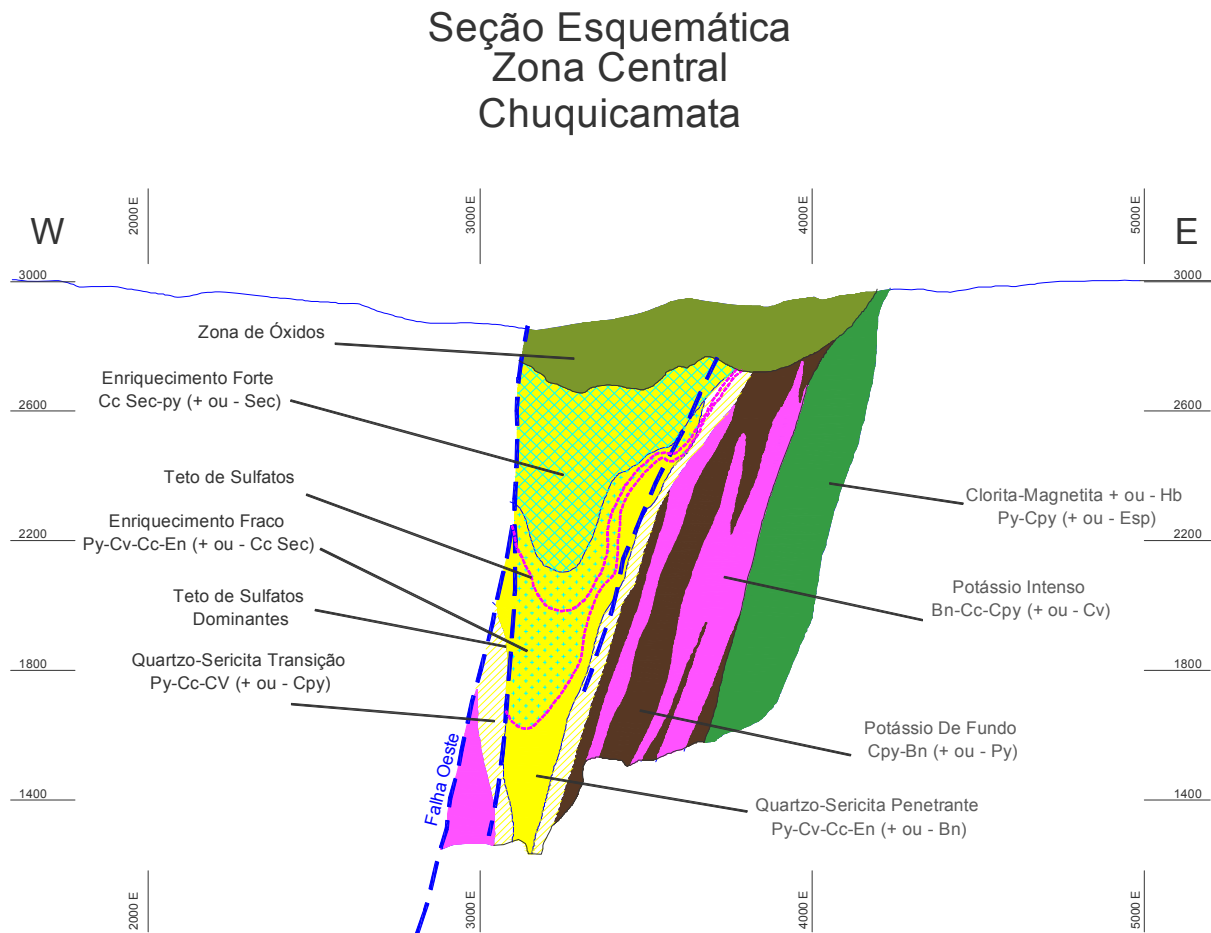


Figura 14 - Perfil esquemático das unidades de alteração, mineralização e zonas metalogênica do jazimento de Chuquicamata. (Dirección de Geología, Codelco-Norte).

5 MATERIAIS E MÉTODOS

5.1 Caracterização Geotécnica do Jazimento Chuquicamata

O maciço rochoso que configura o jazimento é composto de unidades de rocha com características geológicas e geotécnicas mais ou menos homogêneas, as que se encontram classificadas e caracterizadas em **Unidades Geotécnicas** que cobrem todo o depósito. O jazimento também se encontra dividido em **Domínios Estruturais**, definidos em função da distribuição, orientação e influência das estruturas geológicas na estabilidade do maciço rochoso. Descrevem-se essas unidades geotécnicas e os domínios estruturais definidos na mina de Chuquicamata pelo Departamento de Geotecnia da Codelco Norte, segundo o Modelamento Geotécnico proposto para essa Mina.

5.2 Unidades Geotécnicas

A partir do ano 1990, o departamento de geotecnia da Codelco Norte realizou a caracterização do jazimento de Chuquicamata sobre a base do modelamento das Unidades Geotécnicas Básicas, que consiste em unir corpos com características geotécnicas relativamente homogêneas e que é, em geral, o resultado da sobreposição das unidades de alteração sobre as unidades litológicas.

De forma sistemática a partir do resultado dos levantamentos geotécnicos dos taludes expostos na cava da mina, sondagens e trabalhos subterrâneos se têm integrado tais informações para modelar os corpos geológicos com suas características intrínsecas. De acordo com o modelo das Unidades Geotécnicas Básicas, realizado em 2005 pela equipe de geotecnia da Codelco Norte, o jazimento se encontra definido nas seguintes Unidades Geotécnicas, como mostra o modelo de bloco isométrico da cava de Chuquicamata, conforme a figura 15.

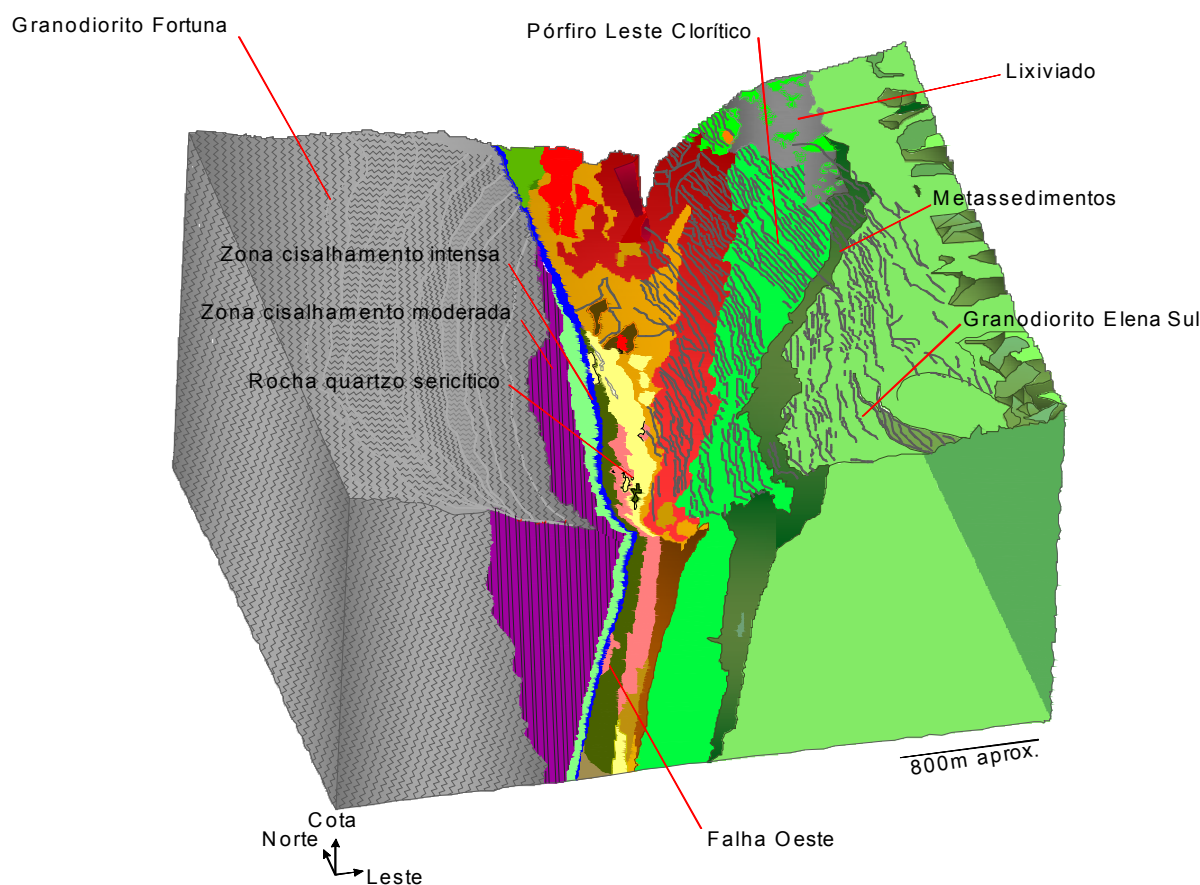


Figura 15 - Modelo de bloco isométrico da cava atual da mina de Chuquicamata, visada parte norte, mostrando as Unidades Geotécnicas Básicas, segundo o departamento de geotecnia da Codelco-Norte, 2005.

5.2.1 Unidade Geotécnica Granodiorítica Fortuna (GDF)

A unidade geotécnica Granodiorítica Fortuna é composta exclusivamente pela unidade litológica Fortuna, a qual se descreve como uma rocha com textura equigranular de grão médio a grosso, com abundante horblenda que alcançam tamanhos entre 4 a 12 mm. Esta unidade é a de maior expressão superficial de todas as unidades da mina, distribuem-se completamente no talude Oeste, especificamente desde a parte média para Oeste, em toda a sua extensão longitudinal, sendo o limite ocidental do jazimento.

O maciço rochoso desta unidade se caracteriza por ser muito resistente a compressão uniaxial (estimada em 100 MPa), com fraturas predominantemente irregulares, onde as fraturas encontram-se seladas e/ou levemente aberta (<1mm), gerando blocos de tamanho variado entre 10 a 2 cm de aresta, com uma média de 30 cm, dos quais se encontram geralmente retrabalhados. De acordo com o padrão de fraturas se determina o RQD (*Rock Quality Design*), o índice de qualidade da rocha entre 50% a 75%. Segundo Deere, 1967, esse maciço é classificado como regular.

5.2.2 Unidade Geotécnica Zona de Cisalhamento Intenso (ZCI)

Esta unidade faz a parte da zona de cisalhamento da falha Oeste e corresponde o setor de maior grau de deformação que sofreu o Granodiorito Fortuna, devido à intensa atividade tectônica desta falha. A deformação que afeta esta unidade, destrói praticamente toda a estrutura original do maciço rochoso, deixando o material com números planos de descontinuidades, os quais materializam a zona de falha, com biotitas orientadas e preenchimentos argilosos. Em estudos microscópicos realizados por Niemeyer (1999), indicam que esta unidade é composta por cataclasitos gerados por mecanismo deformacionais dúctil-rúptil.

Esta unidade geotécnica se distribui em superfície como uma franja alongada anexada ao traço ocidental da falha Oeste, limita-se pelas margens da cava ao sul. Em profundidade se interpreta baseado em informações de sondagens geotécnicas, como uma franja paralela à orientação da falha Oeste.

A composição do material é similar a uma brecha não coesiva, com alguns blocos menores que 10 cm de aresta imersos numa matriz argilosa aproximadamente em 15% do volume total da rocha. Esse material tem um comportamento do tipo solo, praticamente sem coesão, no que implica que em superfície ocorrem desprendimento e rupturas dos taludes da cava quando escavados.

Nos taludes da cava onde aflora esta **Unidade Zona de Cisalhamento Intensa** se caracteriza por apresentar uma baixa resistência a compressão uniaxial que varia de 5 a 25 MPa. No caso das fraturas, como se trata de um material argiloso tipo solo, se considera uma frequência de fraturas superior a 16 fraturas/metro. Neste sentido pode-se estimar o RQD < 50%, classificando-se como um material de classe ruim a muito ruim.

5.2.3 Unidade Geotécnica Zona de Cisalhamento Moderado (ZCM)

Esta unidade é parte da zona de cisalhamento fixada no traço ocidental da falha Oeste e corresponde ao setor com menor grau de deformação da estrutura como um todo. A rocha original corresponde ao Granodiorito Fortuna, que se encontra com a textura parcialmente destruída, devido aos eventos tectônicos. Os planos de cisalhamento mostram-se poliorientados, os quais se inter cruzam entre si, formando estruturas do tipo S-C. Estes planos se caracterizam por apresentar superfícies suaves ao tato definidas por mica. Segundo os estudos microscópicos realizados por Niemeyer (1999), as rochas desta unidade correspondem a cataclasitos.

Esta zona se distribui em superfície numa franja Norte-Sul com um halo externo ocidental da zona de cisalhamento intenso. O maciço rochoso desta unidade se caracteriza por ser moderadamente resistente a compressão uniaxial (estima-se entre 25 e 50 MPa).

As fraturas se apresentam em forma polidirecional com uma frequência que varia entre 1 a 3 fraturas/metro no setor mais competente e, 6 a 10 fraturas/metro nos setores com maior deformação. Estas fraturas geram blocos de tamanho variado entre 1,50 m a 0,05 m, com uma média estimada para blocos com aresta de 0,25 m, os quais se encontram pouco retrabalhados. Apresenta valores de RQD entre 50% e 70% (maciço ruim a regular).

5.2.4 Unidade Geotécnica Rocha Sericítica (RQS)

A unidade de Rocha Quartzo Sericita é resultado da sobreposição da unidade de alteração quartzo sericita dentro da unidade litológica Pórfiro Leste e, geologicamente, define-se como uma rocha fortemente alterada, com quartzo como mineral dominante e que se apresenta em forma de olhos cristalizados e vênulas polidirecionais, este é um agregado fino de sericita.

As informações obtidas das sondagens e das escavações subterrâneas feitas foram associadas ao mapeamento geológico de superfície desta unidade apresentando uma variabilidade muito importante em termos de qualidade geotécnica, existindo **três subunidades mapeáveis** com qualidade geotécnica distintas, associada à **porcentagem de sericita e quartzo**. Estas subunidades são as seguintes: Quartzo maior que Sericita (Q>S), Quartzo igual Sericita (Q=S) e Quartzo<Sericita (Q<S).

5.2.5 Subunidade Geotécnica Quartzo maior do que Sericita (Q>S)

Esta subunidade é representada por uma rocha com textura totalmente obliterada, produto de alteração quartzo sericita penetrante, em que a característica principal é o conteúdo de **quartzo sobre a sericita**, com uma porcentagem de quartzo maior que 60% da rocha.

Expõe-se como uma franja Norte-Sul, principalmente na parte central da mina, na forma de veios no centro do corpo mineral quartzo-sericítico, ocupando toda a largura inferior do talude Oeste.

À medida que se aprofunda tem-se reconhecida uma porção contínua no setor Centro-Sul do jazimento, como um corpo suspenso e isolado. O maciço rochoso exposto se caracteriza por ser resistente à compressão uniaxial, estima-se mediante ao golpe do martelo de geólogo.

Esta unidade se apresenta maciça, com alguns setores com fraturas polidirecionais, não superam as 5 fraturas/ metro nos setores mais fraturados desta unidade.

As fraturas expostas neste setor encontram-se seladas. Devido a característica desta subunidade, permite-se estimar o parâmetro do RQD entorno de 75% a 90%, como um maciço de boa qualidade.

5.2.6 Subunidade Geotécnica Quartzo igual à Sericita (Q=S)

Esta subunidade corresponde a uma rocha com textura obliterada, produto da alteração quartzo-sericita pervasiva, em que a característica principal é o conteúdo de quartzo ser semelhante ao conteúdo de sericita, com uma porcentagem de quartzo entre 25% a 60% da rocha. Esta unidade expõe-se ao longo de todo o corpo quartzo-sericítico, apresentando a maior extensão em área e em profundidade tem sido reconhecida com a subunidade dominante. Nesta unidade os corpos se apresentam formas isoladas, gradando para Leste da unidade Pórfiro Leste Sericítico.

O maciço rochoso se caracteriza por ser moderadamente resistente a compressão uniaxial, estima-se com o uso do martelo de geólogo. Esta unidade apresenta setores com diáclases polidirecionais com 5 a 10 fraturas/metro, apresentando aberturas de 2 a 3 mm. A relativa competência desta unidade permite estimar o parâmetro do RQD variando 50% a 75%, como um maciço regular.

5.2.7 Subunidade Geotécnica Quartzo menor do que Sericita (Q<S)

Esta unidade se caracteriza por apresentar o conteúdo de Quartzo menor do que de sericita, com textura obliterada, produto da alteração quartzo sericita pervasiva, o conteúdo de sericita maior que 75% da rocha. Esta unidade se expõe como uma franja alongada de Norte-Sul, principalmente no flanco oriental da falha Oeste e, como um halo de estruturas maiores que se cruzam. Em profundidade esta subunidade apresenta-se como um corpo alongado que tende a desaparecer e/ou ficar como uma forma isolada.

O maciço rochoso desta unidade se caracteriza por apresentar baixa resistência à compressão uniaxial estimada pelo golpe do martelo de geólogo. Apresenta-se muito fraturada em média de 15 a 20 fraturas/metro, com uma abertura de 3 a 5 mm e preenchida com material argiloso. A má qualidade desta unidade permite estimar o parâmetro do RQD < 25%, material de classe ruim a muito ruim.

5.2.8 Unidade Geotécnica Pórfiro Leste Sericítico (PES)

A unidade geotécnica Pórfiro Leste Sericítico é resultado da sobreposição da unidade de alteração Sericítica-Potássica da unidade litológica Pórfiro Leste. Petrograficamente se define como um granodiorito a diorito quartzítico, com textura porfírica com fenocristais de tamanho médio submersos numa matriz fina, na qual se encontra com uma alteração fraca de feldspato a sericita de forma generalizada, onde se diferencia da textura original da rocha, ou seja, protólito.

Distribui-se como uma franja Norte-Sul e na parte centro e sul da mina. No setor norte se distribui sem uma orientação preferencial. Esta unidade mostra-se para Oeste com os contatos gradacionais com a Unidade Rochosa Quartzo Sericita e para Leste grada a Unidade Pórfiro Leste Potássico no centro e sul do depósito.

O maciço rochoso se caracteriza por ser moderadamente resistente à compressão uniaxial (estimada de 75 a 100 MPa). O maciço apresenta-se intensamente fraturado, com direções ortogonais entre si, gerando blocos irregulares com tamanhos entre 15 a 35 cm de aresta, os quais se encontram pouco retrabalhados.

Uma característica importante desta unidade é que essas fraturas apresentam-se abertas entre 2 a 3 mm, mostrando-se muito desfavoráveis frente aos desmontes de rocha, pois ajuda a soltar os blocos, gerando um fraturamento escalonado. De acordo com estas características estima-se um valor de RQD variando entre 50% a 75%, sendo esse maciço rochoso classificado como regular.

5.2.9 Unidade Geotécnica Pórfiro Este Potássico (PEK)

Essa unidade geotécnica é resultado da sobreposição da unidade de alteração Potássica (Potássica de Fundo, “K-Sil”, Sericita cinza verde e Potássica Intensa) na unidade litológica Pórfiro Leste. Petrograficamente se define como uma rocha com textura porfirítica, com fenocristais de tamanho médio imerso numa matriz fina que não se observa na macroscopia, ou seja, amostra de mão.

A alteração potássica está constituída por feldspato potássico, que se apresenta como vênulas e megacristais. Esta unidade se distribui na parte central da mina como uma franja descontínua, com uma disposição Nordeste, desde o centro para o sul, para o norte se distribui de forma isolada dentro da unidade geotécnica Pórfiro Leste Sericítico. O maciço rochoso se caracteriza por ser muito resistente à compressão uniaxial, estimada pelo martelo de geólogo. Constitui-se como uma das unidades mais competentes da Mina de Chuquicamata. As fraturas se apresentam irregulares de forma polidirecional, com uma freqüência de 1 a 3 fraturas/metro, deixando blocos de tamanho de 2 a 0,3 metros de aresta, os quais se encontram bem retrabalhados.

Em geral esta unidade apresenta uma alternância de setores pouco fraturados que, na média, mostram-se com boa competência. Outra característica que se tem é o alto conteúdo de feldspato potássico, tanto na matriz da rocha com no preenchimento das fraturas e formação de vênulas. Esta unidade geotecnicamente mostra-se muito competente, com valor de RQD de 75 a 90%. Rocha de boa a excelente qualidade.

5.2.10 Unidade Geotécnica Pórfiro Leste Clorítico (PEC)

Esta unidade é o resultado da sobreposição da unidade de alteração clorítica à unidade litológica Pórfiro Leste, a qual apresenta uma textura da rocha porfirítica, com fenocristais com tamanho médio imerso numa matriz fina. A alteração está constituída por clorita, que invade parcialmente a textura da rocha na forma de vênulas e veios preenchendo fraturas.

Distribui-se na parte média e superior do talude Leste, principalmente na parte Sul, onde se encontram quase de forma exclusiva. No setor Norte se restringe numa franja Norte - Sul, localizada na parte superior do talude. Para Oeste Central se encontra em contato gradacional com as unidades Pórfiro Leste Sericítico e Pórfiro Leste Potássico. Para Leste se reconhece uma desconformidade estrutural com as unidades Metassedimentares e o Granodiorito Elena.

O maciço rochoso se caracteriza por ser resistente à compressão uniaxial (estimada em 100 MPa). As fraturas são poucas e esparsas, desenvolvem blocos regulares com tamanho médio de aresta de 0,5 metros, os quais se encontram moderadamente retrabalhados. As fraturas não se encontram abertas, os valores do RQD médios oscilam entre 75 - 90%. Esta unidade se classifica como regular a muito boa.

5.2.11 Unidade Geotécnica Metassedimentar (MET)

Esta unidade é composta por uma associação de rochas de origem sedimentar, vulcânica e ígnea que tem sido afetada por um metamorfismo de contato e dínamo-termal, tendo como resultado um conjunto de rochas parcialmente metamorfizadas, milonitizadas e rochas completamente silicificadas.

Este conjunto se distingue dos sedimentos clásticos, metassedimentos químicos, milonitos, cataclasitos, andesitos vulcânicos, rochas deformadas diferenciadas. Esta unidade se distribui no talude Leste como uma franja contínua irregular de orientação Norte-Sul. O corpo se encontra colocado em contato estrutural para Oeste com a unidade Pórfiro Leste Clorítico e para Leste com a unidade Granodiorito Elena.

O maciço rochoso se caracteriza por ser resistente a moderadamente resistente à compressão uniaxial (estimada em 50 MPa). As fraturas desta unidade mostram-se intensas e não apresentam orientações preferenciais, com frequência das fraturas variando de 15 a 20 fraturas/metros. As fraturas geram blocos irregulares, com tamanho médio de suas arestas entre 0,15 m a 0,08 m respectivamente, as quais se encontram semi-retrabalhadas. De acordo com este padrão de fraturas estima-se um RQD, entre 25 -50%, maciço ruim a muito ruim.

5.2.12 Unidade Geotécnica Granodiorítica Elena Sul (GES)

Esta unidade é composta, exclusivamente, pela unidade litológica Granodiorítica Elena, a qual se descreve como uma rocha com textura equigranular de grão médio a grosso, com abundante biotita e horblenda, afetada por alteração clorítica de caráter mais regional e, em alguns setores, são mascaradas pela lixiviação.

Esta unidade se expõe como uma franja Norte-Sul que se desenvolve na parte Leste da cava, sendo o limite oriental do jazimento. O maciço rochoso se caracteriza por ser resistente à compressão uniaxial (estima-se um valor de 100 MPa). As fraturas dessa unidade se manifestam em direções bem definidas e ortogonais entre si, mostrando boa correlação com a orientação das estruturas maiores.

Em geral os planos de falha e diáclases se encontram fechados ou levemente abertos, neste último caso geram blocos de tamanho médio de aresta de 0,25 m. Os valores do RQD variam entre 50 a 75%, caracterizando um maciço ruim a regular.

5.2.13 Unidade Geotécnica Granodiorítica Lixiviado (LIX)

Nesta unidade se agrupam todas aquelas rochas que se encontram afetada pelo processo de lixiviação parcial, produto de sucessivos eventos de mineralização do jazimento. Devido ao desenvolvimento da mina Chuquicamata, esta unidade apresenta-se na forma de solo aflorante, localmente em alguns setores marginais da cava da mina. No setor Norte se tem reconhecido a continuidade desta unidade através de sondagens sob a cobertura de cascalho. Esta unidade mostra uma superfície muito irregular, com espessura máxima de 200 metros, onde é evidente um forte controle estrutural.

O maciço rochoso se caracteriza por ser resistente à compressão uniaxial estimada a partir do golpe do martelo de geólogo. As fraturas se apresentam polidirecional, as superfícies se encontram levemente abertas, entre 1 a 2 mm, bastante alteradas. Os blocos desta unidade se definem com arestas de 0,15 m, como parâmetro de RQD encontra-se entre 50-58%. Esta unidade se classifica como regular a ruim.

5.2.14 Unidade Geotécnica Brecha entre Falha (BEF)

Esta unidade corresponde a uma franja alongada Norte-Sul, composta exclusivamente por megabrechas tectônicas, além do produto das reativações da falha Oeste. Esta unidade se distribui principalmente na parte média da mina, com espessura de 20 a 40 metros numa seção E-W. Em profundidade se apresenta um estreitamento, sempre limitada pelos traços da falha Oeste.

O maciço rochoso se caracteriza por ser moderadamente resistente à compressão uniaxial. As fraturas se apresentam polidirecionais; suas superfícies mostram-se seladas e preenchidas por hematita e *gouge* argiloso. O RQD desta unidade varia de 10 a 60%, mostrando-se fortemente fraturado em blocos regulares, conforme as condições das suas descontinuidades.

Estas unidades geotécnicas podem ser observadas na figura 16, onde se demonstra a sua distribuição em planta dentro dos domínios geológicos, onde o projeto da rampa de exploração e o túnel de drenagem interceptaram-nas.

6 Domínios Estruturais do Jazimento de Chuquicamata

6.1 Modelo conceitual da Falha Oeste

O modelo conceitual utilizado para descrever as zonas de falha do ponto de vista geotécnico dentro da mina de Chuquicamata é proposto por Caine *et al.*, 1996. Este conceito distingue um núcleo de falha formado por *gouge*, cataclasitos e milonitos ao longo do qual se tenha ocorrido à maior movimentação tectônica, circundada por uma zona danificada, constituída por pequenas falhas, fraturas antitéticas e sintéticas, veios e vênulas e finalmente circundada pelo protólito, ou seja, a rocha original.

A figura abaixo mostra este modelo conceitual, onde a elipse **K** representa a magnitude e a orientação relativa dos tensores bidimensionais de permeabilidade, associada com cada um dos componentes da falha. Os fatores que controlam o **K** são a litologia, a escala, o tipo de falha, o estilo da deformação, a sua anisotropia e a história de pressão e temperatura sofridas.

De acordo com o modelo apresentado, as falhas e fraturas do jazimento foram categorizadas de acordo com a influência, persistência ou continuidade. A influência se entende como a área que incorpora os conceitos de núcleo e zona danificada do modelo de Caine *et al.* 1996.

Persistência ou continuidade se define como a ocorrência das estruturas medidas na superfície. De acordo com o modelo, definem-se três tipos de estruturas diferenciáveis como é indicado na figura 17.

Esta é uma designação comumente utilizada para um modelo geológico que mostre a geometria de um depósito em profundidade, unidades de rochosa, zonas de deformação, etc, junto com seus parâmetros geomecânicos.

No que se refere ao presente trabalho é o embasamento das informações dentro de um modelo geológico, em que consiste a combinação de um modelo litológico-estrutural relacionado com o modelo geomecânico, buscando uma representatividade para a área investigada.

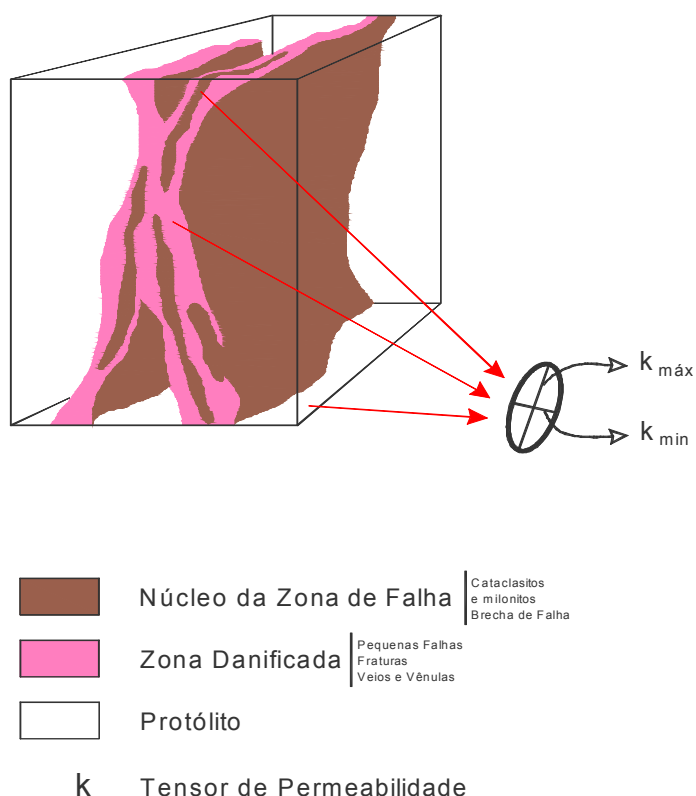


Figura 17 - Modelo conceitual de uma falha, segundo Caine *et al.*, (1996), (modificado).

As estruturas VIF (“*Very Important Faults*” – falhas muito importantes) correspondem àquelas de maior influência e persistências observadas no interior do cava de Chuquicamata que, em geral, definem o limite dos macroblocos. A instabilidade dos blocos são maiores no nível intermediário dos taludes.

Algumas dessas estruturas podem apresentar-se com reativações ao longo do seu traçado, sendo que estas manifestações são devido à acomodação ou ao recalque diferencial dos materiais expostos nos taludes da cava.

A partir da Rampa de Exploração e do Túnel de Drenagem foi possível observar a persistência da direção de mergulho dos planos de falhas principais, definindo-se como zona de influência uma largura igual ou superior a 0,5 m, do qual geralmente, menor que 0,05 m correspondem à espessura do núcleo desta falha.

As estruturas FT (*Fault Traces* - traços de falha) são estruturas de menor importância, apresentam influência e persistência reduzidas, de modo que afetam o comportamento geotécnico das rochas a nível básico. Quantitativamente este tipo de estrutura corresponde aproximadamente 75% do total das falhas mapeadas no interior da cava da mina.

As diáclases e fraturas FR (*Fractures* - fraturas) correspondem a rupturas geológicas simples ou compostas com ou sem deslizamento (inferior a 10 cm), encontram-se fora da zona de núcleo da falha e da zona danificada, conforme a definição feita por Caine *et al.*, 1996.

As fraturas apresentam preenchimento de pouca espessura, com o produto da circulação e precipitação de soluções hidrotermais. Estas estruturas controlam as estabilidades a nível básico como, por exemplo, blocos planares e/ou cunhas tetraédricas expostas nos taludes da cava da mina, além de cunhas esféricas presentes ao longo das escavações subterrâneas realizadas.

6.2 Caracterização dos Domínios Estruturais

Os domínios estruturais correspondem aos setores do jazimento que apresentam características estruturais próprias e distintas no que se refere às famílias de estruturas, cujo limite é definido por elementos geológicos como, por exemplo: falha geológica, contatos litológicos, padrões de descontinuidades presentes no maciço rochoso.

O modelo de caracterização geotécnica realizado pelo Departamento de Geologia da Codelco Norte, no ano de 2005, foi baseado nas informações de 80% no levantamento dos taludes expostos na cava da mina e 20% nos dados de sondagens rotativas realizadas na investigação dos Sulfuros Profundos.

A partir da compilação dos dados foi possível determinar 8 (oito) domínios estruturais do jazimento, cujos limites estão definidos pelas falhas mais importantes presentes na área, conforme é mostrado na figura 18.

Um domínio estrutural é definido como a massa rochosa delimitada por descontinuidades geológicas dentro da qual as estruturas são praticamente homogêneas.

A estrutura do maciço rochoso é definida por um conjunto de falhas, diáclases, dobras e pelas características geológicas que definem uma determinada região dentro de uma determinada mina, onde existe uma série de domínios estruturais perfeitamente definidos e diferenciados entre si.

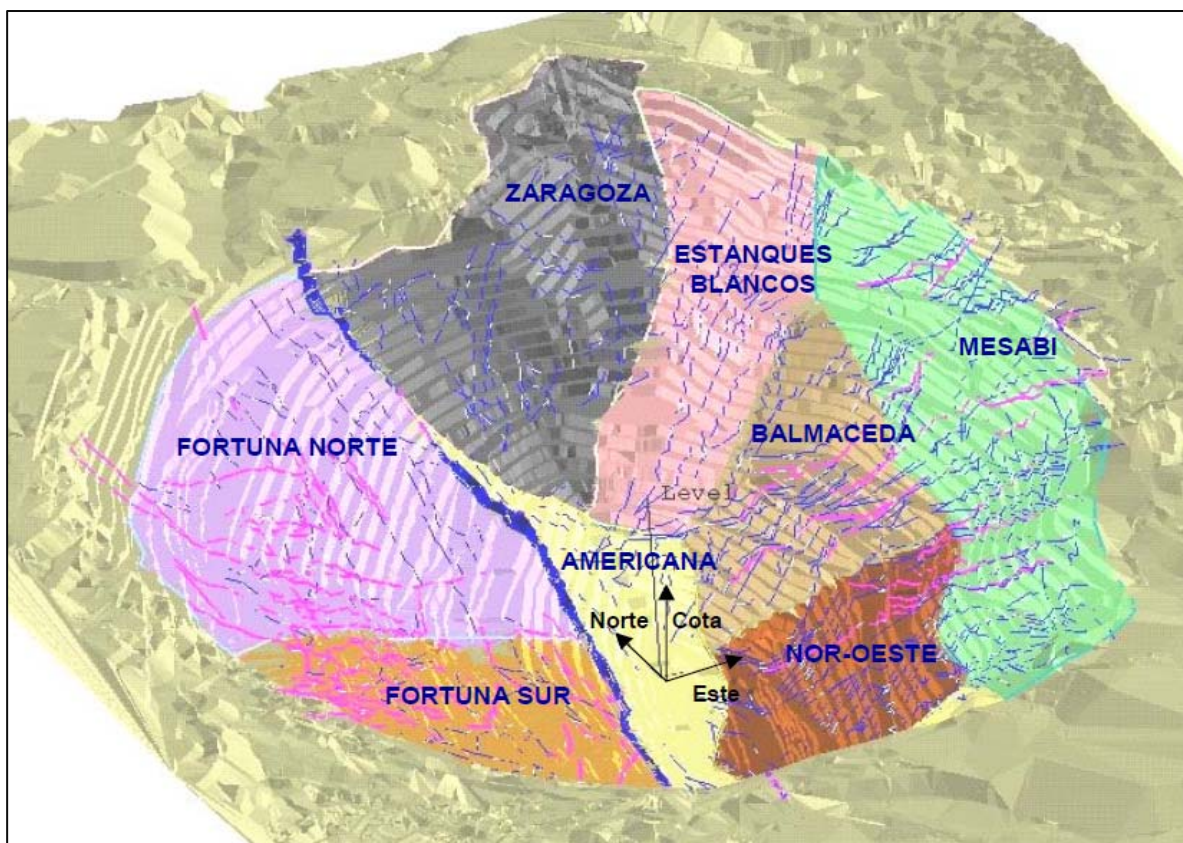


Figura 18 - Distribuição em 3-D em superfície dos Domínios Estruturais do Jazimento, com visada para a direção Norte da área. (Codelco, 2005).

A técnica de projeção estereográfica utilizada no tratamento estatístico dos dados geológicos mapeados no campo para representar a orientação das superfícies das descontinuidades é a rede estereográfica de **Schmidt-Lambert**, onde este método representa a concentração da população das famílias das descontinuidades. O método de *Schmidt-Lambert* é um método clássico, onde para cada pólo é atribuído um valor constante de influência igual a 1 (um).

Esta zona de influência é integrada a um cilindro de altura constante, com um raio igual ao raio do círculo de contagem, na qual uma grade de contagem é sobreposta sobre o plano do estereograma, ou no caso de um círculo com uma área equivalente a 1% da superfície do hemisfério inferior. Para cada pólo traçado, qualquer ponto da grade caindo dentro de um círculo de raio constante arbitrário, centrado sobre este pólo é incrementado pelo valor deste pólo.

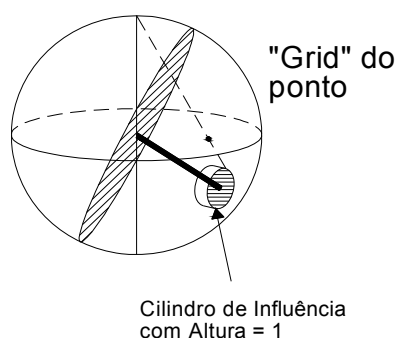
Após a influência de todos os pólos desenhados é, assim, distribuída a densidade em cada ponto da grade. O calculo é realizado dividindo a contagem de pólos num ponto da grade pela influência total dos mesmos.

A rede de **Schmidt-Lambert** é a mais utilizada em geologia estrutural por permitir um estudo estatístico mais acurado para uma população de dados bastante conhecida. **No método de Fischer** a cada pólo é atribuída uma influência normal ou a distribuição de Fischer sobre a superfície da esfera, em vez de um valor de ponto, como no método de Schmidt-Lambert. A zona de influência é integrada a uma distribuição em forma de sino, com altura máxima igual a 1 (um), e um raio basal duas vezes maior que o raio do círculo de contagem. A contribuição da influência para um ponto da grade é representado pela altura da zona de influência imediatamente acima do ponto da grade, conforme a figura 19.

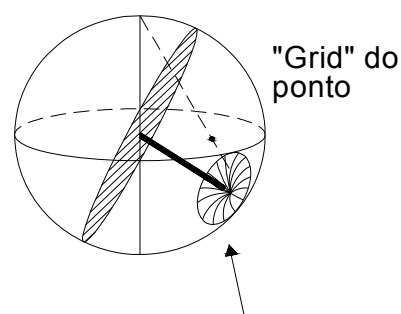
Neste método, a influência total de um pólo individual é o mesmo como se fosse o método de Schmidt-Lambert, mas a sua distribuição de influência reflete uma probabilidade assumida, muitas vezes, pelo erro de medição. Para grandes quantidades de dados, o método de *Fischer* produz resultados semelhantes ao método de *Schmidt*.

A verdadeira força de utilização do **método de Fischer** está na “suavização” gráfica da densidade do conjunto de dados, quando os mesmos apresentam-se dispersos. A partir da tabulação dos dados das orientações das descontinuidades de cada domínio estrutural, com o uso da notação mergulho / direção do mergulho (*dip / dip direction*), os dados foram tratados com o **software DIP´S versão 5.108 da Rocscience**, para representação do padrão estrutural predominante dentro de cada domínio estrutural, através da rede estereográfica de *Schmidt-Lambert* de igual área, hemisfério inferior em 1% de área, onde foram plotados as concentrações dos pólos dos planos das descontinuidades presentes em cada domínio estrutural mapeado dentro da mina e no subterrâneo.

Distribuição de Schmidt



Distribuição de Fisher



Domo do Sino de influência com altura máxima = 1 coincidente com o pólo do vetor. Base do raio = 2 x o cilindro de Schmidt. Total volume de influência igual ao cilindro de Schmidt.

Figura 19 - Métodos de distribuições estatísticas para o tratamento das descontinuidades na rede estereográfica conforme o método de Schimidt-Lambert e Fischer.

A definição do número de grupos ou sistemas de estruturas é relacionada diretamente na definição da orientação de cada família. Esta análise estrutural é realizada através das projeções estereográficas, a fim de representar cada estrutura geológica, podendo ser na forma de plano ou ponto (pólo). Através das técnicas estereográficas, os dados foram analisados através dos *clusters* ou grupos de pólo, e desta forma definiu-se o conjunto ou sistemas principais, claramente predominantes, de cada família das descontinuidades.

A utilização das projeções estereográficas para este fim é descrito por Goodman (1976), Hoek & Bray (1981), Hoek & Brow (1980) e Priest (1993). Na prática, os programas computacionais são utilizados para essa análise e interpretação, onde são bastante utilizados e consagrados no meio geocientífico.

Na prática da geologia estrutural e da geotecnia, a utilização das projeções de igual área no hemisfério inferior tornou-se usual, por conseguinte, este método é bastante aconselhável em estudos geométricos dos elementos geológicos.

A fim de se definir os *clusters* dos pólos das discontinuidades pela distribuição de Schmidt ou Fischer, as mesmas podem ser utilizadas em diferentes situações, por exemplo, quando a quantidade de dados é grande o suficiente, as duas distribuições podem produzir os mesmos contornos, no entanto, quando a quantidade de dados é limitada, a distribuição de Schmidt produz contornos bastante irregulares e podem conduzir a erros, já que cada dado é considerado absolutamente preciso, qualquer erro torna-se eminente.

Nesta situação é aconselhável a distribuição de Fisher quando não se tem uma coleta de dados bem representativa de cada domínio estrutural, como os dados utilizados neste trabalho mostram-se bastante consistente optou-se em utilizar-se a distribuição de Schimidt-Lambert, na representação dos elementos descontínuos de cada domínio estrutural mapeado. (Ver tabelas 01 a 08 de dados dos domínios estruturais em anexo).

6.2.1 Domínio Estrutural Fortuna Norte

No modelo geológico-estrutural da área é definido na parte norte do talude ocidental da cava, o Granodiorito Fortuna, a partir da coordenada do *grid* N 4.000. Conforme é demonstrado na figura 20, onde se podem observar todos os domínios individualizados. Neste domínio estrutural é caracterizando por apresentar os sistemas de falhas VIF (*Very Important Fault*) e FT (*Fault Traces*) relacionadas entre si com orientações predominantemente Norte-Sul e Leste-Oeste.

Os sistemas de diáclases também estão relacionados com as direções preferenciais das falhas e a sua orientação Nordeste, correspondendo as diáclases, com mergulhos intermediários entre 20° - 50°.

A distribuição dos principais sistemas de falhas muito importantes (VIF), traços de falhas (FT) e diáclases (D) do Domínio Estrutural Fortuna Norte estão representadas a baixo pelas redes estereográficas de *Schmidt-Lambert* como referido anteriormente.

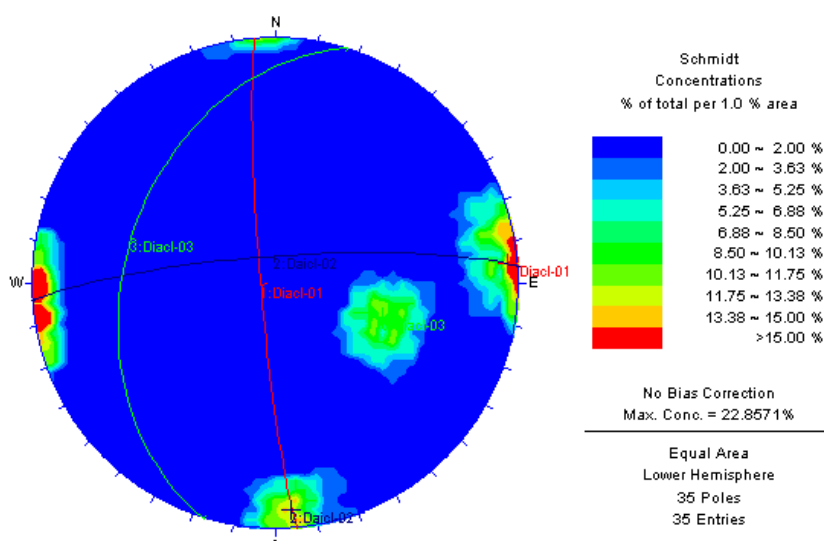


Figura 21 - Rede Estereográfica de *Schmidt-Lambert*, 1% em área, representando a distribuição das famílias de diáclases presentes no Domínio Estrutural Fortuna Norte, mostrando concentração do pólo dos planos.

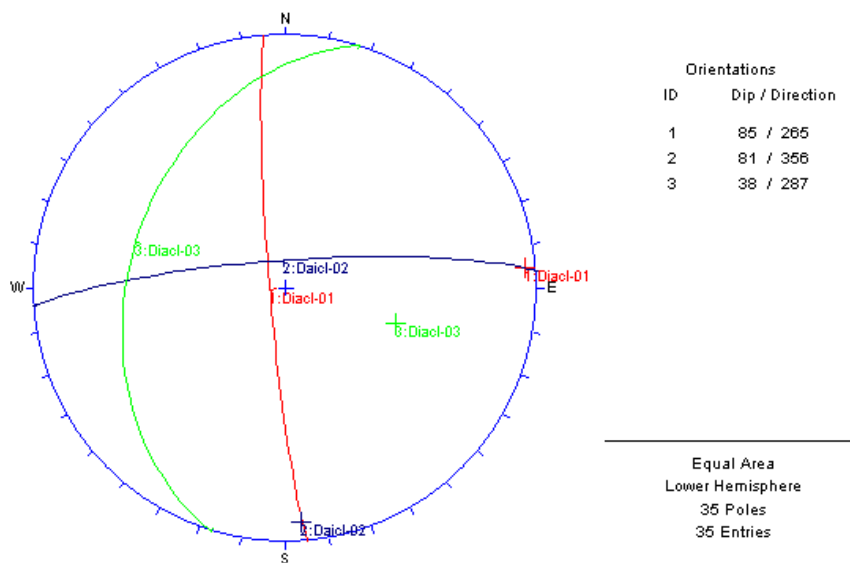


Figura 22 - Rede Estereográfica de *Schmidt-Lambert*, mostrando os planos médios das diáclases, com suas atitudes principais.

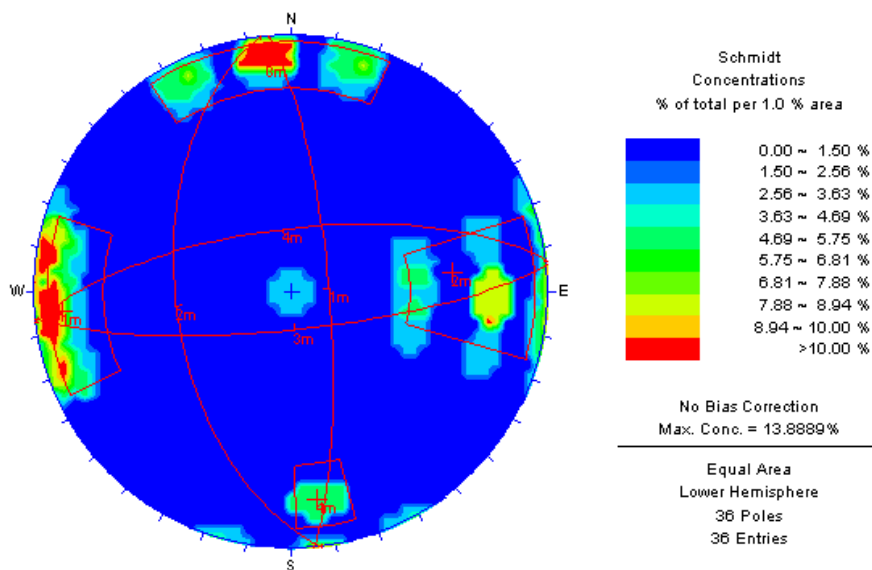


Figura 23 - Rede Estereográfica de *Schmidt-Lambert*, 1% em área, representando a distribuição das falhas importantes (VIF), presentes no Domínio Estrutural Fortuna Norte, mostrando a concentração dos diferentes sistemas.

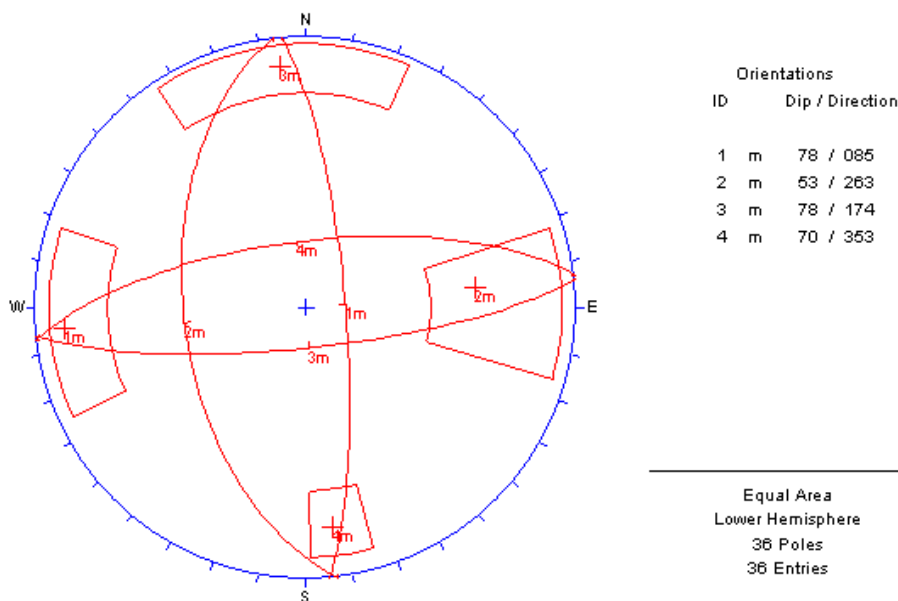


Figura 24 - Rede Estereográfica de *Schmidt-Lambert*, mostrando os planos médios das falhas VIF com suas atitudes.

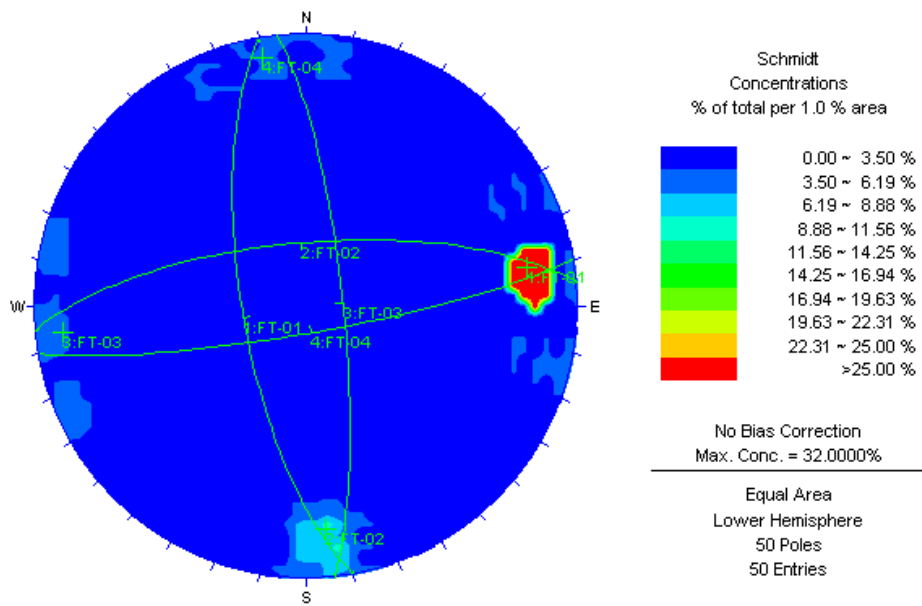


Figura 25 - Rede Estereográfica de *Schmidt-Lambert*, 1% em área, representando a distribuição dos traços de falhas (FT), presentes no Domínio Estrutural Fortuna Norte, mostrando a concentração dos diferentes sistemas.

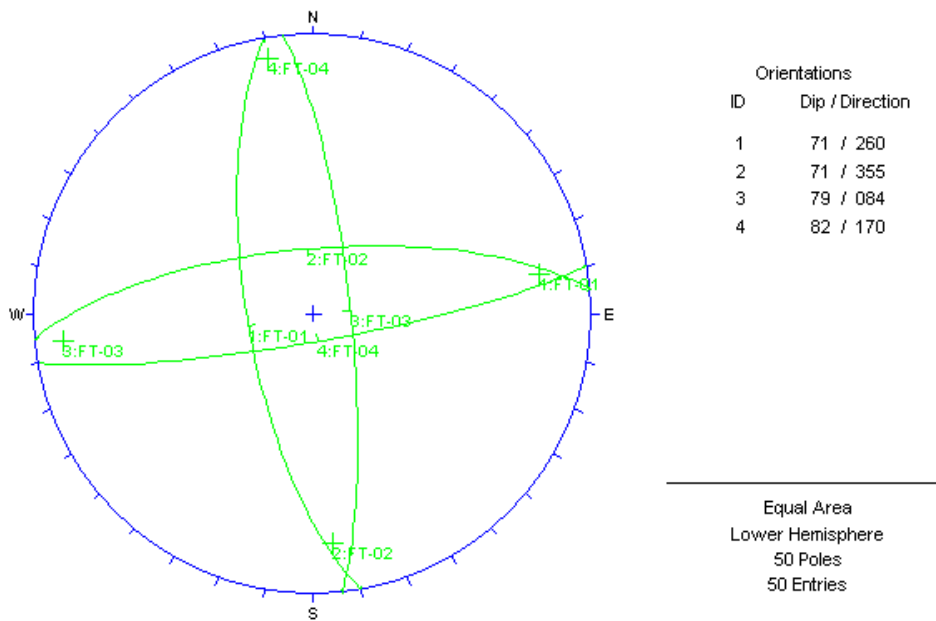


Figura 26 - Rede Estereográfica de *Schmidt-Lambert*, mostrando os planos médios dos traços das falhas FT.

6.2.2 Domínio Estrutural Fortuna Sul

O Domínio Estrutural Fortuna Sul é definido no talude Oeste da cava, têm-se reconhecido dois sistemas de falhas importantes VIF, bem marcadas, N-NE e NW-SE. Os sistemas de falha FT apresentam uma tendência predominante E-W e as diáclases predominam com o *trend* N-S.

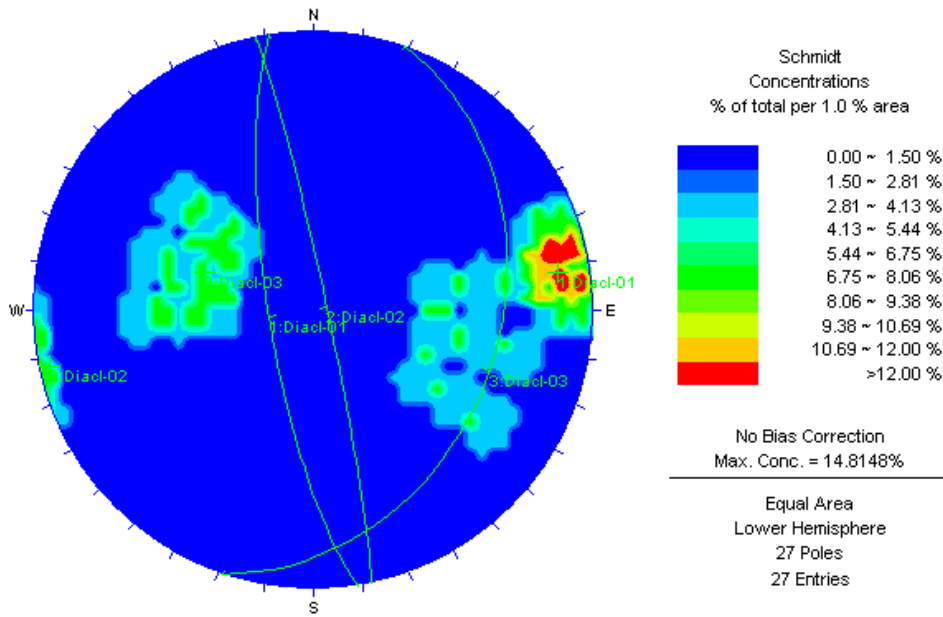


Figura 27 - Rede Estereográfica de *Schmidt-Lambert*, 1% em área, representando a distribuição do pólo das famílias de diáclases presentes no Domínio Estrutural Fortuna Sul.

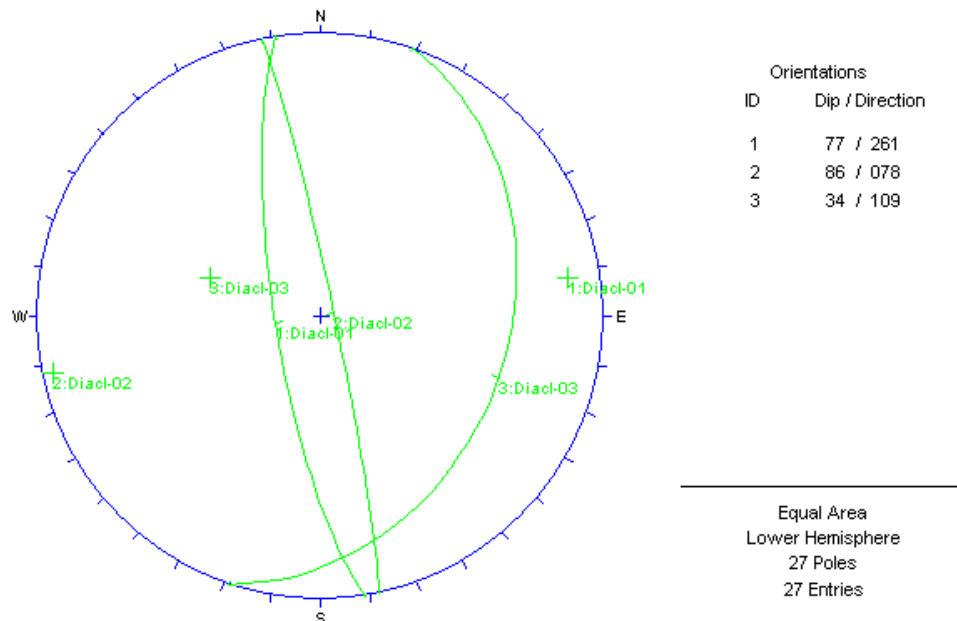


Figura 28 - Rede Estereográfica de *Schmidt-Lambert*, mostrando os planos médios das Diáclases.

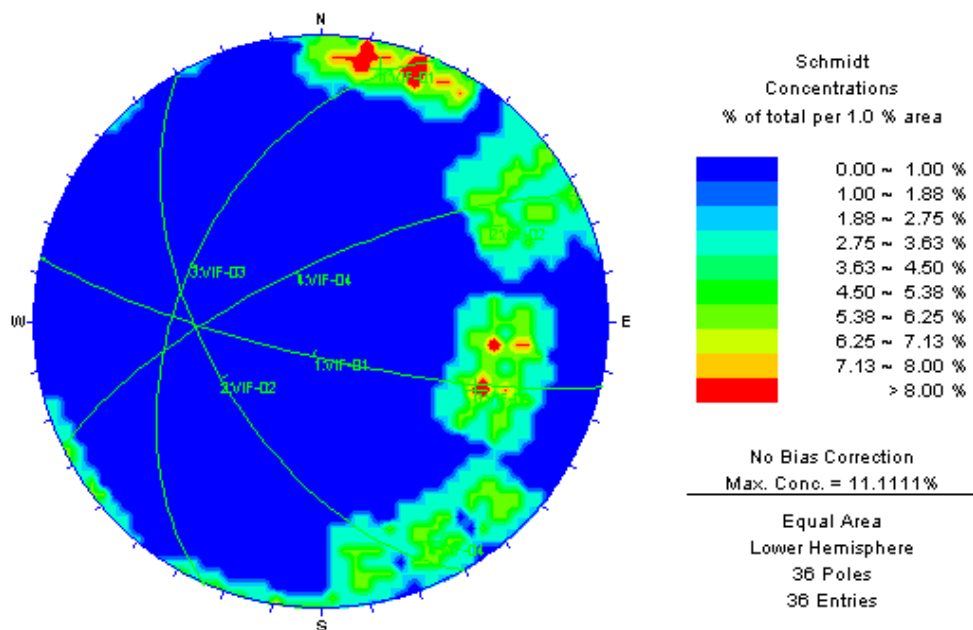


Figura 29 - Rede Estereográfica de *Schmidt-Lambert*, 1% em área, representando a distribuição das falhas VIF, presentes no Domínio Estrutural Fortuna Sul.

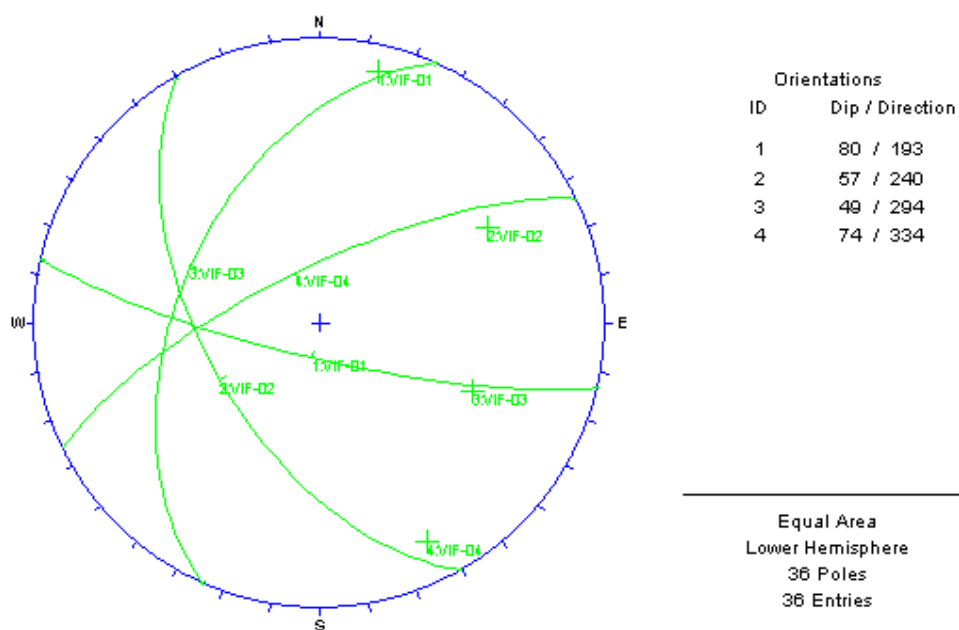


Figura 30 - Rede Estereográfica de *Schmidt-Lambert*, mostrando os planos médios das falhas importantes VIF.

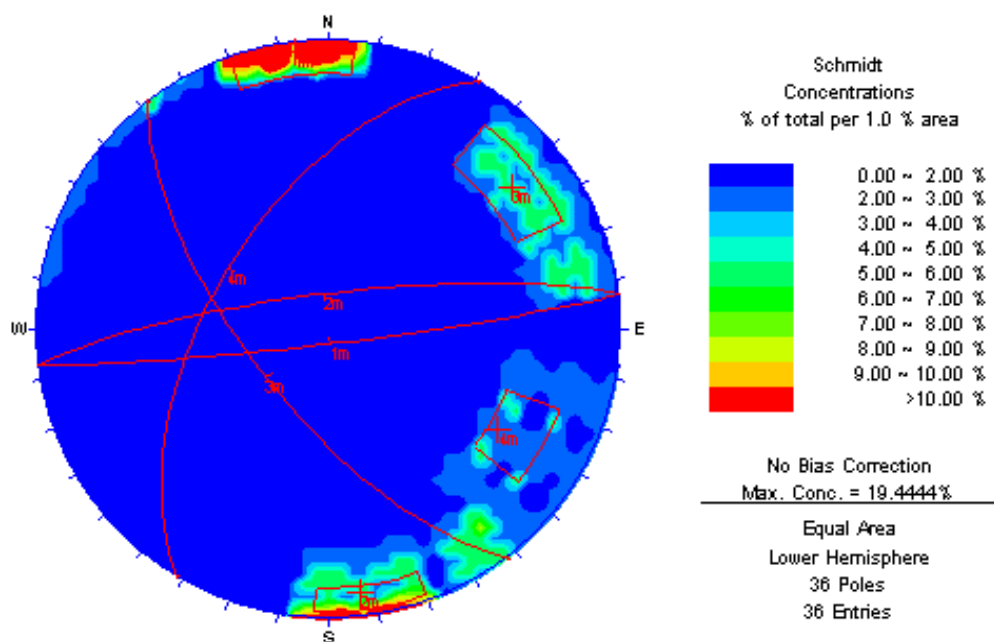


Figura 31 - Rede Estereográfica de *Schmidt-Lambert*, 1% em área, representando a distribuição do pólo das falhas FT, presentes no Domínio Estrutural Fortuna Sul.

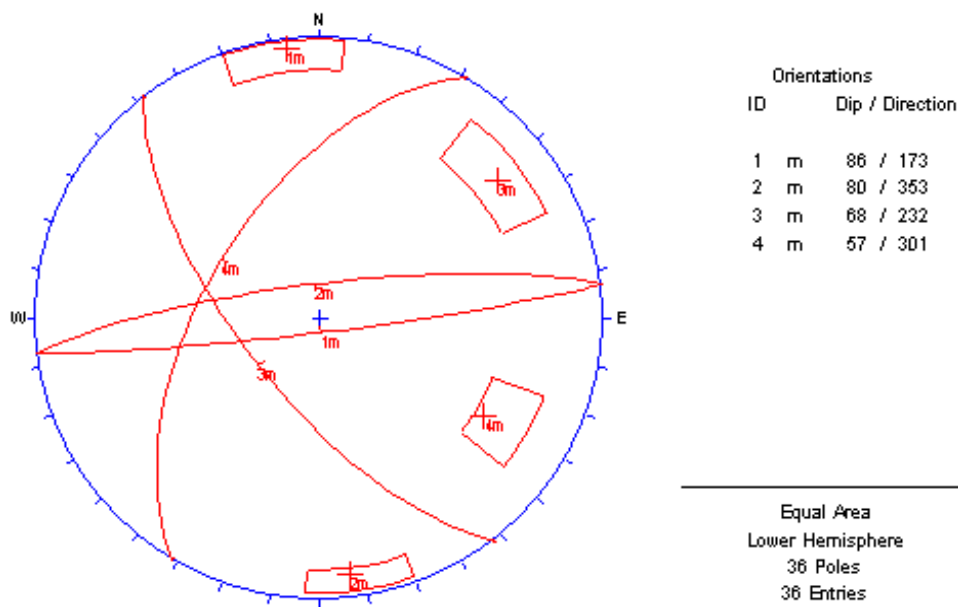


Figura 32 - Rede Estereográfica de *Schmidt-Lambert*, mostrando os planos médios das falhas FT.

6.2.3 Domínio Estrutural Americana

O domínio estrutural Americana se define com uma franja estrutural de disposição geral Norte-Sul, anexada a leste da falha Oeste. Os sistemas principais das estruturas geológicas são as falhas importantes VIF, as quais apresentam orientação N-S e NE. Os sistemas de falhas do tipo FT (*Fault traces*) apresentam orientação NE, com o mergulho subvertical. Os sistemas de falhas e diáclases de acordo com as suas orientações distinguem-se das falhas VIF, como pode-ser observado nos gráficos abaixo.

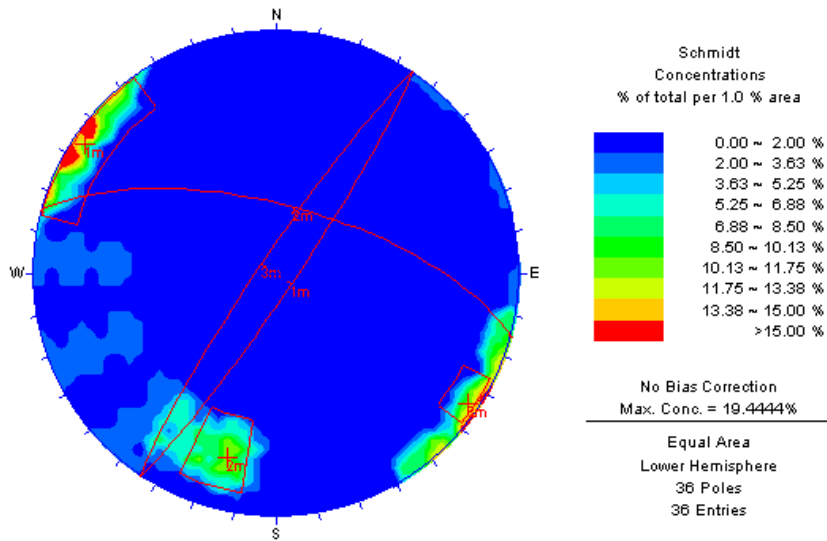


Figura 33 - Rede Estereográfica de *Schmidt-Lambert*, 1% em área, representando a distribuição do pólo das famílias de diáclases presentes no Domínio Estrutural Americana.

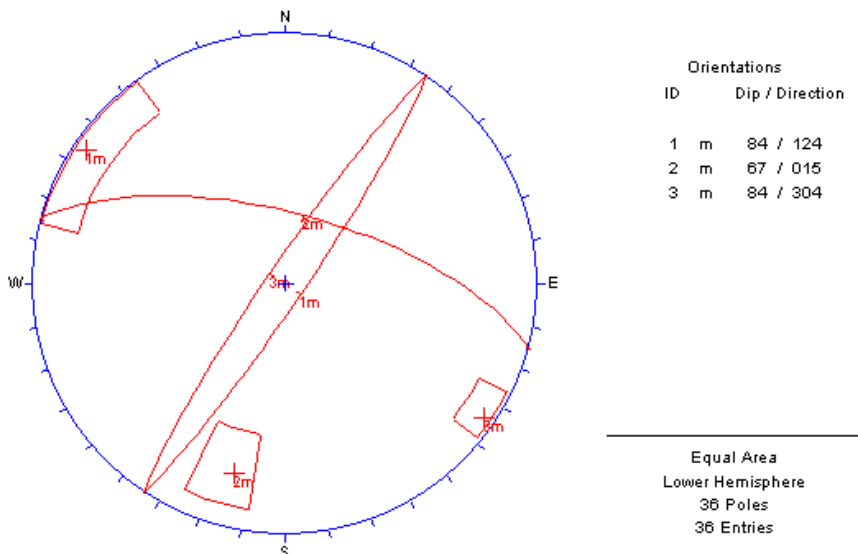


Figura 34 - Rede Estereográfica de *Schmidt-Lambert*, mostrando os planos médios das diáclases.

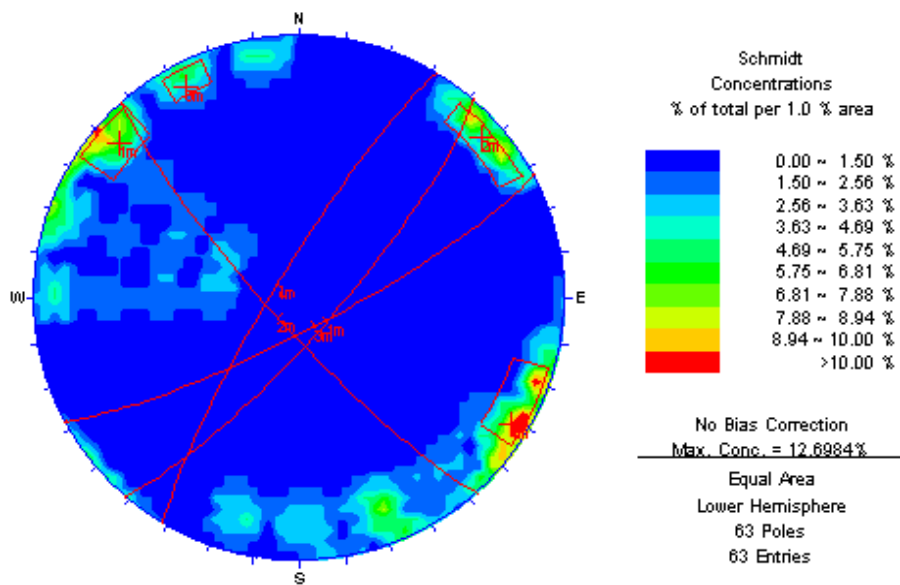


Figura 35 - Rede Estereográfica de *Schmidt-Lambert*, 1% em área, representando a distribuição dos pólos das falhas VIF, presentes no Domínio Estrutural Americana.

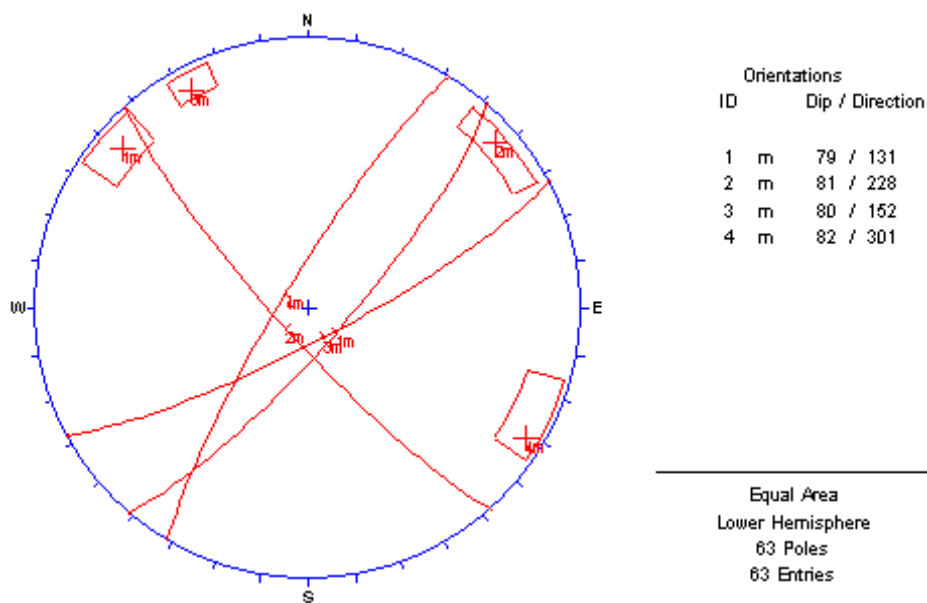


Figura 36 - Rede Estereográfica de *Schmidt-Lambert*, mostrando os planos médios das falhas VIF.

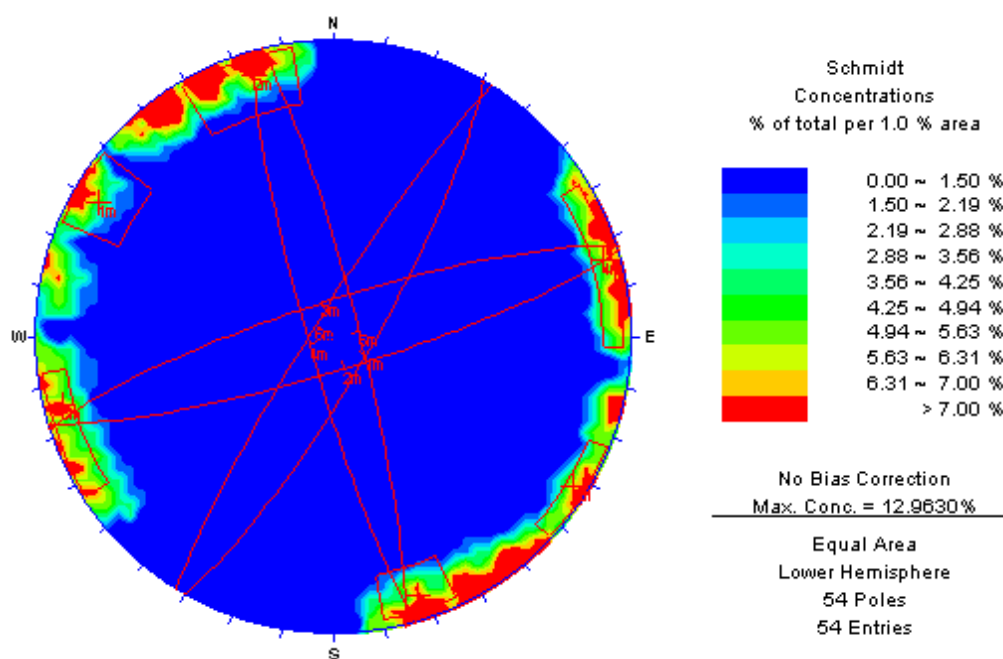


Figura 37 - Rede Estereográfica de *Schmidt-Lambert*, 1% em área, representando a distribuição do pólo das falhas do tipo FT, presentes no Domínio Estrutural Americana.

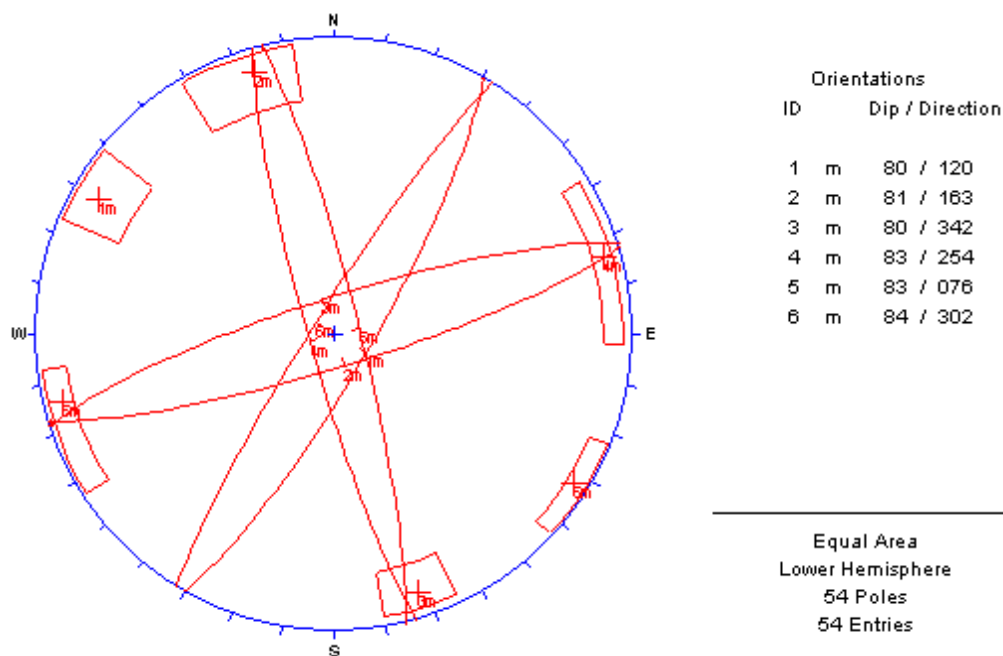


Figura 38 - Rede Estereográfica de *Schmidt-Lambert*, mostrando os planos médios das falhas FT.

6.2.4 Domínio Estrutural Balmaceda

O Domínio estrutural Balmaceda está localizado na porção central do talude leste da cava da mina. Os principais sistemas de falhas VIF e FT correspondem à orientação NW.

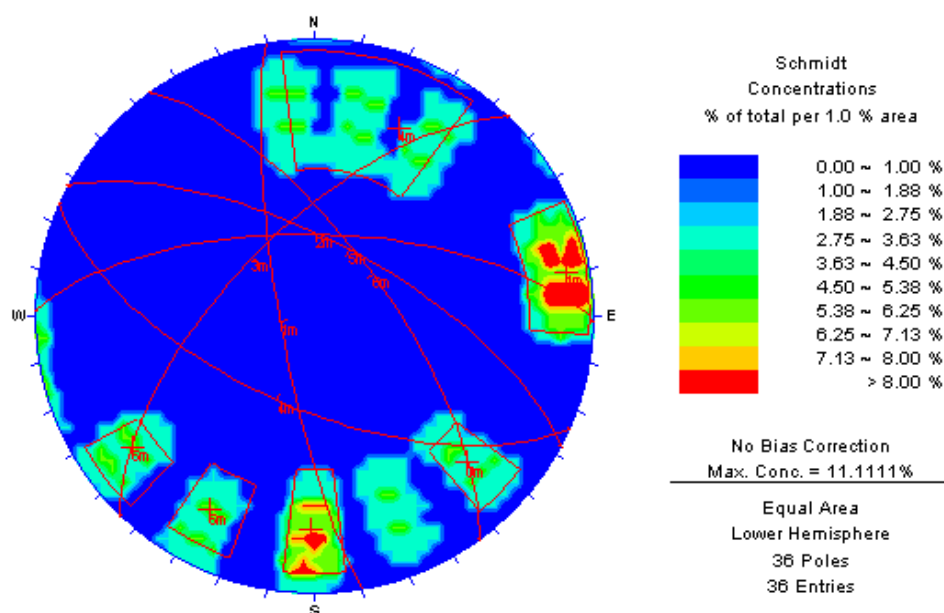


Figura 39 - Rede Estereográfica de *Schmidt-Lambert*, 1% em área, representando a distribuição do pólo das famílias de diáclases presentes no Domínio Estrutural Balmaceda.

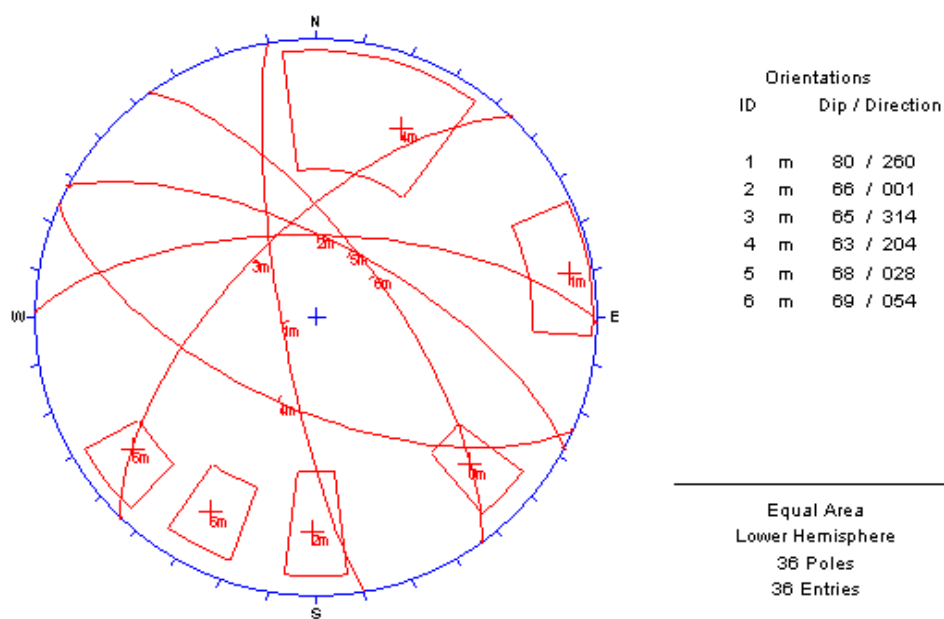


Figura 40 - Rede Estereográfica de *Schmidt-Lambert*, mostrando os planos médios das diáclases.

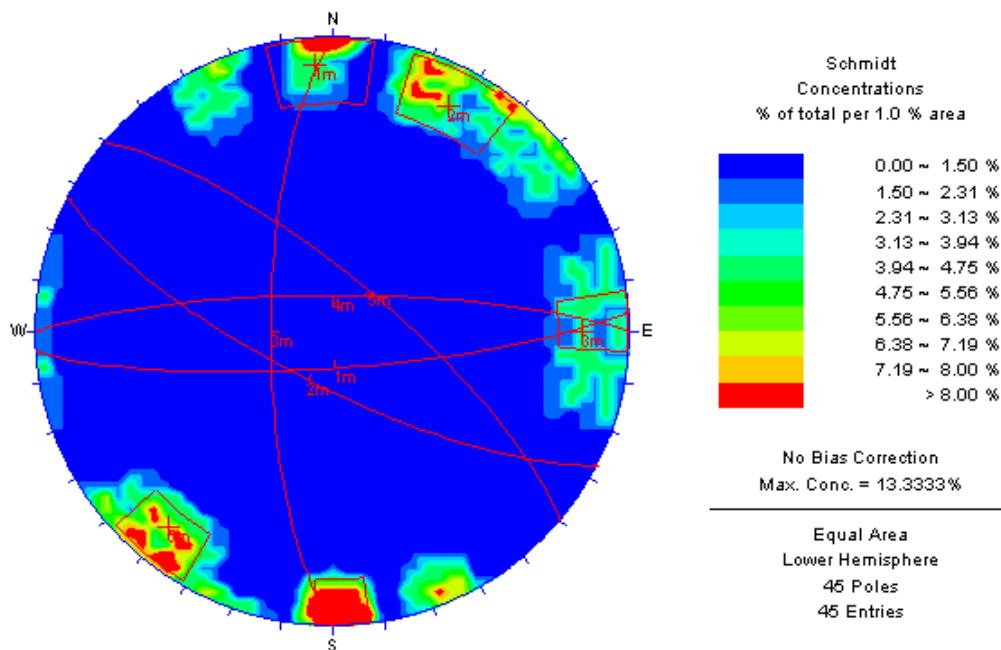


Figura 41 - Rede Estereográfica de *Schmidt-Lambert*, 1% em área, representando a distribuição do pólo das falhas VIF, presentes no Domínio Estrutural Balmaceda.

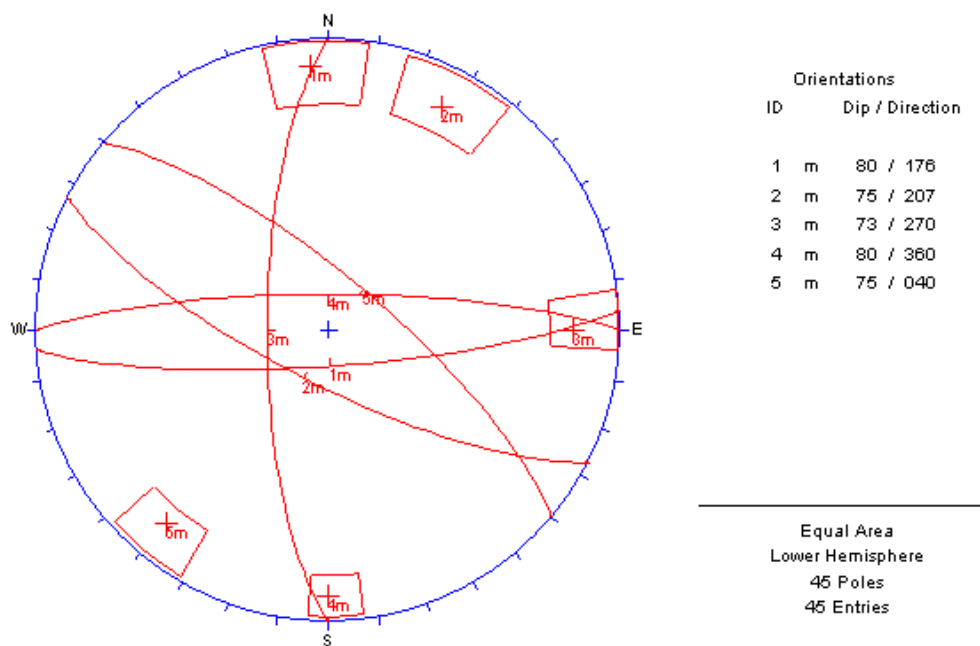


Figura 42 - Rede Estereográfica de *Schmidt-Lambert*, mostrando os planos médios das falhas VIF.

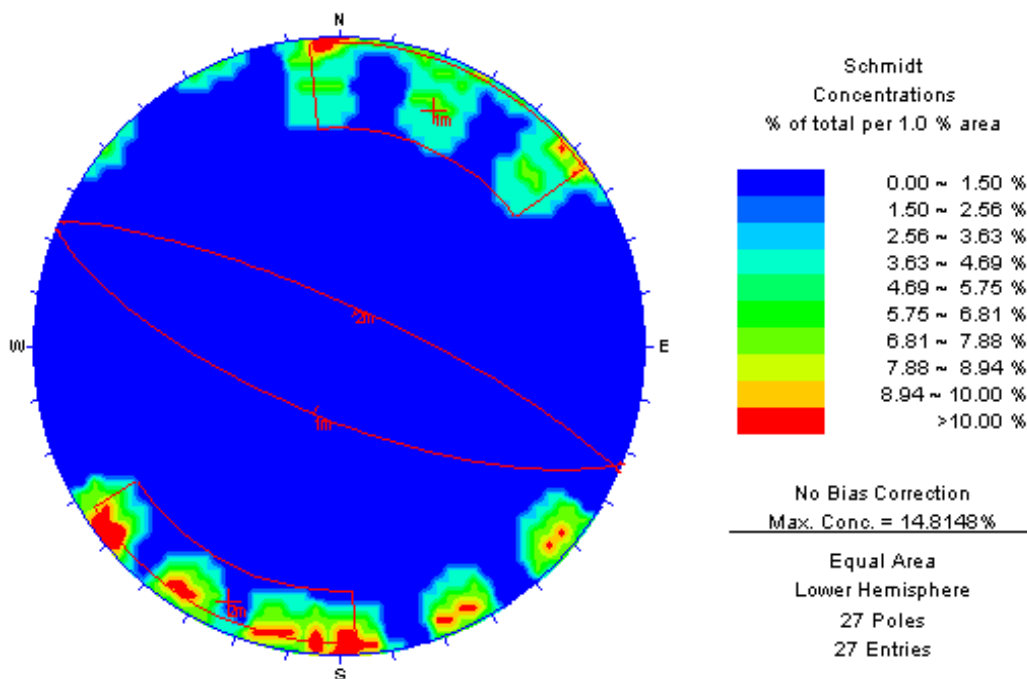


Figura 43 - Rede Estereográfica de *Schmidt-Lambert*, 1% em área, representando a distribuição do pólo das falhas do tipo FT, presentes no Domínio Estrutural Balmaceda.

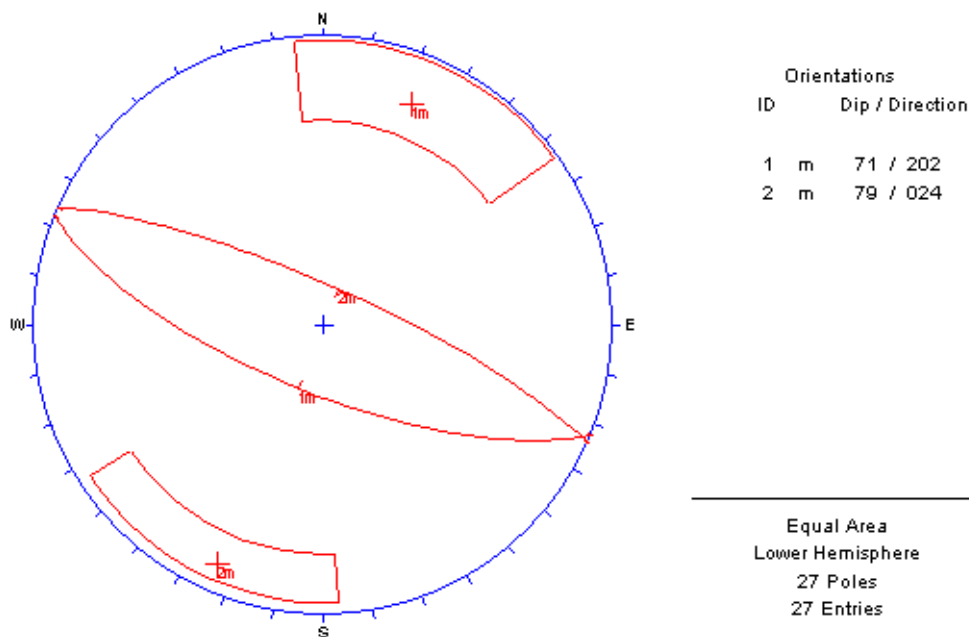


Figura 44 - Rede Estereográfica de *Schmidt-Lambert*, mostrando os planos médios das falhas FT.

6.2.5 Domínio Estrutural Estanques Blancos

O domínio Estrutural Estanques Blancos é definido na parte oriental superior do talude leste da cava da mina. Apresenta a distribuição dos sistemas de falha VIF e FT e diáclases, de acordo com suas distintas orientações e distribuição dentro deste domínio.

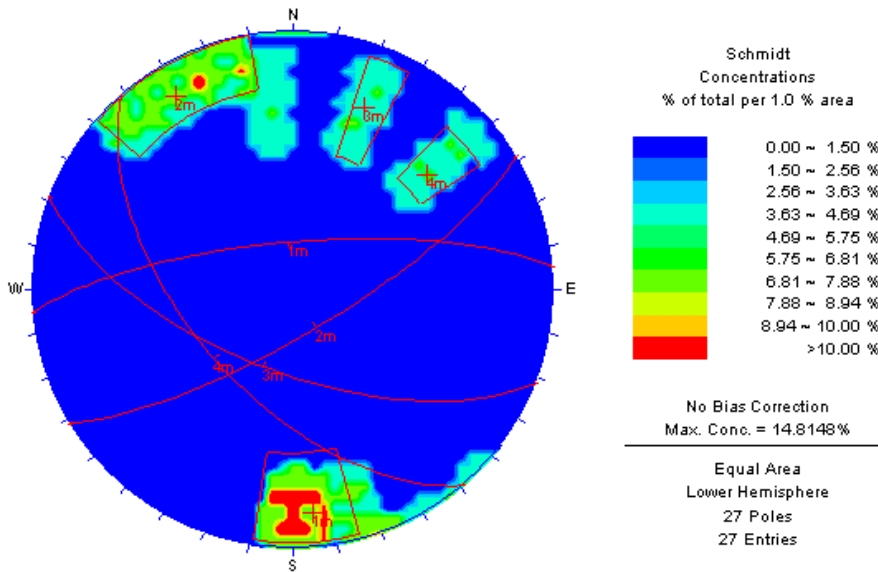


Figura 45 - Rede Estereográfica de *Schmidt-Lambert*, 1% em área, representando a distribuição do pólo das famílias de diáclases presentes no Domínio Estrutural Estanques Blancos.

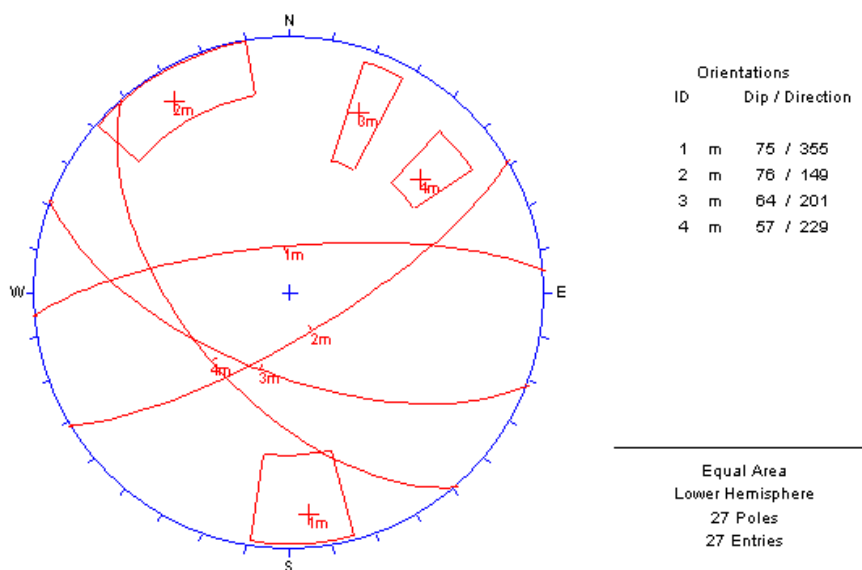


Figura 46 - Rede Estereográfica de *Schmidt-Lambert*, mostrando os planos médios das diáclases.

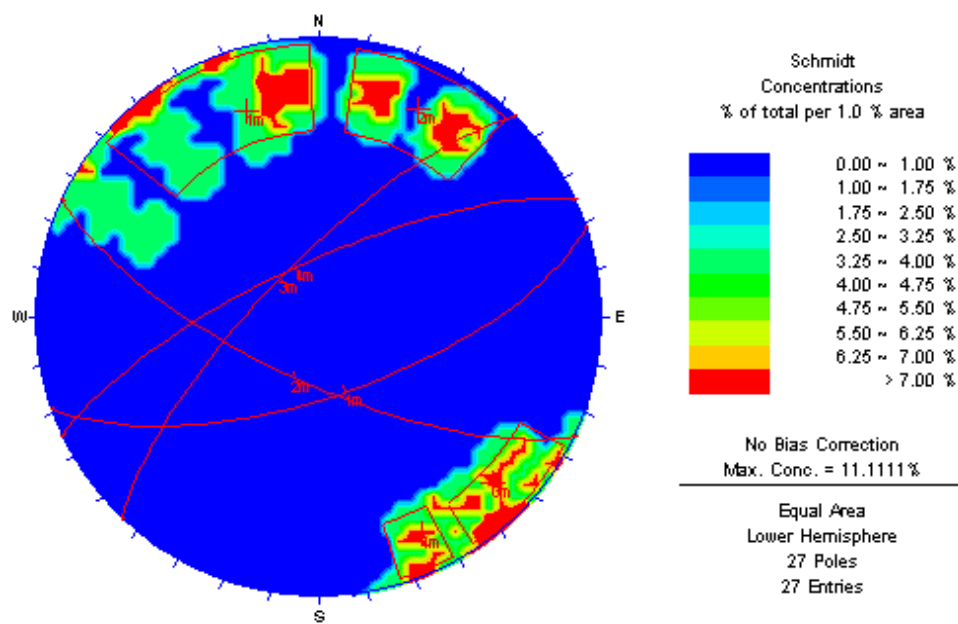


Figura 47 - Rede Estereográfica de *Schmidt-Lambert*, 1% em área, representando a distribuição dos pólo das falhas VIF, presentes no Domínio Estrutural Estanques Blancos.

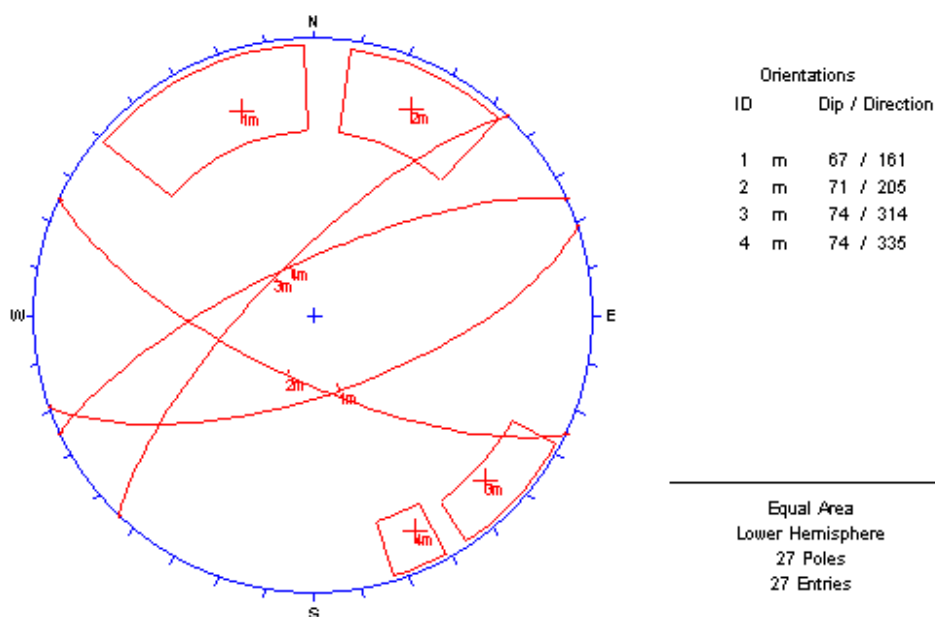


Figura 48 - Rede Estereográfica de *Schmidt-Lambert*, mostrando os planos médios das falhas VIF

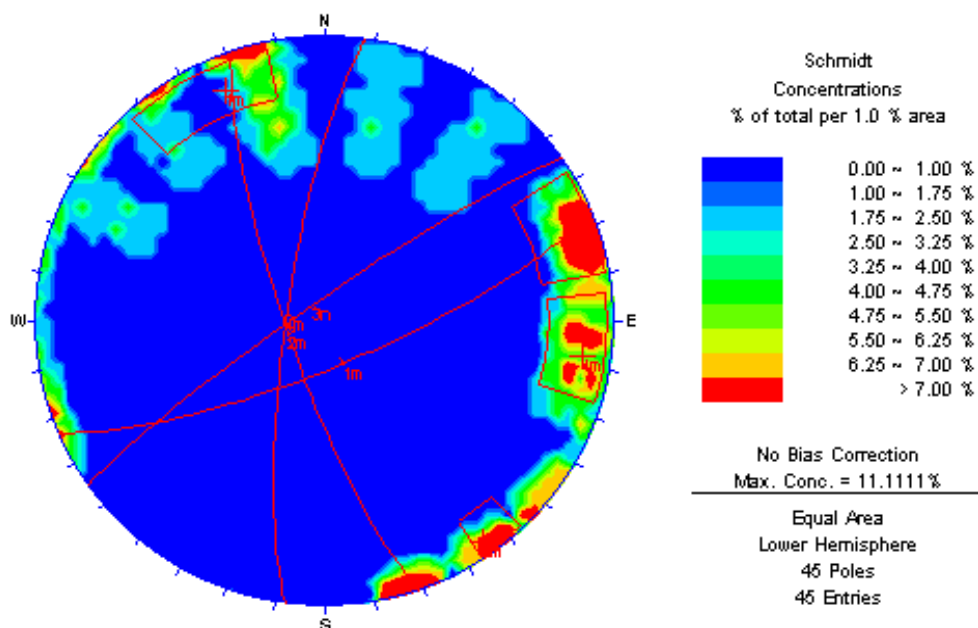


Figura 49 - Rede Estereográfica de *Schmidt-Lambert*, 1% em área, representando a distribuição dos pólo das falhas VIF, presentes no Domínio Estrutural Estanques Blancos.

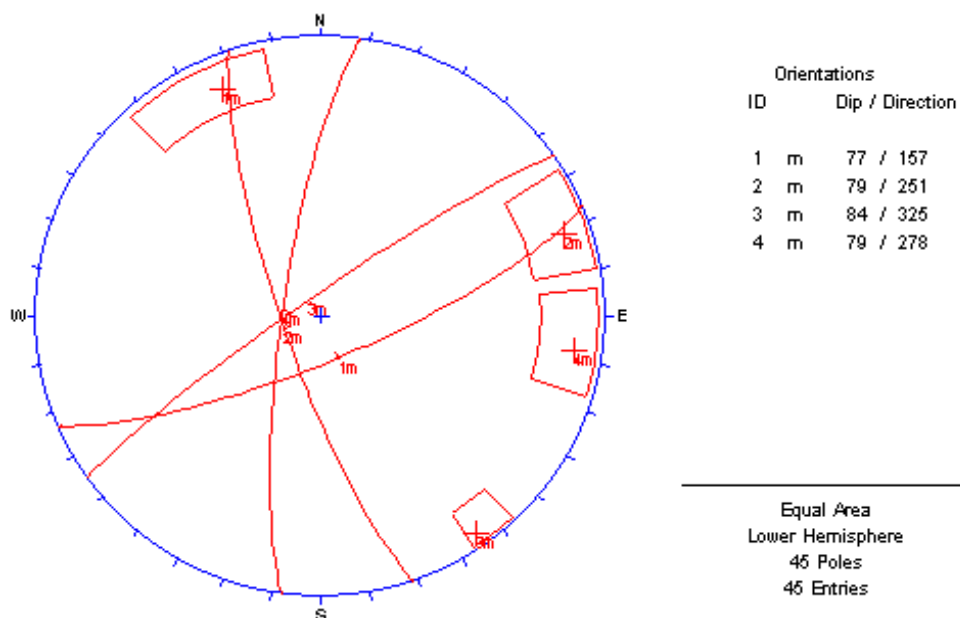


Figura 50 - Rede Estereográfica de *Schmidt-Lambert*, mostrando os planos médios das falhas FT.

6.2.6 Domínio Estrutural Noroeste

O Domínio Estrutural Noroeste está definido na parte centro - sul do talude leste do jazimento. A rede estereográfica representa o padrão direcional e a concentração das famílias das discontinuidades, conforme se demonstra a seguir:

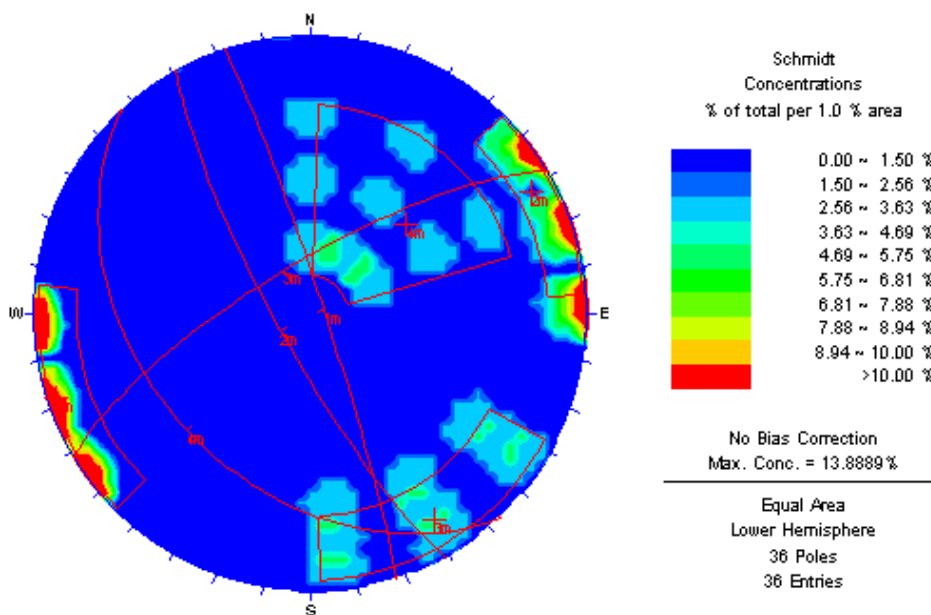


Figura 51 - Rede Estereográfica de *Schmidt-Lambert*, 1% em área, representando a distribuição das famílias de diáclases presentes no Domínio Estrutural Noroeste.

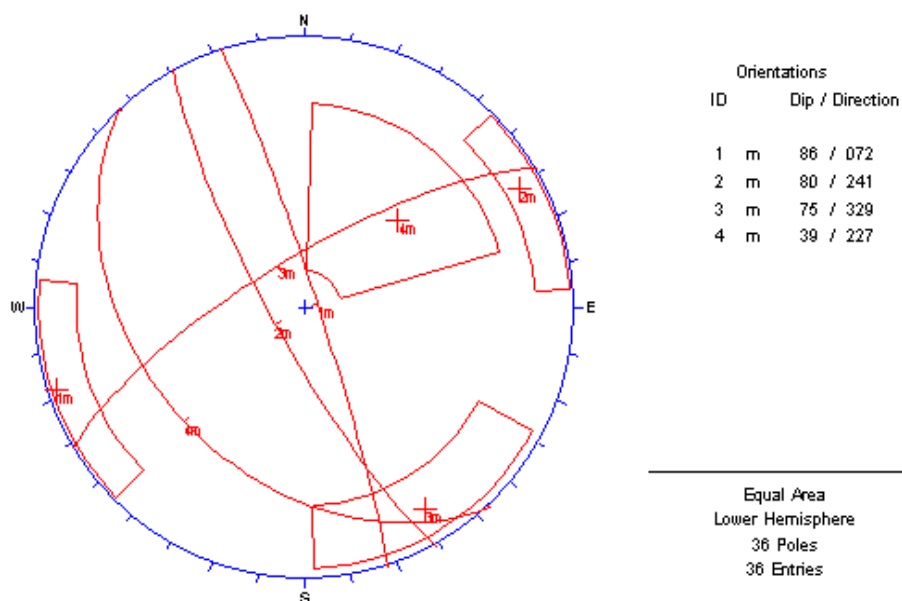


Figura 52 - Rede Estereográfica de *Schmidt-Lambert*, mostrando os planos médios das diáclases.

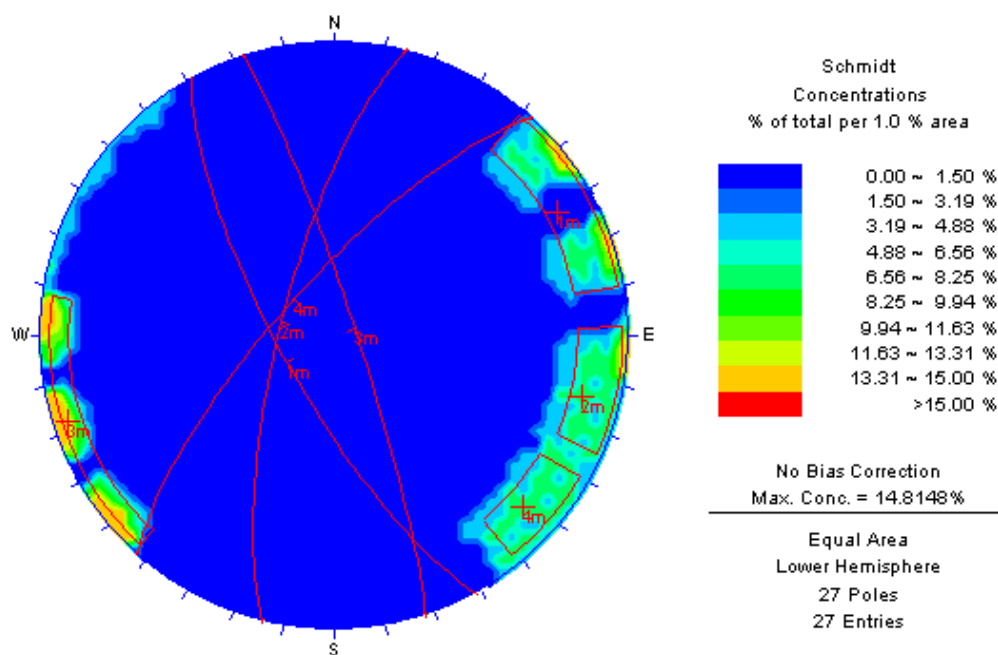


Figura 53 - Rede Estereográfica de *Schmidt-Lambert*, 1% em área, representando a distribuição do pólo das falhas VIF, presentes no Domínio Estrutural Noroeste.

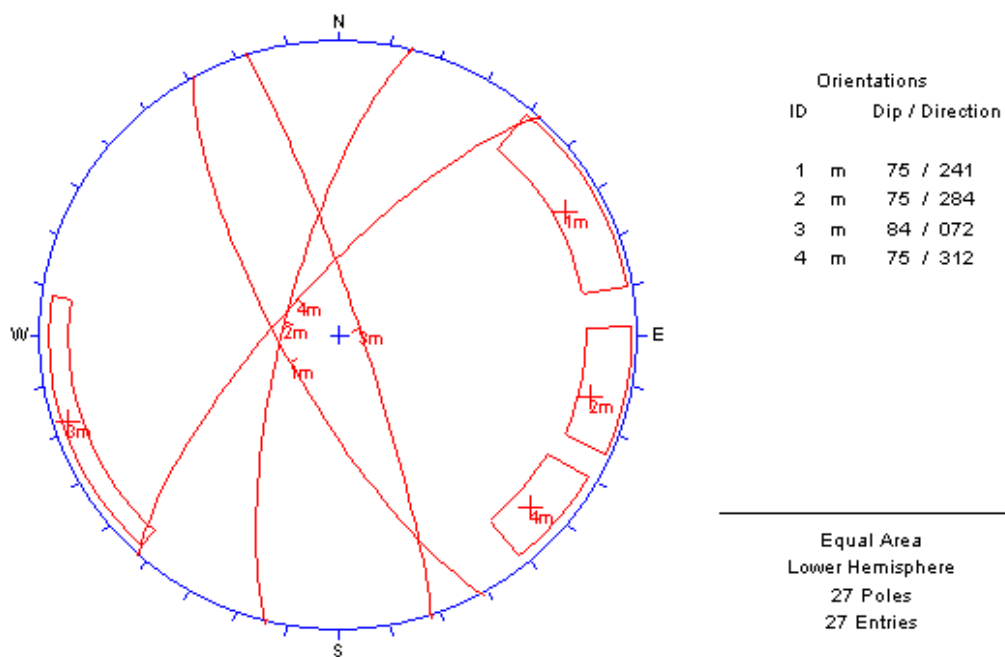


Figura 54- Rede Estereográfica de *Schmidt-Lambert*, mostrando os planos médios das falhas VIF.

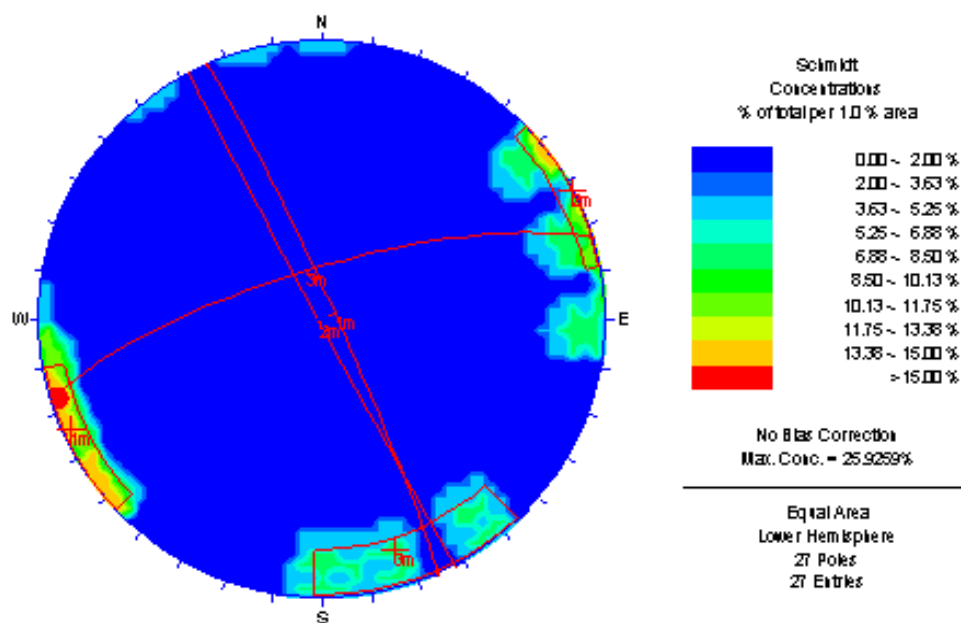


Figura 55 - Rede Estereográfica de *Schmidt-Lambert*, 1% em área, representando a distribuição do pólo das falhas FT, presentes no Domínio Estrutural Nor-Oeste.

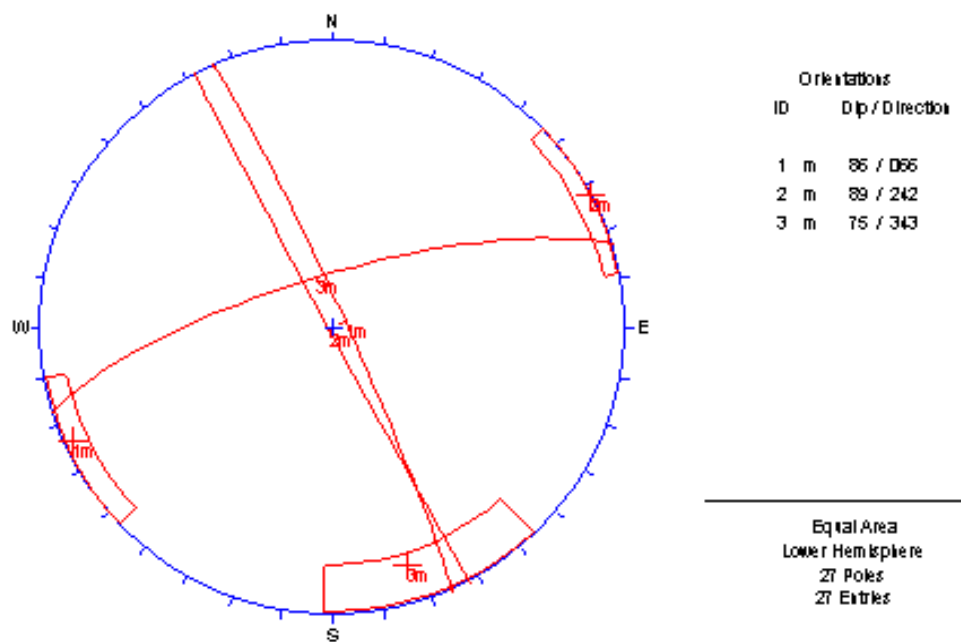


Figura 56 - Rede Estereográfica de *Schmidt-Lambert*, mostrando os planos médios das falhas FT.

6.2.7 Domínio Estrutural Mesabi

O Domínio Estrutural Mesabi é definido na margem leste do talude da cava. Os sistemas de falha importantes VIF e os traços de falha FT apresentam orientações preferenciais N-S e NW.

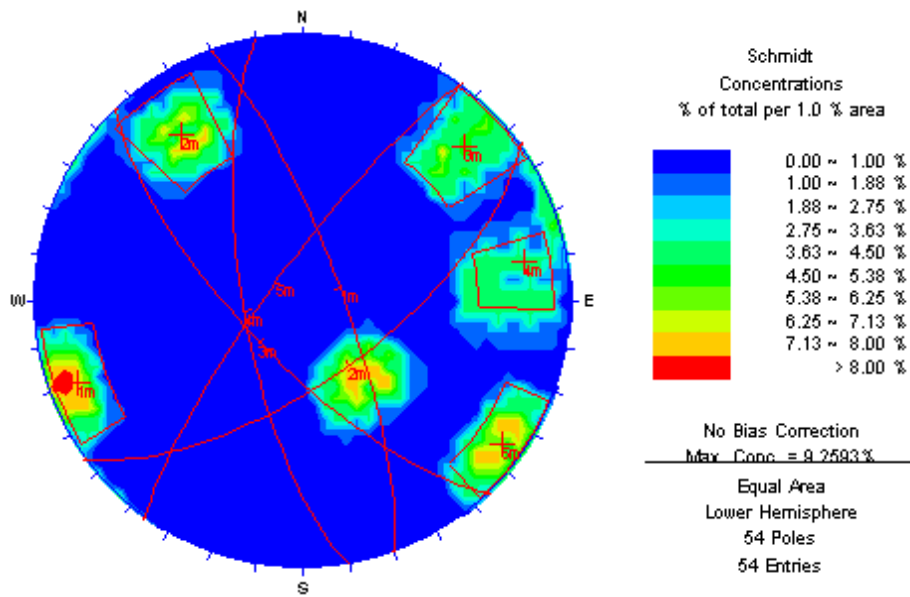


Figura 57 - Rede Estereográfica de *Schmidt-Lambert*, 1% em área, representando a distribuição do pólo das famílias de diáclases presentes no Domínio Estrutural Mesabi.

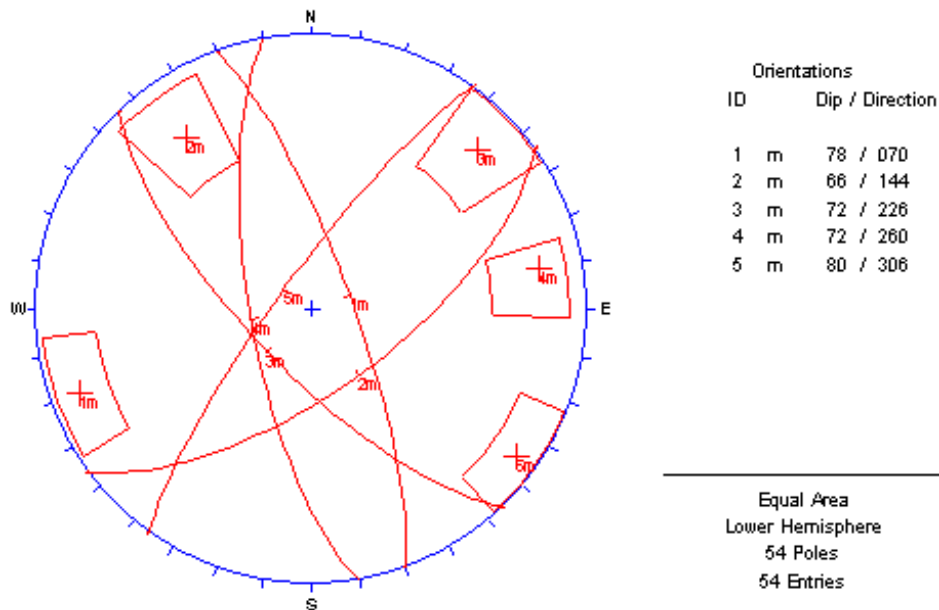


Figura 58 - Rede Estereográfica de *Schmidt-Lambert*, mostrando os planos médios das diáclases.

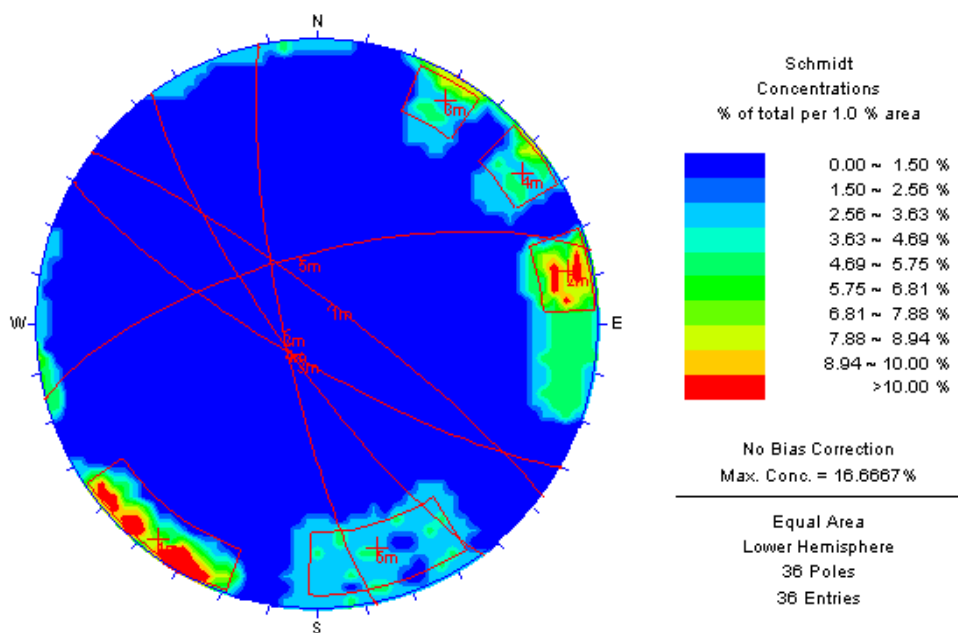


Figura 59 - Rede Estereográfica de *Schmidt-Lambert*, 1% em área, representando a distribuição do pólo das falhas VIF, presentes no Domínio Estrutural Mesabi.

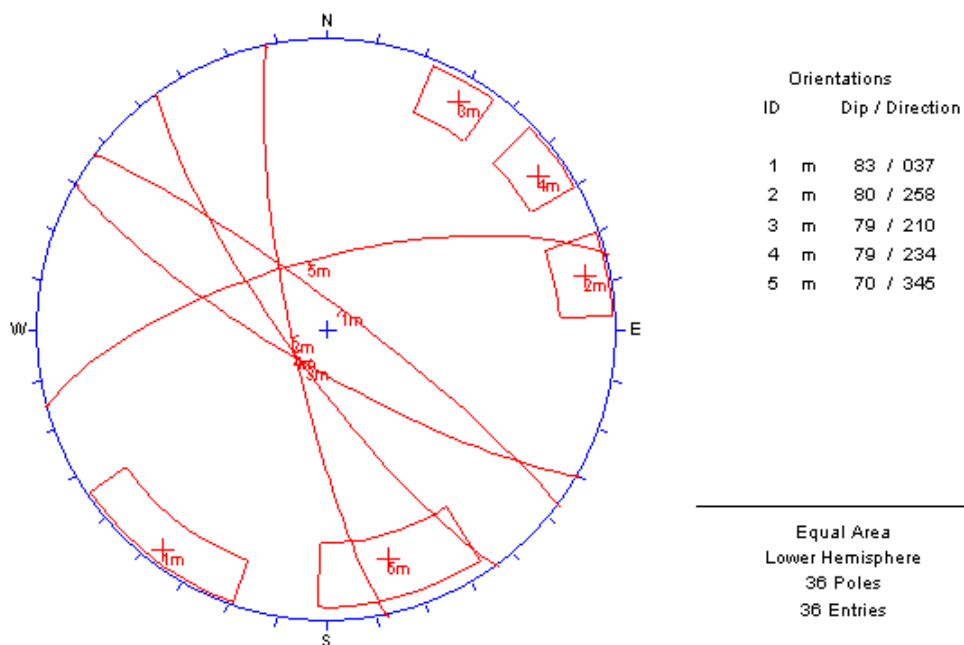


Figura 60 - Rede Estereográfica de *Schmidt-Lambert*, mostrando os planos médios das falhas VIF.

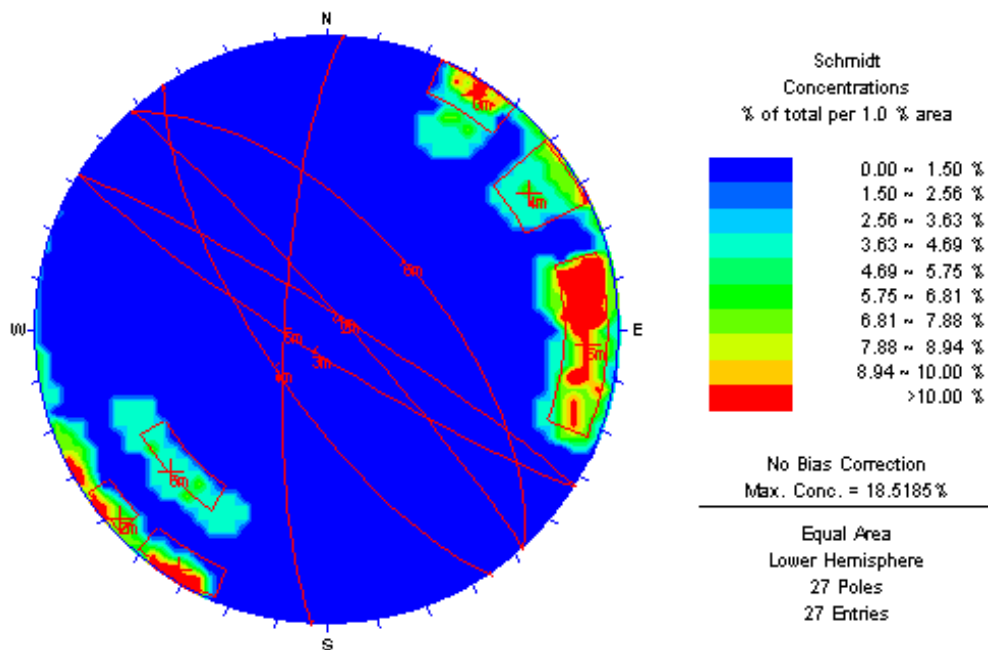


Figura 61 - Rede Estereográfica de *Schmidt-Lambert*, 1% em área, representando a distribuição do pólo das falhas FT, presentes no Domínio Estrutural Mesabi.

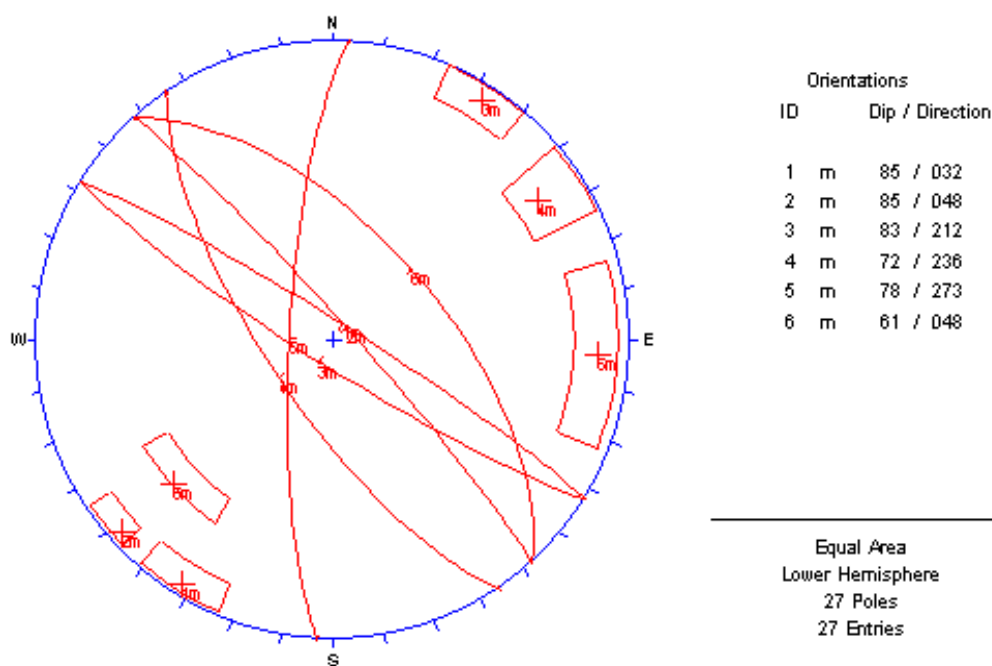


Figura 62 - Rede Estereográfica de *Schmidt-Lambert*, mostrando os planos médios das falhas FT.

6.2.8 Domínio Estrutural Zaragoza

O Domínio Estrutural Zaragoza está localizado na porção Norte da área cava, especificamente no talude leste do cava. Este domínio é relacionado com um antigo setor de exploração de um veio de cobre oxidado. Apresenta a distribuição dos sistemas de falhas e diáclases, conforme demonstrado nos estereogramas abaixo.

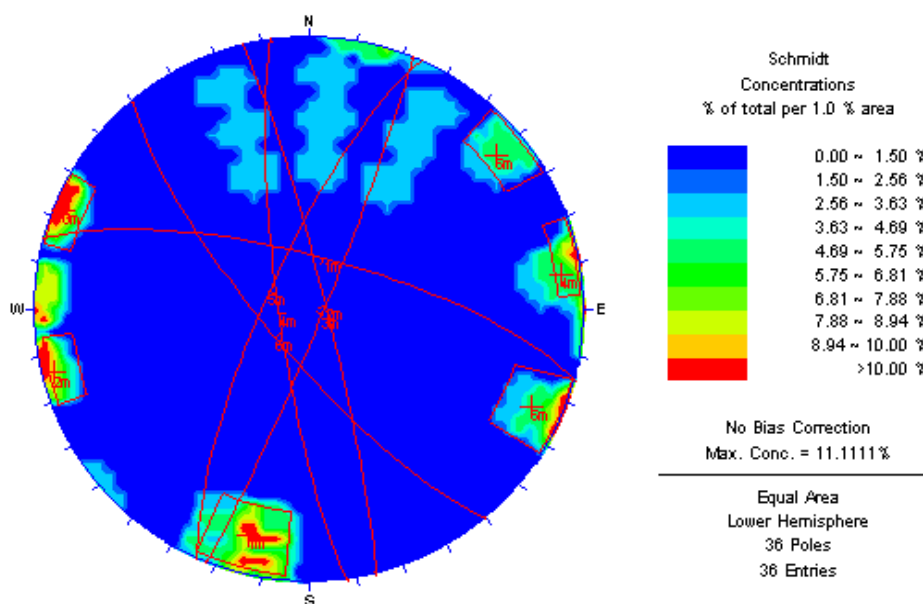


Figura 63 - Rede Estereográfica de *Schmidt-Lambert*, 1% em área, representando a distribuição das famílias de diáclases presentes no Domínio Estrutural Zaragoza.

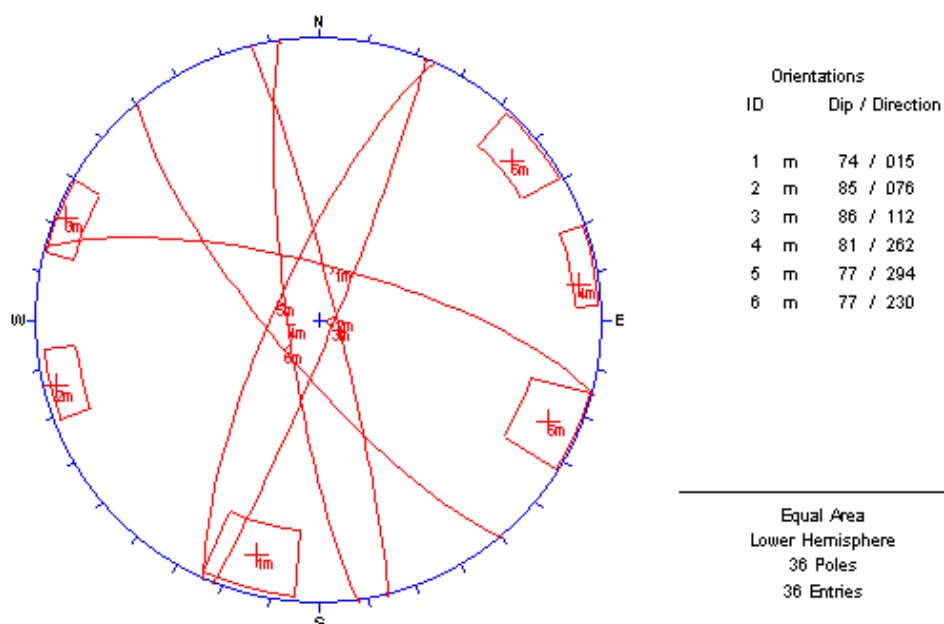


Figura 64 - Rede Estereográfica de *Schmidt-Lambert*, mostrando os planos médios das diáclases.

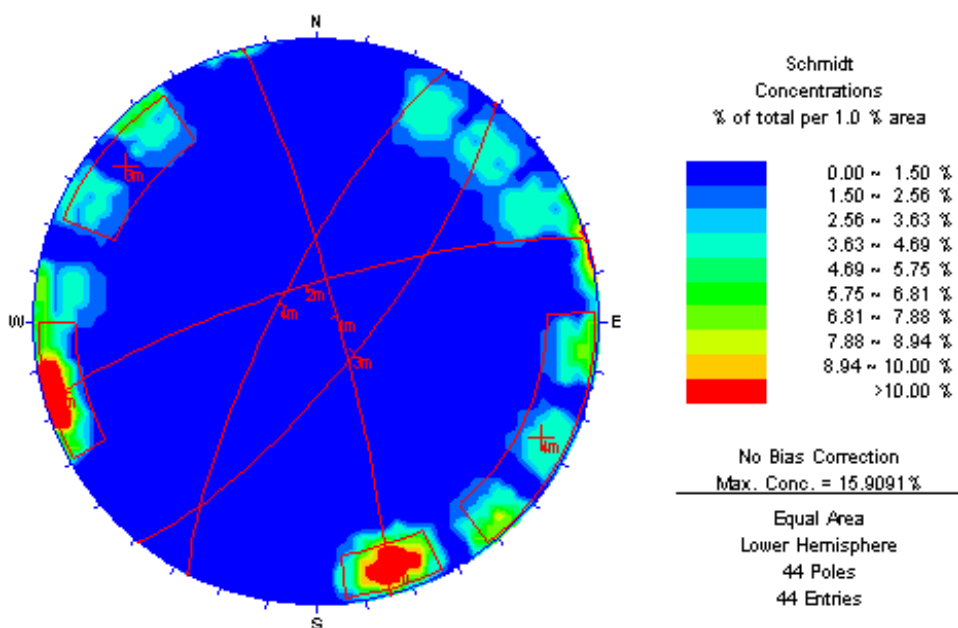


Figura 65 - Rede Estereográfica de *Schmidt-Lambert*, 1% em área, representando a distribuição do pólo das falhas VIF, presentes no Domínio Estrutural Zaragoza.

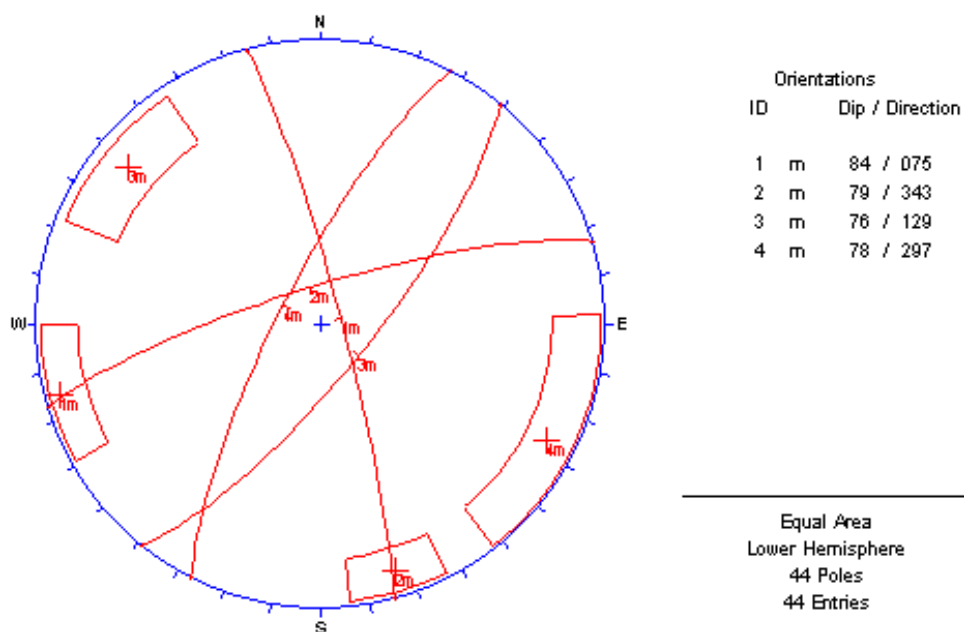


Figura 66 - Rede Estereográfica de *Schmidt-Lambert*, mostrando os planos médios das falhas VIF.

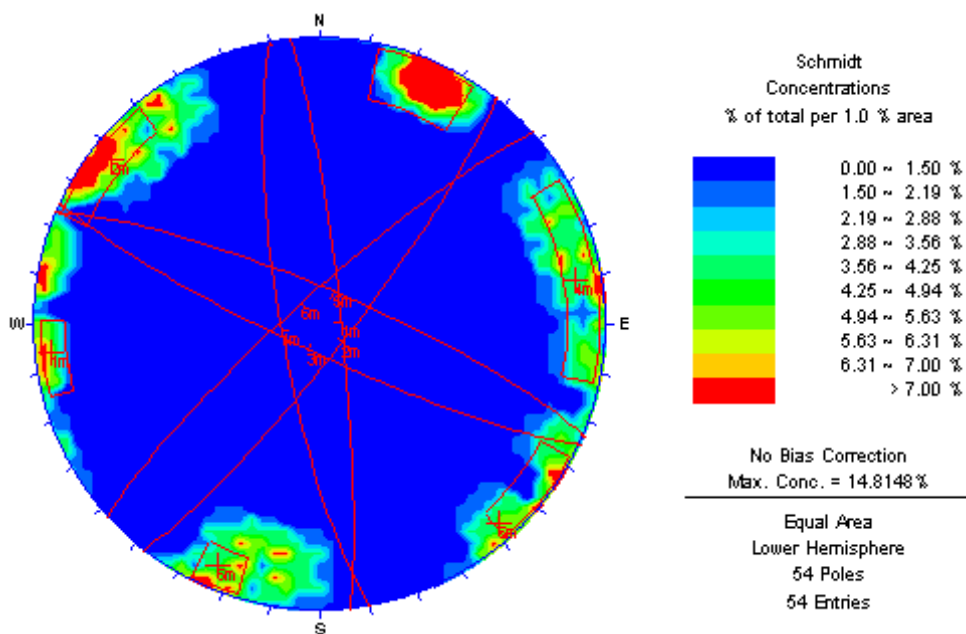


Figura 67 - Rede Estereográfica de *Schmidt-Lambert*, 1% em área, representando a distribuição do pólo das falhas FT, presentes no Domínio Estrutural Zaragoza.

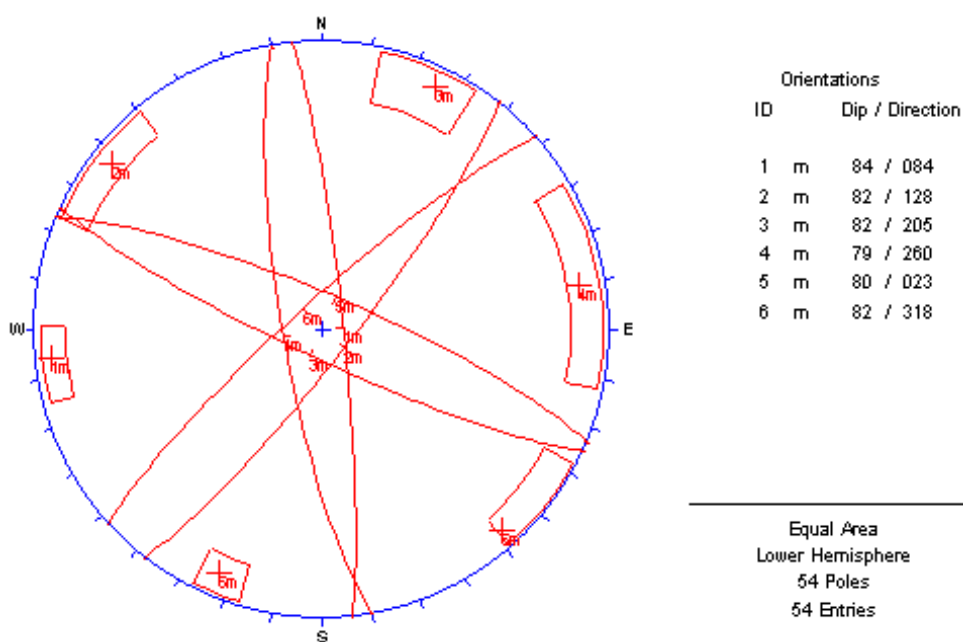


Figura 68 - Rede Estereográfica de *Schmidt-Lambert*, mostrando os planos médios das falhas FT.

7 Caracterização Geomecânica – Conceitos e Definições

As características e as condições da massa rochosa podem variar de uma mina para outra, como também, em áreas dentro da própria mina. A fim de organizar e manter uma adequada estratégia de controle das instabilidades das rochas em aberturas subterrâneas busca-se conhecer as suas características as suas condições, as quais permitirão a tomada de decisões corretas sobre os diferentes aspectos relacionados com a abertura, direção em que se deve avançar uma determinada escavação, tamanho desta abertura, tempo de exposição, tipo de reforço e/ou suporte a ser utilizado e o momento de sua aplicação.

Mesmo com muitos recursos disponíveis para a investigação de uma determinada mina, pode-se continuar a se ter problemas na aplicação de teorias e nas práticas de engenharia. Pode-se abordar quatro princípios no campo da mecânica das rochas, podendo ser **analítico, empírico, numérico e de observação**, sendo também a **classificação geomecânica considerada uma abordagem empírica** e é parte integrante dos projetos de engenharia civil e minas.

Na verdade, em construções subterrâneas, tunelagens e galerias de mineração subterrânea, a classificação da massa rochosa fornece subsídios importantes para a consolidação dos projetos de uma forma sistemática, na qual se podem identificar os parâmetros que influenciam a massa rochosa, sendo dividida em grupos com comportamento geomecânico similar e/ou semelhantes.

Também fornece uma base para o entendimento das características de cada grupo, além de embasar os dados quantitativos para o projeto de suporte da escavação. Os limites dos domínios estruturais geralmente coincidem com uma das principais características estruturais de uma mina, tais como uma falha ou a mudança no tipo de rocha.

Em alguns casos, mudanças significativas no espaçamento entre as descontinuidades ou em suas características dentro do mesmo litotipo (litologia) poderão exigir a divisão da massa rochosa em um número menor de domínios estruturais e geomecânicos, conforme se ilustra na figura 69.

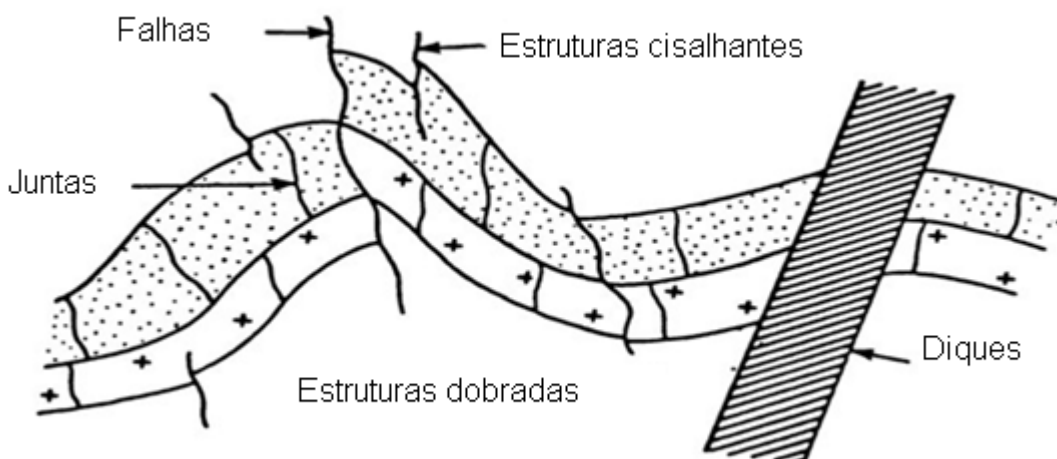


Figura 69 - Tipos de estruturas presentes dentro dos domínios estruturais.

A classificação geomecânica do maciço rochoso, a partir dos conceitos preestabelecidos, fornece uma base comum de comunicação entre a engenharia e geologia. Assim, se faz necessária uma descrição cuidadosa da estrutura e das características da natureza das descontinuidades presentes no maciço rochoso. Este procedimento é realizado por meio do mapeamento geológico das superfícies finais escavadas, juntamente com a caracterização geomecânica dos maciços rochosos.

No mapeamento geológico dos maciços rochosos, objetiva-se a identificação de todas as características e propriedades da rocha e das descontinuidades que a compõe, evidenciando os atributos do meio rochoso importantes para o entendimento e a predição do comportamento do maciço, quando sujeito às solicitações impostas por uma obra subterrânea.

O produto do mapeamento geológico-geomecânico de um maciço, pode ser representado em uma planta em **2D** ou numa **projeção em 3D**, na qual consta-se cartografadas todas as feições e defeitos da massa rochosa trecho a trecho, ou seja, a cada estaca, todas as características e estruturas intrínsecas do maciço rochoso é observado e mensurado “*in loco*”. De modo geral, as características mais visadas na caracterização de maciços rochosos relacionam-se à **litologia, estado de alteração, coerência, padrão de fraturas, rocha intacta e, principalmente, a orientação das discontinuidades, geometria dos blocos e campos de tensões.**

Os fatores que influenciam na estabilidade de uma massa rochosa com a presença de juntas, à frente de uma escavação subterrânea são: **a resistência do material rochoso, a freqüência de juntas, a resistência das superfícies das discontinuidades, a tensão confinante e a presença d’água.**

A orientação das discontinuidades, em relação ao traçado da escavação, pode exercer uma influência na estabilidade do teto e das paredes laterais. Com base na estratificação e/ou nas discontinuidades presentes no maciço rochoso, então pode se analisar quatro casos distintos, conforme se descreve abaixo:

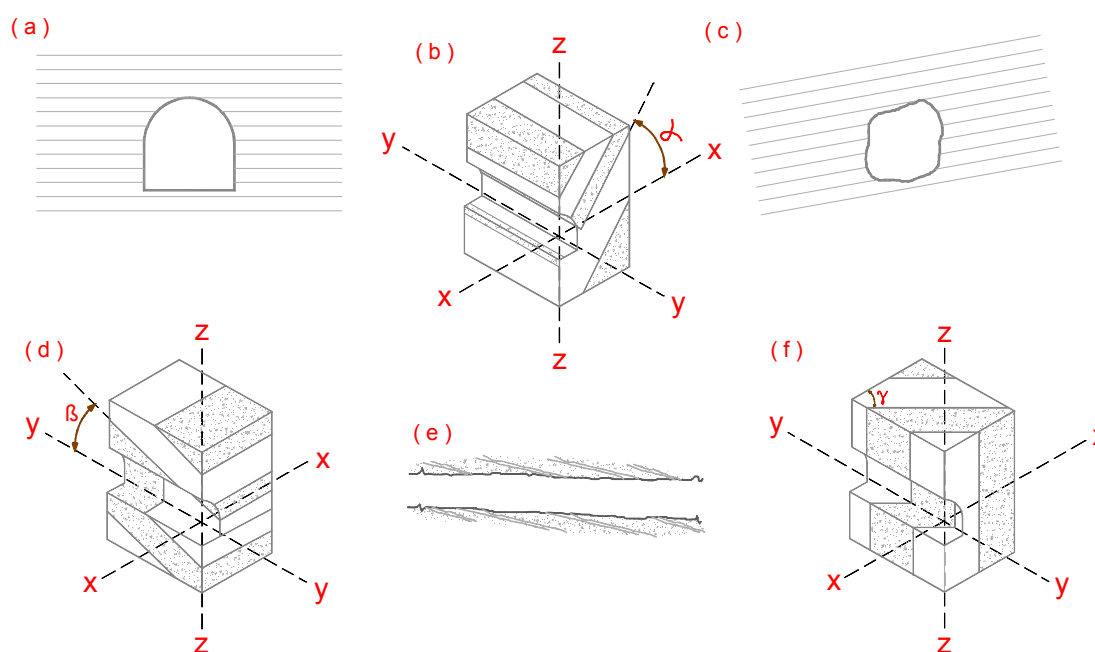


Figura 70 (a), (b), (c), (d) e (f) - Orientação das estruturas versus direção das escavações.

Caso1: rocha com estruturas laminadas e/ou estratificadas, com o teto da escavação paralelo à estratificação, conforme se mostra na figura 70 (a). A rocha é considerada laminada quando composta por uma sucessão paralela, cujas espessuras são pequenas em relação ao diâmetro ou a altura da abertura, e quando a ligação entre as camadas é nula ou possui resistência inferior à resistência à tração dos estratos rochosos. Nesse caso, o maciço pode ser considerado isotrópico para análise de estabilidade das paredes, que serão estáveis, mas o teto oferece grandes problemas de estabilidade em função das características de resistência de cada camada.

Caso 2: Descontinuidade inclinada e paralela ao traçado da escavação, conforme a figura 70 (b). Se $\alpha = 0^\circ$, a situação é idêntica ao caso 1. Para $0^\circ < \alpha < 20^\circ$, não haverá problema de estabilidade nas paredes, mas a situação do teto será crítica e, geralmente, a forma do teto da escavação será condicionada pelos estratos figura 70 (c). Para $70^\circ < \alpha < 90^\circ$, a situação de estabilidade da escavação dependerá do estado de tensões do maciço rochoso.

Se as tensões horizontais forem superior a $1/3$ das tensões verticais, o maciço rochoso pode ser considerado isotrópico e algumas quedas de blocos do teto e das paredes pode eventualmente ocorrer. Caso $\sigma_h < 1/3 \sigma_v$, as tensões de tração criarão grandes problemas de instabilidade no teto da escavação.

Para $20^\circ < \alpha < 70^\circ$, a situação de instabilidade no teto é semelhante ao caso anterior, porém a instabilidade das paredes é maior, sendo mais iminente a ruptura por cisalhamento em um dos lados da escavação.

Caso 3: Descontinuidade inclinada e perpendicular ao traçado do túnel figura 65 (d). Se $\beta=0^\circ$, a situação é idêntica ao caso 1. Para $0^\circ < \beta < 20^\circ$, a situação das paredes é ao caso $0^\circ < \alpha < 20^\circ$, mas a situação do teto é bem diferente.

A escavação ocorre na direção do mergulho da descontinuidade e, se ocorrer uma camada de baixa resistência, Figura 70 (d), será muito extenso o trecho em que a escavação terá tal camada como teto que exigirá um intenso programa de estabilização com o uso de suportes. À medida que β vai aumentando, diminui a necessidade de ancoragem no teto, e não haverá problema de estabilidade nas paredes da escavação, qualquer que seja o valor de β . A melhor situação de intersecção de uma descontinuidade por uma escavação subterrânea horizontal é quando $\beta=90^\circ$.

Caso 4: Descontinuidade vertical e fazendo um ângulo qualquer com a direção da escavação, conforme a figura 65 (f).

Para $\gamma=90^\circ$, a situação corresponde ao caso em que $\alpha=90^\circ$.

Para $\beta=90^\circ$, ou seja, é a melhor situação para a abertura de uma escavação subterrânea horizontal.

Para $70^\circ < \gamma < 90^\circ$, as condições do teto e das paredes assemelham-se à situação em $\alpha=90^\circ$.

Para $20^\circ < \gamma < 70^\circ$, algum suporte pode ser necessário no teto e nas paredes.

A Influência do estado de tensão no comportamento geomecânico de um maciço rochoso ao ser escavado por uma galeria ou túnel ou qualquer outro tipo de escavação subterrânea é ditado pelo estado de tensões gerado no entorno da abertura.

No caso de uma escavação circular, as tensões tangenciais às paredes de escavação, sejam no teto ou lateralmente, desenvolvem-se conforme indicado na figura 70 (a) Nesta figura, σ_{θ} é a tensão tangencial e σ_y , a tensão vertical. Observa-se que, na crista, do teto as tensões são negativas e de mesmo valor de σ_y . Ocorre, assim, uma tração horizontal no topo do teto do túnel de intensidade igual à tensão imposta pelo peso da rocha, considerando o efeito de arco imposto pela abertura.

As tensões tangenciais negativas se anulam aproximadamente a 1/3 do arco compreendido entre o raio na vertical (y) e na horizontal (x). A partir daí, as tensões tangenciais são compressivas, assumindo o valor máximo na perpendicular à horizontal, quando são correspondentes a $3\sigma_y$. Nessas circunstâncias, pode-se prever que tensões de tração no teto propiciarão a abertura de fraturas paralelas ao traçado da escavação, além de facilitarem a flexão de camadas subhorizontais.

Por outro lado, as tensões compressivas que se distribuem para as paredes laterais aumentam as possibilidades de ruptura por cisalhamento ao longo dessas paredes, principalmente quando as descontinuidades possuem um ângulo $\alpha > 70^\circ$, figura 70 (c).

Com relação ao teto, deve-se analisar se as geometrias das descontinuidades, já comentadas anteriormente, não aumentem o problema criado pelas tensões de tração. Nos casos críticos, devem se executar ensaios de flexão, deformabilidade e tração nas rochas que compõem o teto.

No caso de estruturas horizontais do maciço de teto, os valores de deflexão, tensão de cisalhamento e tensão de tração que atuam em um estrato de rocha no teto são dadas pelas seguintes expressões:

$$\eta_{\text{máx.}} = (\gamma \times L^4) / 32E \times t^2 \quad \tau_{\text{máx.}} = (3\gamma \times L) / 4 \quad \sigma_{\text{máx.}} = (\gamma \times L^2) / 2t ; \text{ Onde:}$$

$\eta_{\text{máx.}}$ = deflexão máxima;

$\tau_{\text{máx.}}$ = tensão de cisalhamento máxima;

$\sigma_{\text{máx.}}$ = tensão de tração máxima;

L = vão do estrato no teto;

t = espessura do estrato;

γ = peso específico da rocha;

E = módulo de deformabilidade da rocha.

Nas paredes laterais, as conseqüências dos esforços compressivos não são as mais desastrosas, a não ser que o estado de tensões naturais ou virgens seja muito elevado, em função da tectônica local, podendo levar a problemas de “*spalling*” ou *rockburst*”, ou seja, empastilhamento ou explosões naturais de rocha.

Quando fragmentos de rocha são ejetados violentamente para o interior da escavação. Esta instabilidade elástica pode ocorrer tanto no teto como nas paredes da escavação, este efeito é devido ao desequilíbrio entre as tensões elevadas e a resistência do material rochoso. O problema das paredes laterais deve ser observado com mais atenção quando duas ou mais aberturas são feitas em paralelo e muito próximas entre si.

Nesse caso, o espaçamento entre as aberturas funciona como um pilar, o qual receberá o efeito do arqueamento das tensões verticais provenientes das duas escavações atuando simultaneamente.

Assim, enquanto no caso de uma só abertura a tensão σ_θ - que assume o maior valor quando atua perpendicularmente no eixo horizontal - decresce rapidamente para o interior do maciço, tornando nulo o efeito da abertura a uma distância igual ao diâmetro da abertura figura 70 (b). Esse efeito é somado quando duas aberturas são feitas muito próximas.

Nesse caso, a tensão no pilar é calculada pelo valor médio σ_p , que depende da relação entre o diâmetro da escavação (W_o) e o espaçamento entre as escavações (W_p). Por exemplo, para uma relação $W_o/W_p = 5$, a tensão vertical que atua no pilar (σ_p) existente entre as escavações é igual a $6\sigma_y$, o que pode ser suficiente para provocar a ruptura do pilar.

Em função das discontinuidades existentes, torna-se necessário, nesses casos, calcular a resistência do maciço rochoso que integra o pilar e dividir essa resistência pela tensão calculada pela equação de σ_p , conforme a figura 70 (c). Essa relação constitui o fator de segurança do pilar contra a ruptura.

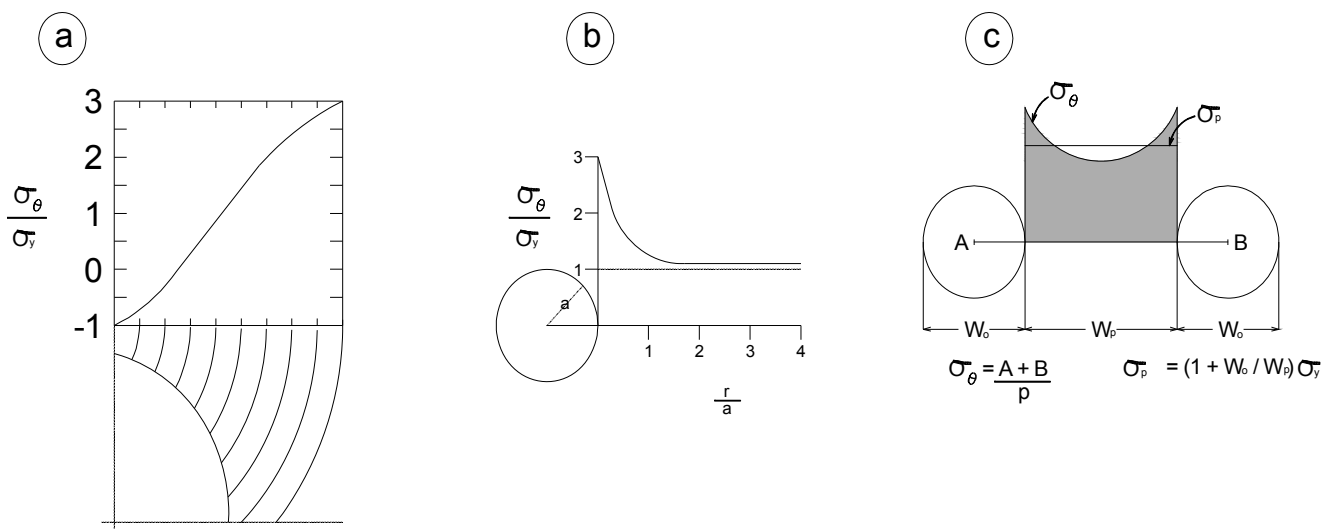


Figura 71 - Distribuição de tensões no entorno das aberturas: relação entre σ_θ e σ_y nas paredes (a), e no entorno (b); tensões sobre o pilar formado por duas aberturas próximas (c).

7.1 Influência da Geometria nas Aberturas Subterrâneas

A geometria das aberturas induz a variações significativas no estado de tensões no entorno da cavidade, ou, mais precisamente, no teto e nas paredes. Para cada tipo de abertura, ou seja, o *shape* (geometria) irá apresentar estados de tensões distintos.

Assim, quando for possível variar a forma da escavação, deve-se conciliar a forma escolhida com as conseqüências que o estado de tensões impuser à escavação, levando em consideração a geometria das discontinuidades presentes no maciço rochoso.

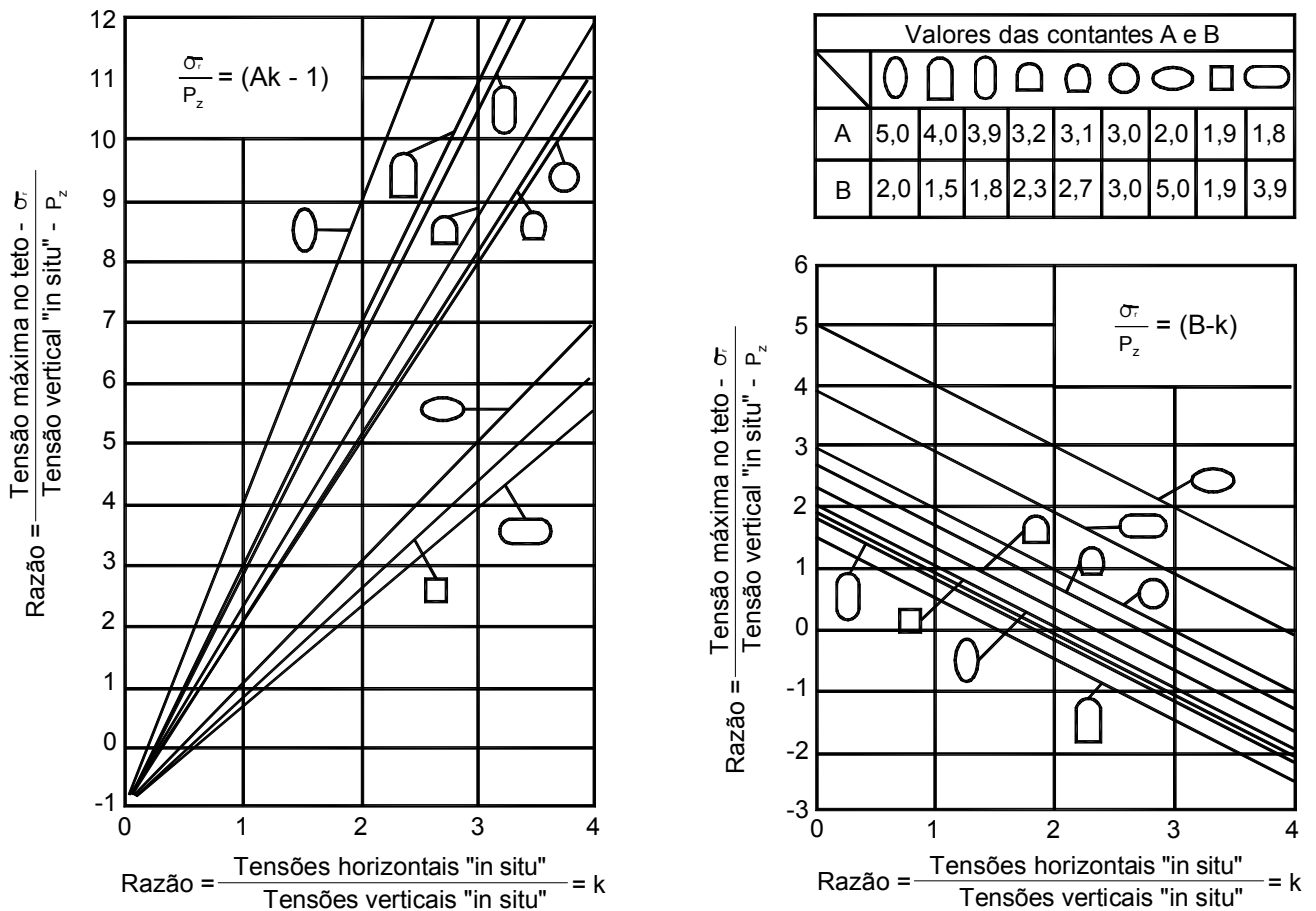


Figura 72 – Influência da forma das aberturas sobre as tensões que atuam em seu entorno. Fonte: Hoek e Brown (1980).

O interesse nas classificações geomecânicas consiste em sistematizar o conjunto de elementos, buscando melhorar a qualidade das investigações e dos dados mínimos de classificação. Além disso, de fornecer informações quantitativas para fins de projeto, habilitando um melhor julgamento da engenharia subterrânea e a comunicação mais eficaz dentro do projeto.

Dentre as várias classificações geomecânicas existentes no campo da geomecânica referem-se, nesta monografia, às de Barton *et al.*, 1974 (sistema-Q) e a de Bieniawski *et al.*, 1989 (RMR). Na aplicação dos sistemas de classificação geomecânica, a massa rochosa é dividida em um número de regiões ou domínios geotécnicos, sendo cada domínio classificado separadamente.

Os limites das regiões estruturais geralmente coincidem com uma das principais características estruturais presentes dentro dos domínios, tais como: falhas, tipos de rocha ou características geotécnicas distintas dentre outras. Em alguns casos, mudanças significativas no espaçamento das descontinuidades, ou características dentro do mesmo tipo de rocha poderão exigir uma divisão da massa de rocha em um número menor de domínios estruturais.

Os sistemas de classificações são descrita abaixo:

8 Classificação de Barton (Sistema-Q)

A classificação de Barton está embasada na observação de um grande número de escavações subterrâneas, Barton *et al.*, 1974. Esta classificação geomecânica define o **índice de qualidade da massa rochosa** através de **6 (seis)** parâmetros importantes e relevantes na caracterização do maciço rochoso. O valor numérico do índice Q apresenta uma variação, entre 10^{-3} a 10^3 , sendo este valor é determinado pela expressão abaixo.

$$Q = (RQD/J_n) \times (J_r/J_a) \times (J_w/SRF)$$

Os valores dos parâmetros de Barton têm o significado indicado na prancha 01. É de salientar que os três quocientes que compõem a expressão correspondem a três aspectos relativos ao maciço rochoso:

O sistema Q para a classificação da massa rochosa foi desenvolvido em 1974, na Noruega, pelo Prof. Nick Barton. O sistema foi proposto após a aplicação e análise de 212 túneis em casos na Escandinávia. Hoje totaliza sua aplicação em mais 1.250 casos de túneis, ou seja, 60% na Escandinávia, em 40% na Europa, USA, Japão, México, Chile e no Brasil.

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF}$$

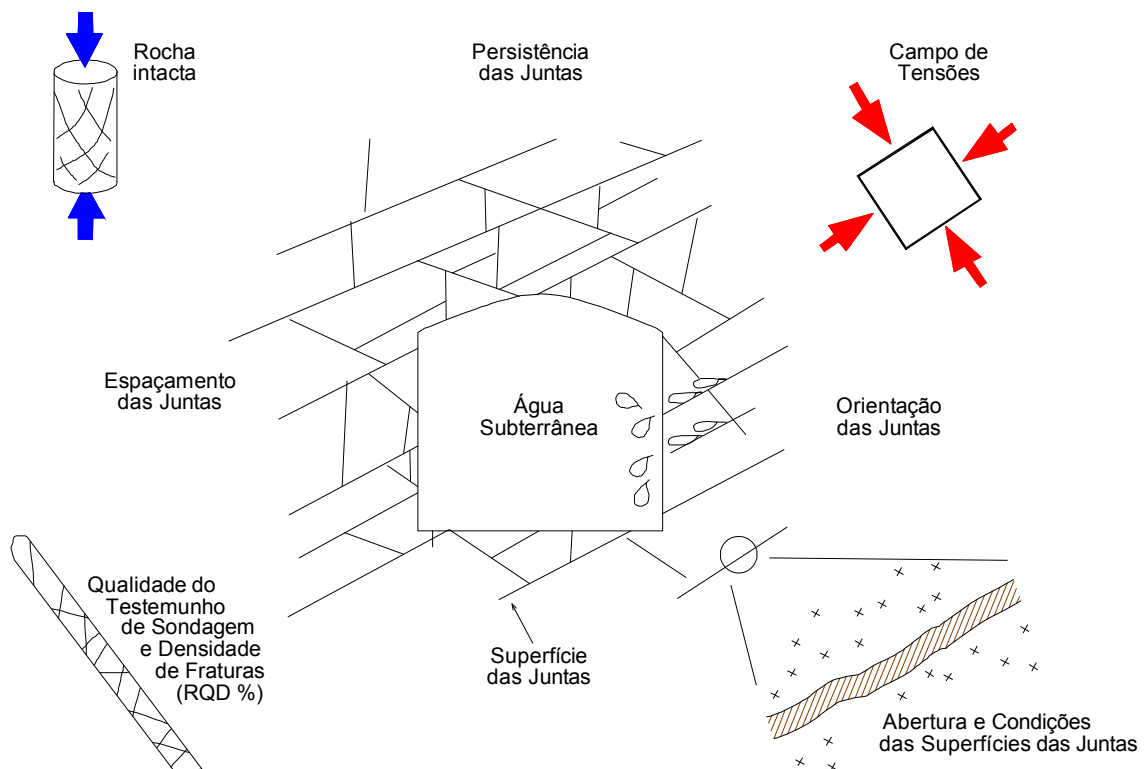


Figura 73 - Parâmetros básicos utilizados a classificação geomecânica da massa rochosa.

Os seis parâmetros utilizados na classificação do sistema Q significam:

RQD = Índice da qualidade da rocha, (Deere *et. al.*, 1967);

Jn = Índice de influência do número de famílias das fraturas;

Jr = Índice de influência da rugosidade das paredes das fraturas;

Ja = Índice de influência da alteração das paredes das fraturas;

Jw = Índice de influência da ação d'água subterrânea nas fraturas;

SRF = Índice de influência do estado de tensão do maciço (relacionada com a presença das zonas de cisalhamento, concentração de tensão e “squeezing” e “swelling”. Fator redução de tensão.

Estes **três quocientes** são importantes na avaliação de uma escavação subterrânea de uma mina e/ou túneis quanto a sua estabilidade, juntamente com as diretrizes de suporte sugeridos pelo sistema Q.

(RQD/Jn) caracteriza a estrutura do maciço rochoso e constitui uma medida do bloco unitário. Este quociente está relacionado com a geometria da massa rochosa, desde que o RQD aumente com a diminuição do número de famílias de descontinuidade. Representa o descontínuo da estrutura da massa rochosa, pode ser considerado um medidor do tamanho de blocos ou de partículas

(Jr/Ja) representa as características de rugosidade das paredes das descontinuidades e o seu preenchimento, ou seja, o grau de alteração das paredes das descontinuidades. Este quociente diz respeito à resistência ao cisalhamento inter-blocos. Valores altos representam uma melhor qualidade mecânica do maciço rochoso.

É de se esperar que algumas superfícies fechadas apresentem uma resistência de pico, quando fortemente cisalhada irá se dilatar e apresentar uma instabilidade para uma escavação subterrânea. Quando as descontinuidades apresentarem-se preenchidas por material argiloso, a força será reduzida significativamente.

(Jw/SRF) representa o estado de tensão no maciço rochoso: o fator SRF caracteriza o estado de tensão no maciço rochoso, em profundidade, ou as tensões de expansibilidade, bem como as formações incompetentes de comportamento plástico, sendo a sua avaliação feita a partir de evidências de liberação de energia (explosão de rocha); o fator Jw representa a medida desta pressão. (tensão ativa).

Este quociente incorpora o fator de água, os fluxos do percolado pelas as descontinuidades, além a presença das zonas de cisalhamento, falhas etc., também o estado de tensão “*in situ*” presente no meio rochoso. O decréscimo da pressão da água favorece em razões as tensões “*in situ*”.

- . Relaxamento de tensão causada pela escavação, através das zonas de cisalhamento ou pela expansão das argilas dos preenchimentos das descontinuidades;
- Tensão em rocha competente;
- Deformações plásticas das rochas incompetentes.

SRF pode ser considerado um parâmetro de tensão total. Descreve a tensão ativa.

Sem dúvida existem vários outros parâmetros que podem ser adicionados para melhorar a precisão do sistema de classificação. Um destes seria a orientação das descontinuidades. Embora em muitos casos seja necessário incluir informações sobre a orientação das estruturas em relação ao eixo de escavação.

Segundo Barton, os parâmetros **Jn**, **Jr** e **Ja** parecem desempenhar um papel mais importante do que a **orientação das descontinuidades**, porque o número de grupo de juntas determina o grau de liberdade para o movimento dos blocos (se houver), e a característica friccional e dilatacional pode variar mais do que o *down-dip* da componente gravitacional das juntas, com orientações não favoráveis à escavação.

As vantagens do uso do sistema Q de Barton é que seus parâmetros são usados com medidas do tamanho dos blocos e inter-blocos, resistência ao cisalhamento e tensões ativas, todos os fatores críticos e importantes para a determinação e análise para problemas subterrâneos como, por exemplo: queda de blocos chaves, tensões anômalas em condições do SRF elevados. Também pode ser utilizado diretamente no acompanhamento das condições do maciço, antes e depois de ser escavado, podendo ser definido o sistema de suporte necessário para a estabilização do maciço logo depois de escavado.

A orientação das juntas não é levada em consideração, uma vez que é considerado o número de famílias de juntas e, portanto, o potencial de liberdade dos movimentos dos blocos de rocha é mais importante.

9 Classificação de Bieniawski (Sistema RMR)

A classificação de Bieniawski foi desenvolvida em 1973 e publicada em 1976, tendo por base uma vasta experiência colhida em obras subterrâneas.

A classificação de Bieniawski ou sistema RMR "**Rock Mass Rating**" é, atualmente, muito divulgada e utilizada e tem sido sucessivamente refinada na medida em que são incluídos os resultados de análises de um maior número de casos práticos. Nesta monografia será apresentada a versão 1989 (modificada).

A classificação geomecânica de Bieniawski é baseada no princípio da atribuição de **pesos aos seis parâmetros** que Bieniawski considera contribuir mais significativamente para o comportamento dos maciços rochosos, tendo em especial atenção para o caso das obras subterrâneas. O somatório dos pesos atribuídos a cada um destes parâmetros consiste num índice, usualmente designado por **RMR₈₉**, conforme a expressão abaixo, ao qual corresponde uma das cinco classes de qualidade de maciço rochoso, consideradas pelo autor. Os parâmetros utilizados na classificação são os seguintes: (ver prancha 01)

$$\mathbf{RMR_{89} = J1 + J2 + J3 + J4 + J5 + J6}$$

J1- Resistência à compressão uniaxial da rocha intacta (UCS);

J2- RQD “Rock Quality Designation” (Qualidade da rocha);

J3- Espaçamento entre as descontinuidades;

J4- Condição das descontinuidades;

J5- Influência da água no subterrâneo;

J6- Orientação das descontinuidades.

A aplicação da classificação geomecânica a um maciço rochoso implica na divisão deste em várias regiões geotécnicas (zonas) a serem classificadas separadamente. As fronteiras destas regiões coincidem usualmente com as estruturas geológicas principais, tais como: falhas, fraturas e/ou mudanças do tipo de rocha a ser interceptada.

Os sistemas de classificação da massa rochosa formam a base para os projetos de engenharia de minas, nos quais contribuem para o dimensionamento do método de extração a serem aplicados em uma determinada lavra subterrânea, além da geometria das aberturas a serem executadas e também, os requisitos de suporte necessários para a sua segurança e estabilização.

A partir dos dados das curvas de nível da cava da mina de Chuquicamata vetorizaram-se com o uso do software **AutoCad Civil 3D**[®] gerando a modelo da superfície da cava e as projeções das escavações subterrâneas realizadas, como a rampa de exploração e o túnel de drenagem do projeto Subterrâneo Chuquicamata. Figura 74.

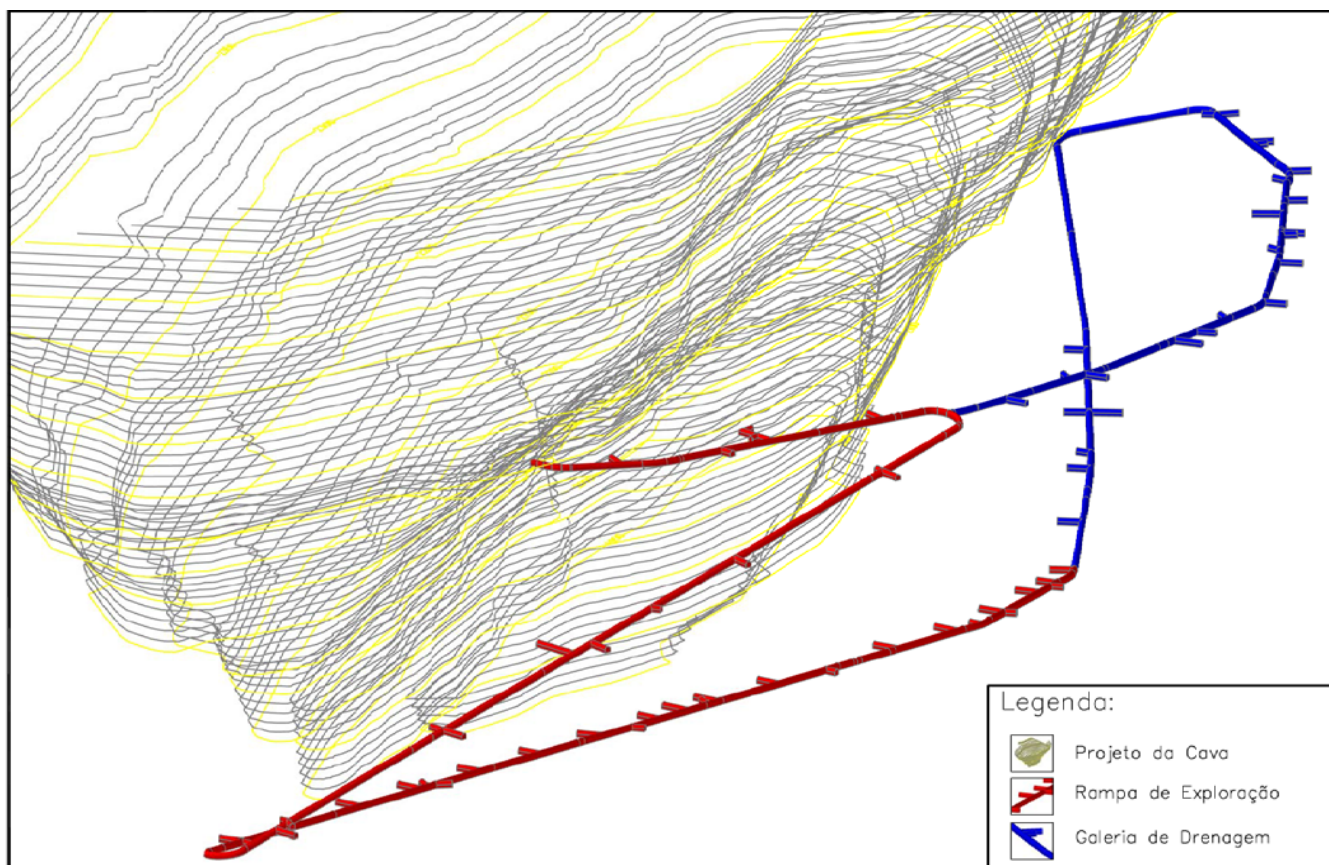


Figura 74 - Modelamento em 3-D da Rampa de Exploração e Túnel de Drenagem com o uso do AutoCad Civil D3.

Este procedimento também foi utilizado na configuração das estruturas subterrâneas implantadas, sendo respeitados todos os elementos geométricos das aberturas subterrâneas como, por exemplo: declividade, curvas, alinhamentos e seções escavadas.

A partir deste procedimento foram cadastrados todos os elementos intrínsecos dos materiais escavados, levando-se em consideração as características geomecânicas mapeáveis como: a litologia, padrão de fraturas, orientação de todas as descontinuidades interceptadas pela escavação, alteração, coerência, geometria das estruturas planares e lineares (juntas, falhas e etc.) impressas no maciço rochoso ao longo das paredes e teto das escavações, dentro de cada domínio estrutural agrupando esse elementos em áreas ou em segmentos com a mesma similaridade, delineando cada domínio geomecânico com uma maior homogeneidade possível, conforme a Figura 75.

Esta metodologia procura destacar a avaliação geomecânica do maciço rochoso, com base no mapeamento geológico-geotécnico realizado durante a escavação, e que serviu para o dimensionamento dos suportes necessários, conforme mostram os segmentos mapeados.

Destaca-se, neste trabalho, a utilização das classificações geomecânicas de Barton e Bieniawski, que permitiram fornecer subsídios para a estimativa das deformações e a correlação entre as classificações, sendo sugeridos suportes distintos. A partir dos resultados do mapeamento geológico-geomecânico de campo, executado e analisado, procedeu-se uma reanálise das condições geomecânica do maciço.

A partir dos dados cadastrados durante o mapeamento, após cada avanço, permitiu a identificação das características geotécnicas do maciço rochoso predominante dentro de cada domínio, conforme é demonstrado nas pranchas 02 e 03.



Figura 76 - Mapeamento dos parâmetros geológico-geotécnico da massa rochosa.



Figura 77 - Medida dos parâmetros geomecânicos do maciço rochoso (JRC índice de rugosidade das juntas pelo método de *Rengers* e o pente de Barton e amplitude do perfil).

10 RESULTADOS

10.1 Classificação Geomecânica da Rampa de Exploração

A partir do mapeamento da rampa de exploração ao longo dos **3.254,74** metros, a mesma intercepta **três domínios geológico-estruturais**, sendo definido como: **Noroeste, Americana e Balmaceda e quatro unidades geotécnicas: Pórfiro Leste Clorítico (PEC), Pórfiro Leste Potássico (PEK), Unidade Metassedimentar (MET) e a unidade Granodiorítica Elena Sul (GES).**

Cada domínio geológico-estrutural interceptado pela a escavação subterrânea apresenta classes geomecânicas específicas para cada trecho da escavação, como pode ser observado nas figuras 78 e 79. Esta distribuição foi obtida após a coleta dos parâmetros geomecânico do maciço interceptado e calculados pelas expressões de Barton e Bieniawski.

A unidade geotécnica Pórfiro Leste Clorítico é o resultado da sobreposição da unidade de alteração clorítica que afeta a unidade litológica Pórfiro Leste do jazimento. Este litotipo aflora na rampa de exploração como um granodiorito a monzonito de textura porfirítica, com fenocristais de tamanho médio imerso numa massa fina.

A alteração está constituída principalmente por clorita que invade parcialmente a textura da rocha, em forma de veios e vênulas, preenchendo as fraturas. Este maciço rochoso apresenta uma resistência à compressão uniaxial, estimada pelo martelo de geólogo valores entre 70 MPa a 150 MPa, que qualifica com uma maciço resistente a muito resistente. As frequências das fraturas apresentam variações 1 a 10 fraturas por metro. O índice do RQD "*rock quality Designation*" apresenta variações de 30% a 95%, os valores típicos ocorrem entre 70% a 85%.

As estruturas mais importantes no traçado da rampa na unidade PEC correspondem a falhas VIF e FT, com orientações N35°-45°W/ 75°- 85°, que se apresentam sinuosas e com superfície rugosa a polida.

O preenchimento principal dessas estruturas é com material argiloso. As falhas principais (VIF) apresentam uma zona de influência de 0,5 a 2 metros. Um segundo sistema de falhas importantes e intermediárias (VIF e FT) tem orientação N-S a N20°E, são falhas sinuosas com superfícies suavemente rugosas, subverticais tanto para NW, como para SE, com pequenas variações e influência de 0,2 a 1 metro.

A unidade geotécnica Metassedimentar (MET) corresponde a rochas sedimentares metamorfizadas do tipo arenítica de grão fino, arenítica calcária e lutitos. Estas rochas apresentam diferentes graus de foliação associados a eventos compressivos, as quais são recortadas por veios e vênulas de carbonato. Sua alteração dominante é à base de clorita- epidoto. Inclui-se nesta unidade rochas de proveniente do metamorfismo de contato.

Esta unidade apresenta uma resistência à compressão uniaxial estimada em 50 MPa a 90 MPa, que corresponde a um maciço resistente. Com RQD entre 40% a 50 %, correspondendo uma rocha de má qualidade. As estruturas interceptadas nesta unidade são as VIF e FT de orientações preferenciais N-S e N20°-40° W, com caimento de 60°-75°W e 60° - 85°E. Estas falhas apresentam uma zona de influência 0,2 a 1,5 metros, mostram-se preenchidas por material argiloso, calcita e anidrita, com espessuras que variam de 2 a 30 cm. As orientações das foliações são: N70°-80°E /75°-80°N e N40°-50°W /80°W.

A unidade geotécnica Granodiorítica Elena Sul (GES) apresenta-se entre as estacas 586 a 685 da rampa de exploração, onde sua composição é granodiorítica, com textura equigranular de grão médio. A alteração presente é clorítica incluindo pequenas ocorrências de epidoto e sericita em menor proporção.

A resistência do maciço rochoso estimada é de 90 MPa a 140 MPa, correspondendo a um maciço resistente a muito resistente. As fraturas se apresentam com uma frequência de 2 a 8 fraturas por metro, com índice de RQD de 65% a 80%.

As estruturas maiores e intermediárias (VIF e FT) interceptadas pela escavação, apresentam orientações N10°- 40°W/70°80°W, as primeiras e N70°- 80°E / 60°- 80°S e N10°- 20°W/70°- 80°W das do tipo FT. Estas estruturas se apresentam levemente onduladas, rugosas a lisas, sendo preenchidas por argila e especularita, alcançando espessuras de 0,3 metros.

A unidade geotécnica Pórfiro Leste Potássico (PEK) é resultado da sobreposição da alteração potássica do Pórfiro Leste. Corresponde a uma rocha granodiorítica-monzonítica de textura porfírica a inequigranular de grão médio, com alteração predominante potássica. A alteração potássica está constituída por feldspato potássico, que se apresenta como veios e vênulas.

O maciço rochoso apresenta uma resistência à compressão uniaxial entre 60 MPa a 150 MPa, que qualifica o maciço com resistente a muito resistente. As fraturas apresentam variações de 2 a 10 fraturas por metro. O índice do RQD varia de 75% a 95%.

A partir do mapeamento e da qualificação geomecânica do maciço rochoso exposto na rampa de exploração, os **valores de Q de Barton** mostram-se distribuídos ao longo de toda a escavação, sendo evidenciada uma distribuição percentual da qualidade do maciço em: **3,44% do maciço mostram-se pertencente à classe IV (ruim); 27,74% classe III (regular); 38,77% classe II (bom) e 30,05% classe I (muito bom).**

Com o uso do sistema **RMR de Bieniawski**, os segmentos apresentam um percentual de **2,15% pertencente à classe IV (ruim); 34,93% pertencente à classe III (regular) e 62,21% à classe II (bom)**, conforme se mostra nas figuras 80 e 81, do modelo em 3D da rampa de exploração.

10.2 Classificação Geomecânica do Túnel de Drenagem

A partir do mapeamento realizado no túnel de drenagem, verifica-se três domínios geológico-estruturais, sendo definidos como domínios: **Noroeste, Balmaceda e Estanques Blancos** e três unidades geotécnicas: **Pórfiro Leste Clorítico (PEC), Pórfiro Leste Potássico (PEK), Unidade Metassedimentar (MET)**.

A abertura do túnel de drenagem apresenta uma extensão de **2.557,27 metros** com uma inclinação de ~15%, parte da segunda curva da rampa de exploração, direciona-se para o sentido NE descendente até atingir a curva na elevação 2.058 m (a.n.m), posteriormente direciona-se para SW percorrendo uma distância de 132,15 metros até atingir a elevação 2.037,9 m (a.n.m). Após direcionar-se para Sul até atingir a parte mais profunda do túnel 1.911,79 metros encontrando finalmente a rampa de exploração, demonstrado na figura 03.

De acordo com o levantamento geotécnico do túnel de drenagem o mesmo secciona as três unidades geotécnicas, sendo Metassedimentos (MET), Pórfiro Leste Clorítico (PEC) e Pórfiro Leste Potássico (PEK).

No túnel de drenagem evidenciam-se zonas com a presença de água com gotejamento e um caudal da ordem de 1 litro/minuto (l/min), onde está associado com as falhas importantes (VIF) de atitude N30°E/80°NW e N36°E / 80°NW. Na continuação se expõe as características geotécnicas e estruturais gerais de cada unidade seccionada pela a escavação.

A unidade geotécnica Metassedimentar (MET) apresenta-se no início do túnel na cota de elevação 2.318,86 m(a.n.m). Este maciço rochoso é uma rocha de grão fino, de cor esverdeada, intensamente foliada (entre 10 e 30 planos de foliação por metros, predominantemente dobrados). Apresenta veios e vênulas de calcita, onde os veios alcançam espessuras da ordem 0,5 metros, com orientação N20°-30°W/ subverticais.

De acordo com a qualidade geotécnica, o maciço varia com intercalações de rochas boa, regular a ruim, quando está associada a zonas de falhas importantes (VIF) oblíquas a subparalelas na direção do eixo do túnel.

A unidade geotécnica Pórfiro Leste Clorítica, apresenta-se como uma rocha granodiorítica-monzonítica de textura porfírica inequigranular, de grão médio com fenocristais de tamanho médio imersos numa massa fina. A alteração clorítica aparece na forma de veios e vênulas preenchendo as fraturas e juntas.

O Pórfiro Leste Clorítico se apresenta no túnel de drenagem como uma rocha de boa qualidade geotécnica, com alguns locais e segmentos com qualidade regular, mas em pouca extensão. A resistência à compressão uniaxial estima-se entre 75 MPa a 150 MPa, rocha resistente a muito resistente, com uma frequência de fraturas de 2 a 8 fraturas por metro. O RQD varia de 75% a 95%.

As falhas têm atitudes principais $N70^{\circ}-85^{\circ}W / 75^{\circ}-85^{\circ}SW$ e $N75^{\circ}-85^{\circ}E/70^{\circ}-80^{\circ}N$, estes sistemas apresentam-se sinuosos, com superfície rugosa, com preenchimento de rocha triturada (brecha de falha) gouge, argila e hematita, com espessura de 5 a 50 cm.

Do mesmo modo, identificam-se falhas intermediárias (FT), principalmente de direção $N75^{\circ}-85^{\circ}E$ com o mergulho de $65^{\circ}SW$ a subverticais. O segundo sistema $N60^{\circ}-80^{\circ}W/65^{\circ}-80^{\circ}NE$, são falhas sinuosas, rugosas a lisas, com preenchimento predominante de argila, brecha de falha e sulfetos moídos.

A unidade geotécnica Pórfiro Leste Potássico (PEK), apresenta-se como uma rocha granodiorítica-monzonítica, e textura porfírica inequigranular, com fenocristais de tamanho médio imersos numa matriz fina, afetada por alteração potássica na forma de veios e vênulas e mega-cristais de feldspato potássico com sericita variável. A qualidade do maciço é de boa a regular, apresentam uma resistência à compressão uniaxial estimada de 100 MPa a 150 MPa, frequência das fraturas de 2 a 9 fraturas por metros, com típicos na faixa de 4 a 6 fraturas por metro e o RQD de 70% a 90%.

As zonas de qualidade geotécnica regular se encontram associadas às falhas importantes (VIF), pois ocorre um aumento na quantidade de sericita na rocha. Apresenta, nesta zona, uma resistência de 50 MPa. A frequência de fraturas é da ordem de 6 a 10 fraturas por metro e um RQD de 75% a 95%.

A partir do mapeamento e da qualificação geomecânica do maciço rochoso exposto no túnel de drenagem, os **valores obtidos de Q de Barton** mostram-se distribuídos ao longo de toda a escavação, sendo evidenciada uma distribuição em percentual de qualidade para o maciço em: **1,94% do maciço mostram-se pertencente à classe IV (ruim); 27,55% classe III (regular); 11,06% classe II (bom) e 59,45% classe I (muito bom).**

Com o uso do sistema **RMR de Bieniawski**, os segmentos apresentam um percentual de **11,29% pertencente à classe III (regular) e 88,71% à classe II (bom), conforme se mostra nas figuras 80 e 81, do modelo em 3D do túnel de drenagem**

10.3 Análise Estrutural das Descontinuidades

A interpretação dos dados estruturais, a partir do posicionamento da rampa de exploração e túnel de drenagem dentro dos domínios estruturais do jazimento e a coleta dos dados durante o mapeamento geológico-geotécnico nas estruturas escavadas, foram analisadas nas redes estereográficas, de igual ângulo, do hemisfério inferior, com o uso da distribuição de Fischer, buscando a suavização dos dados dos contornos.

No tratamento dos dados foi utilizada a versão do software *Dip's* 5.0 da Rocscience para a geração dos estereogramas das falhas de cada domínio estrutural interceptado pela escavação.

A rampa de exploração secciona o **Domínio Estrutural Noroeste**, onde são interceptadas as falhas importantes (VIF) e falhas intermediárias (FT).

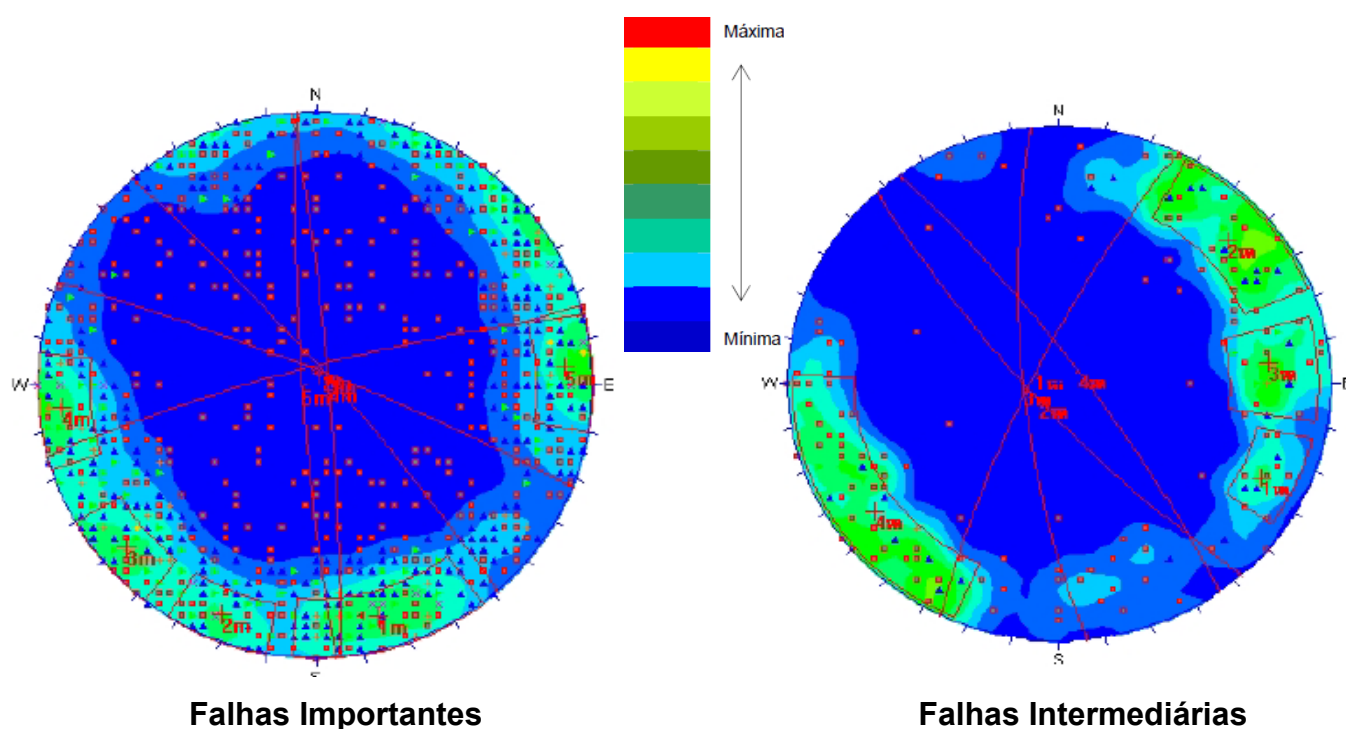


Figura 82 - Projeção estereográfica das falhas importantes e intermediárias no Domínio Estrutural Noroeste concentração do pólo dos planos.

A preponderância dos altos ângulos dos sistemas de falhas principais tem pouca probabilidade de ocorrência de cunhas instáveis dentro deste domínio, pois as condições desfavoráveis à instabilidade ocorrem nas paredes podendo produzir deslocamento potencializado pela orientação paralela ao eixo da escavação. A predominância das famílias das discontinuidades em notação de *dip/dipdirection* (*mergulho/direção de mergulho*) é: (85; 085°) para falhas intermediárias e (80°, 054°) para falhas importantes.

A rampa de exploração secciona o **Domínio Estrutural Balmaceda**, onde são interceptadas as falhas importantes (VIF) e falhas intermediárias (FT).

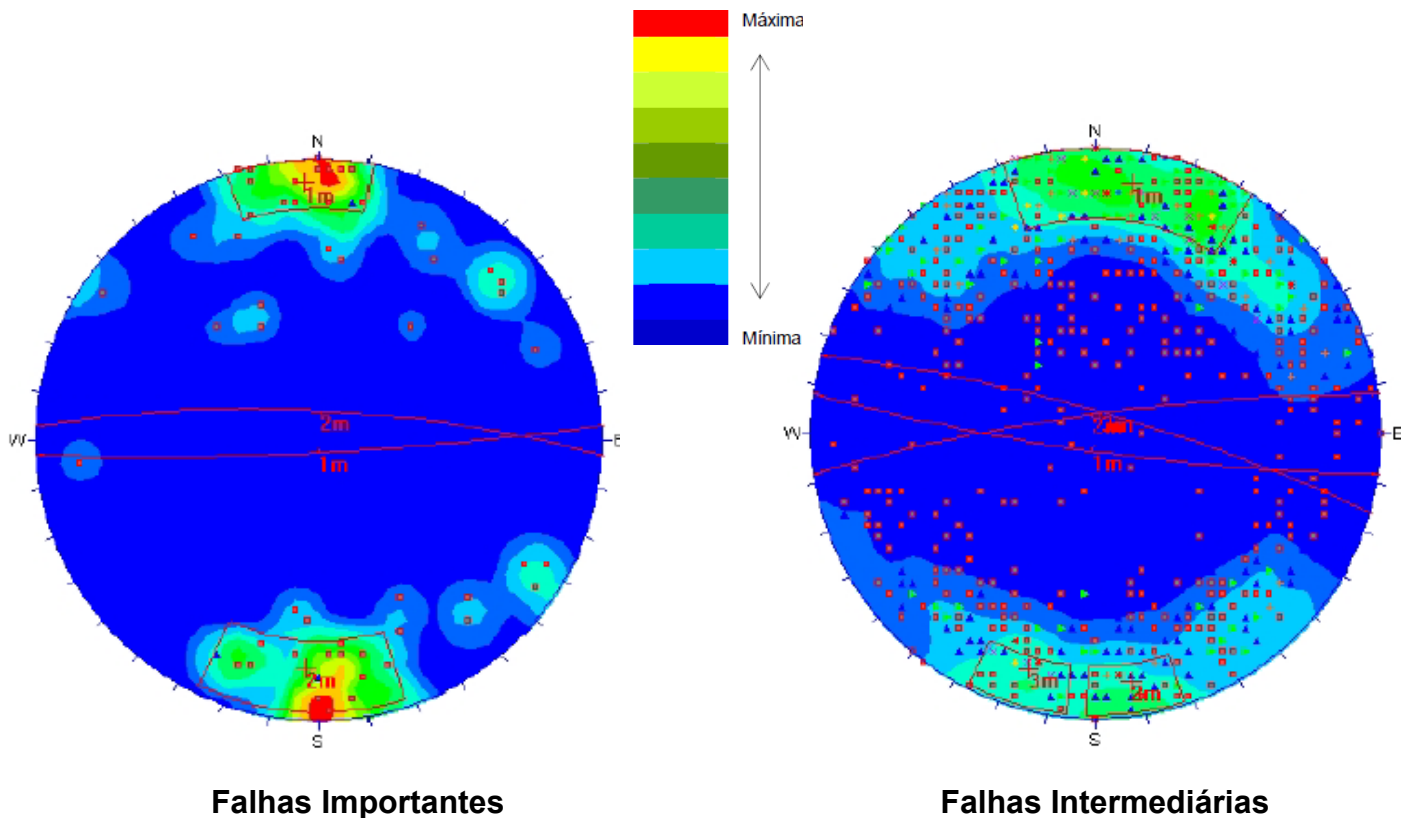


Figura 83 - Projeção estereográfica das falhas importantes e intermediárias no Domínio Estrutural Balmaceda concentração do pólo dos planos.

A ocorrência de falhas subverticais de orientação EW, dentro do domínio Balmaceda, tem pouco potencial para a ocorrência de cunhas esféricas instáveis.

A rampa de exploração e o túnel de drenagem, ambos com orientação preferencialmente NS na área do domínio estrutural, podendo ocorrer o desprendimento de blocos e placas das paredes da escavação. As orientações predominantes das falhas são: (85°; 177°; 78°; 003°) para falhas importantes e (83°;188; 82°/352°; 81°/016°) para falhas intermediárias.

A rampa de exploração secciona o **Domínio Estrutural Estanques Blancos**, onde são interceptadas as falhas importantes (VIF) e falhas intermediárias (FT).

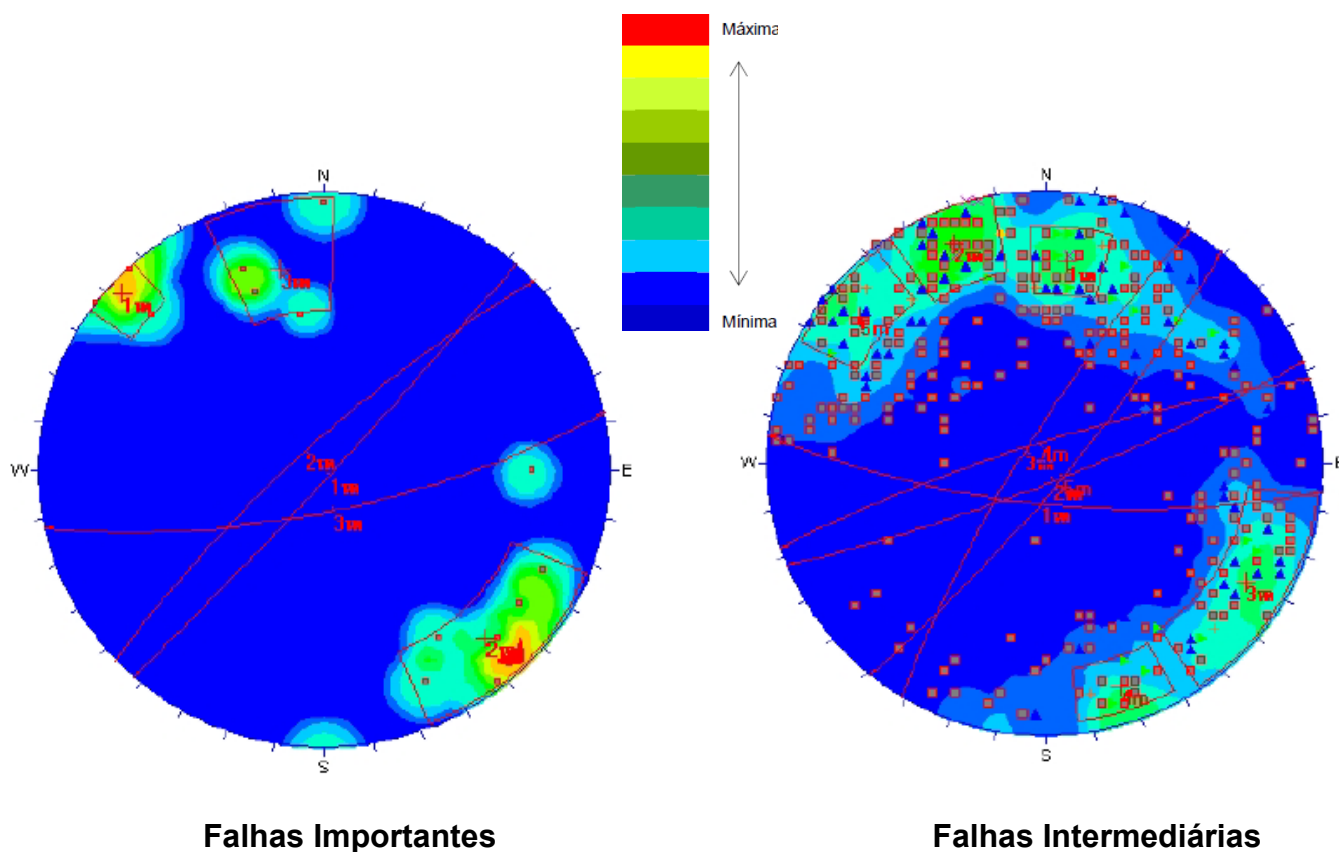


Figura 84- Projeção estereográfica das falhas importantes e intermediárias no Domínio Estrutural Estanques Blancos concentração do pólo dos planos.

Os principais sistemas de falhas no Domínio Estanques Blancos ocorrem preferencialmente subverticais, dentro da unidade geotécnica Pórfiro Leste Potássico (PEK), apresenta maior potencial de instabilidade, pois a orientação da escavação apresenta $N70^{\circ}W$ concordante com os sistemas das falhas principais. As orientações das estruturas são: $(87^{\circ}; 132^{\circ})$; $(79^{\circ}; 317^{\circ})$; $(73; 168^{\circ})$ para as falhas importantes e $(81^{\circ}; 129^{\circ})$; $(73^{\circ}; 186^{\circ})$; $(80^{\circ}; 301^{\circ})$; $(81^{\circ}; 342^{\circ})$; $(82^{\circ}; 158^{\circ})$ para falhas intermediárias.

A rampa de exploração secciona o **Domínio Estrutural Americana**, onde são interceptadas as falhas importantes (VIF) e falhas intermediárias (FT).

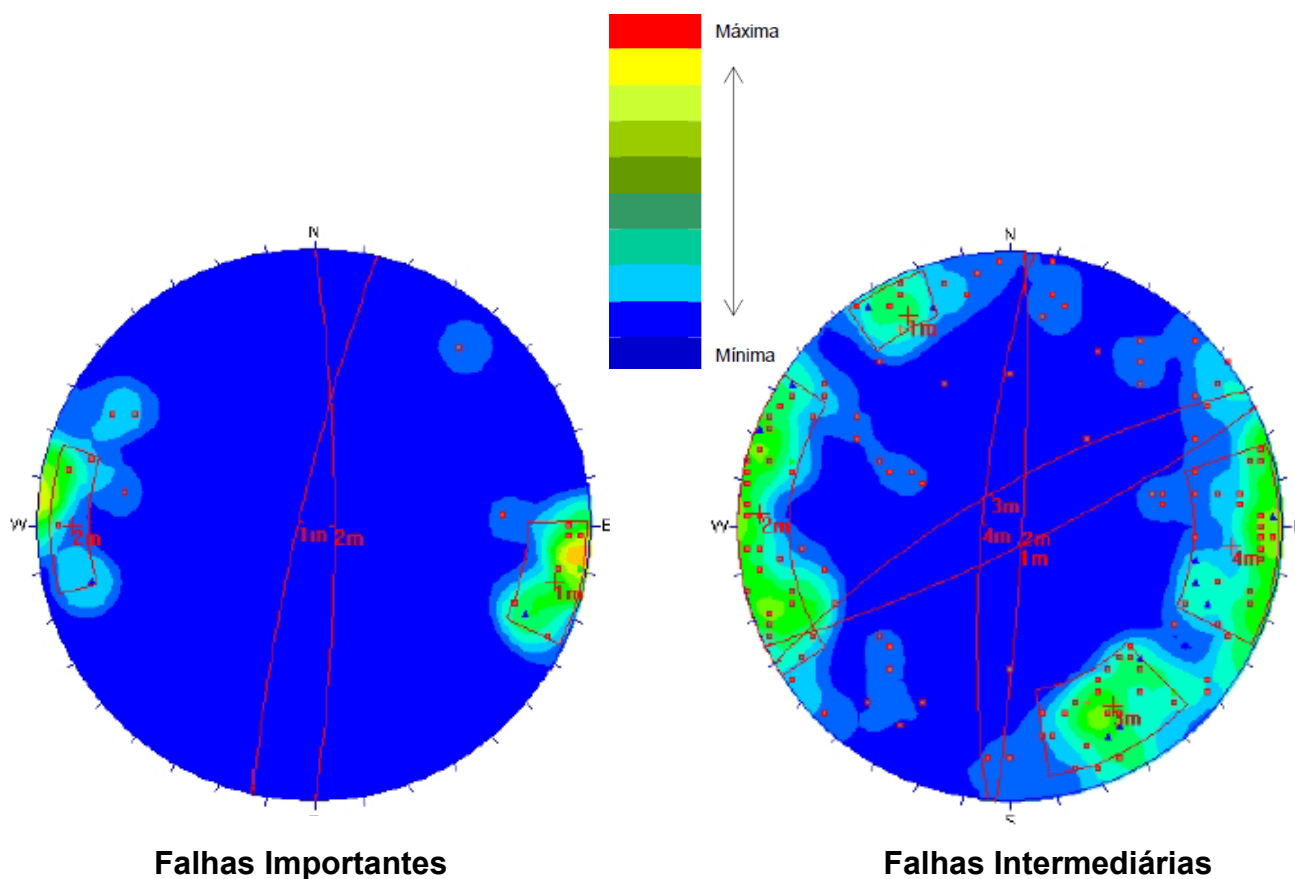


Figura 85- Projeção estereográfica das falhas importantes e intermediárias no Domínio Estrutural Americana concentração do pólo dos planos.

A distribuição dos sistemas de falhas, de acordo com a sua orientação, ocorre uma pequena variação, mas preferencialmente mantém as orientações NS e NE, com altos ângulos de mergulho podendo ocorrer provável cunhas instáveis em pontos localizados.

As orientações das estruturas são: (82°; 090°); (83°; 283°) para as falhas importantes e (81°/154°); (85°; 093°); (74°; 330°); (78°; 275°) para as falhas intermediárias.

10.4 Controle das Instabilidades nas Escavações Subterrâneas

Em escavações subterrâneas em massas rochosas muito fraturadas relativamente em baixa à moderada profundidades, alguns tipos comuns de rupturas ocorrem como, por exemplo: aquelas que envolvem a queda de cunhas do teto ou deslizamento das paredes laterais da escavação.

Estas cunhas são formadas pela a intersecção de estruturas, ou seja, descontinuidades, planos de estratificação e/ou juntas, que separam a massa rochosa em fragmentos e blocos discretos.

ORIENTAÇÃO DAS DESCONTINUIDADES

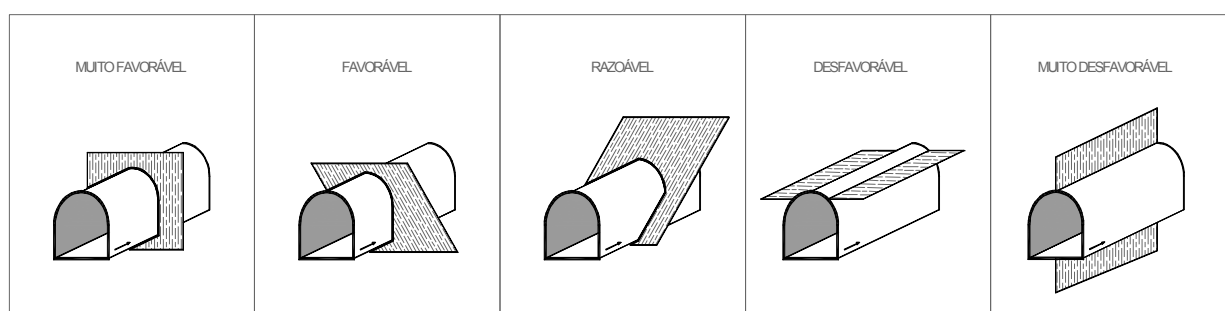


Figura 86 - Orientação das descontinuidades em relação ao sentido eixo de escavação, mostrando as condições de favorabilidade.

Quando a face está livre criada pela a abertura, o sistema de retenção da rocha circundante é removido, uma ou mais cunhas podem ser desestabilizada podendo cair ou deslizar a partir da superfície exposta, se os planos delimitadores forem contínuos e interceptados pela superfície de escavação criada.

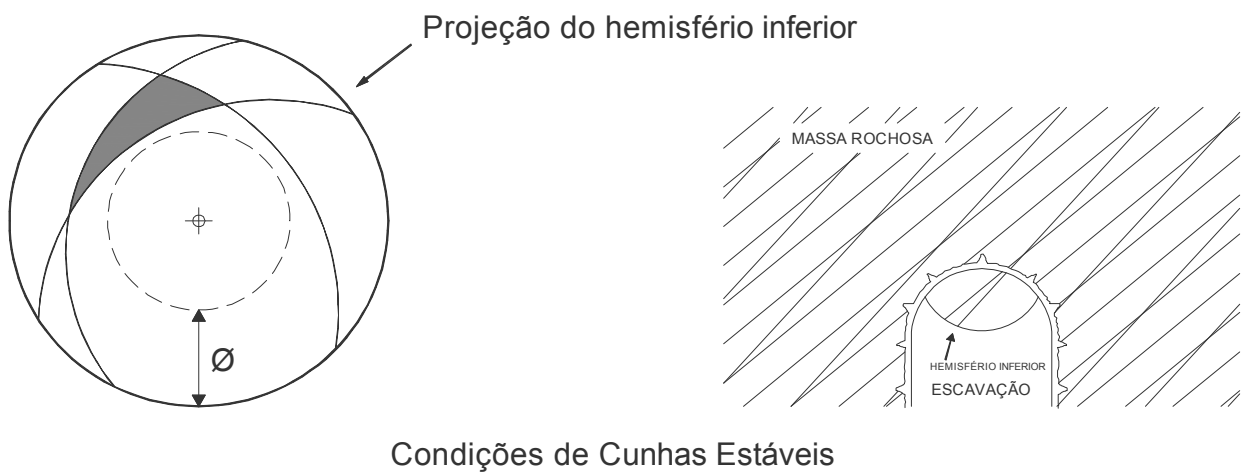
Deve-se determinar o plano médio das atitudes dos planos mais significativos dos grupos descontinuidades presentes no entorno do maciço escavado, identificando o potencial de quedas e/ou deslizamento das cunhas esféricas ou tetraédricas presentes nas paredes e teto das aberturas.

Após, a determinação dos elementos geométricos é possível determinar o fator de segurança dessas cunhas, dependendo do modelo de ruptura identificado, sendo importantes para dimensionamento do tipo de suporte e necessário para a sua estabilização.



RUPTURA POR QUEDA GRAVITACIONAL
QUEDA DE BLOCOS

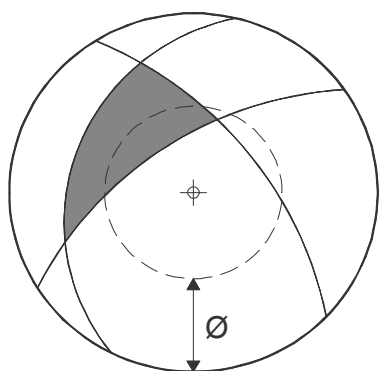
Figura 87 - Projeção estereográfica mostrando a queda gravitacional de blocos condicionadas pela a abertura.



Condições de Cunhas Estáveis

AVALIAÇÃO CINEMÁTICA DA ESTABILIDADE DE CUNHAS ROCHOSAS
(Hoek and Brown, 1980)

Figura 88 - Projeção estereográfica demonstrando a formação de cunhas chave parcialmente estáveis, mas potencializam queda por deslizamento nas paredes.



RUPTURA POR DESLIZAMENTO GRAVITACIONAL
(ϕ = ÂNGULO DE ATRITO)

Figura 89 - Projeção estereográfica demonstrando a queda de cunhas e lascas por deslizamento gravitacional.

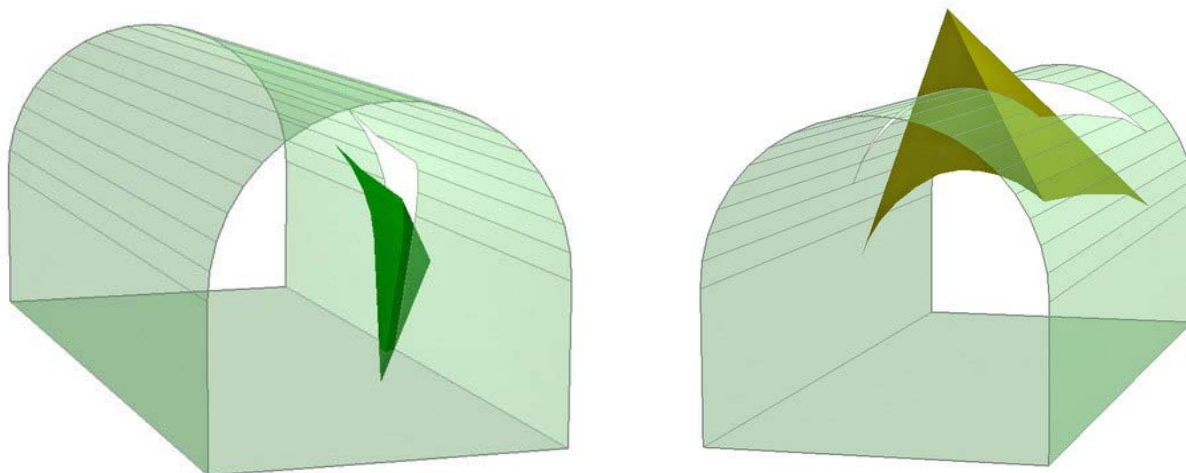


Figura 90 - Modelo em 3-D de um segmento da Rampa de Exploração, mostrando cunhas instáveis locais interceptada pela a escavação.

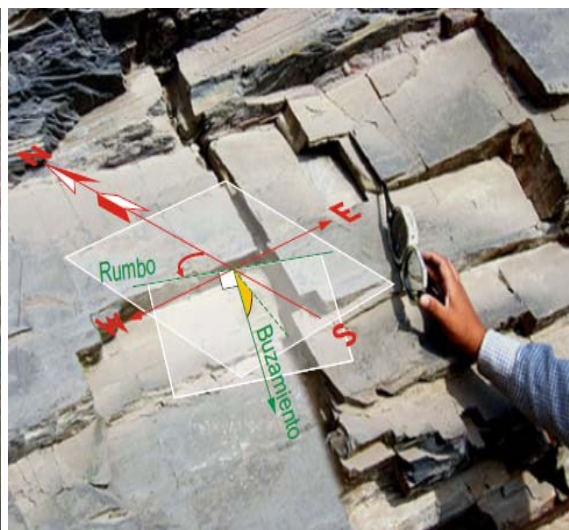
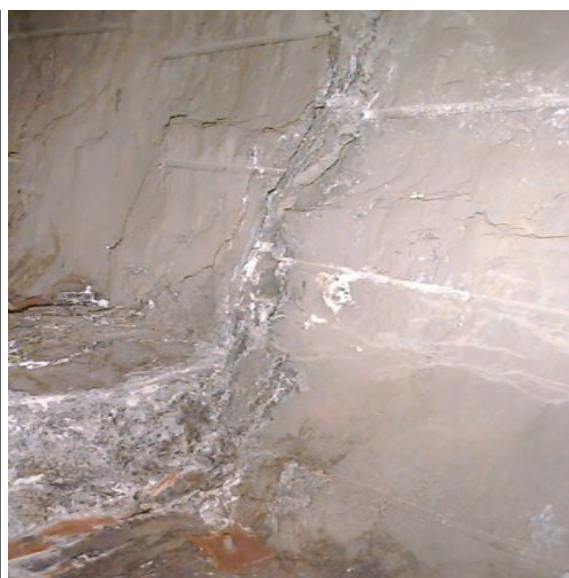


Figura 100 - Falhas importantes e intermediárias no Domínio Estrutural Balmaceda, mostrando a potencialidade de ocorrência de cunhas no teto da escavação, condicionadas pelos elementos estruturais (falhas, juntas e descontinuidades de forma geral).



Figura 101 - Elementos geológico-estruturais presente dentro dos domínios geológico-geotécnicos (planos de juntas, fraturas, falhas, vênulas, veios, dobras), os quais condicionam as instabilidades.

A partir dos elementos estruturais seccionados pela rampa de exploração (falhas importantes e falhas intermediárias) mapeada dentro dos Domínios Estruturais sendo simulada a potencialidade de queda de cunhas ou blocos no entorno da cavidade aberta, devido à intersecção das descontinuidades com a superfície escavada podendo ocorrer à desestabilização desses blocos de rocha quando ocorrerem à intersecção e o intercruzamento de no mínimo três famílias de descontinuidades com a superfície escavada. Buscando um melhor entendimento o controle e análise da estabilidade das cunhas rochosas nas escavações foi aplicado o software **UNDWEDGE** da Rocscience versão 4.0 para a simulação da geometria das cunhas instáveis. A rampa de exploração secciona o **Domínio Estrutural Noroeste**, onde são interceptadas as falhas importantes (VIF) e falhas intermediárias (FT).

No **Domínio Estrutural Noroeste** a orientação do eixo de escavação é de 035° com um *plunge* de 8° , onde essas descontinuidades apresentam características distintas como: ângulo de atrito $\phi=30^\circ$; coesão = 0 tf/m^3 ; pressão d'água = 0 tf/m^3 JRC= 10, waviness = 10° e peso específico da rocha $\gamma= 2,7 \text{ tf/m}^3$.

Falhas	dip°	dip direction°
VIF	79°	270°
FT	84°	045°
FT	85°	266°

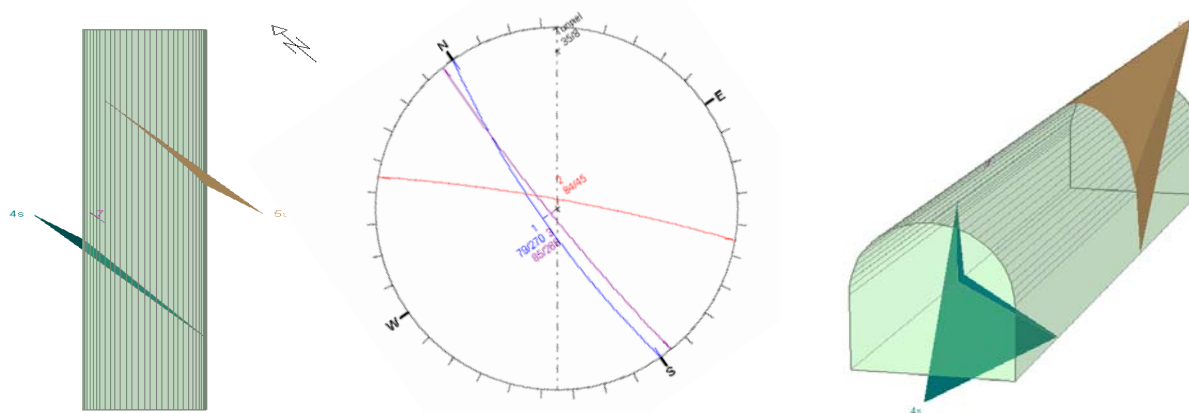


Figura 102 - Projeção estereográfica das falhas importantes e intermediárias no Domínio Estrutural Americana mostrando a potencialidade de ocorrência de cunhas no teto da escavação.

A rampa de exploração secciona o **Domínio Estrutural Balmaceda**, onde são interceptadas as falhas importantes (VIF) e falhas intermediárias (FT).

No Domínio Estrutural Noroeste a orientação do eixo de escavação é de 025° com um *plunge* de 8° , onde essas discontinuidades apresentam características distintas como: ângulo de atrito $\phi=35^\circ$; coesão = 5° tf/m^2 ; pressão d'água = 0 tf/m^2 , JRC = 6, waviness = 8° e peso específico da rocha $\gamma = 2,7 \text{ tf/m}^3$.

Falhas	dip $^\circ$	dip direction $^\circ$
VIF	78 $^\circ$	177 $^\circ$
FT	83 $^\circ$	016 $^\circ$
FT	82 $^\circ$	352 $^\circ$

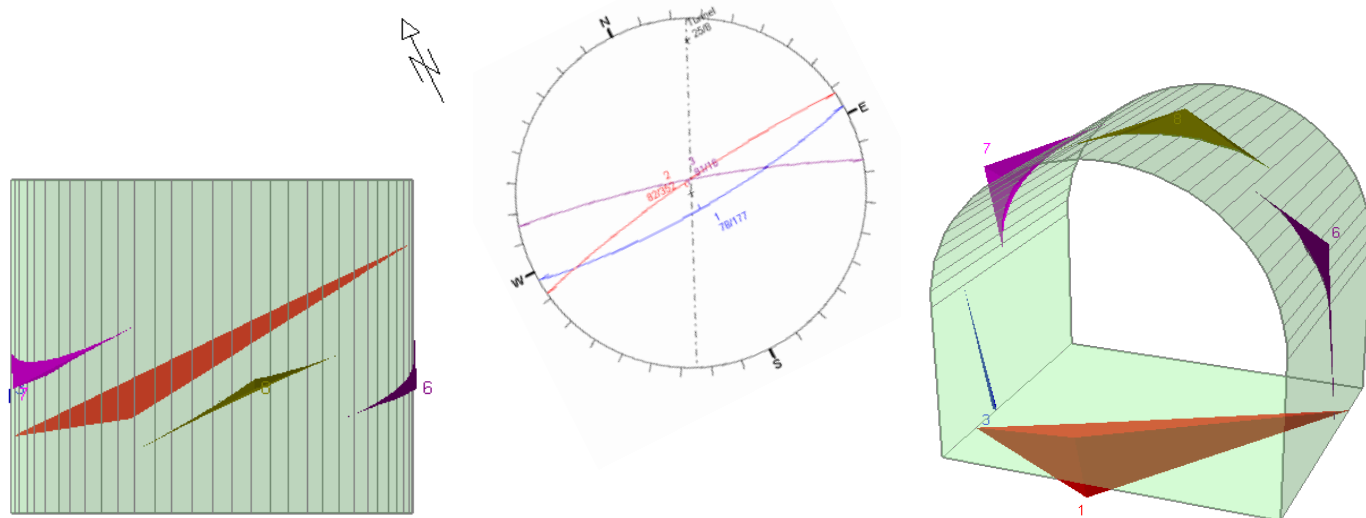


Figura 103 - Projeção estereográfica das falhas importantes e intermediárias no Domínio Estrutural Balmaceda mostrando a potencialidade de ocorrência de cunhas no teto da escavação.

A rampa de exploração secciona o **Domínio Estrutural Estanques Blancos**, onde são interceptadas as falhas importantes (VIF) e falhas intermediárias (FT).

No Domínio Estrutural Noroeste a orientação do eixo de escavação é de 330° com um *plunge* de 8° , onde essas discontinuidades apresentam características distintas como: ângulo de atrito $\phi=25^\circ$; coesão = 6° , pressão d'água= 0 tf/m^3 ; JRC= 5, waviness = 4° e peso específico da rocha $\gamma= 2,7 \text{ tf/m}^3$.

Falhas	dip $^\circ$	dip direction $^\circ$
VIF	79 $^\circ$	168 $^\circ$
FT	81 $^\circ$	342 $^\circ$
FT	82 $^\circ$	266 $^\circ$

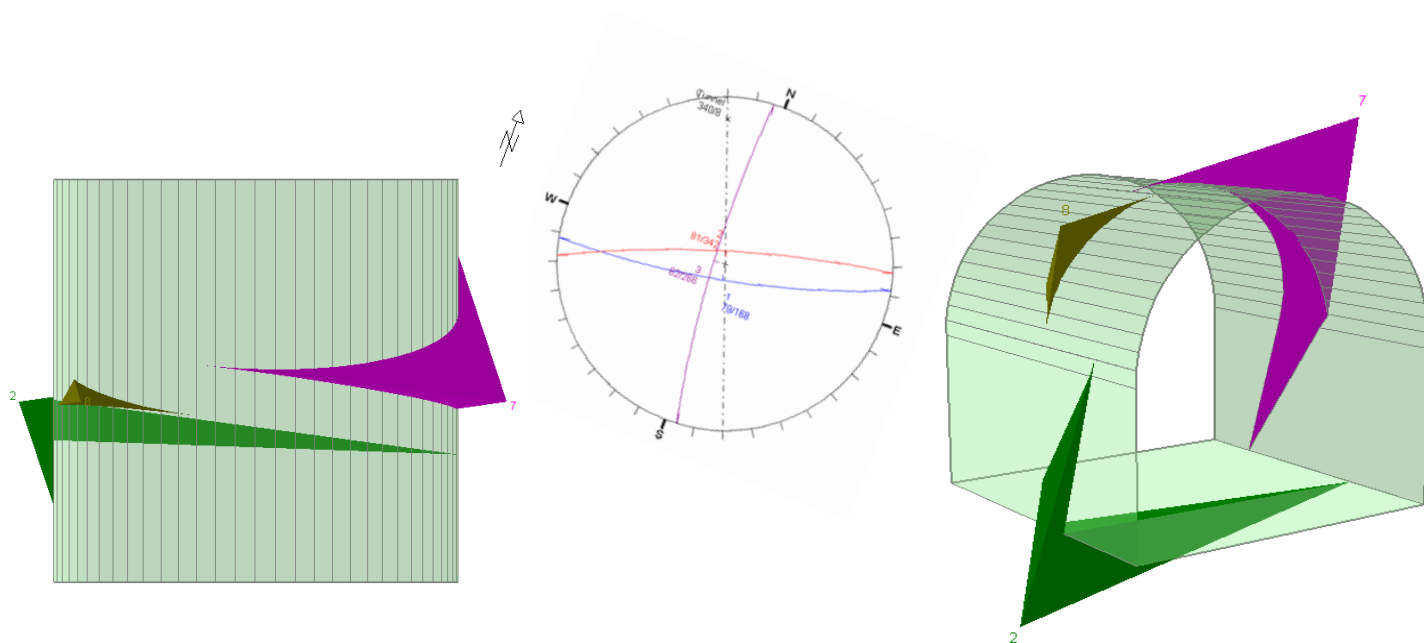


Figura 104 - Projeção estereográfica das falhas importantes e intermediárias no Domínio Estrutural Estanques Blancos mostrando a potencialidade de ocorrência de cunhas no teto da escavação.

A rampa de exploração secciona o **Domínio Estrutural Americana**, onde são interceptadas as falhas importantes (VIF) e falhas intermediárias (FT).

No Domínio Estrutural Noroeste a orientação do eixo de escavação é de 035° com um *plunge* de 8° , onde essas discontinuidades apresentam características distintas como ângulo de atrito $\phi=30^\circ$; coesão = 0° ; JRC= 10, pressão d'água= 0 tf/m^3 , waviness = 10° , peso específico da rocha $\gamma= 2,7\text{tf/m}^3$.

Falhas	dip $^\circ$	dip direction $^\circ$
VIF	82 $^\circ$	090 $^\circ$
FT	83 $^\circ$	093 $^\circ$
FT	76 $^\circ$	330 $^\circ$

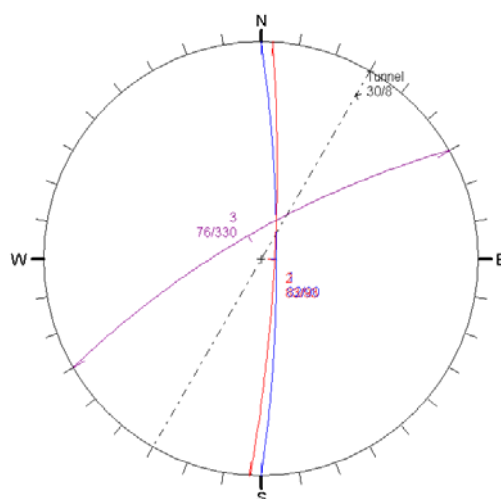


Figura 105 - Projeção estereográfica das falhas importantes e intermediárias no Domínio Estrutural Americana mostrando não apresenta potencial de cunhas, potencializa a ocorrência de lascas das paredes.

Na análise de estabilidade das cunhas instáveis feita com o programa UNWEDGE ilustra uma metodologia indireta do modelamento a partir da geometria das famílias de discontinuidades e suas condições geotécnicas frente à geometria da abertura. Sendo possível determinar o potencia e o volume de cada cunha ou blocos instáveis em cada domínio estrutural, conforme demonstrado no estudo acima.

10.5 Suportes e Reforços nas Escavações Subterrâneas

O desenvolvimento de métodos empíricos de apoio aos projetos de estabilização subterrânea inclui a experiência adquirida ao longo do tempo com projetos semelhantes, em circunstância semelhante em uma construção.

A característica principal destes métodos é uma maior variedade de qualidade de rocha combinando com cada tipo de categoria de suporte. Além disso, as tais medidas de suporte pode ser distintas ao longo das escavações dependendo das condições de água subterrâneas, assim como a redistribuição das tensões ativas de relaxamento ou virgens devido às aberturas. Para estimar os parâmetros geomecânicos do maciço rochoso, e suas medidas de suporte é necessário conhecer a que classe geomecânica o maciço pertence.

A estabilidade da rocha circundante ou remanescente no entorno da rampa de escavação e do túnel de drenagem, a partir da classificação geomecânica de Barton, sistema Q e RMR de Bieniawski se podem sugerir algumas categorias de suporte e reforço para o maciço rochoso. Sendo que a estabilidade depende dos esforços e das condições estruturais da massa rochosa nas bordas da abertura.

Os sistemas de classificação ajudaram no agrupamento das massas rochosas com o comportamento geomecânico similar com base em dados qualitativos e quantitativos medidos no local. As análises desses dados levaram a diferentes classes de massa rochosa, tornando possível a calibração da qualidade final necessária a sua estabilização.

As instabilidades locais são controladas pelas trocas de esforços e pelos danos causados pelos desmontes do material rochoso com o uso de explosivo.

Em escalas locais, o suporte é muito importante, por que resolve o problema da estrutura da massa rochosa e dos esforços, controlando os movimentos e reduzindo a possibilidade de quedas de blocos e/ou cunhas esféricas na borda da escavação.

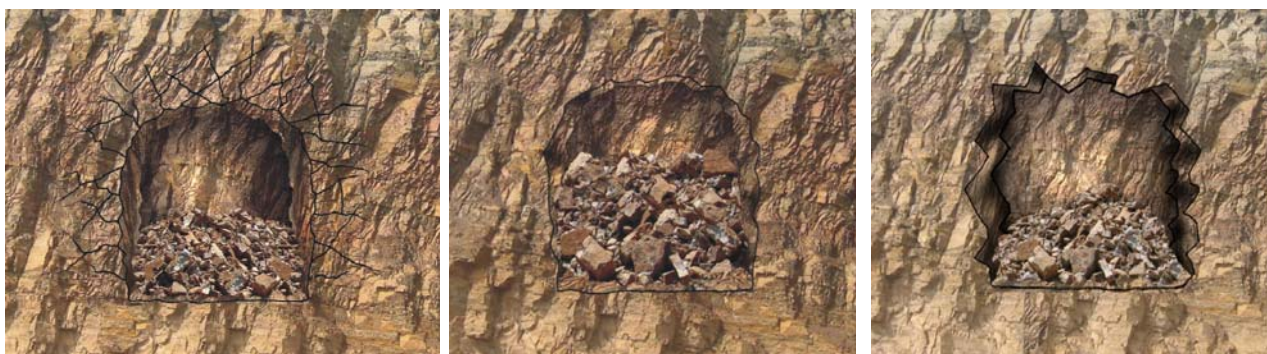


Figura 106 - Comportamento do maciço rochoso após abertura, mostrando maciço remanescente instável.

O termo suporte e reforço utilizado nesta monografia cobrem diversos dispositivos para suportes e reforços necessários a estabilização do maciço circundante à escavação, podendo ser classificados com **passivos ou ativos** com, por exemplo: tirantes de monobarra resinados, *split set*, *swellex*, cordoalhas, *straps*, perfis metálicos do tipo I e H, perfis treliçados, telas metálicas de diversas aberturas, concreto projetado padrão ou com fibra metálica.

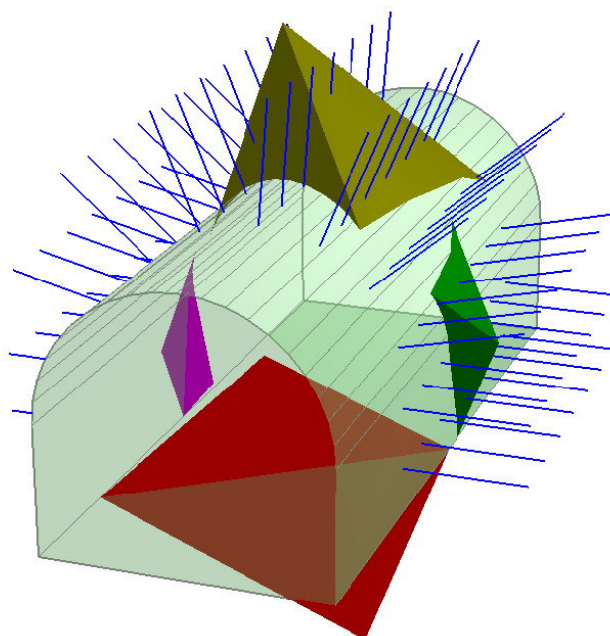


Figura 107 - Padrão de tirantes sistemáticos utilizado para estabilizar cunhas rochosas no teto e paredes em uma determinada abertura subterrânea.

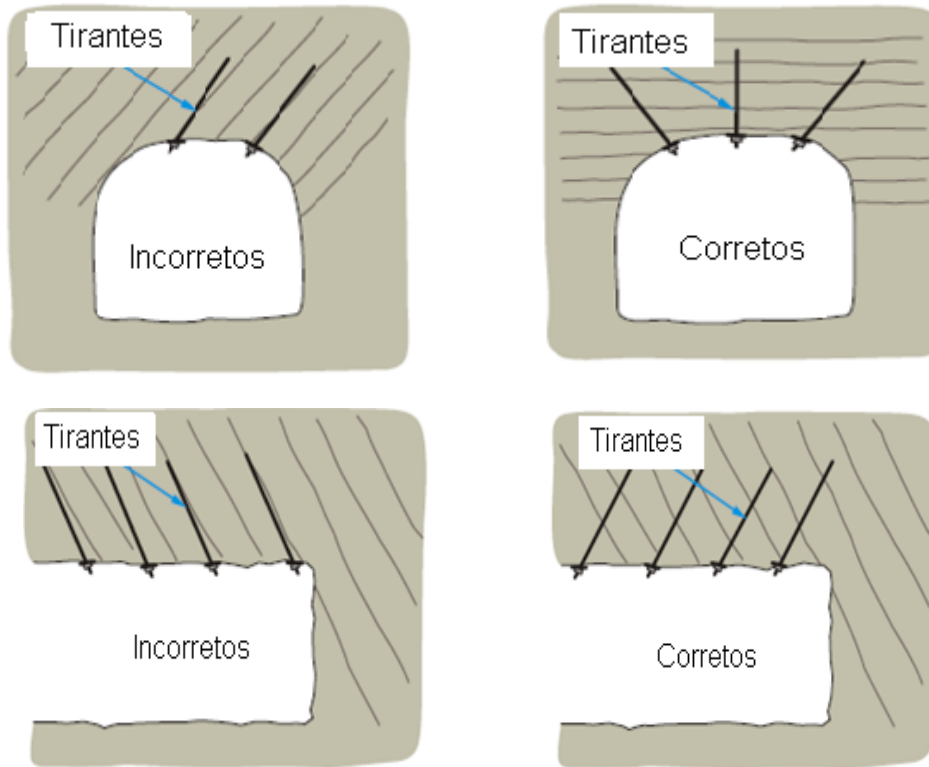


Figura 108 - Posicionamento correto dos tirantes, em função da orientação das descontinuidades.

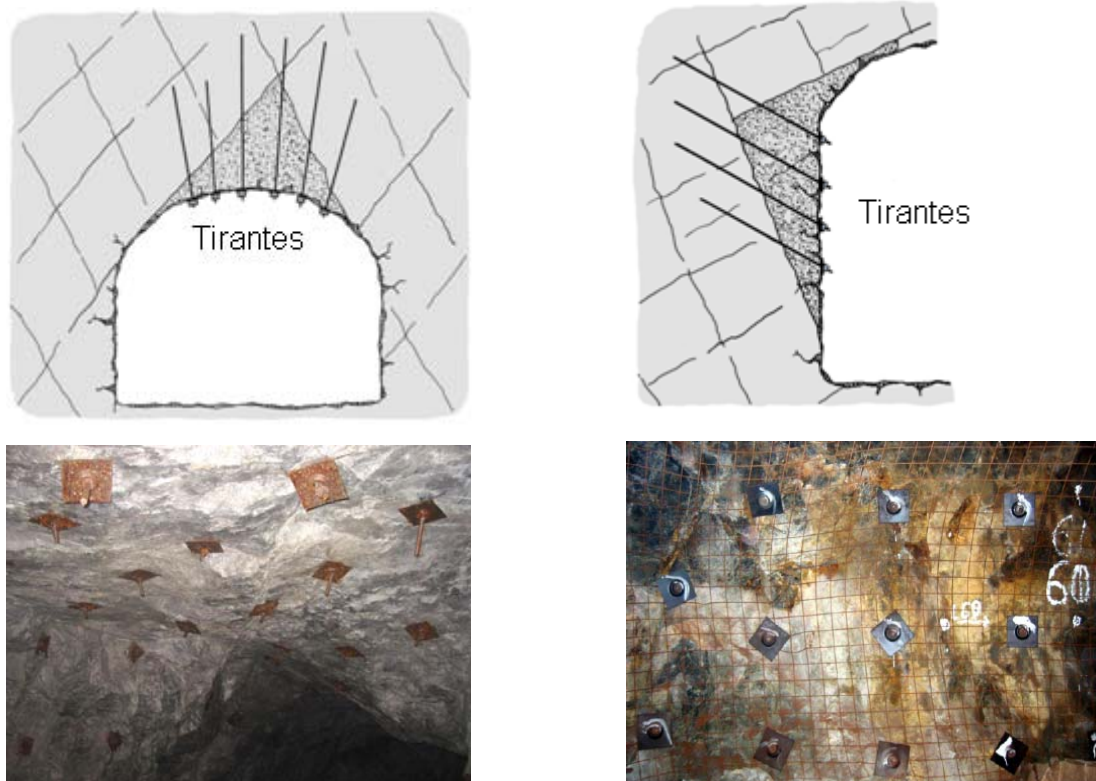


Figura 109 -. Aplicação de tirantes sistemáticos no teto para ancoragem de cunha esférica e cunhas planares nas paredes laterais da escavação.

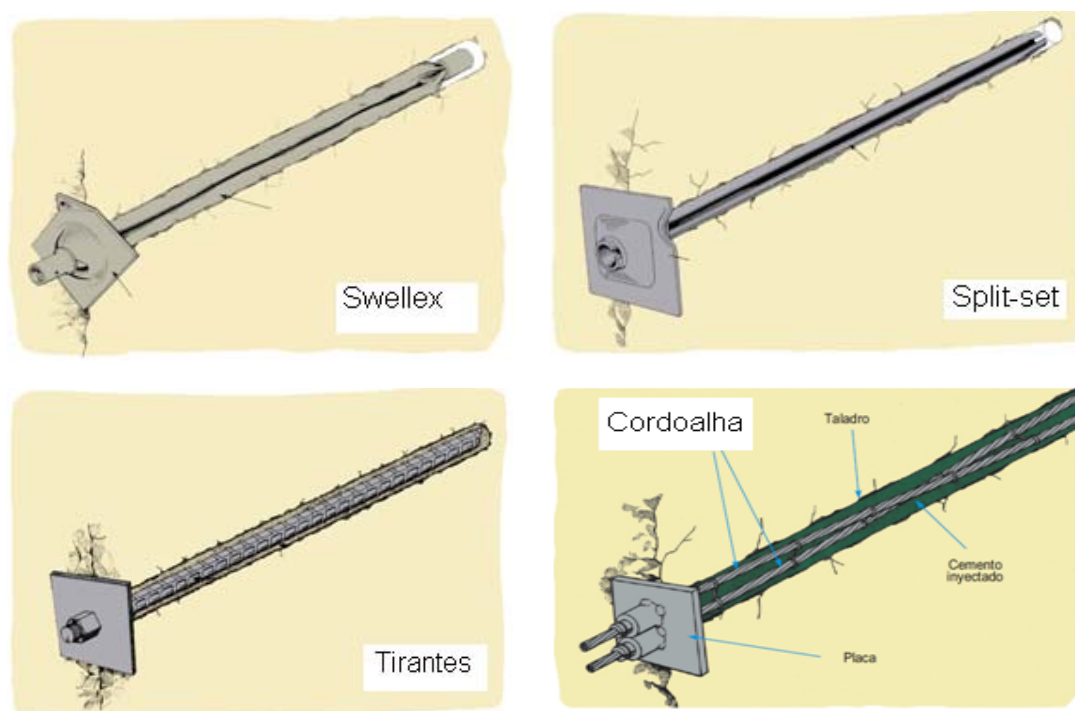


Figura 110 - Tipos de ancoragens ativas e passivas aplicadas em escavações subterrâneas.

A partir dos cálculos no **sistema Q e RMR**, alguns parâmetros foram determinados como, por exemplo: Os valores de Q e a De (distância equivalente da abertura), segundo a expressão $De = \text{vão (m)} / ESR$, onde ESR (taxa de suporte) = 1,3, considerada para a rampa de exploração e túnel de drenagem, conforme é demonstrado nas pranchas 02 e 03 em anexo.

A partir da plotagem dos dados no gráfico do sistema Q de Barton e correlacionados aos valores de RMR de Bieniawski, conforme a expressão **$RMR = 9 \ln Q + 44$** , foi possível determinar a qualidade do maciço rochoso e categorizar os suportes necessários para cada segmento do tanto pelo método de Barton com por Bieniawski, onde se observa uma coerência e aderência entre os resultados obtidos.

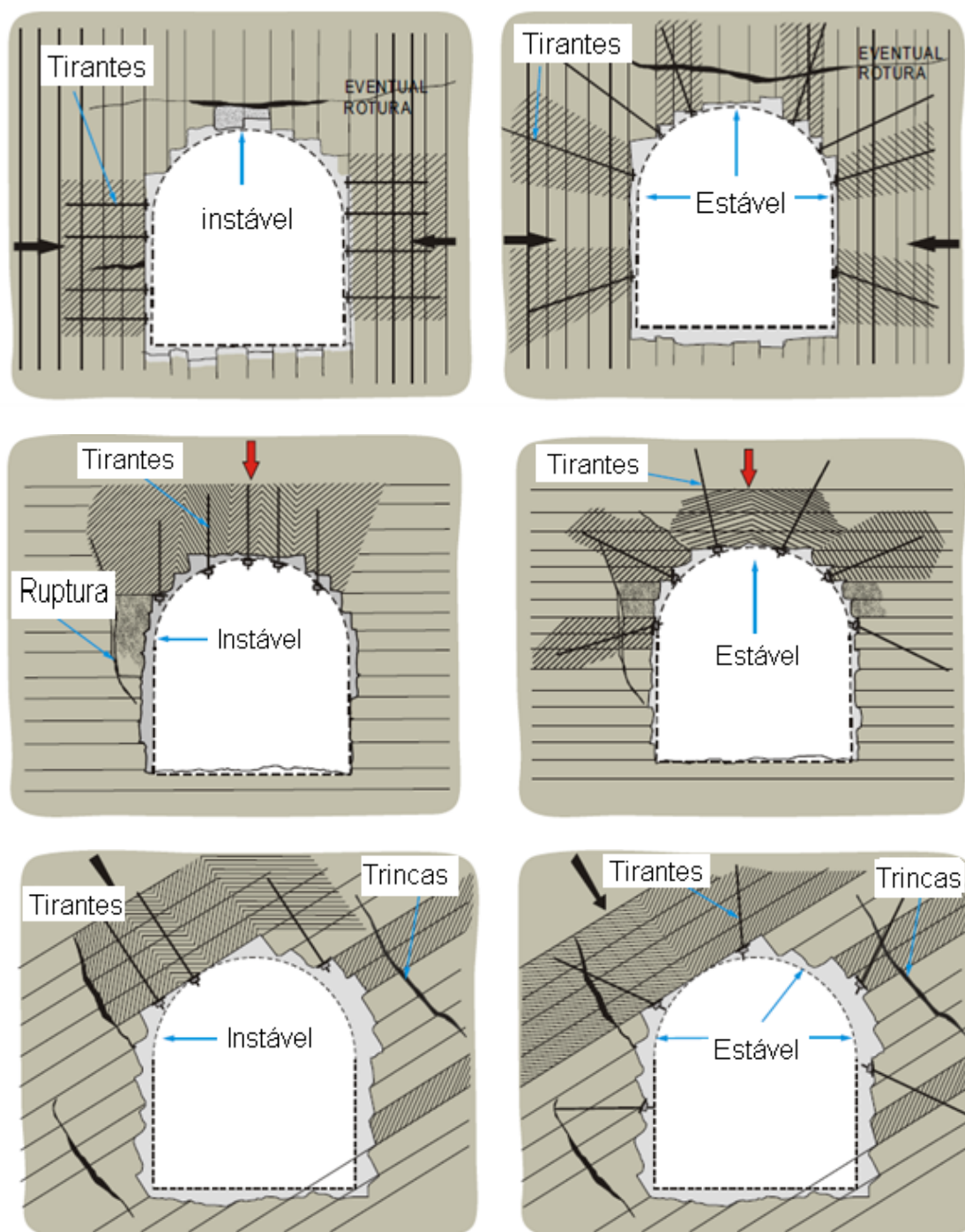


Figura 111 - Posicionamento correto das ancoragens conforme a orientações das estruturas presentes no maciço rochoso.

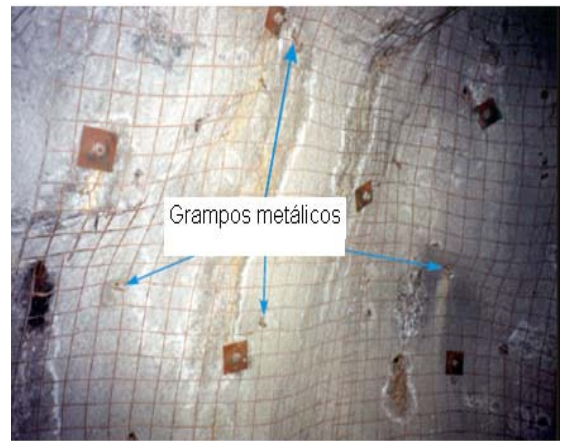
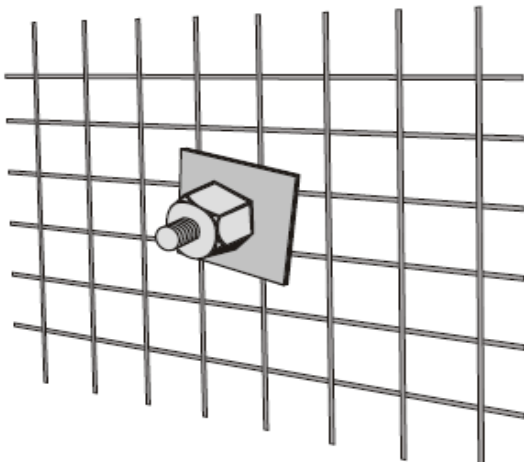
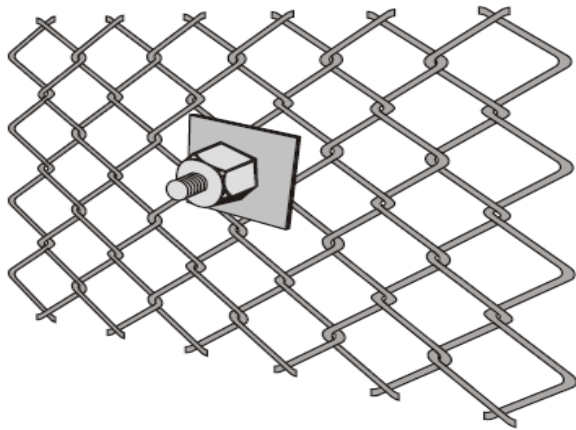


Figura 112 - Tipos de suportes passivos telas metálicas, grampos metálicos, ribs e straps metálicos.

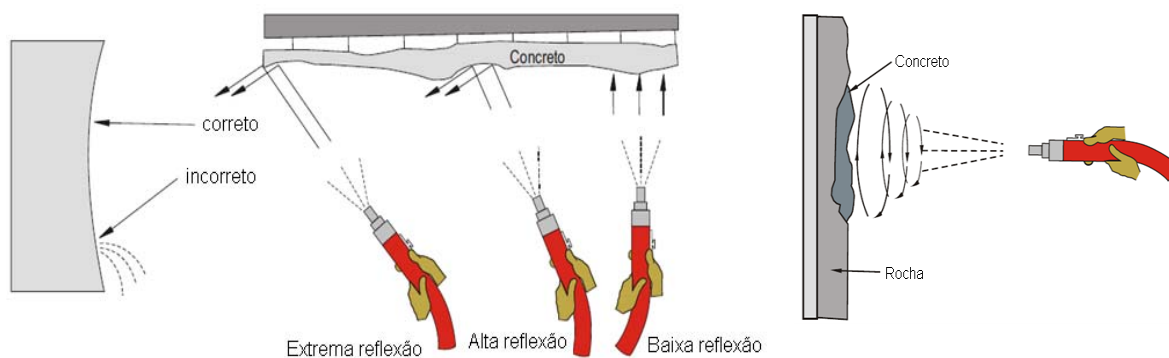
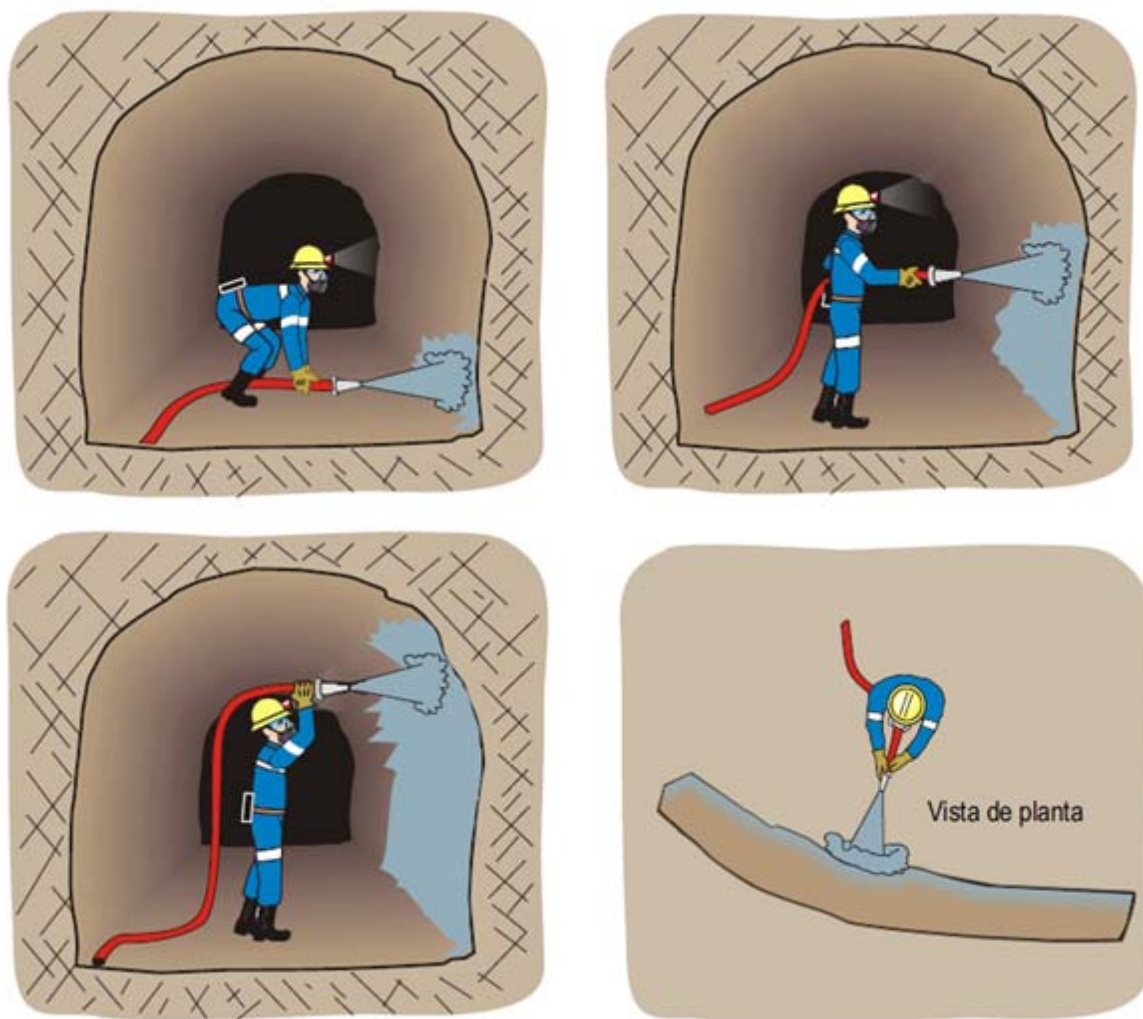


Figura 113 - Forma de aplicação do concreto projetado (padrão/ fibra metálica /polietileno).

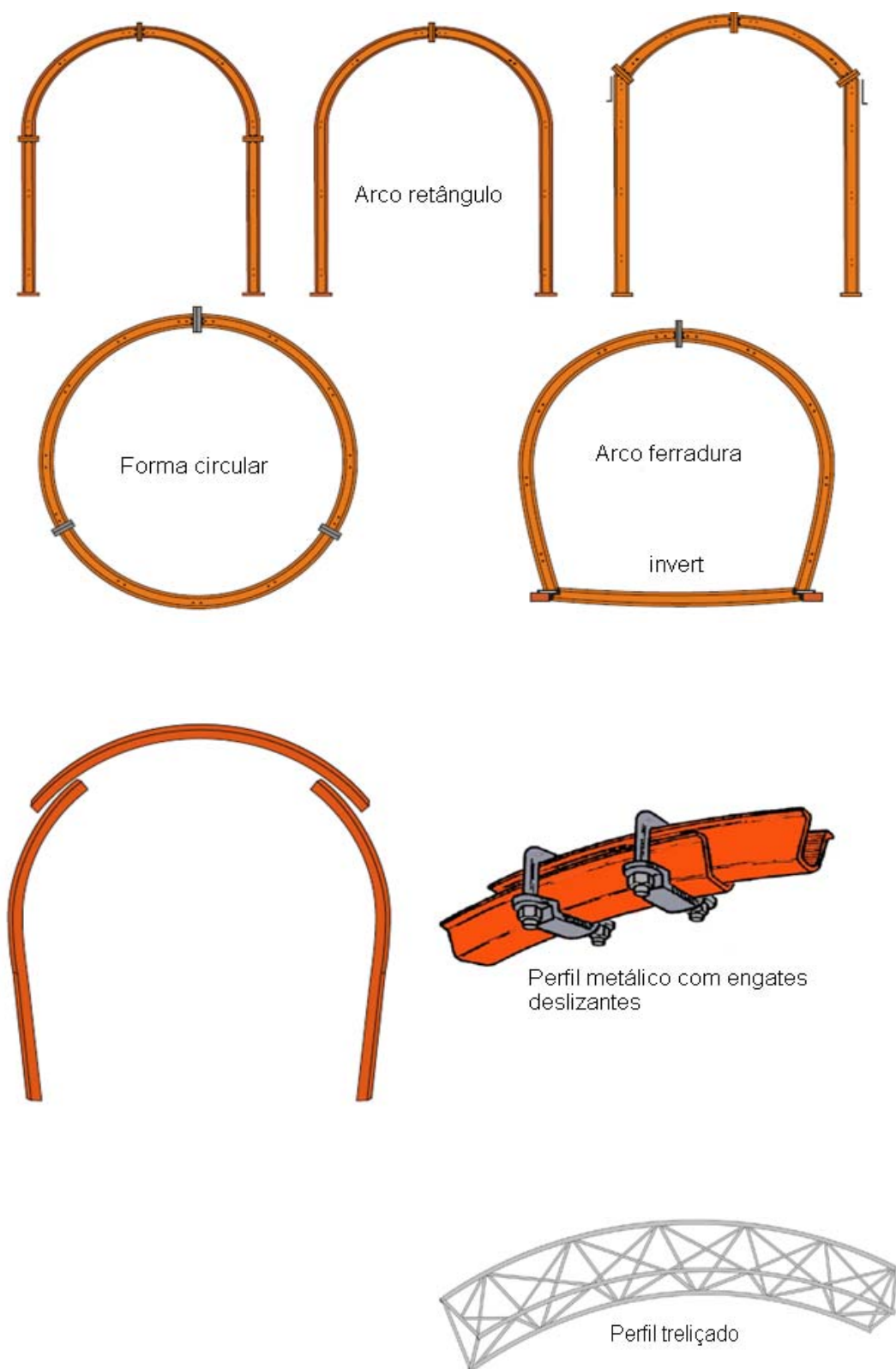


Figura 114 - Perfis metálicos I ou H de diversas bitolas e treliças metálicas (cambotas).

11 CONCLUSÃO

Mediante o estudo das condições geológicas subterrâneas da área investigada e a partir do conhecimento das características do maciço rochoso dentro dos principais domínios estruturais, pode-se estabelecer um plano que garanta a instalação de suporte e reforço do maciço remanescente a ser interceptado durante as novas aberturas para a implantação da futura mina.

Existem diferentes tipos de rocha, cada uma das quais apresentam suas características e propriedades físicas distintas; existem também situações que requerem o uso de reforços adicionais para consolidar os estratos de rocha, ou ancorar blocos chave prevenindo sua queda.

O objetivo principal da aplicação dos sistemas de classificação geomecânica, portanto, é garantir a segurança dos suportes a serem aplicados nas escavações subterrâneas para que o maciço rochoso suporte tais aberturas, assim como, orientar a direção da escavação, evitando o desprendimento ou queda de blocos inesperados.

Aplicação da classificação geomecânica favorece o controle dos riscos de acidentes, por queda de materiais como “*rockfall*” ou “*roof fall*”, ocorrerem durante a sua abertura subterrânea, constituem, ainda, uma preocupação fundamental que se deve ter na implantação de qualquer abertura subterrânea seja na mineração ou em obras civis.

Destaca-se neste trabalho a utilização das classificações de Barton e Bieniawski, a qual permitiu fornecer subsídios para a estimativa das deformações do maciço escavado, sugerindo muitas vezes suportes distintos.

A partir dos dados cadastrados durante o mapeamento e após cada avanço, permitiu-se a identificação do padrão de fraturas e falhas predominante dentro de cada domínio.

Os mapeamentos das escavações indicaram a predominância de maciços de qualidade regular a boa, dentro dos domínios estruturais seccionados pelas aberturas.

De uma maneira geral, conclui-se que as classificações geomecânica de um maciço rochoso acoplada às correlações com vários sistemas contribuem para a minimização do erro e da subestimação dos parâmetros geotécnicos importantes dentro de um projeto mineiro. Analisando a correlação feita entre o sistema Q com o RMR verificou-se algumas características intrínseca de cada sistema, por exemplo:

- ❖ **O sistema RMR é mais conservativo que o sistema Q para maciços rochosos de baixa qualidade ($21 < \text{RMR} < 40$).**
- ❖ **Os sistemas de classificação RMR e Q podem ser correlacionados por expressões matemáticas, mas deve-se ter cuidado com a sua aplicação em maciços de baixa qualidade e de domínios estruturais complexos.**
- ❖ **O sistema Q apresenta certa vantagem em relação ao RMR, pois é relativamente sensível a pequenas variações intrínsecas do maciço rochoso.**

A classificação geomecânica e suas correlações é, em muitos casos, uma alternativa para se obter uma redução do grau de incertezas muitas vezes encontradas ao longo de um projeto subterrâneo, tanto na mineração, como em obras civis.

O presente trabalho não tem a pretensão de esgotar o vasto e complexo campo da mecânica de rochas e de suas classificações, nem constituir um estado da arte sobre tão delicado assunto. Por isso, a classificação geomecânica deve constituir uma parte fundamental no processo de aberturas subterrâneas, buscando a identificação dos fatores críticos que regem a sua estabilidade.

Na essência, o RMR e o Q estão sem dúvida na mesma categoria para avaliar a qualidade do maciço rochoso com objetivo construir túneis e proporcionar dados para o projeto e para a construção.

Ao descrever esta monografia fui instigado principalmente por dois motivos: **propiciar um importante entendimento da importância das classificações geomecânicas e suas correlações dentro dos domínios geológicos e geotécnicos**, além do cuidado de sua aplicação, **buscando um melhor entendimento em prol de projetos subterrâneos mais seguros e econômicos, minimizando os imprevistos e os riscos geológico-geomecânico** muitas vezes encontrados na implantação deste tipo de empreendimento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVAREZ O., MIRANDA, J. y GUZMÁN, P. **Geología del Complejo Chuquicamata. Minería de Cobres Porfídicos.** Congreso Cincuentenario. Instituto de Ingenieros de Mina de Chile, Santiago. 314-363 pp. 1980.

AMBRUS, J. **Emplazamiento y Mineralización de los Pórfidos Cupríferos de Chile.**, Departamento de Cristalografía y Mineralogía, Universidad de Salamanca, España. Tesis de Doctorado, inédita. 1979.

AMBRUS, J. y SOTO, H. **Estudio Geológico del Molibdeno en Chuquicamata Chile.**STVDIA GEOLOGICA, VIII. 45-83 pp. 1974.

ARACENA, I. **Geología y Alteración del Complejo Plutónico del Sector Norte del Yacimiento de Chuquicamata.** Memoria para optar al título de Geólogo. Departamento de Geología y Geofísica, Universidad de Chile. 83 pp. 1981.

ARNOTT, A. M. **Evolution of the Hydrothermal Alteration at the Chuquicamata Porphyry Copper System,** Northern Chile. Dalhousie University, Halifax, Canada. Tesis de Doctorado, Inédita. 2003.

BARTON, N., LIEN, R. & LUNDE, J. **Engineering Classification of Rock Masses for the Design of Tunnel Support.** Rock Mechanics, Vol. 6 N°4, 189-236 pp., 1974.

BIENIAWSKI, Z. **Engineering Classification of Jointed Rock Masses.** Trans. S. Afr. Inst. Civ Eng., N° 15, 335-344 pp., 1973.

BIENIAWSKI, Z. **Engineering Rock Mass Classifications.** John Wiley & Sons, New York, 251 pp., 1989.

BIENIASWKI, Z.. **Rock Mechanics Design in Mining and Tunneling.** A.A Balkema, 272 pp. 1984.

BROWN, E. **Rock Characterization Testing and Monitoring,** ISRM Suggested Methods, Pergamon Press.1981.

CAINE, J., EVANS, J. & FORSTER, C. **Fault Zone Architecture and Permeability Structure**. Geology, November. V.24, N°11, 1025-1028 pp. 1996.

CAMUS, F. **Geología de los Sistemas Porfídicos en los Andes de Chile**. SENAGEOMIN, Santiago de Chile, 267 pp. 2003.

COLLADO, J., LATTUS, J. y RODRÍGUEZ, J. **Estudio Estructural Preliminar, Mina Chuquicamata 2005**. Informe interno, Subgerencia de Geología, Codelco Norte. 2005.

DEERE, D., HENDRON, A., PATTON, F. & CORDING, E. **Design of Surfice or Near Surface Excavations in Rocks**. Proc. 8th U.S. Symp. Rock Mechanics. Aime, New York. 1967.

DERK S.A. **Informe final: Servicio de Caracterización Geotécnica Rampa de Exploración y Rampa de Drenaje**. Mina Chuquicamata. Informe Inédito. Dirección de Geotecnia, Codelco Norte. 2005.

DILLES, J., TOMLINSON, A., MARTIN, M. & BLANCO, N. **El Abra and Fortuna Complexes: A Porphyry Copper Batholith Sinistrally Displaced by the Falla Oeste**. Actas VIII Congreso Geológico Chileno, Vol. 3, 1883-1887 pp. 1997.

DIRECCIÓN DE GEOLOGÍA, CODELCO NORTE. **Modelo Geológico y Estimación de Recursos del Depósito Chuquicamata**. Informe Inédito. 2005

DIRECCIÓN DE GEOLOGÍA, CODELCO NORTE. **Actualización Geológica del Proyecto Transición a Minería Subterránea**. Informe Inédito. 2006.

DIRECCIÓN DE GEOLOGÍA, CODELCO NORTE. **Caracterización Geotécnica del Yacimiento Chuquicamata**, año 2005. Informe Inédito. 2005.

FAUNES, A., HINTZE, F., SIÑA, A., VÉLIZ, H., VIVANCO, M. & Geological Staff . Chuquicamata, Core of a Planetary Scale Cu-Mo Anomaly; in Poter, T.M. (Ed), Super Porphyry Copper & Gold Deposits: **A Global perspective**; PGC Publishing, Adelaide. 2005.

FLORES, G. y KARZULOVIC, A. **Guías Geotécnicas para una Transición Desde Rajo Abierto a Minería Subterránea**. Caracterización Geotécnica. Tarea 4. Taller ICS-II. Informe Inédito. Dirección de Geotecnia, Codelco Chile División CodelcoNorte. 2004.

FUENZALIDA, H. **Calizas del Loa, en Lexique Stratigraphique International**, Chile. Center de Rech. Scientifique. Vol. V, Fasc 7, 195-196 pp. 1957.

GALLI, C. **Las Formaciones Geológicas en el Borde Occidental de la Puna de Atacama**, Sector Tarapacá. Minerales, Vol. 12, N° 56, Santiago, 1426 pp. 1957.

GARCÍA, F. **Geología del Norte de Chile. Simposio Geosinclinal Andino. Sociedad Geológica de Chile**, N° 3. Santiago, 138 pp. 1967.

GRIMSTAD, E. & BARTON, N. Updating of the Q-System for NMT. Kompen, Opsahl & Berg (eds). **Proceedings of the International Symposium on Sprayed Concrete, Modern Use of Wet Mix Sprayed Concrete for Underground Support, Fagernes. Norwegian Concrete Association**, Oslo, 1993.

HOEK, E., KAISER, P. and BAWDEN, W. **Support of Underground Excavations in Hard Rock**, Balkema, Rotterdam, 215pp. ISBN 89 5410 187 3, 1995.

HOEK, E. and BROWN, E.T. **Underground Excavations in Rock**, Institute of Mining and Metallurgy, London. ISBN 0- 900488 55 7, 1980.

HUTCHINSON, D. and DIEDERICHS, M. **Cablebolting in Underground Mines**, BiTech Publishers Ltd., Richmond, 4067pp. ISBN 0-921095-37-6.1996.

HERRERA, R.E. **Caracterización y Calificación Geotécnica Según los Índices RMR y RMRL Para el Macizo Rocoso Ubicado al Oriente de la Falla Oeste**. Mina Chuquicamata, II Región, Chile. Memoria para optar al título de Geólogo. Universidad Católica del Norte. Inédito. 2006.

HOEK, E. **Strength of Rock and Rock Masses**, ISRM News Journal, 2 (2), 4-16 pp. 1994.

HOEK, E. & BROWN, E.T. **Practical Estimates of Rock Mass Strength**. Int. J. Rock Mechanics Min. Sci. 34(8). 1165-1186 pp. 1997.

HOLLISTER, V. **Geology of Porphyry Copper Deposit of the Western Hemisphere**. New York, Aime, 219 pp. 1978.

LAUBSCHER, D. **A Geomechanics Classification System for the Rating of Rock Mass in Mine Design.** J. S. Afr. 199

LINDSAY, D., ZENTILLI, M. & ROJAS de la RIVERA J. **Evolution of an Active Ductile to Brittle Shear System Controlling Mineralization at the Chuquicamata Porphyry Copper Deposit,** Northern Chile. International Geology Review, vol. 37, 945-958 pp. 1995.

LIRA, G. **Geología del Área Preandina de Calama con Énfasis en la Estratigrafía Paleogeografía del Mesozoico 22° a 22° 45' Latitud Sur.** Región de Antofagasta, Chile. 1989

LOPEZ, V. **The Primary Mineralization at Chuquicamata, Chile.** Economic Geology , Vol. 34, 674-711 pp. 1939.

LOWELL, J. & GUILBERT, J. **Lateral and Vertical Alteration Mineralization Zoning in Porphyry Ore Deposits.** Economic Geology, vol. 65, 373-408 pp. Inst. Min. Metall. Vol. 90 N° 10, 257-273 pp. 1970.

MAKSAEV, V. y ZENTILLI, M. **Marco Metalogénico Regional de los Megadepósitos de tipo Pórfido Cuprífero del Norte Grande de Chile.** Actas V Congreso Geológico Chileno, Tomo I, B181-B212 pp. 1988.

MAKSAEV, V. **Metallogeny, Geological Evolution and Thermochronology of the Chilean Andes Between Latitudes 21° and 26° South and the Origin of the Major Porphyry Copper Deposits.** Universidad Dalhousie, Halifax. Nueva Escocia. Tesis de Doctorado. 1990.

MAKSAEV, V., Tomlinson, A. y Blanco, N.,. **Estudio Geológico de la Franja Longitudinal Comprendida entre Quebrada Blanca y Chuquicamata.** SERNAGEOMIN. 1994 (informe Inédito).

MARINOVIC, N., LAHSEN, A. **Hoja Calama,** Región de Antofagasta. Servicio de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, N° 58. 1984.

NARANJO, J. y PASKOFF. **Estratigrafía de los Depósitos Cenozoicos de la Región de Chiu-Chiu, Calama.** Desierto de Atacama. Revista Geológica de Chile, N° 13-14. 79-85 pp. 198

NIEMEYER, H. **Informe Geológico Estructural Zona de Falla Asociada a la Falla Oeste.** 1999.

OSSANDÓN, G., FRÉRAUT, R., GUSTAFSON, L., LINDSAY, D. y ZENTILLI, M. **Geology of the Chuquicamata Mine: A Progress Report. Economic Geology**, vol. 96, 249-270 pp. 2001.

PALMSTRÖM, A. **The Volumetric Joint Count a Useful and Simple Measure of the Degree of Rock Jointing**. Proc. 4th Congr. Int. Association of Engineering Geology. New Delhi. Vol.2, 221-228 pp. 1982.

PARDO, R. y RIVERA, S. **Programa de Exploración Básica de Seguimiento Distrito de Chuquicamata**. Informe de Resultados, 2° Región. Gerencia de Exploraciones. Oficina Calama, Codelco Chile. Informe Inédito. 1999.

PALLAUTA, J. **Análisis de Estabilidad y Desarrollo de los Taludes del Sector Sur-Oriental, Mina Chuquicamata**. Memoria para optar al título de Geólogo. Fac. De Cs. Fis. y Mat., Dpto. de Geología y Geofísica, Univ. De Chile. 97 pp. 1982.

RAYO, C. **Sectorización Geotécnica del Túnel de Drenaje Etapa 2, Expansión Norte de Mina Sur, División Codelco Norte**. Memoria para optar al título de Geólogo. Universidad de Chile. Inédito, 106 pp. 2007.

REUTTER, K.J., CHONG, G. y SCHEUBER, E. **The West Fissure and the Precordilleran Fault System of Northern Chile**. Andean Geodynamics, International Symposium 3rd, Oxford. UK, 21-23 de Septiembre 1999 RSTOM-University of Oxford, Extended Abstracts, 237-240 pp. 1993.

REUTTER K-J., SCHEUBER, E. y CHONG, G. **The Precordilleran System of Chuquicamata, Northern Chile: Evidence for Reversals Along Arc-parallel Strike-slip Fault**. Tectonophysics, vol. 259, 213-228 pp. 1996.

REYNOLDS, P., RAVENHURST, C., ZENTILLI, M. y LINDSAY, D. **High-Precision $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Dating of Two Consecutive Hydrothermal Events in the Chuquicamata Porphyry Copper System, Chile**. Chemical Geology, vol. 148, 45-60 pp. 1998.

SUPERINTENDÊNCIA INGENIERÍA GEOTÉCNICA. **Estandares para la Caracterización Geotécnica de Rocas, Estructuras y Macizos Rocosos. Primer Taller Gm Interdivisional**. Organizado por la División Chuquicamata de Codelco Chile. La Serena.1997.

SILLITOE, R. **The Tops and Bottoms of Porphyry Copper Deposits**. Economic Geology, Vol. 68, 799-815 pp. 1973.

SILLITOE, R. & MCKEE, E., 1996. **Age of Supergene Oxidation and Enrichment in the Chilean Porphyry Copper Province.** Economic Geology, vol. 91, 164-179 pp. 1996.

SYLVESTER, A. **Strike-Slip Faults.** Geological Society of American Bulletin, vol. 100, 1666-1703 pp. 1988.

TAPIA, J. **Distribución y Control de la mineralización en el Yacimiento Chuqui Norte. II Región de Antofagasta. Memoria para optar al título de Geólogo.** Departamento de Geociencias. Universidad del Norte. 96 pp. 1980.

THOMAS, A. **Geología de la Zona El Inca.** Codelco Chile, División Chuquicamata. Superintendencia de Geología. Informe Inédito, 35 pp. 1978.

TOMLISON, A., MPODOZIS, C., CORNEJO, P., RAMÍREZ, C., y DUMINTRO, T. **El Sistema de fallas Sierra Castillo-Agua Amarga: Transpresión sinistral Eocena en la Precordillera de Potrerillo,** El Salvador. VII Congreso Geológico Chileno, Vol. 2, Univ. de Concepción, Concepción, Chile. 1459-1463 pp. 1994.

TOMLISON, A., & BLANCO, N. **Structural Evolution and Displacement History of the West Fault System,** Precordillera, Chile: Part1, Synmineral History. Actas VIII Congreso Geológico Chileno, vol. 3, 1873-1877 pp. 1997.

TOMLISON, A.J., & BLANCO, N. **Structural Evolution and Displacement History of the West Fault System,** Precordillera, Chile: Part2, Postmineral History. Actas VIII Congreso Geológico Chileno, vol. 3, 1878-1882 pp. 1997.

ANEXOS

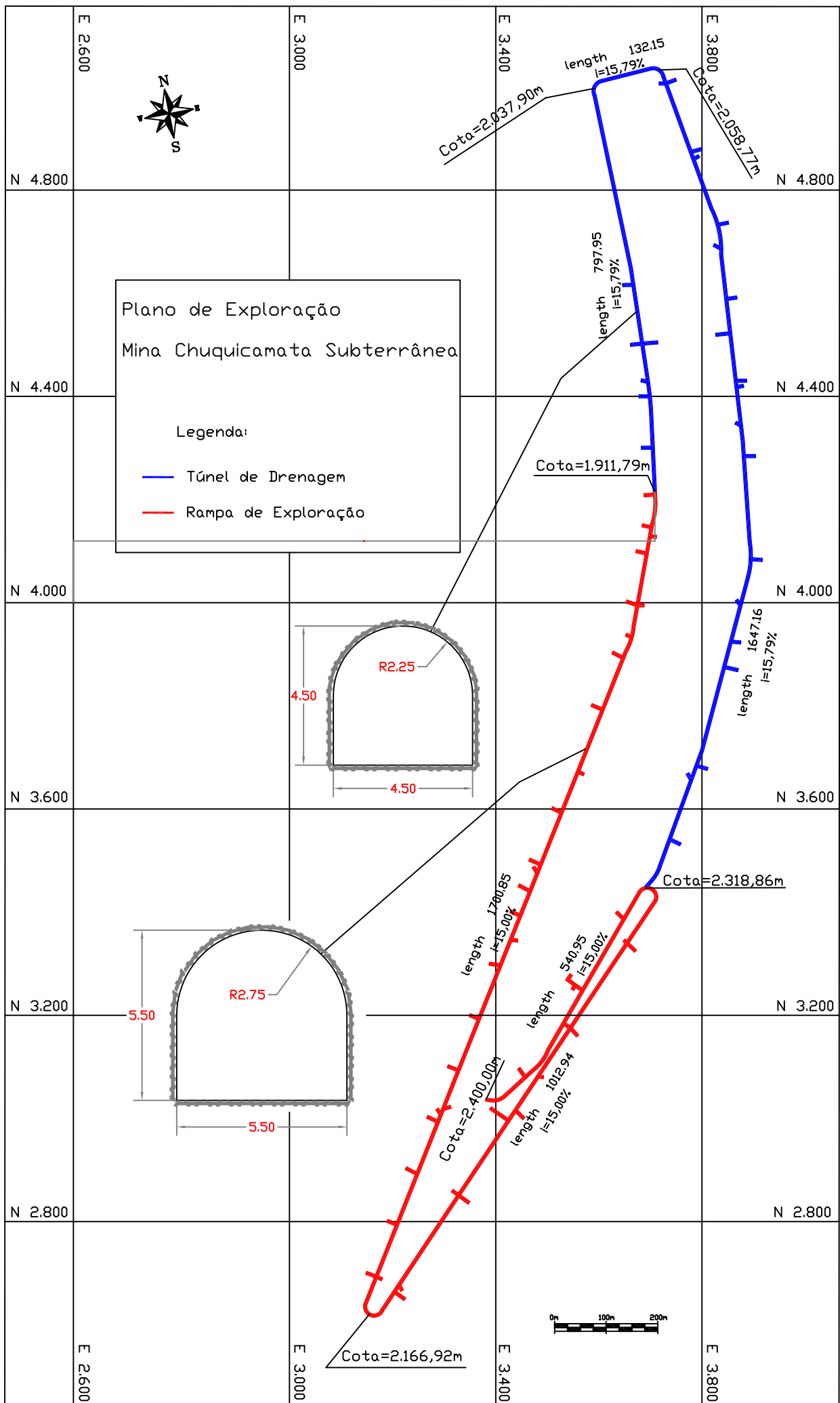


Figura 03



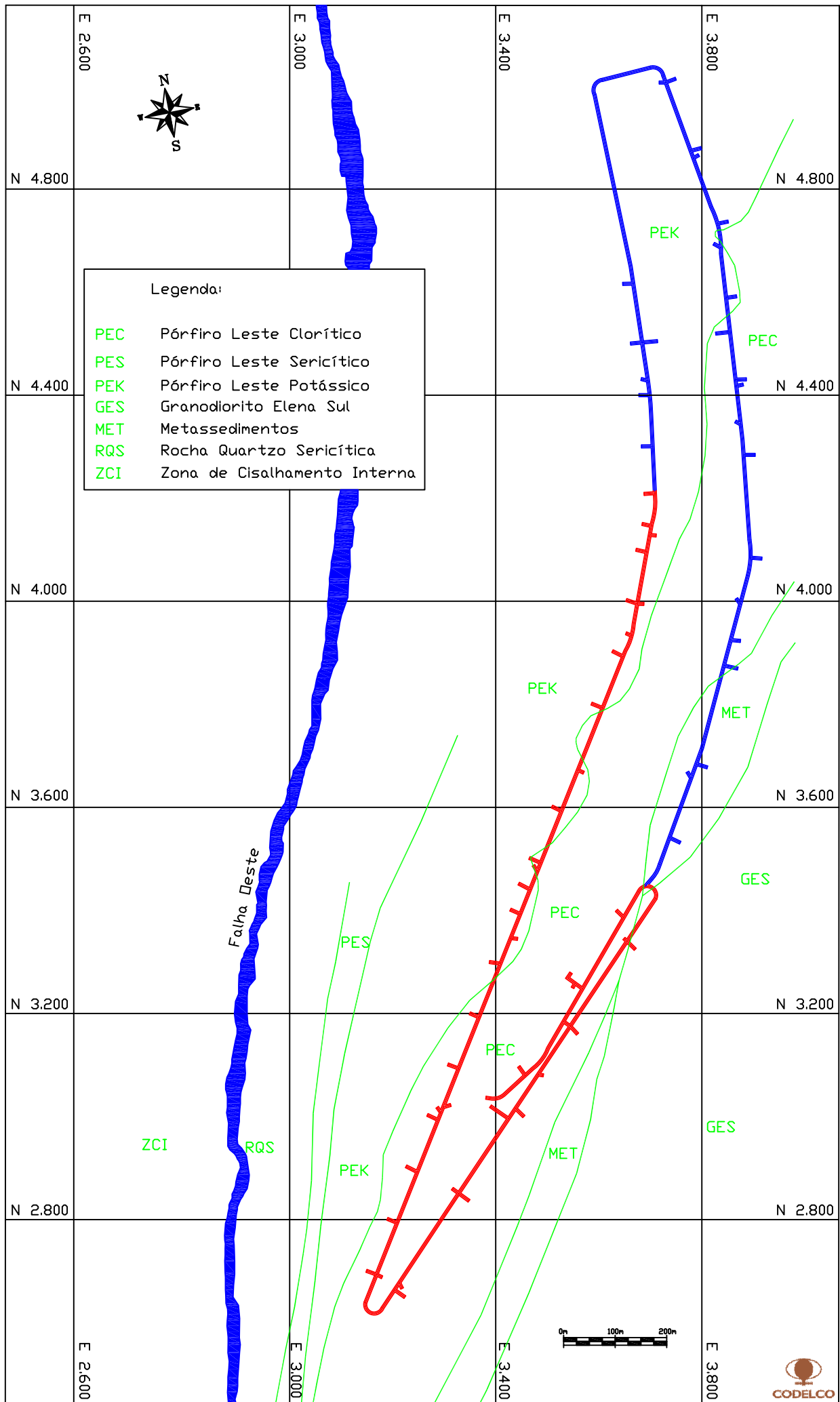


Figura 16

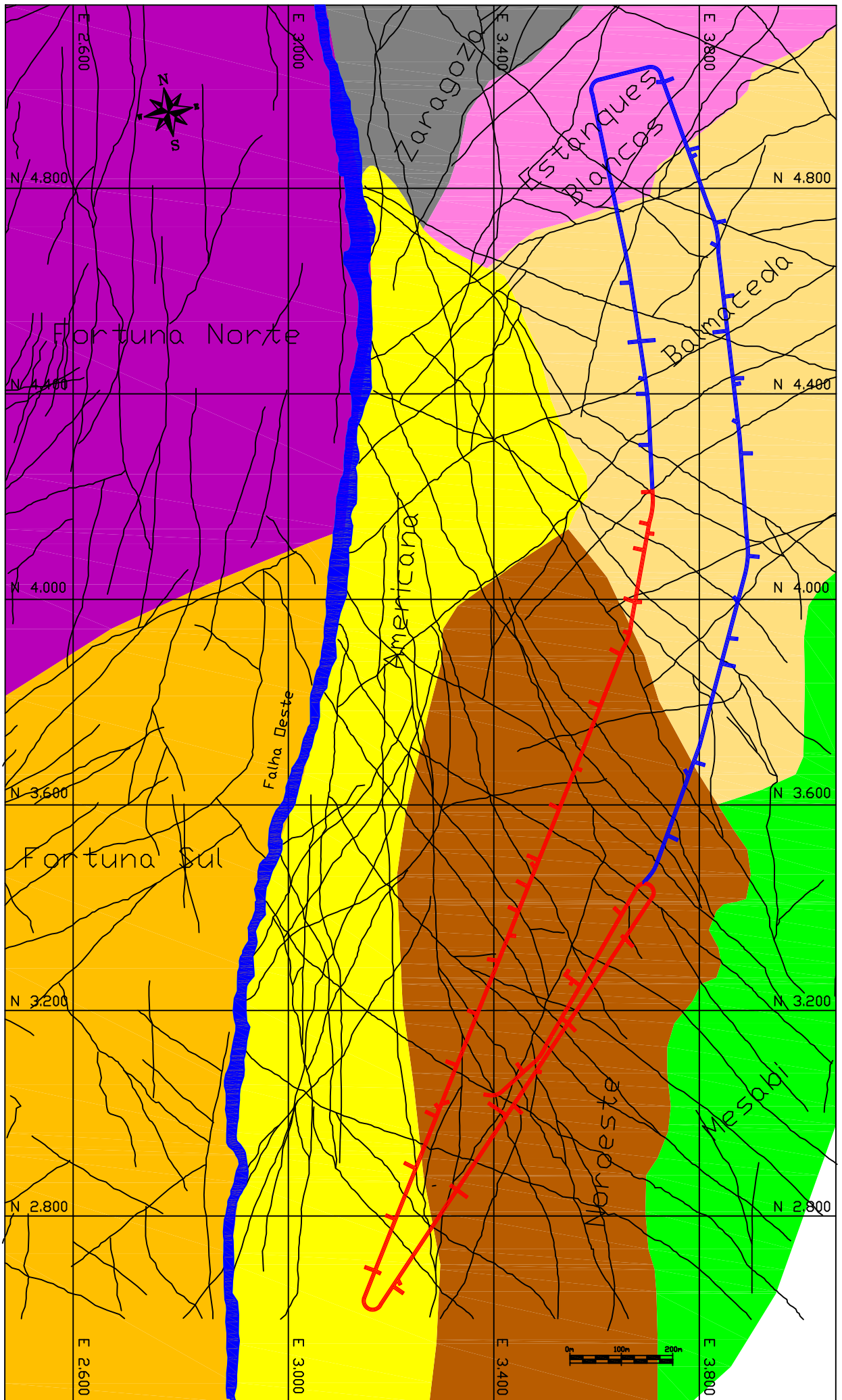


Figura 20



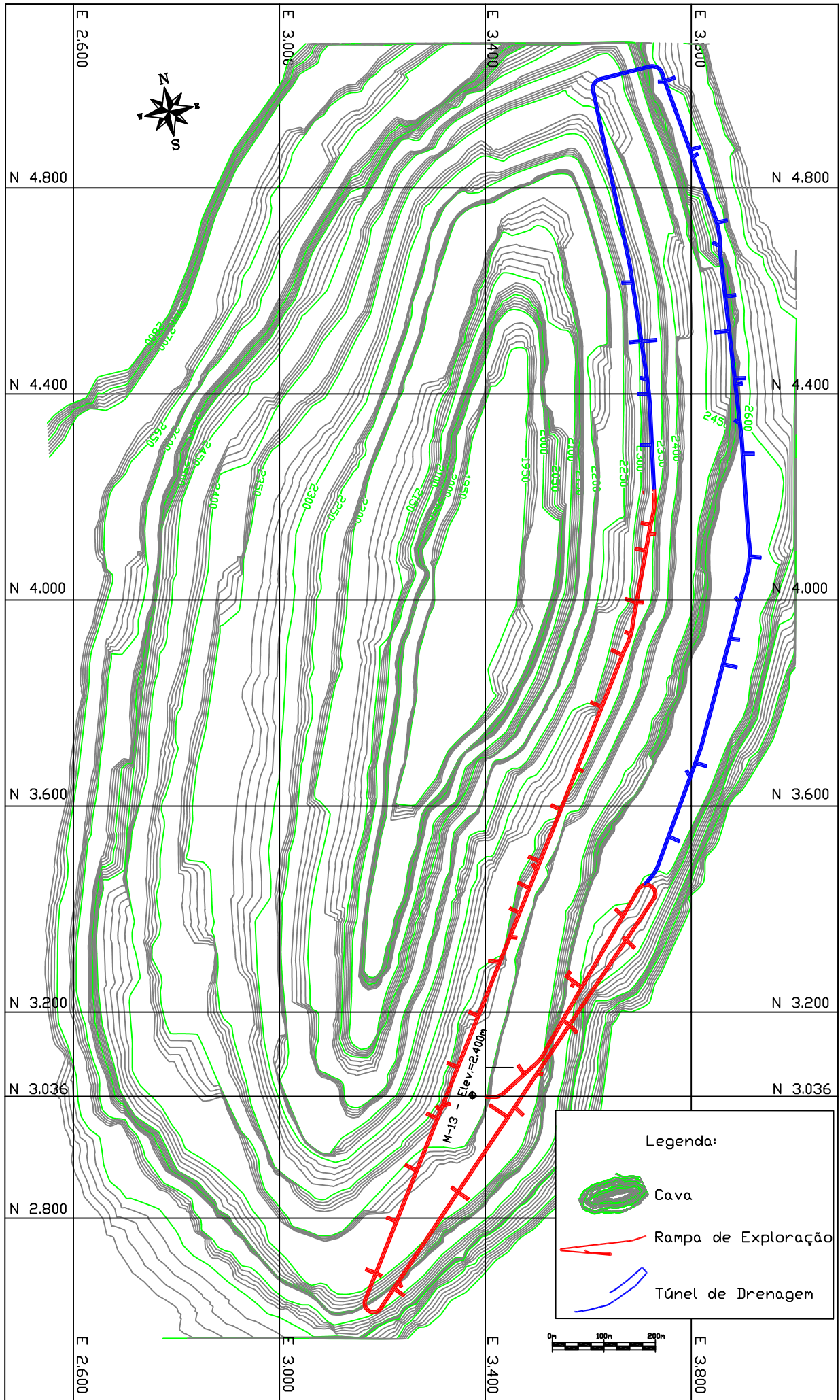


Figura 75

Planta de Localização da Rampa de Exploração e Túnel de Drenagem na cava da Mina de Chuquicamata-Chile



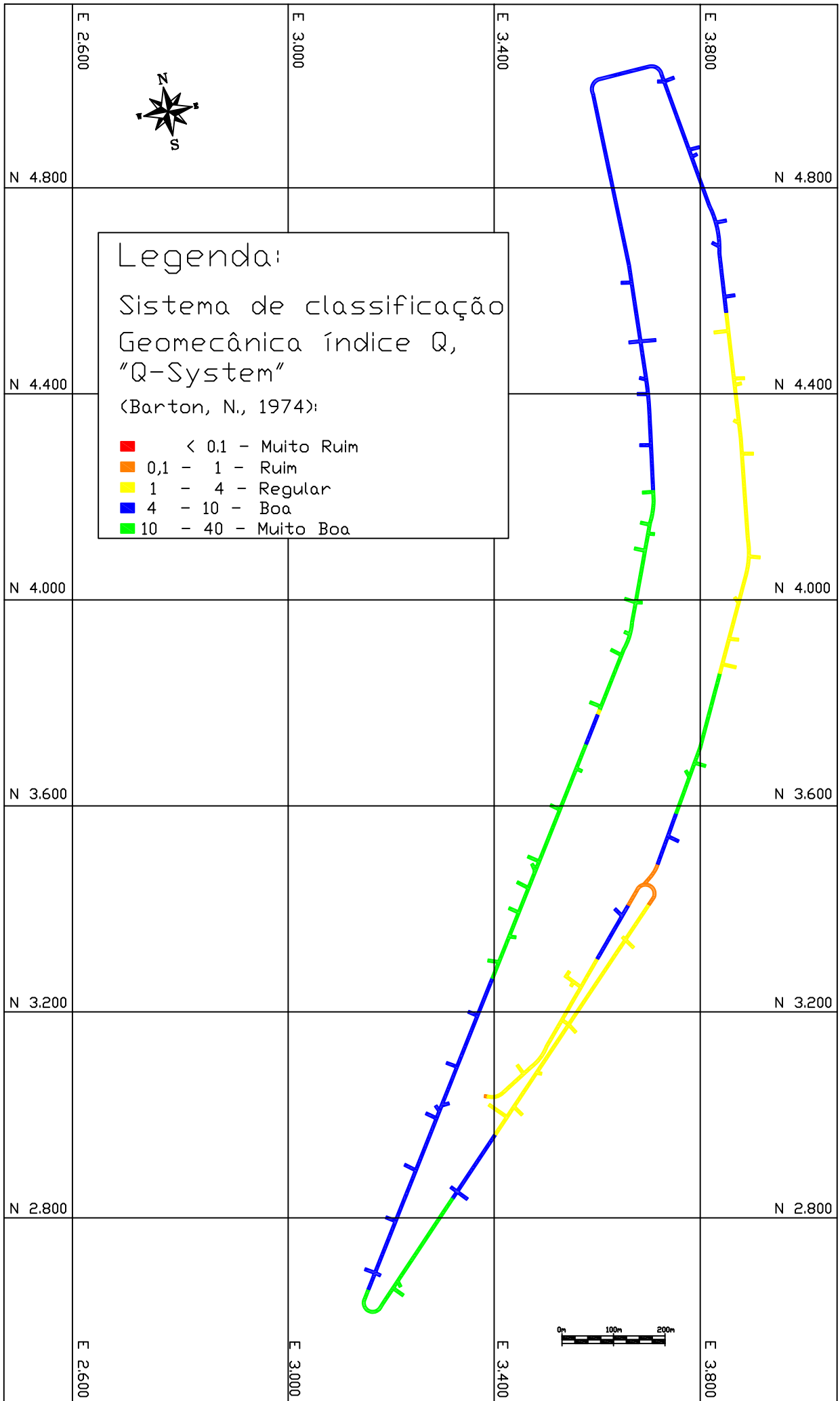


Figura 78

Distribuição das classes Geomecânicas, segundo (Barton, N., 1974)



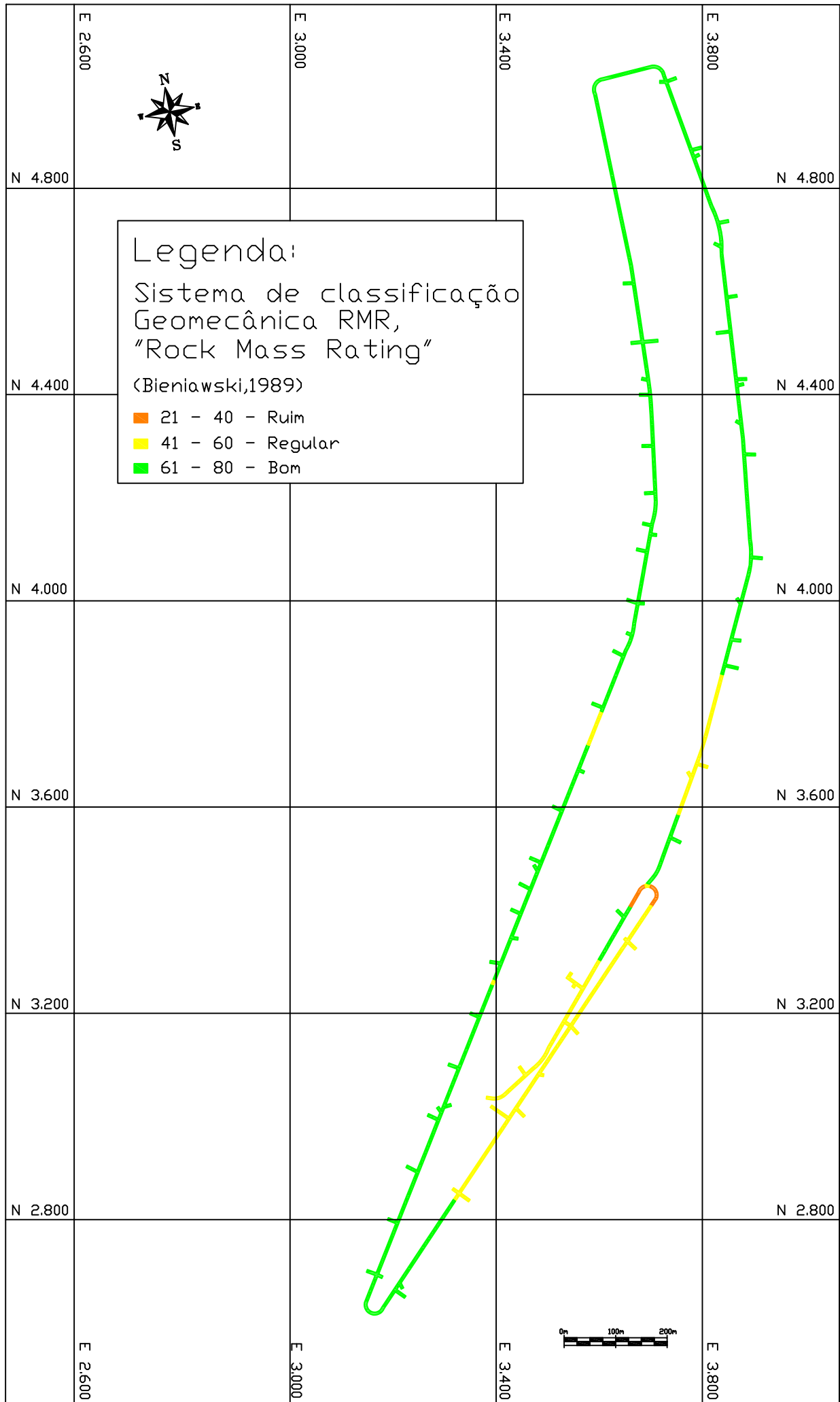
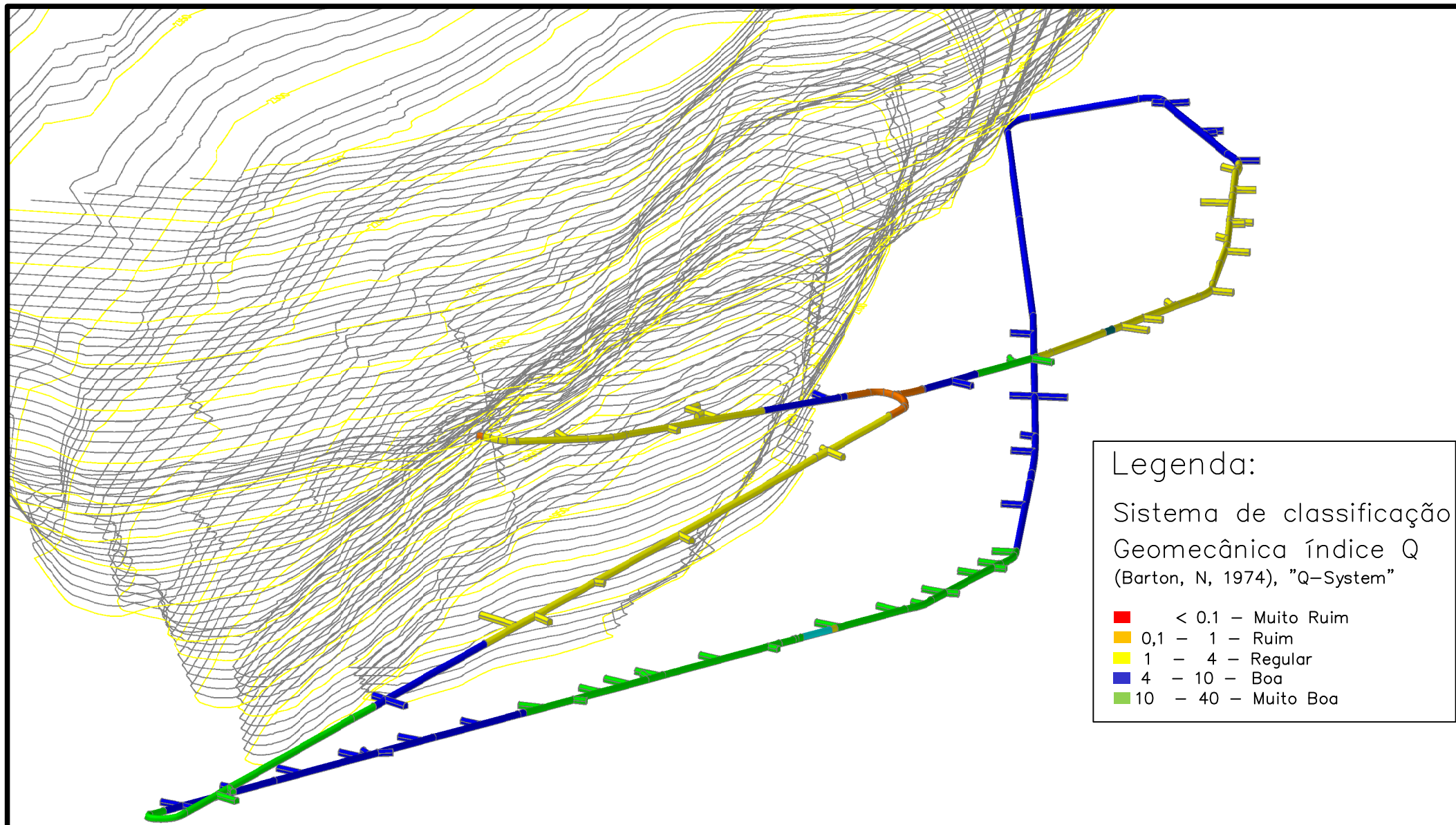


Figura 79

Distribuição das classes Geomecânicas, segundo Bieniawski, 1989

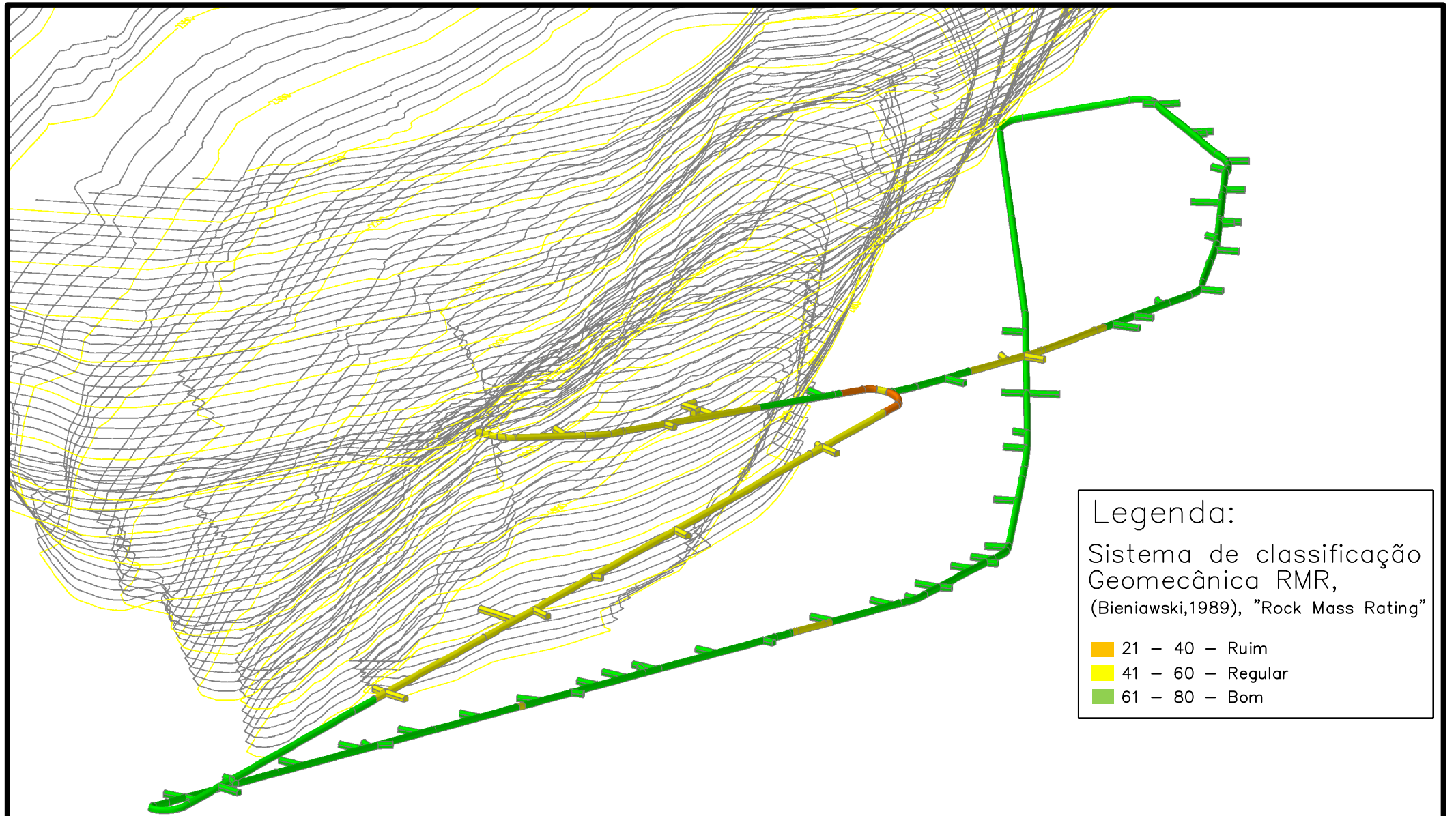




Modelagem Geomecânica 3D de Rampa de Exploração e Túnel de Drenagem, segundo Barton, N. *et. al.*, 1974.

Figura 80





Modelagem Geomecânica 3D de Rampa de Exploração e Túnel de Drenagem, segundo RMR de Bieniawski,1989.

Figura 81



CLASSIFICAÇÃO GEOMECÂNICA = ÍNDICE Q

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF}$$

$\frac{RQD}{J_n}$ - TAMANHO DOS BLOCOS
 $\frac{J_r}{J_a}$ - RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO ENTRE BLOCOS
 $\frac{J_w}{SRF}$ - TENSÕES ATUAANTES

RQD - DESIGNAÇÃO DA QUALIDADE DA ROCHA ("ROCK QUALITY DESIGNATION") - (OBS.1)

R1	MUITO POBRE	0 - 25
R2	POBRE	25 - 50
R3	REGULAR	50 - 75
R4	BOM	75 - 90
R5	EXCELENTE	90 - 100

J_n - NÚMERO DE FAMILIAS DE JUNTAS - (OBS.2)

A	MACIÇO, NENHUMA OU POUCAS JUNTAS	0,5-1,0
B	UM SISTEMA DE JUNTAS	2,0
C	UM SISTEMA DE JUNTAS MAIS JUNTAS ALEATORIAS	3,0
D	DOIS SISTEMAS DE JUNTAS	4,0
E	DOIS SISTEMAS DE JUNTAS MAIS JUNTAS ALEATORIAS	6,0
F	TRES SISTEMAS DE JUNTAS	9,0
G	TRES SISTEMAS DE JUNTAS MAIS JUNTAS ALEATORIAS	12,0
H	QUATRO SISTEMAS DE JUNTAS, ALEATORIAS, MUITO FRATURADO, POUCOS IRREGULARES.	15,0
I	ROCHA FRAGMENTADA, "BRITA"	20,0

J_r - ÍNDICE DE RUDESSAÇA DE AS JUNTAS

a) PAREDES DAS JUNTAS EM CONTATO (OBS. 3)
 b) PAREDES COM MENOS DE 10 cm DE CISCALHAMENTO

A	JUNTAS DESCONTINUAS	4,0
B	RUGOSA E IRREGULAR, ONDULADA	3,0
C	LISA E ONDULADA	2,0
D	ESTRIAS DE FRICÇÃO E ONDULADA	1,5
E	RUGOSA OU IRREGULAR E PLANA	1,5
F	LISA E PLANA	1,0
G	ESTRIAS DE FRICÇÃO E PLANA	0,5

c) SEM CONTATO ENTRE PAREDES, ZONAS CISCALHADAS (OBS.)

H	ZONAS CONTENDO ARGILA-MINERAS COM ESPRESSURAS SUFFICIENTE PARA IMPEDIR CONTATO ENTRE PAREDES	1,0
I	ARENOSA OU FRAGMENTADA COM ESPRESSURA SUFFICIENTE PARA IMPEDIR CONTATO ENTRE PAREDES	1,0

J_a - ÍNDICE DE ALTERAÇÃO E PREENCHIMENTO DAS JUNTAS

Fr	J _a
----	----------------

a) CONTATO ENTRE PAREDES SEM PELICULAS

A	SELADA, DURO, IMPERMEÁVEL, PREENCHIDA POR QUARTZO, CALCITA, ETC.	0,75	
B	PAREDES SÁS, SUPERFÍCIE DESCOLORIDA SOMENTE.	25'-35'	1,0
C	PAREDES POUCO ALTERADA, SEM MINERAIS BRANDOS RECORBRINDO, SEM ARGILA E ROCHA DESINTEGRADA.	25'-30'	2,0
D	CAMADA ARGILO-SILTOSA OU ARGILO-ARENOSA, COM PEQUENA FRAÇÃO DE ARGILA (NÃO MOLE).	20'-25'	3,0
E	MATERIAS BRANDOS COM BAIXA ATRITO, ARGILO MINERAIS, CALCINITA OU MICAS, TAMBÉM GORTA, TALCO, GIPSO, ETC. E POUCA QTDE DE MINERAIS EXPANSIVOS.	8'-16'	4,0

b) PAREDES COM MENOS DE 10cm DE CISCALHAMENTO, PREENCHIMENTO FINO

F	PARTICULAS ARENOSA, SEM ARGILO MINERAIS E ROCHA DECOMPOSTA	25'-30'	4,0
G	ARGILA RÍGIDA DURA, CONTINUA PORÉM $\leq 5mm$.	16'-24'	6,0
H	ARGILA POUCA A MEDIANAMENTE CONSOLIDADA, CONTINUA PORÉM $\leq 5mm$.	12'-16'	8,0
I	ARGILO MINERAIS EXPANSIVOS, ESMETTITAS, CONTINUA PORÉM $\leq 5mm$; VALORES DE J _a DEPENDERÁ DA % DE ARGILA EXPANSIVOS, E ACESSO A ÁGUA, ETC.	6'-12'	8-12

c) SEM CONTATO ENTRE PAREDES, ZONAS CISCALHADAS

K,L,M	ZONAS OU BANDAS DESINTEGRADAS, ROCHA FRAGMENTADA E ARGILA, VER G, H, I.	6'-24'	6,8 a 8-12
N	ZONAS OU BANDAS ARGILO-SILTOSA OU ARGILO-ARENOSA COM PEQUENA FRAÇÃO DE ARGILA (NÃO MOLE).	-	5,0
O,P,R	ZONA ESPESSA E CONTINUA OU BANDA DE ARGILA, (VER G, H, I PARA DESCRIÇÃO).	6'-24'	10,13 ou 13-20

J_w - FATOR DE REDUÇÃO DEVIDO A PRESEÇA D'ÁGUA - (OBS.5)

A	ESCAVAÇÃO SECA OU GOTEJAMENTO, <5l/min LOCALMENTE	1,0
B	VAZÃO MÉDIA OU PRESSÃO, PODE LAVAR O PREENCHIMENTO	0,66
C	VAZÃO ALTA OU ALTA PRESSÃO EM ROCHA COMPETENTE E JUNTAS NÃO PREENCHIDAS	0,5
D	VAZÃO ALTA OU PRESSÃO, CONSIDERAVEL LAVAGEM DAS JUNTAS	0,33
E	EXCEPCIONAIS VAZÕES APÓS A DETONAÇÃO, CAINDO NO TEMPO	0,2-0,1
F	EXCEPCIONAIS VAZÕES APÓS A DETONAÇÃO, SEM DIMINUIÇÃO SIGNIFICATIVA	0,1-0,05

SRF - FATOR DE REDUÇÃO A TENSÕES NO MACIÇO

a) ZONAS DE FRAQUEZA INTERCEPTANDO A ESCAVAÇÃO, AS QUAIS PODERÃO CAUSAR QUEDA DE BLOCOS DE ROCHA QUANDO O TÚNEL É ESCAVADO (OBS.6)

A	MÚLTIPLA OCORRÊNCIAS DE ZONAS FRACAS CONTENDO ARGILA OU ROCHA QUIMICAMENTE DESINTEGRADA, MUITO MATERIAL SOLTO NA SUPERFÍCIE DA ROCHA	10,0
B	ÚNICA ZONA DE FRAQUEZA COM ARGILA OU ROCHA DESINTEGRADA (PROFUND.>50m)	5,0
C	ÚNICA ZONA DE FRAQUEZA COM ARGILA OU ROCHA DESINTEGRADA (PROFUND.>50m)	2,5
D	MÚLTIPLAS ZONAS, FRAQUEZAS E ROCHA COMPETENTE, SEM ARGILA MATERIAL SOLTO NA SUPERFÍCIE DA ROCHA; QUALQUER PROFUNDIDADE	7,5
E	ÚNICA ZONA CISCALHADA EM ROCHA COMPETENTE, SEM ARGILA; (PROFUNDIDADE>50)	5,0
F	ÚNICA ZONA CISCALHADA EM ROCHA COMPETENTE, SEM ARGILA; (PROFUNDIDADE>50)	2,5
G	FRAGMENTADA, JUNTAS ABERTAS, MUITO FRAGMENTADA, "BRITA"	5,0

b) ROCHA COMPETENTE; PROBLEMAS DE TENSÃO NO MACIÇO (OBS.7)

H	BAIXA TENSÃO, PRÓXIMO DA SUPERFÍCIE.	>200	<0,01	2,5
J	MÉDIA TENSÃO, CONDIÇÕES FAVORÁVEIS DE TENSÃO.	200-10	0,01-0,3	1,0
K	TENSÃO ALTA.	10-5	0,3-0,4	0,5-2,0
L	MODERADO DESPLACAMENTO EM ROCHA MACIÇA, APOS + DE 1 HORA.	5-3	0,8-0,65	5-50
M	DESPLACAMENTO EXPLOSAO DE ROCHA EM ROCHA MACIÇA, APOS POUCOS MINUTOS.	3-2	0,65-1	50-200
N	MUITO EXPLOSAO DE ROCHA (DEFORMAÇÃO E EXPLOSAO) E DEFORMAÇÃO DINÂMICA MÉDIA, ROCHA MACIÇA.	<2	>1	200-400

c) SQUEEZING ROCK; FLUXO PLÁSTICO DE ROCHA INCOMPETENTE CAUSADO POR ALTAS PRESSÕES DE ROCHA (OBS.8)

O	MODERADO SQUEEZING E CONSEQUENTE PRESSÃO DE ROCHA.	1-5	5-10
P	INTENSO SQUEEZING E CONSEQUENTE PRESSÃO DE ROCHA.	>5	10-20

d) EXPANSIBILIDADE DE ROCHA; EXPANSÃO DEPENDENTE DA PRESSÃO DE ÁGUA

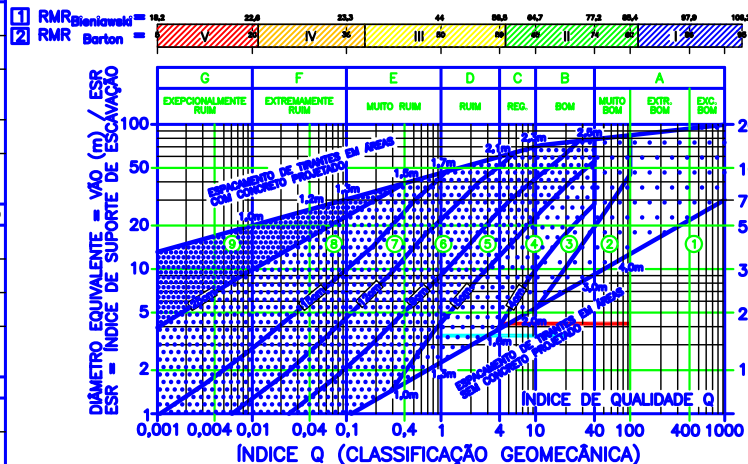
Q	EXPANSIBILIDADE DE ROCHA; EXPANSÃO DEPENDENTE DA PRESSÃO DE ÁGUA	1-5	5-10
R	MODERADA EXPANSIBILIDADE E CONSEQUENTE PRESSÃO DE ROCHA.	5-10	10-15
S	INTENSA EXPANSIBILIDADE E CONSEQUENTE PRESSÃO DE ROCHA.	10-15	10-15

CLASSIFICAÇÃO GEOMECÂNICA DE BARTON

DIAGRAMA EMPÍRICO PARA USO NO DIMENSIONAMENTO DO SUPORTE PERMANENTE DE ESCAVAÇÕES SUBTERRÂNEAS E SUA CORRELAÇÃO ENTRE O SISTEMA Q E RMR.

$$RMR = 9 \ln Q + 44 \text{ (Bieniawski, 1989)} \quad Q >> e^{\frac{RMR-44}{9}}$$

$$RMR = 15 \log Q + 50 \text{ (Barton, 1995)} \quad Q >> 10^{\frac{RMR-50}{15}}$$



CLASSE DE ROCHA:

V	IV	III	II	I
Muito Ruim	Ruim	Regular	Bom	Muito Bom

CLASSIFICAÇÃO GEOMECÂNICA RMR - BIENIAWSKI, 1989

Tabela: Sistema de classificação geomecânica RMR (Bieniawski, 1979)

J1	Resistência da rocha intacta	Índice puntiforme	10MPa	4-10MPa	2-4MPa	1-2MPa	utilizar compressão simples
J2	ROD (rock quality designation)	Compressão simples	250MPa	100-250MPa	50-100MPa	25-50MPa	5-25MPa 1-5MPa 1MPa
J3	Empacamento de fraturas	Peso relativo	15	12	7	4	2 1 0
J4	Condições das fraturas	Superfícies muito rugosas; não continuas; <1mm; paredes duras	Superfícies pouco rugosas; aberturas <1mm; paredes duras	Superfícies muito rugosas; aberturas <1mm; paredes duras	Superfícies muito rugosas; aberturas <1mm; paredes duras	Superfícies muito rugosas; aberturas <1mm; paredes duras	Fracturação mole >5mm ou >5mm; >5mm; >5mm; >5mm; >5mm;
J5	Água subterrânea	Peso relativo	30	25	20	10	0
J6	Direção e mergulho	Muito favorável	Favorável	10	Desfavorável	Muito desfavorável	

$$RMR = J1 + J2 + J3 + J4 + J5 + J6$$

PARÂMETROS GEOMECÂNICOS

- J1=Resistência a compressão uniaxial da rocha intacta
- J2=ROD % "Rock Quality Designation"
- J3=Empacamento das descontinuidades
- J4=Condições das descontinuidades
- J5=Influência da água no subterrâneo
- J6=Orientação das descontinuidades

CATEGORIAS DE SUPORTE DE BIENIAWSKI

Classes Geomecânicas	Avanço da Escavação	Tirantes Ø-25mm / resina ou grouting	Concreto Projetado	Grupos Metálicos
I - Muito Boa RMR: 81-100	3 a 4 metros.	Geralmente sem suporte, às vezes tirantes esporádicos "Blocos"		terris / H e Treliças
II - Boa RMR: 80-61	1,5 a 3 metros suporte a cada 2 metros de avanço.	Tirantes localizados comprimento de 3 metros, Espacamento=2,5 metros, tela metálica ocasional	50 mm na região da abóboda.	não
III - Regular RMR: 41-60	Avanço de 1,5 a 2 metros suporte após avanço total de 10 metros.	Tirantes sistemáticos Espacamento=1,5 a 2 metros, tela metálica esporádica.	50-100mm na abóboda Ø8mm nas paredes; optar por fibra metálica	não
IV - Ruim RMR: 21-40	Avanços parciais em meia seção e rebaixo 1,5 a 2,0 metros da cabeceira.	Tirantes sistemáticos 4 a 5 metros de comprimento espacamento=1,5 a 2 metros no teto e paredes com tela metálica.	100-150mm de concreto no teto e 100mm nas paredes podendo ser com fibra metálica.	Rbs e/ou Straps com espaçamento de 1,5 metros.
V - Muito Ruim RMR: <20	Múltiplos drifts: 0,5 a 1,5 metros de avanço no topo. Instalação de suportes com tela e concreto projetado a cada avanço.	Tirantes sistemáticos de 5 a 6 metros, espacamento=1,5 a 2 metros no teto e no invert.	150-200mm de concreto projetado no teto e 50mm na face de escavação	Ribs metálicos, Straps, perfis e Hc projetado no tubular e/ou monobata CA-50 de Ø=1". Perfis treliçados.

DIMENSÕES EQUIVALENTE, De

De = VÃO DA ESCAVAÇÃO / ESR
 De = (LARGURA OU ALTURA, Em m / EXCAVATION SUPPORT RATIO)

CLASSE	CARACTERÍSTICA DA ESCAVAÇÃO	ESR
A	ABERTURAS TEMPORARIAS EM MINAS SUBTERRÂNEAS	3-5
B	ABERTURAS PERMANENTES EM MINAS SUBTERRÂNEAS, TÚNEIS HIDRÁULICOS EM HIDRELÉTRICAS (EXCETO TÚNEIS A PRESSÃO), TÚNEIS PILOTO E GALERIAS DE AVANÇO DE LARGAS ESCAVAÇÕES	1,6
C	CAVERNAS PARA ARMAZENAMENTO, ESTAÇÕES SUBTERRÂNEAS DE TRATAMENTO DE ÁGUA, MENORES TÚNEIS RODOVIÁRIOS E FERROVIÁRIOS, CÂMERAS DE EQUILÍBRIO E TÚNEIS DE ACESSO	1,3
D	USINAS HIDRELÉTRICAS, SUBTERRÂNEAS, MAIORES TÚNEIS RODOVIÁRIOS E FERROVIÁRIOS, CAVERNAS DE DEFESA CIVIL E INTERSEÇÕES NOS PORTAIS	1,0
E	USINAS NUCLEARES SUBTERRÂNEAS, ESTAÇÕES FERROVIÁRIAS E CAVERNAS SUBTERRÂNEAS PARA USO CIVIL (ESPORTE E UTILIDADES PÚBLICAS) E FÁBRICAS	0,8

CATEGORIAS DE SUPORTE DE BARTON

- 1 - AUTOPORTANTE
- 2 - TIRANTES ESPORÁDICOS
- 3 - TIRANTES SISTEMÁTICOS E CONCRETO PROJETADO PADRÃO, 4cm
- 4 - TIRANTES SISTEMÁTICOS E CONCRETO PROJETADO PADRÃO 10-10cm
- 5 - TIRANTES SISTEMÁTICOS E CONCRETO PROJETADO COM FIBRAS, 5-9cm
- 6 - TIRANTES SISTEMÁTICOS E CONCRETO PROJETADO COM FIBRAS, 9-12cm
- 7 - TIRANTES SISTEMÁTICOS E CONCRETO PROJETADO COM FIBRAS, 12-15cm
- 8 - TIRANTES SISTEMÁTICOS E CONCRETO PROJETADO COM FIBRAS, >15cm E CAMBIAS DE CONCRETO PROJETADO ARMADO
- 9 - REVESTIMENTO DE CONCRETO CONVENCIONAL

LEGENDA:
 RAMPA DE EXPLORAÇÃO
 TÚNEL DE DRENAGEM

OBSERVAÇÕES

- GERAL - INÍCIO DE RUDESSAÇA DE JUNTAS, E J_a ÍNDICE DE ALTERAÇÃO, SÃO APLICADOS PARA SISTEMAS DE JUNTAS OU DESCONTINUIDADES QUE SÃO MENOS FAVORÁVEIS PARA A ESTABILIDADE DO PUNTO DE CONTATO E RESISTÊNCIA AO CISCALHAMENTO (1,5 E 3,0 D_e) ESCOLHE E INÍCIO A CLASSIFICAÇÃO PELA DESCONTINUIDADE MAIS DESFAVORÁVEL A ESTABILIDADE.
- 1 - QUANDO O ROD MEDIDO FOR <10 (INCLUSIVE 10) USAR O VALOR 10 PARA DETERMINAR DE Q. USAR VALORES DE INTERVALOS MÚLTIPLAS DE 5.
 - 2 - PARA DETERMINAÇÃO NA FRENTE ESCAVADA, ESCOLHA O TRECHO MAIS REPRESENTATIVO DO MACIÇO, E FAÇA A CONTAGEM VOLUMÉTRICA (3 EXOS) DAS JUNTAS, NESTA REGIÃO, RO = 115-3,3 J_w (J_w É O SOMATÓRIO DAS JUNTAS POR METRO ENCONTRADAS NOS 3 EXOS).
 - 3 - PARA INTERSEÇÃO DE TÚNEIS USAR 3,0 J_w; PORTAIS USAR 2,0 J_w.
 - 4 - DESCRIÇÃO REFERENTE AS FEIÇÕES DE PEQUENA E INTERMEDIÁRIA ESCALA, NESTA ORDEM.
 - 5 - ADICIONE 1,0 SE O ESPAÇAMENTO DO PRINCIPAL SISTEMA DE JUNTAS FOR MAIOR QUE 3m.
 - 6 - OS ÍTEM C e F, SE ESTIMATIVAS GROSSERAS, OS VALORES DE J_w PODERÃO SER AUMENTADAS SE VÁZIO FOREM MEDIDAS NAS DRENAGENS DESIDUAS.
 - 7 - REDUZIR ESSES VALORES DE SRF, DE 25% A 50%, SE RELEVANTES ZONAS DE FRAQUEZA INFLUENCIAM MAS NÃO INTERCEPTAM A ESCAVAÇÃO.
 - 8 - PARA FORTES ZONAS DE TENSÕES VIGOSAS (DE MEDIO): QUANDO SRF < 10, REDUZIR EM 25% C₁ / >10 REDUZIR EM 50%, ONDE C₁ = RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO UNIAXIAL DA ROCHA EM TENSÃO PRINCIPAL MENOR QUE TENSÃO TANGENCIAL. A CLASSIFICAÇÃO UNIAXIAL DA ROCHA DE ACORDO COM A TEORIA DA ELASTICIDADE. PARA POUCOS CASOS REGISTRADOS, ONDE A COBERTURA É MENOR QUE O VÃO, SUGERE-SE O AUMENTO DO SRF DE 2,0 PARA 5,0, ÍTEM H.
 - 9 - SQUEEZING PODE OCORRER EM PROFUNDIDADES DE 10-300 m; RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO DO MACIÇO PODE SER ESTIMADA DA SEGUINTE RELAÇÃO: 0,7*10⁴ EM MPa, ONDE "Y" INDICARÁ O VALOR EM MPa/m².

Sistemas de Classificação Geomecânica

Prancha 01

ESCALA	FOLHA	REVISÃO
S/E	01/01	

Classificação Geomecânica do Maciço Rochoso - RAMPA DE EXPLORAÇÃO

Mapeamento Geotécnico - Geomecânico										BARTON, 1974	BIENIAWSKI, 1989	RMR (Bieniawski, 1989)	Q - BARTON										RMR Bieniawski														
Estaca Inicial (m)	Estaca final (m)	UG	UCS (MPa)	RQD (%)	Jn	Jr	Ja	Jw	SRF	Q-System	RMR = 9*lnQ+44	Em (GPa)	(Discontinuity Strike and Dip Orientation Ramp)	BIENIAWSKI, 1989	BARTON, 1974	BIENIAWSKI, 1989	Jv	ESR	H(m)	De	Máx. Span (m)	L Bolts (m)	Proof (MPa)	Proof (MPa)	Span (m)	J1	peso	J2 RQD	peso	J3 (Spa m)	J4 (FH)	J5 (water)	J6 (Orientations)	RMR	Classe	RMR	Classe
0	6	PEC	100	65	20	3	4	1	2,5	1,0	44	7,0	44	44	ALBUM	III	15	1,3	5,5	4,2	2,6	2,2	0,1	9,0	2,0	100	12	65	13	10	4	8	-2	45	III	44	III
6	19	PEC	100	70	9	2	4	1	2,5	1,6	48	8,9	48	48	ALBUM	III	14	1,3	5,5	4,2	3,1	2,2	0,1	3,5	2,7	100	12	70	13	10	7	8	-2	48	III	48	III
19	27	PEC	100	75	9	3	4	1	2,5	2,5	52	4,5	52	ALBUM	III	12	1,3	5,5	4,2	3,8	2,2	0,2	4,4	3,7	100	12	75	13	10	7	10	-2	50	III	52	III	
27	35	PEC	100	60	9	3	4	1	2,5	2,0	50	10,1	50	ALBUM	III	17	1,3	5,5	4,2	3,4	2,2	0,2	4,8	3,2	100	12	60	13	10	7	10	-2	50	III	50	III	
35	140	PEC	100	86	15	2	4	1	1	2,9	53	7,0	53	ALBUM	III	9	1,3	5,5	4,2	4,0	2,2	0,1	3,6	4,0	100	12	86	17	10	7	10	-2	54	III	53	III	
140	158	PEC	100	84	15	2	4	1	1	2,8	53	6,5	53	ALBUM	III	9	1,3	5,5	4,2	3,9	2,2	0,1	3,7	3,9	100	12	84	17	10	7	10	-2	54	III	53	III	
158	360	PEC	100	86	15	2	4	1	1	2,9	53	7,0	53	ALBUM	III	9	1,3	5,5	4,2	4,0	2,2	0,1	3,6	4,0	100	12	86	17	10	7	10	-2	54	III	53	III	
360	470	PEC	120	85	9	2	2	1	1	9,4	64	28,4	64	REGULAR	II	9	1,3	5,5	4,2	6,4	2,2	0,2	1,9	8,8	120	12	85	17	10	7	10	-2	54	III	64	II	
470	480	PEC	120	85	9	2	2	1	1	9,4	64	28,4	64	REGULAR	II	9	1,3	5,5	4,2	6,4	2,2	0,2	1,9	8,8	120	12	85	17	10	7	10	-2	54	III	64	II	
480	530	PEC	120	40	20	1	4	1	1	0,5	38	4,9	38	ALBUM	IV	23	1,3	5,5	4,2	2,0	2,2	0,0	3,8	1,3	120	12	40	8	10	4	10	-2	39	IV	38	IV	
530	540	PEC	120	45	15	1	4	1	1	0,8	41	6,1	41	ALBUM	III	21	1,3	5,5	4,2	2,3	2,2	0,0	2,8	1,7	120	12	45	8	10	4	10	-2	39	IV	41	III	
540	565	MET	90	50	15	1	4	1	1	0,8	42	6,4	32	ALBUM	III	20	1,3	5,5	4,2	2,4	2,2	0,0	2,7	1,8	90	7	50	8	10	4	10	-2	34	IV	32	IV	
565	586	MET	80	45	15	1	4	1	1	0,75	41	6,1	31	ALBUM	III	21	1,3	5,5	4,2	2,3	2,2	0,0	3,8	3,6	120	12	73	13	10	7	10	-2	54	III	53	III	
586	685	GRS	120	73	15	2	4	1	1	2,4	52	4,0	52	ALBUM	III	13	1,3	5,5	4,2	3,7	2,2	0,1	3,8	3,6	120	12	73	13	10	7	10	-2	54	III	53	III	
685	1125	PEC	130	67	15	2	4	1	1	2,2	51	2,5	46	ALBUM	III	15	1,3	5,5	4,2	3,6	2,2	0,1	4,0	3,4	130	12	67	13	10	7	10	-2	54	III	46	III	
1125	1273	PEC	130	70	12	2	2	1	1	5,83	60	19,7	55	REGULAR	III	14	1,3	5,5	4,2	5,3	2,2	0,2	2,6	6,4	130	12	70	13	10	7	10	-2	54	III	55	III	
1273	1600	PEC	130	80	9	3	2	1	1	13,3	67	34,6	67	BOA	II	11	1,3	5,5	4,2	7,3	2,2	0,4	2,5	11,1	130	12	80	17	10	10	10	-2	57	III	67	II	
1600	1800	PEC	130	83	9	2	2	1	1	9,2	64	28,0	64	REGULAR	II	10	1,3	5,5	4,2	6,3	2,2	0,2	1,9	8,7	130	12	83	17	10	10	10	-2	57	III	64	II	
1800	2240	PEC	130	82	9	3	3	1	1	9,1	64	27,8	64	REGULAR	II	10	1,3	5,5	4,2	6,3	2,2	0,3	2,9	8,6	130	12	82	17	10	10	10	-2	57	III	64	II	
2240	2250	PEC	120	75	6	2	4	1	1	6,3	60	21,0	60	REGULAR	II	12	1,3	5,5	4,2	5,4	2,2	0,2	1,8	6,7	120	12	75	13	10	10	10	-2	53	III	60	II	
2240	2470	PEK	120	83	6	3	3	1	1	13,8	68	35,3	68	BOA	II	10	1,3	5,5	4,2	7,4	2,2	0,4	2,0	11,3	120	12	83	17	10	10	10	-2	57	III	68	II	
2470	2590	PEC	130	82	6	3	2	1	1	20,5	71	42,4	71	BOA	II	10	1,3	5,5	4,2	8,7	2,2	0,4	1,8	14,7	130	12	82	17	10	10	10	-2	57	III	71	II	
2590	2710	PEK	120	83	6	3	4	1	1	10,4	65	30,1	65	BOA	II	10	1,3	5,5	4,2	6,6	2,2	0,3	2,2	9,4	120	12	83	17	10	10	10	-2	57	III	65	II	
2710	2740	PEC	130	75	6	3	3	1	1	12,5	67	33,5	67	BOA	II	12	1,3	5,5	4,2	7,1	2,2	0,3	2,1	10,6	130	12	75	13	10	10	10	-2	53	III	67	II	
2740	2750	PEC	130	70	6	1,5	4	1	1	4,4	57	14,6	57	REGULAR	III	14	1,3	5,5	4,2	4,7	2,2	0,1	1,5	5,3	130	12	70	13	10	10	10	-2	53	III	57	III	
2750	2800	PEC	130	80	9	2	3	1	1	5,9	60	20,0	60	REGULAR	II	11	1,3	5,5	4,2	5,3	2,2	0,2	2,2	6,5	130	12	80	17	10	10	10	-2	57	III	60	II	
2800	2810	PEK	120	80	6	2	4	1	2,5	2,7	53	11,8	53	ALBUM	III	11	1,3	5,5	4,2	3,8	2,2	0,1	2,4	3,8	120	12	80	17	10	10	10	-2	57	III	53	III	
2810	3254,74	PEK	120	82	6	3	4	1	1	10,3	65	29,9	65	BOA	II	10	1,3	5,5	4,2	6,6	2,2	0,3	2,3	9,3	120	12	82	17	10	10	10	-2	57	III	65	II	

Deere et al. 1967					
RQD=115-3,3Jv			RDO (Quality Rock Design)		
Jv=	15	juntas/m²	65	regular	blocos pequenos
	14		70	regular	blocos pequenos
	12		75	regular	blocos pequenos
	17		60	regular	blocos pequenos
	9		86	boa	blocos médios
	9		84	boa	blocos médios
	9		86	boa	blocos médios
	9		85	boa	blocos médios
	9		85	boa	blocos médios
	23		40	ruim	blocos pequenos
	21		45	ruim	blocos pequenos
	20		50	ruim	blocos pequenos
	21		45	ruim	blocos pequenos
	13		73	regular	blocos pequenos
	15		67	regular	blocos pequenos
	14		70	regular	blocos pequenos
	11		80	boa	blocos pequenos
	10		83	boa	blocos médios
	10		82	boa	blocos médios
	12		75	regular	blocos pequenos
	10		83	boa	blocos médios
	10		82	boa	blocos médios
	10		83	boa	blocos médios
	12		75	regular	blocos pequenos
	14		70	regular	blocos pequenos
	11		80	boa	blocos pequenos
	11		80	boa	blocos pequenos
	10		82	boa	blocos médios

LEGENDA	
UG	Unidade geológica
UCS	Resistência compressão uniaxial (Mpa)
RQD	Índice de qualidade da rocha
Jn	Número de família das juntas
Jr	Índice de rugosidade das juntas
Ja	Índice de alteração e preenchimento das juntas
Jw	Fator de redução devido a presença d'água
SRF	Fator de redução à tensões no maciço
Q	Tunnelling Quality Index
RMR	Rock Mass Rating
Em	Módulo de deformação
Jv	Juntas/m²
ESR	Taxa de suporte de escavação
H (m)	Altura (m)
De	Dimensão Equivalente (m)
Span	Espaçamento (m)
Fill	Preenchimento
water	Água (H ₂ O)
J1/2/3/4/5 e 6	Parâmetros geomecânicos de "Bieniawski"
L Bolts	Comprimentos das tirantes
Proof	Pressão do teto



Mapeamento Geológico - Geotécnico
Rampa de Exploração

Classificação Geomecânica do Maciço Rochoso - TÚNEL DE DRENAGEM

Mapeamento Geotécnico - Geomecânico										BARTON	BIENIAWSKI, 1989	RMR (Bieniawski, 1989)	Q - BARTON										RMR Bieniawski														
Estaca inicial (m)	Estaca final (m)	UG	UCS (MPa)	RQD (%)	J _a	J _r	J _a	J _w	SRF	Q-System	RMR = 9 + ln(Q-I)	Em (GPa)	BIENIAWSKI, 1989	BARTON	BIENIAWSKI, 1989	BIENIAWSKI, 1979	J _r	ESR	H(m)	De	Máx. Span (m)	L Bolts (m)	Proof (MPa)	Proof (MPa)	Span (m)	J1 UCS	peso	J2 RQD	peso	J3 (Span m)	J4 (Fill)	J5 (water)	RMR	Classe	RMR	Classe	
0	6	MET	90	75	18	2	3	1	1	1,1	45	7,5	45	44	RUM	III	III	12	1	4,5	4,5	2,1	2,7	0,1	5,5	2,1	100	12	65	13	10	4	8	45	III	44	III
6	50	MET	100	70	6	3	4	1	1	8,8	64	21,8	64	48	REGULAR	II	III	14	1,3	4,5	3,5	6,2	2,1	0,3	2,4	8,4	100	12	70	13	10	7	8	48	III	48	III
50	155	MET	100	73	9	3	2	1	1	12	66	33,0	66	52	BOM	II	III	13	1,3	4,5	3,5	7,1	2,1	0,3	2,6	10,4	100	12	75	13	10	7	10	50	III	52	III
155	270	MET	100	58	9	3	4	1	2,5	2	50	10,0	50	RUM	III	III	17	1,3	4,5	3,5	3,4	2,1	0,2	4,8	3,1	100	12	60	13	10	7	10	50	III	50	III	
270	300	MET	80	53	6	2	5	1	2,5	1	47	8,5	47	53	RUM	III	III	19	1,3	4,5	3,5	3,0	2,1	0,1	2,9	2,5	100	12	86	17	10	7	10	54	III	53	III
300	420	MET	80	68	6	2	4	1	2,5	2	51	2,7	51	53	RUM	III	III	14	1,3	4,5	3,5	3,6	2,1	0,1	2,5	3,4	100	12	84	17	10	7	10	54	III	53	III
420	440	PEC	100	76	6	3	4	1	2,5	4	56	12,0	56	53	RUM	III	III	12	1,3	4,5	3,5	4,4	2,1	0,2	3,1	4,8	100	12	86	17	10	7	10	54	III	53	III
440	590	PEC	120	80	9	3	4	1	1	7	61	22,1	64	REGULAR	II	II	11	1,3	4,5	3,5	5,6	2,1	0,3	3,2	7,0	120	12	85	17	10	7	10	54	III	64	II	
590	810	PEC	120	85	6	2,5	4	1	1	9	64	27,3	64	REGULAR	II	II	9	1,3	4,5	3,5	6,2	2,1	0,3	2,0	8,4	120	12	85	17	10	7	10	54	III	64	II	
810	1030	PEC	100	80	6	3	4	1	1	10	65	23,3	65	REGULAR	II	IV	11	1,3	4,5	3,5	6,5	2,1	0,3	2,3	9,1	120	12	40	8	10	4	10	42	III	38	IV	
1030	1150	PEC	100	80	6	3	4	1	1	10	65	23,3	65	REGULAR	II	III	11	1,3	4,5	3,5	6,5	2,1	0,3	2,3	9,1	120	12	45	8	10	4	10	39	IV	41	III	
1150	1287	PEK	120	78	6	3	3	1	1	13	67	26,7	57	BOM	II	IV	11	1,3	4,5	3,5	7,3	2,1	0,4	2,1	10,9	90	7	50	8	10	4	10	34	IV	32	IV	
1287	1310	PEC	110	80	6	3	4	1	1	10	65	23,3	55	REGULAR	II	IV	11	1,3	4,5	3,5	6,5	2,1	0,3	2,3	9,1	80	7	45	8	10	4	10	34	IV	31	IV	
1310	1620	PEK	100	80	6	3	4	1	1	10	65	29,4	65	REGULAR	II	III	11	1,3	4,5	3,5	6,5	2,1	0,3	2,3	9,1	120	12	73	13	10	7	10	42	III	52	III	
1620	1799	PEK	100	73	9	3	4	1	1	6	60	20,5	55	REGULAR	II	III	13	1,3	4,5	3,5	5,4	2,1	0,3	3,3	6,6	130	12	67	13	10	7	10	42	III	46	III	
1799	1960	PEK	150	83	6	3	4	1	1	10	65	30,1	60	BOM	II	III	10	1,3	4,5	3,5	6,6	2,1	0,3	2,2	9,4	130	12	70	13	10	7	10	42	III	55	III	
1960	2450	PEK	120	83	9	3	3	1	1	9	64	28,0	64	REGULAR	II	II	10	1,3	4,5	3,5	6,3	2,1	0,3	2,9	8,7	130	12	80	17	10	10	10	49	III	67	II	
2450	2577,27	PEK	110	82	6	3	4	1	1	10	65	29,9	65	BOM	II	II	10	1,3	4,5	3,5	6,6	2,1	0,3	2,3	9,3	130	12	83	17	10	10	10	57	III	64	II	

Deere et al. 1967			
RQD=115-3.3J _r		RDQ (Quality Rock Design)	
J _w	juntas/m ³		
12		75	regular
14		70	regular
13		73	regular
17		58	regular
19		53	regular
14		68	regular
12		76	boa
11		80	boa
9		85	boa
11		80	boa
11		80	boa
11		78	boa
11		80	boa
11		80	boa
13		73	regular
10		83	boa
10		83	boa
10		82	boa

LEGENDA	
UG	Unidade geológica
UCS	Resistência (Mpa) compressão uniaxial
RQD	Índice de qualidade da rocha
J _n	Número de famílias das Juntas
J _r	Índice de rugosidade das juntas
J _a	Índice de alteração e preenchimento das juntas
J _w	Fator de Redução devido a presença d'água
SRF	Fator de redução à tensão no maciço
Q	Tunneling Quality Index
RMR	Rock mass rating
Em	Módulo de deformação
J _y	Junta m ³
ESR	Taxa de volume de escavação
H (m)	Altura (m)
De	Dimensão Equivalente (m)
Span	Espçamento (m)
Fill	Preenchimento
water	Água (H ₂ O)
J1/2/3/4/5 e 6	Parâmetros geomecânicos de "Bieniawski"
L Bolts	Comprimentos dos tirantes
Proof	Pressão do teto

Mapeamento Geológico - Geotécnico
Túnel de Drenagem

Prancha 03

ESCALA	FOLHA	REVISO
s/E	01/01	

Diaclasses - Domínio Fortuna Norte	
Dip (°)	Dipdirection (°)
40	289
48	289
32	289
40	301
48	301
32	301
40	277
48	277
32	277
81	262
89	262
73	262
81	271
89	271
73	271
81	253
89	253
73	253
87	86
89	86
84	86
87	95
90	95
84	95
87	77
90	77
84	77
83	356
89	356
74	356
83	360
89	360
74	360
89	348
74	348

Very Important Fault	
Dip (°)	Dipdirection (°)
67	271
94	271
40	271
67	287
94	287
40	287
67	255
94	255
40	255
82	85
89	85
75	85
82	100
89	100
75	100
82	70
89	70
75	70
82	174
89	174
75	174
82	195
89	195
75	195
82	153
89	153
75	153

Falhas FT (Fault Traces)	
Dip (°)	Dipdirection (°)
73	262
83	262
63	262
73	283
83	283
63	283
73	241
83	241
63	241
75	356
84	356
66	356
75	360
84	360
66	360
75	348
84	348
66	348
84	85
89	85
79	85
84	103
89	103
79	103
84	67
89	67
79	67
80	171
89	171
71	171
80	186
89	186
71	186
80	156
89	156

Tabela 01 - Domínio Estrutural Fortuna Norte



<i>Diaclases - Domínio Fortuna Sul</i>	
<i>Dip (°)</i>	<i>Dipdirection (°)</i>
40	109
51	109
29	109
40	130
51	130
29	130
40	88
51	88
29	88
51	282
65	282
37	282
51	303
65	303
37	303
51	261
65	261
37	261
81	260
89	260
73	260
81	268
89	268
73	268
81	252
89	252
73	252

<i>Very Important Fault</i>	
<i>Dip (°)</i>	<i>Dipdirection (°)</i>
55	285
64	285
46	285
55	299
64	299
46	299
55	271
64	271
46	271
74	238
89	238
59	238
74	248
89	248
59	248
74	228
89	228
59	228
83	195
89	195
77	195
83	207
89	207
77	207
83	183
89	183
77	183
75	333
84	333
66	333
75	350
84	350
66	350
75	316
84	316
66	316

<i>Falhas FT (Fault Traces)</i>	
<i>Dip (°)</i>	<i>Dipdirection (°)</i>
73	240
82	240
64	240
73	256
82	256
64	256
73	224
82	224
64	224
73	301
89	301
57	301
73	317
89	317
57	317
73	285
89	285
57	285
86	173
89	173
83	173
86	182
89	182
83	182
86	164
89	164
83	164
80	345
89	345
71	345
80	360
89	360
71	360
80	328
89	328
71	328

Tabela 02 - Domínio Estrutural Fortuna Sul



Diaclases - Domínio Americana	
Dip (°)	Dipdirection (°)
73	68
89	68
57	68
73	94
89	94
57	94
73	42
89	42
57	42
86	304
89	304
83	304
86	321
89	321
83	321
86	287
89	287
83	287
86	124
90	124
82	124
86	134
90	134
82	134
86	114
90	114
82	114
67	12
75	12
59	12
67	30
75	30
59	30
67	18
75	18
59	18

Very Important Fault	
Dip (°)	Dipdirection (°)
43	109
60	109
26	109
43	128
60	128
26	128
43	90
60	90
26	90
82	110
89	110
75	110
82	129
89	129
75	129
82	91
89	91
75	91
84	228
89	228
79	228
84	237
89	237
79	237
84	219
89	219
79	219
85	295
89	295
81	295
85	305
89	305
81	305
85	285
89	285
81	285
79	319
89	319
69	319
79	335
89	335
69	335
79	303
89	303
69	303
83	152
89	152
77	152
83	171
89	171
77	171
83	133
89	133
77	133
75	359
82	359
68	359
75	376
82	376
68	376
75	342
82	342
68	342

Falhas FT (Fault Traces)	
Dip (°)	Dipdirection (°)
85	254
89	254
81	254
85	266
89	266
81	266
85	242
89	242
81	242
83	69
89	69
77	69
83	82
89	82
77	82
83	56
89	56
77	56
83	120
89	120
77	120
83	139
89	139
77	139
83	101
89	101
77	101
86	302
90	302
82	302
86	317
90	317
82	317
86	287
90	287
82	287
84	158
89	158
79	158
84	168
89	168
79	168
84	148
89	148
79	148
83	337
89	337
77	337
83	347
89	347
77	347
83	327
89	327
77	327

Tabela 03 - Domínio Estrutural Americana



Diaclases - Domínio Balmaceda	
Dip (°)	Dipdirection (°)
80	260
88	260
72	260
80	269
88	269
72	269
80	251
88	251
72	251
74	28
85	28
63	28
74	54
85	54
63	54
74	2
85	2
63	2
65	337
77	337
53	337
65	360
77	360
53	360
65	314
77	314
53	314
63	193
75	193
51	193
63	214
75	214
51	214
63	172
75	172
51	172

Very Important Fault	
Dip (°)	Dipdirection (°)
79	270
90	270
68	270
79	283
90	283
68	283
79	257
90	257
68	257
80	218
89	218
71	218
80	233
89	233
71	233
80	203
89	203
71	203
80	40
89	40
71	40
80	48
89	48
71	48
80	32
89	32
71	32
80	176
89	176
71	176
80	199
89	199
71	199
80	153
89	153
71	153
83	359
89	359
77	359
83	360
89	360
77	360
83	338
89	338
77	338

Falhas FT (Fault Traces)	
Dip (°)	Dipdirection (°)
78	202
89	202
67	202
78	229
89	229
67	229
78	175
89	175
67	175
83	33
89	33
77	33
83	54
89	54
77	54
83	12
89	12
77	12
83	335
89	335
77	335
83	359
89	359
77	359
83	311
89	311
77	311

Tabela 04 - Domínio Estrutural Balmaceda



Diaclases - Domínio Estrutural Estanques Blancos

Dip (°)	Dipdirection (°)
64	201
78	201
50	201
64	229
78	229
50	229
64	173
78	173
50	173
81	149
90	149
72	149
81	162
90	162
72	162
81	136
90	136
72	136
75	360
85	360
65	360
75	360
85	360
65	359
75	345
85	345
65	345

Very Important Fault

Dip (°)	Dipdirection (°)
71	194
79	194
63	194
71	215
79	215
63	215
71	173
79	173
63	173
73	140
89	140
57	140
73	163
89	163
57	163
73	117
89	117
57	117
79	321
89	321
69	321
79	335
89	335
69	335
79	307
89	307
69	307

Falhas FT (Fault Traces)

Dip (°)	Dipdirection (°)
79	278
87	278
71	278
79	287
87	287
71	287
79	269
87	269
71	269
83	251
90	251
76	251
83	258
90	258
76	258
83	244
90	244
76	244
67	194
82	194
52	194
67	220
82	220
52	220
67	168
82	168
52	168
75	140
89	140
61	140
75	163
89	163
61	163
75	117
89	117
61	117
86	325
89	325
83	325
86	342
89	342
83	342
86	308
89	308
83	308

Tabela 05 - Domínio Estrutural Estanques Blancos

Diadases - Domínio Estrutural Noroeste

Dip (°)	Dipdirection (°)
83	250
89	250
77	250
83	268
89	268
77	268
83	232
89	232
77	232
87	72
89	72
85	72
87	88
89	88
85	88
87	56
89	56
85	56
40	211
60	211
20	211
40	242
60	242
20	242
40	180
60	180
20	180
70	329
82	329
58	329
70	354
82	354
58	354
70	304
82	304
58	304

Very Important Fault

Dip (°)	Dipdirection (°)
80	253
89	253
71	253
80	277
89	277
71	277
80	229
89	229
71	229
86	72
89	72
83	72
86	92
89	92
83	92
86	52
89	52
83	52
80	305
89	305
71	305
80	319
89	319
71	319
80	291
89	291
71	291

Falhas FT (Fault Traces)

Dip (°)	Dipdirection (°)
86	66
89	66
83	66
86	80
89	80
83	80
86	52
89	52
83	52
81	252
89	252
73	252
81	272
89	272
73	272
81	232
89	232
73	232
80	345
89	345
71	345
80	360
89	360
71	360
80	323
89	323
71	323

Tabela 06 - Domínio Estrutural Noroeste

Diaclasses- Domínio Estrutural Mesabi

Dip (°)	Dipdirection (°)
66	265
78	265
54	265
66	275
78	275
54	275
66	255
78	255
54	255
82	70
89	70
75	70
82	77
89	77
75	77
82	63
89	63
75	63
72	226
85	226
59	226
72	233
85	233
59	233
72	219
85	219
59	219
31	323
38	323
24	323
31	339
38	339
24	339
31	307
38	307
24	307
66	144
75	144
57	144
66	152
75	152
57	152
66	136
75	136
57	136
80	306
87	306
73	306
80	314
87	314
73	314
80	298
87	298
73	298

Very Important Fault

Dip (°)	Dipdirection (°)
79	234
90	234
68	234
79	258
90	258
68	258
79	210
90	210
68	210
80	271
88	271
72	271
80	284
88	284
72	284
80	258
88	258
72	258
85	37
89	37
81	37
85	49
89	49
81	49
85	25
89	25
81	25
77	346
90	346
64	346
77	360
90	360
64	360
77	329
90	329
64	329

Falhas FT (Fault Traces)

Dip (°)	Dipdirection (°)
78	236
89	236
67	236
78	260
89	260
67	260
78	212
89	212
67	212
78	275
84	275
72	275
78	288
84	288
72	288
78	262
84	262
72	262
85	48
90	48
61	48
85	64
90	64
61	64
85	32
90	32
61	32

Tabela 07 - Domínio Estrutural Mesabi



Diaclases - Domínio Estrutural Zaragoza

Dip (°)	Dipdirection (°)
81	262
89	262
73	262
81	294
89	294
73	294
81	230
89	230
73	230
86	94
89	94
83	94
86	112
89	112
83	112
86	76
89	76
83	76
60	185
76	185
44	185
60	211
76	211
44	211
60	159
76	159
44	159
79	10
89	10
69	10
79	22
89	22
69	22
79	12
89	12
69	12

Very Important Fault

Dip (°)	Dipdirection (°)
81	118
90	118
72	118
81	140
90	140
72	140
81	96
90	96
72	96
86	75
90	75
82	75
86	82
90	82
82	82
86	68
90	68
82	68
74	225
82	225
66	225
74	242
82	242
66	242
74	208
82	208
66	208
82	297
75	297
82	318
89	318
75	318
82	276
89	276
75	276
79	343
85	343
73	343
79	348
85	348
73	348
79	338
85	338
73	338

Falhas FT (Fault Traces)

Dip (°)	Dipdirection (°)
82	297
89	297
75	297
82	318
89	318
75	318
82	276
89	276
75	276
86	104
90	104
82	104
86	124
90	124
82	124
86	84
90	84
82	84
80	250
89	250
71	250
80	260
89	260
71	260
80	240
89	240
71	240
82	205
88	205
76	205
82	210
88	210
76	210
82	200
88	200
76	200
80	138
89	138
71	138
80	148
89	148
71	148
80	128
89	128
71	128
75	14
84	14
66	14
75	23
84	23
66	23
75	5
84	5
66	5

Tabela 08 - Domínio Estrutural Zaragoza