

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

CARACTERIZAÇÃO GEOMECÂNICA DE DESCONTINUIDADES E ANÁLISE DE
ESTABILIDADE DE TALUDES EM ROCHA NA PEDREIRA MAXBRITA, MUNICÍPIO
DE SANTOS (SP).

Clóvis Aparecido de Camargo Junior

Orientador: Prof. Dr. Ginaldo Ademar da Cruz Campanha
Co-orientador: Geól. Msc. Fernando Machado Alves

MONOGRAFIA DE TRABALHO DE FORMATURA
(TF-2013 / 12)

SÃO PAULO
2013

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

CARACTERIZAÇÃO GEOMECÂNICA DE DESCONTINUIDADES E ANÁLISE DE
ESTABILIDADE DE TALUDES EM ROCHA NA PEDREIRA MAXBRITA, MUNICÍPIO
DE SANTOS (SP).

Clóvis Aparecido de Camargo Junior

Orientador: Prof. Dr. Ginaldo Ademar da Cruz Campanha
Co-orientador: Geól. Msc. Fernando Machado Alves

MONOGRAFIA DE TRABALHO DE FORMATURA
(TF-2013 / 12)

SÃO PAULO
2013.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer, primeiramente, ao meu co-orientador e chefe Fernando Lampião Alves, por toda paciência, força e ajuda oferecida desde o início do ano. Agradeço muitíssimo também aos amigos Caio Gorgonzola e Guilherme Piriguete, pelas conversas realizadas na etapa final da elaboração da monografia. Agora, porém não menos importante, agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Ginaldo Campanha pelas dicas e correções sempre sábias. Muito obrigado mesmo, sem vocês este trabalho não teria sido realizado!

Nestes 6 anos de vida geológica, sou muito grato a todos os professores que passaram pelo meu caminho oferecendo conhecimento, e, acima de tudo, impondo dificuldades e desafios para que eu pudesse me formar um profissional condizente com a qualidade da USP – a melhor Universidade do país.

Porém, a universidade é só o começo de tudo e dela aproveitamos pouquíssimas coisas para nossa carreira pessoal. Entendo que o que fica mesmo para sempre nesta etapa são as histórias e os amigos conquistados!

Neste ponto me sinto um cara de sorte, por ter tido o prazer de fazer parte da Turma 51. André Clítoris, Caio Mocinha, Camila Planária, Dailson Vaselina, Enrico Viadão, Guilherme Sífilis, Lucas Habiba, Sergio Craca, Renata Horácio, Renato Contessotto, Rodrigo Tiozão, Renato Nany, Marcelo Bucetauro, Paulo Cuprólito, Priscila Perva e Francisco Leitoa, vocês são fodas! Eternos brothers!

Não posso me esquecer também de todo time dos Flatulentos, dos membros da equipe de xadrez mais vencedora da história da Geo e do BIFE, da galera da República Cativoiro e, é claro, dos irmãos da República Curva do Rio (Gargalo, Flaminga e Arregazzo) que me acolheram neste último ano.

Por último, um agradecimento especial aos meus pais, irmãos, amigos e amigas da Turma do Botão e a mulher mais maravilhosamente incrível que eu já tive o prazer de conhecer, Camila Acedo! Vocês me fizeram ser, além de um geólogo, um cara de valores e princípios corretos, vocês me ajudaram a ser mais forte e a superar as mais difíceis adversidades, que não foram poucas! De coração, MUITO OBRIGADO!!!

RESUMO

Este projeto de caracterização geomecânica de descontinuidades e análise de estabilidade de taludes, desenvolvido na pedreira MaxBrita (Santos – SP), teve como objetivos estabelecer quais famílias de descontinuidades possuem potencial de rupturas do tipo planar nos taludes que constituirão a cava final da pedreira, e determinar o respectivo fator de segurança, mediante parâmetros como a coesão e o ângulo de atrito, para aquelas famílias que apresentaram esta potencialidade.

As atividades se desenvolveram a partir de levantamento de banco de dados de atividades geológico-geotécnicas previamente desenvolvidas pela empresa REGEA Geologia e Estudos Ambientais. Este banco de dados forneceu um conjunto de 132 medidas e descrições de descontinuidades que permitiram a caracterização geomecânica das famílias presentes, além de ensaios de determinação do ângulo de atrito básico (*Tilt Test*).

Com este conjunto de medidas, as descontinuidades foram separadas em 6 famílias mais a foliação gnáissica do maciço. Em conjunto com 5 direções de taludes que irão compor a cava final da pedreira, foram elaboradas análises geométricas-cinemáticas que apontaram potencialidade de rupturas planares para uma família de descontinuidade e para a foliação.

Então, para estes 2 casos de potencialidade de rupturas, buscou-se determinar o ângulo de atrito e a coesão de cada família, a partir das descrições previamente levantadas, com suporte do *Software Rock Data*. Com estes parâmetros estabelecidos somando-se a dados geométricos dos taludes, características da rocha local e diferentes condições de saturação ou presença de água na descontinuidade, obteve-se o fator de segurança, que apresentou risco significativo ($FS < 1,3$) para uma família apenas para condições de saturação do meio acima de 91,5%.

ABSTRACT

This project of geomechanical characterization of discontinuities and slope stability analysis, developed in the mine MaxBrita (Santos - SP), aimed to establish which discontinuities families have potential of planar breaks type in slope that will constitute the final pit mine and determine its safety factor by parameters such as cohesion and friction angle, for those families that had this capability.

The activities were developed from the research of database of geological and geotechnical activities previously undertaken by the company REGEA Geologia e Estudos Ambientais. This database provided a set of 132 measurements and descriptions of discontinuities that allow the geomechanical characteristics of the present families, as well as assays for determining the basic friction angle (*Tilt Test*).

With this set of measures, the discontinuities were separated in 6 families with the massive gneissic foliation. Together with 5 way slope that will compose the final pit quarry were drawn geometric-kinematic analysis showed that potential of planar disruptions to a family discontinuity and the foliation.

Then, for these two cases of potential disruptions, we sought to determine the friction angle and cohesion of each family from the descriptions previously raised with Software support Rock Date. With these parameters established by summing the geometric data of the slope, characteristics of local rock and different saturation conditions or the presence of water in the discontinuity gave the safety factor, which showed significant risk ($FS < 1.3$) only for a family of saturation conditions above 91.5%.

Índice

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Objetivos	1
1.2. Localização da área.....	2
2. FUNDAMENTAÇÃO BIBLIOGRÁFICA	2
2.1. Geologia regional	2
2.2. Estabilidade de taludes em rocha	4
2.2.1. Caracterização de descontinuidades	4
2.2.2. Principais variáveis no estudo da estabilidade	6
2.2.3. Tipos de rupturas em taludes	7
2.2.4. Análise cinemática.....	9
2.2.5. Fator de segurança.....	11
3. MATERIAIS E MÉTODOS	12
3.1. Levantamento do banco de dados.....	12
3.1.1. Scanlines.....	12
3.1.2. Famílias de descontinuidades	12
3.1.3. Tilt test.....	18
3.2. Atividades de campo	18
3.2.1. Detalhamento da litologia predominante.....	18
3.2.2. Definição dos quadros de estudos.....	19
3.3. Caracterização das descontinuidades	20
3.4. Definição das seções críticas	22
4. Resultados.....	23
4.1. Análises geométricas-cinemáticas.....	23
4.2. Determinação dos parâmetros principais e análise de estabilidade	28
4.2.1. Obtenção do ângulo de atrito básico	28
4.2.2. Obtenção do ângulo de atrito e coesão	29
4.2.3. Geometria e variáveis para cálculo do fator de segurança (FS).....	30
4.2.4. Cálculo do fator de segurança e análise de estabilidade	30
5. Conclusões.....	31
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	32

Anexos:

Anexo 1 – Tabelas de caracterização das famílias mapeadas.

1. INTRODUÇÃO

Com intuito de tornar mais segura a atividade de exploração de minerais para construção civil em lavra a céu aberto, vindo de encontro com novas tendências de rigor nas questões de segurança do trabalho e redução de passivos da atividade minerária, os estudos de estabilidade geotécnica vem sendo progressivamente mais solicitados pelos órgãos reguladores das atividades, tanto o DNPM como órgão fiscalizador da mineração, quanto os órgãos ambientais usualmente responsáveis pela concessão da licença de funcionamento.

Dentro dos estudos de estabilidade supracitados, necessariamente deve-se partir de um detalhamento geológico-geotécnico, para fins de aplicação de caracterização geotécnica e geomecânica para estes projetos de mineração. Assim, em um segmento que até pouco tempo, apenas as grandes minerações de bens minerais de alto valor agregado eram rigorosamente estudadas, com a nova abordagem em saúde e segurança e rigor nas condições de segurança, os empreendimentos minerais menores também devem ser adequados.

O presente estudo, dentro do contexto de estudo de estabilidade de maciço rochoso, propõe uma caracterização geomecânica das discontinuidades pré-existentes no maciço rochoso, buscando compreender quais os fatores que potencialmente podem afetar a estabilidade dos taludes que constituirão o modelo da cava final de uma pedreira no contexto da Serra do Mar, localizada no município de Santos-SP.

1.1. Objetivos

Este estudo de caráter geológico-geotécnico, elaborado para execução da Monografia de conclusão do curso de Geologia, propõe um levantamento de banco de dados de estudos previamente realizados pela empresa REGEA Geologia e Estudos Ambientais, nos domínios da pedreira MaxBrita, localizada no município de Santos-SP, a fim de se executar um estudo de estabilidade dos taludes que irão compor a cava final do empreendimento.

Partindo-se, então, do levantamento e reorganização de dados de campo já obtidos, buscou-se determinar as propriedades geomecânicas das discontinuidades presentes no maciço rochoso, para, assim, se desenvolver as atividades de análises cinemáticas e, posteriormente, determinar quais os quadros de risco que os taludes do desenho da cava final apresentarão, mediante as características das famílias presentes diante do contexto de rupturas do tipo planar.

1.2. Localização da área

A pedreira Maxbrita se localiza no município de Santos, Estado de São Paulo. Na porção continental deste município, o empreendimento se situa sobre o terreno da Serra do Mar, e se encontra às margens da Rodovia Rio-Santos (BR-101), km 245,5 (**Figura 1**).



Figura 1: Localização da área da pedreira MaxBrita, na porção continental do município de Santos – SP (Fonte: Google Earth, 2013).

2. FUNDAMENTAÇÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Geologia regional

Almeida & Carneiro (1998) delimitam a Serra do Mar com cerca de 1000km. de extensão e orientação geral ENE, entre os estados de Santa Catarina e Rio de Janeiro, tendo em São Paulo uma morfologia típica de borda de planalto, variando entre 800 e 1200m de altitude. Seu embasamento é resultado de diversas orogenias proterozóicas, seguidas de processos tectônicos de separação de massas continentais, magmatismos e sedimentação, que lhe deram a configuração morfológica atual.

O domínio tectônico no qual a área se encontra é o Complexo Costeiro (Tassinari & Campos Neto *apud* Dias Neto, 2009) que é um segmento na Faixa Ribeira balizado por zonas de cisalhamento de direção NE-SW. No Estado de São Paulo, o Complexo Costeiro possui

uma expressiva feição estrutural que controla o seu limite a norte, que é a Falha de Cubatão.

Hasui *et al.* (2012) colocam as rochas do Complexo Costeiro originadas no *Riaciano*, num instante em que as principais unidades que se formaram foram complexos gnáissicos, como os dos Domínios Curitiba e Embu. No período orogênico da faixa Ribeira (Brasiliano) ocorreram intensos retrabalhamentos que adicionaram ao Complexo Costeiro porções migmatizadas. Dias Neto *et al.* (2009) mostram que a colocação de corpos ígneos básicos ocorreu a 580 Ma, com metamorfismo de médio a alto grau transformando-os em anfibolitos em 570 Ma. Ocorrem ainda inúmeras intrusões graníticas mais novas e magmatismos alcalinos mesozóicos.

Assim, as grandes zonas de cisalhamento neoproterozóicas conformam as feições estruturais rúpteis (e dúcteis) da área de estudo, com as estruturas paralelas à Zona de Cisalhamento de Cubatão, de direção geral NE-SW, que também marcam a foliação principal da rocha. A Ativação Waldeniana ou abertura do Oceano Atlântico, condiciona às estruturas preexistentes esforços distensionais, que reativam as descontinuidades propícias (NE-SW) com movimentos normais, e as discordantes com movimentos transcorrentes.

A evolução da tectônica rúptil atribui a toda região sudeste do Estado de São Paulo, um forte controle estrutural no contexto do *Rift Continental* do Sudeste do Brasil – RCSB (Riccomini, 1989). Este controle estrutural se mostra bastante complexo já que a evolução do RCSB é dividida em períodos de diferentes regimes de esforços. Inicialmente, se tem uma fase distensiva de direção NNW-SSE, precursora ortogonal da direção onde se alojaria a bacia tipo rifte desenvolvida; em um segundo instante ocorre uma transcorrência sinistral E-W, ainda com distensão semelhante à primeira, mas, localmente, com pontos de compressão NE-SW. A terceira fase da evolução do RCSB torna a transcorrência, antes sinistral, destal, com compressões de direção NW-SE. Já na quarta fase, distensões no quadrante Noroeste-Sudeste voltam a ocorrer e, ao chegar ao Holoceno, dão origem a última fase de evolução, que se estende até hoje, caracterizada por compressão E-W.

Quanto aos seus litotipos, nos arredores da cidade de Santos, têm-se, principalmente, unidades metamórficas neoproterozóicas, granitos quimicamente indiferenciados de idade cambriana e os sedimentos costeiros quaternários (**Figura 2**).

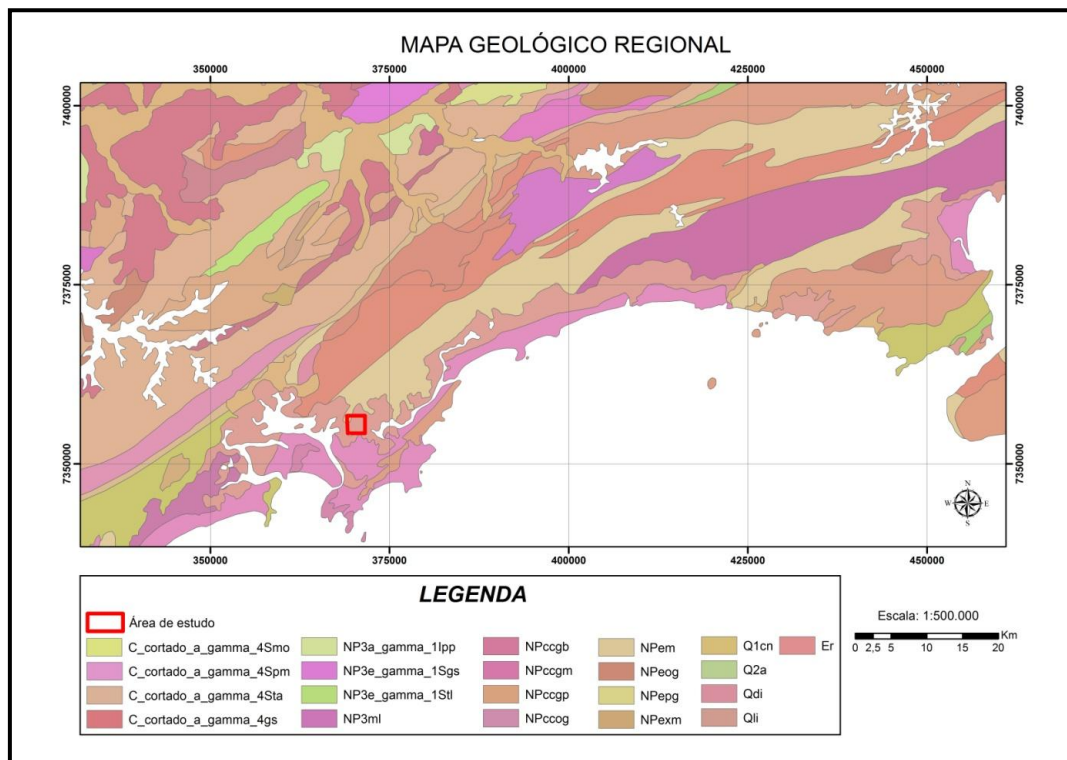


Figura 2: Mapa geológico regional da porção SE do Estado de São Paulo. Em destaque a localização da pedreira, no município de Santos-SP. Modificado de Perrota *et al.*, 2005.

A unidade ortognáissica (NPccog) é composta por gnaisses migmatíticos cálcio-alcalinos, além de granitóides gnáissicos porfiróides e augen gnaisses. Já a outra unidade neoproterozoica (NPccgm) compõe hornblenda-biotita- gnaisse granitóide porfiróide e augen gnaisse, ambos com feições migmatíticas (Perrota, 2005).

2.2. Estabilidade de taludes em rocha

2.2.1. Caracterização de descontinuidades

A pedreira, localizada no município de Santos em sua porção continental, mais especificamente na encosta da Serra do Mar, encontra-se em um local de natureza geológica-geotécnica complexa devido ao seu histórico de escorregamentos e acidentes derivados de um conjunto de fatores que os propiciam.

O clima local caracterizado por chuvas intensas em determinados períodos do ano, a alta declividade do terreno, os conjuntos genéticos que dão ao local uma forte trama de combinações de fases dúcteis e rúpteis que refletem no intenso controle da geologia estrutural, e a própria atividade de exploração de rocha por meio de explosivos e maquinários pesados oferecem todas condições para alertar sobre a necessidade de estudos de estabilidade local.

Contudo, numa escala de maior detalhe, aparecem os fatores geológicos importantes que se inserem e contribuem para o estudo da estabilidade, como as descontinuidades, cuja

determinação de variáveis como a coesão e o ângulo de atrito são fundamentais na análise geomecânica do maciço rochoso.

Fiori & Carmignani (2009) sintetizam os principais tipos de descontinuidades que um maciço rochoso pode conter, de modo a torná-lo mais heterogêneo e anisotrópico que uma rocha intacta. Referem-se a planos de acamamento, juntas, falhas, foliação metamórfica, discordâncias ou inconformidades, margens de intrusões ígneas, zonas de cisalhamento e fendas de tração.

A definição do tipo da descontinuidade não contribui qualitativamente para o estudo da estabilidade dos taludes, mas quantitativamente são suas características e os atributos mensuráveis das descontinuidades os fatores que irão intervir diretamente na análise geométrica e cinemática do talude, como no exemplo da **Figura 3**:

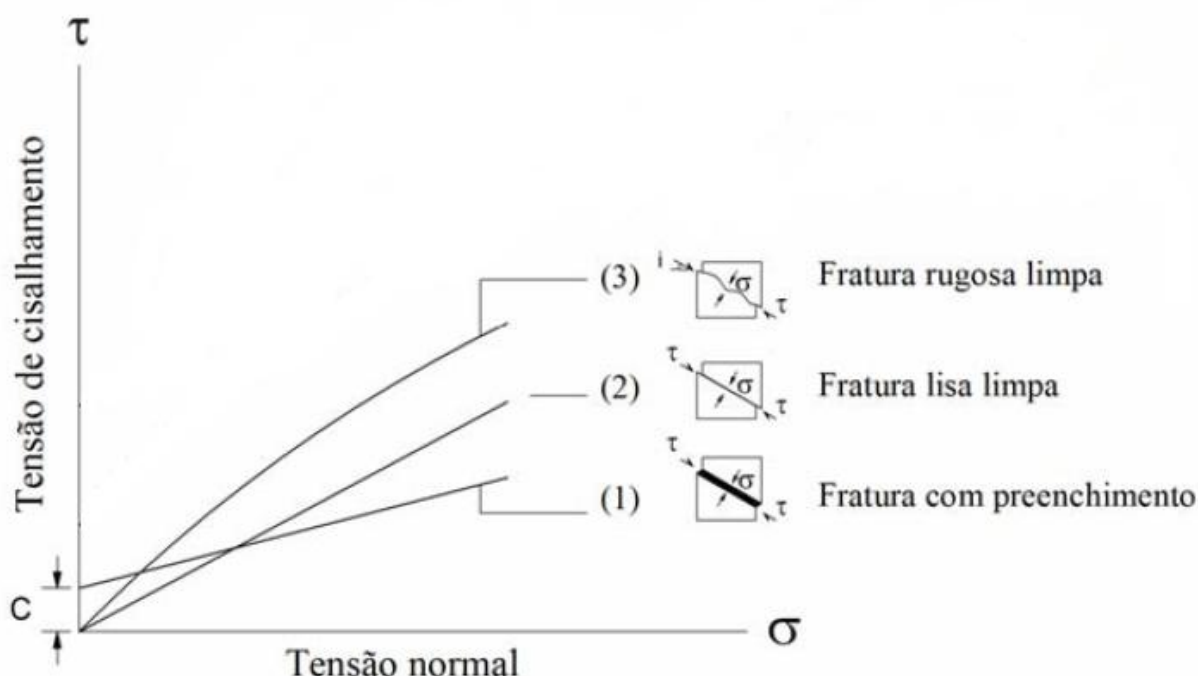


Figura 3: Relação entre as tensões de cisalhamento e normal com a envoltória de ruptura em diferentes tipos de condições da descontinuidade (Extraído de Wyllie & Mah, 2004).

O exemplo do diagrama de Mohr-Coulomb mostrado acima ilustra 3 condições diferentes que derivam dos fatores preenchimento e rugosidade. Em (1) tem-se uma descontinuidade com preenchimento não perturbado, o que resulta numa contribuição no valor da coesão (C), além de possuir baixo ângulo de atrito devido um possível preenchimento de material argiloso frágil. Em (2), tem-se uma fratura sem preenchimento, donde o valor de C é nulo e o ângulo de atrito será derivado apenas do tamanho dos grãos da rocha fraturada. E, em (3), parte-se de uma coesão também nula, porém com influência do fator da rugosidade, que dá um acréscimo (i) ao valor do ângulo de atrito, mas que, com o aumento da tensão normal, tende a diminuir, como se as rugosidades fossem cominuídas e aplainadas.

Além da orientação espacial das descontinuidades, da rugosidade e do preenchimento, há outros fatores a serem observados:

- **Espaçamento:** é a distância entre as descontinuidades, que pode ser mensurada entre quaisquer planos de descontinuidades, ou apenas entre um determinado grupo ou família, normalmente expressada como a média das distâncias. Este espaçamento também pode ser referido como o inverso da frequência (quantidade de descontinuidades por unidade de distância), e este atributo influencia na qualidade e/ou resistência da bancada ou talude da cava, de forma que quanto maior a frequência num determinado trecho, maior a influência dos atributos da descontinuidade na estabilidade, e, quando menor, a estabilidade se dá mais influenciada pelas características intrínsecas a rocha. Quando há ocorrência de água, o espaçamento será um dos condicionadores da permeabilidade e da condutividade hidráulica do maciço.

- **Persistência:** pode ser mensurada a partir do comprimento do traço da descontinuidade no talude e pode ser expressa em porcentagem dada a partir da relação do comprimento total do traço e dos segmentos de rocha intactos. O ISRM (1981) indica que, além do comprimento, se deve observar a terminação do traço, tais como se ela se estende para fora do talude (tipo X), se termina conectando-se a outra descontinuidade (tipo D), ou se terminam num trecho qualquer da rocha. Estes dados de persistência permitem a análise dos principais planos que controlam a estabilidade, delimitando dimensões de blocos.

- **Abertura:** é a distância média entre as paredes paralelas da rocha que contêm o plano da descontinuidade e é normalmente mensurada na escala de milímetros. A abertura está diretamente relacionada com a resistência ao cisalhamento, já que quando mais fechada, a resistência de pico se dá a partir, principalmente, dos atributos da rocha, ao passo que quando mais aberta sem contato rocha-rocha, a resistência será controlada, em termos de coesão e ângulo de atrito, pelo preenchimento e pela rugosidade.

- **Presença de água:** A ocorrência de água no plano da descontinuidade, seja por influência do lençol freático, de pluviosidade ou de qualquer outra origem, tem influência no estudo da estabilidade de taludes devido, principalmente, sua capacidade de alteração e erosão dos materiais presentes na descontinuidade, diminuindo a capacidade de resistência. No entanto, seu efeito mais importante será o de aumentar a pressão interna do maciço rochoso, reduzindo os níveis de pressão efetiva (Fiori & Carmignani, 2009).

2.2.2. Principais variáveis no estudo da estabilidade

No estudo da estabilidade de taludes, ocorrem duas variáveis fundamentais que caracterizam as propriedades do maciço: a coesão e o ângulo de atrito.

Um critério de ruptura determinístico destas variáveis é o de Mohr-Coulomb, pois equaciona os parâmetros coesão e ângulo de atrito sob a influência de esforços combinados, σ_1 e σ_3 , expressos pelo círculo de Mohr. A fórmula a seguir mostra que:

$$\tau = c + \sigma_n * \operatorname{tg} \Phi, \text{ onde:}$$

τ é a resistência ao cisalhamento;

c é a coesão do material;

σ_n é o esforço normal presente na ortogonal da descontinuidade e

Φ é o ângulo de atrito interno ou entre dois planos adjacentes.

A resolução gráfica do critério de Mohr-Coulomb mostra que esta equação linear (uma reta) é capaz de estabelecer valores para parâmetros desconhecidos, como, por exemplo, esforços limite de ruptura. A **Figura 4** exemplifica a aplicação gráfica do critério descrito.

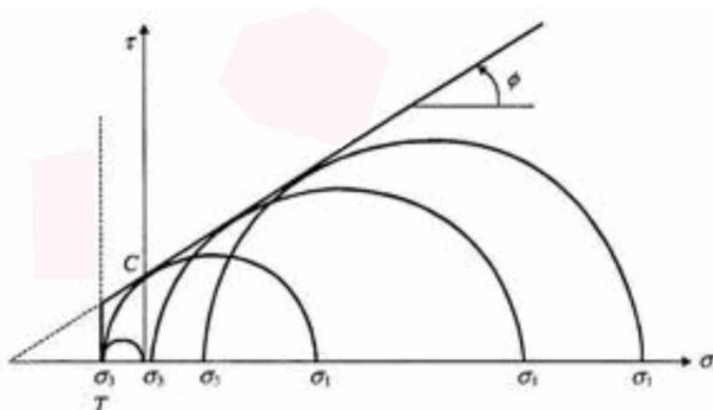


Figura 4: Representação gráfica do critério de Mohr-Coulomb, no qual a reta envelope, que tangencia os círculos de Mohr, determina o limite onde deve haver ruptura (acima). Modificado de Fiori & Carmignani, 2009.

A caracterização das descontinuidades por meio de fatores como o preenchimento, rugosidade e abertura associa-se de forma essencial com a determinação da coesão e do ângulo de atrito de cada caso de estudo de estabilidade que é abordado neste projeto, como, por exemplo, mostrado anteriormente na **Figura 3**, em que a coesão e o ângulo de atrito não são valores atribuídos somente pelas características da rocha, mas, também, da descontinuidade.

2.2.3. Tipos de rupturas em taludes

Os principais tipos de movimentos de massa são classificados a partir dos fatores geométricos que condicionam a ruptura do talude. A disposição espacial e as combinações das descontinuidades são fatores que controlam se estas rupturas terão as condições ou não de ocorrer.

A ruptura planar é condicionada a partir de um ou mais planos subparalelos pelos quais o deslocamento de um certo volume de rocha ocorre (Fiori & Carmignani, 2009). Estes planos, sejam eles de qualquer tipo de descontinuidade, devem estar com seu rumo de mergulho na mesma direção da face livre da vertente, em um ângulo superior ao ângulo de atrito interno e inferior que o da inclinação da superfície livre da vertente, como mostra o exemplo (a) da **Figura 5**.

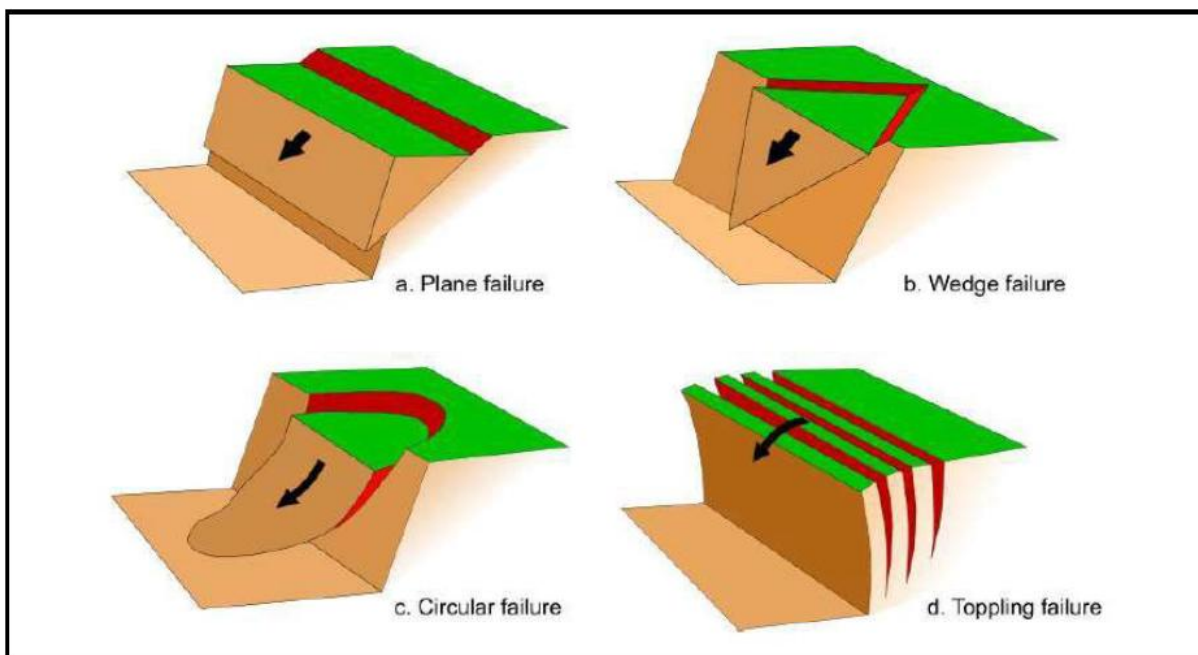


Figura 5: Principais tipos de ruptura em rocha – (a) Ruptura planar, (b) Ruptura em cunha, (c) Ruptura circular e (d) Tombamento de blocos. (Extraído de Hoek, 2007).

As rupturas em cunha, por sua vez, dependem da interseção de pelo menos dois planos e ainda é necessário que a superfície livre do talude abrigue a linha de interseção dos planos, ou descontinuidades de interesse. Esta linha corresponde à direção do deslizamento, e seu ângulo de inclinação deve ser maior ao ângulo de atrito interno para que a ruptura ocorra. Na imagem, pode-se observar um exemplo de deslizamento de massa em forma de cunha (b).

Segundo Fiori & Carmignani (2009), os movimentos de massas rochosas derivados de tombamento de blocos não são exatamente um tipo de escorregamento, mas uma ruptura em que os volumes de rochas rotacionam sobre eixos fixos em direção da face livre do talude (d). Os fatores geométricos que favorecem o tombamento de blocos se estabelecem quando duas descontinuidades, uma de alto ângulo e direção oposta a da face livre do talude, e outra de baixo ângulo e mesma direção ao da face livre do talude, se interceptam.

As rupturas circulares, também chamadas de rotacionais resultam da presença de planos não retilíneos que abrigam um movimento de massa acompanhado de uma rotação. Ocorrem, comumente, em pacotes onde predominam solo ou rocha muito fraturada (exemplo c da **Figura 5**).

De acordo com Hoek (2007), as rupturas circulares ocorrem em rochas cristalinas com alto grau de alteração e fraturamento, o que não reflete as condições atuais dos taludes da pedreira Max Brita, sendo, então, desconsideradas neste projeto.

2.2.4. Análise cinemática

Com o conhecimento da direção das faces livres dos taludes, das direções de descontinuidades existentes no maciço rochoso, somadas aos mecanismos de rupturas possíveis pode-se criar um quadro de análise de estabilidade geométrica e cinemática, sem se fazer necessária uma análise mais detalhada das forças atuantes no movimento.

De importância irrefutável em qualquer atividade que requer conhecimento geotécnico, esta avaliação baseada em projeções estereográficas oferece os fatores geométricos que podem condicionar os tipos de rupturas observados anteriormente. Hoek & Bray (1981) e, posteriormente, Norrish & Wyllie (1996), apresentam uma sistematização do método, onde se definem critérios de avaliação distintos para cada mecanismo ou tipo de ruptura (**Figura 6**).

TIPO	CONDIÇÕES	ESTEREOGRAMA
Ruptura planar	1) Direção da descontinuidade apresentar até 20° de diferença com a direção do talude; 2) Descontinuidade apresentar mergulho menor que o do talude; 3) Mergulho da descontinuidade maior que o ângulo de atrito; 4) Extensão lateral da ruptura ser definida por outras descontinuidades ou pela intersecção do plano da estrutura com a forma convexa da encosta.	
Ruptura em cunha	1) Direção da intersecção dos planos de descontinuidade próxima da direção do mergulho do talude; 2) O mergulho da intersecção menor que o mergulho do talude e maior que o ângulo de atrito.	
Tombamento	1) Direção da descontinuidade apresentar até 20° de diferença com a direção do talude; 2) Mergulho da descontinuidade para dentro do talude; 3) Normal ao plano de tombamento com mergulho menor que a inclinação do talude e menor que o ângulo de atrito.	
Ruptura circular	É identificada pela exclusão dos modelos anteriores.	

Figura 6: Relação geométrica entre as descontinuidades e as faces das vertentes para cada tipo de ruptura (Extraído de Norrish & Wyllie, 1996).

Fiori & Carmignani (2009) ressaltam que estes diagramas são simplificados, já que em casos reais, podem ocorrer combinações de diversos tipos de estruturas geológicas que podem dar origem a deslizamentos de caráter mais complexo.

O fato de representar apenas a orientação das estruturas no talude faz com que dados como espaçamento e persistência das descontinuidades sejam omitidos. Assim, devem-se integrar estas informações nos dados da análise cinemática, ao passo que identificar e eliminar da projeção estereográfica as estruturas/planos que não serão envolvidos em cada caso de deslizamento, torna o resultado do diagrama mais claro.

2.2.5. Fator de segurança

A ideia de se ponderar a resistência disponível e a resistência mobilizada em um determinado plano reflete a aplicação do que é um método de Equilíbrio-Limite ao calcular o fator de segurança (FS) em uma análise de estabilidade.

Este FS contra escorregamento é dado pela razão entre a resultante das forças associadas à resistência ao cisalhamento estabelecida no plano e a resultante das forças associadas ao esforço cisalhante atuante. A intenção desta razão é estabelecer um valor que expresse a estabilidade de um talude.

Carvalho (1991) dá ao resultado da razão o nome de Coeficiente de Segurança (CS), onde:

- Se $CS < 1,0$, o talude é considerado instável e deverá ocorrer ruptura, já que as forças cisalhantes atuantes são maiores que o valor de resistência ao cisalhamento do plano;
- Se $CS = 1$, o talude se encontra na sua condição limite de estabilidade, onde qualquer fator que influencie a diminuição do valor de resistência do plano, como presença periódica de água, pode ocasionar o deslizamento da massa rochosa.
- Se $CS > 1$, o talude se encontra estável, e se torna linearmente mais seguro quando o valor do CS aumenta.

A Associação Brasileira de Normas Técnicas, por meio da NBR 11682 de 2009, abrange tais condições de avaliação do Fator de Segurança, como as citadas anteriormente. Contudo, esta NBR acrescenta uma margem de 30% sobre as condições do limite de estabilidade, o que torna a avaliação do valor do FS mais conservadora, ao passo que valores entre o intervalo de 1,0 e 1,3, no FS, passam a ser considerados com potencial elevado de ter atingido as condições limite da estabilidade local.

Para cada caso de estudo de estabilidade segundo seus mecanismos de ruptura, aplica-se uma equação que retrate todos os parâmetros envolvidos naquilo que seria a determinação da resistência ao cisalhamento do plano, e de todas as forças cisalhantes atuantes. No caso das rupturas planares, a equação do cálculo do FS, segundo Fiori & Carmignani (2009) é dada por:

$$FS = \frac{c.A + [W \cos \alpha_1 - U - V \sin \alpha_1] \tan \varphi}{W \sin \alpha_1 + V \cos \alpha_1}, \text{ onde:}$$

- c: coesão aparente das discontinuidades;
- A: área de atuação da coesão;
- W: peso da cunha da rocha;
- U: pressão neutra na base da cunha da rocha;
- V: pressão neutra na fenda de tração;
- φ : ângulo de atrito entre as discontinuidades; e

γ_r e γ_h : peso específico da rocha e da água, respectivamente.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Levantamento do banco de dados

O levantamento do banco de dados foi elaborado devido às inúmeras atividades previamente realizadas pela empresa REGEA Geologia e Estudos Ambientais nos domínios da pedreira em estudo. Estas atividades pretéritas referem-se predominantemente a estudos de caráter geológico-geotécnicos, que são decorrentes do elevado histórico de problemas de deslizamentos de massas rochosas e de solos no contexto da Serra do Mar, no litoral do Estado de São Paulo.

3.1.1. *Scanlines*

O *scanline*, também conhecido como linha de varredura, é um método de campo para levantamento representativo de medidas e dados estruturais numa determinada seção ou perfil.

Os *scanlines* foram realizados na pedreira em uma campanha que segregou 3 conjuntos de dados obtidos, que totalizaram um levantamento de 132 medidas, divididas em áreas de aproximadamente 45m² (total de 135m² levantados), onde para cada medida, se descreveu as características da descontinuidade.

3.1.2. *Famílias de descontinuidades*

O ponto de partida para a caracterização das descontinuidades se dá com a observação da existência dos planos de fraqueza presentes no maciço rochoso, ou seja, com a identificação dos planos de descontinuidade e sua respectiva atitude no espaço, independentemente do seu tipo (acamamento, foliação, falha, contato litológico, junta).

O levantamento a partir do banco de dados forneceu um total de 132 medidas de descontinuidades, tomadas como representativas do contexto estrutural da pedreira. A disposição espacial das descontinuidades pode ser observada na **Figura 7a**, por meio da representação estereográfica da direção dos planos, e na **Figura 7b**, que representa os polos dos mesmos. Estes diagramas de Schmidt-Lambert foram elaborados a partir dos softwares *Stereonet* e *Dips*, respectivamente.

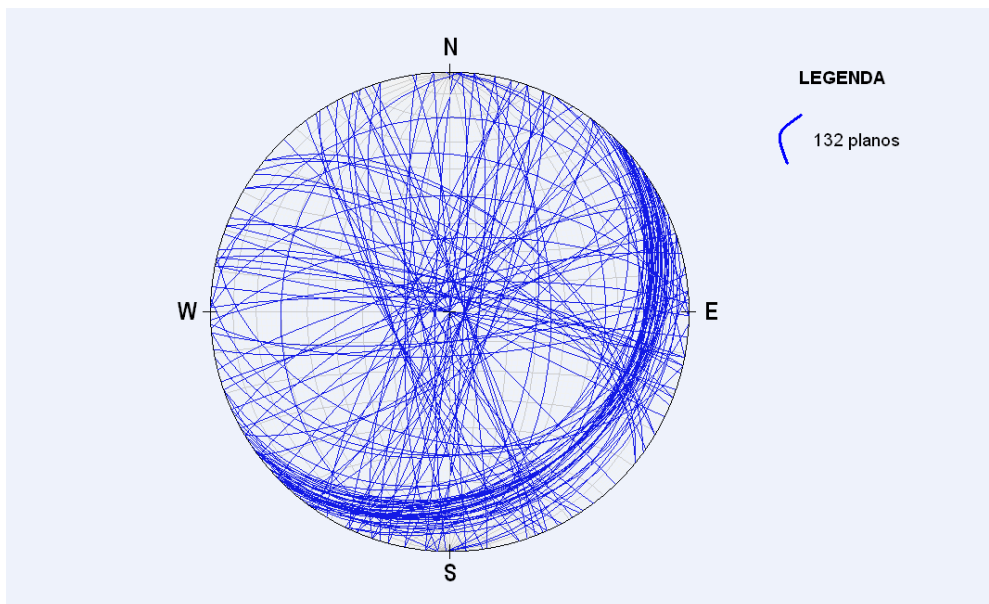


Figura 7a: Representação estereográfica dos planos das descontinuidades.

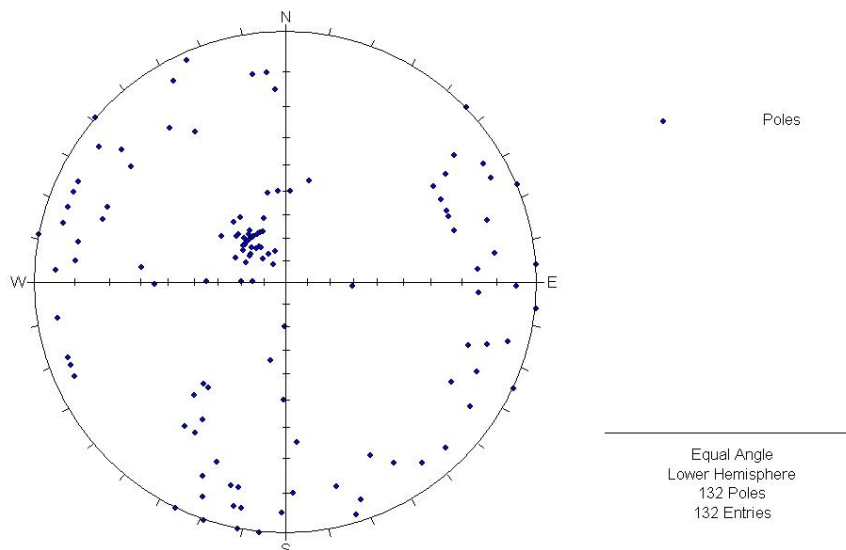


Figura 7b: Representação estereográfica dos polos das descontinuidades.

Para melhor compreensão do comportamento espacial das descontinuidades presentes, subdividiu-se o total de medidas de atitudes em famílias, que representam os diversos *trends* significativos para o estudo da estabilidade dos taludes. Assim, elaborou-se estereogramas que representam os pólos dos grupos de medidas ou famílias (**Figuras 8a, b, c, d, e e f**).

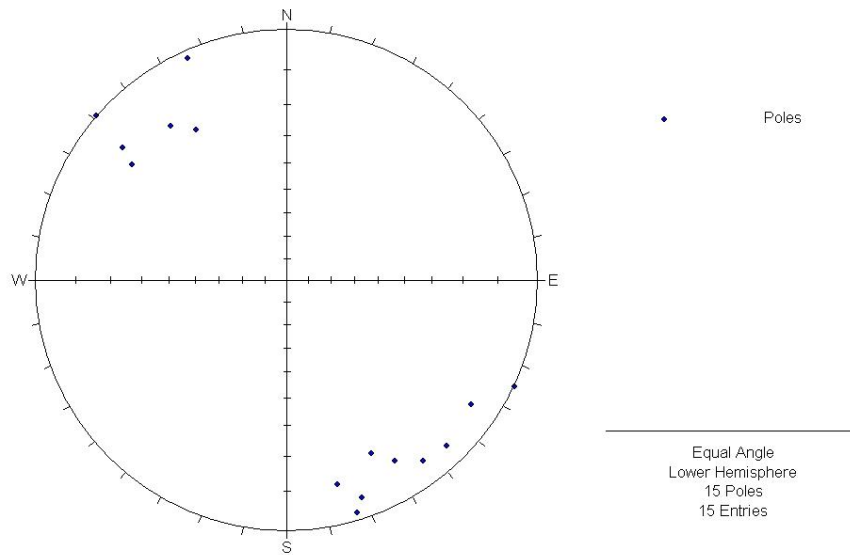


Figura 8a: Polos de descontinuidades de *trend* NW-SE e alto mergulho – Família 1.

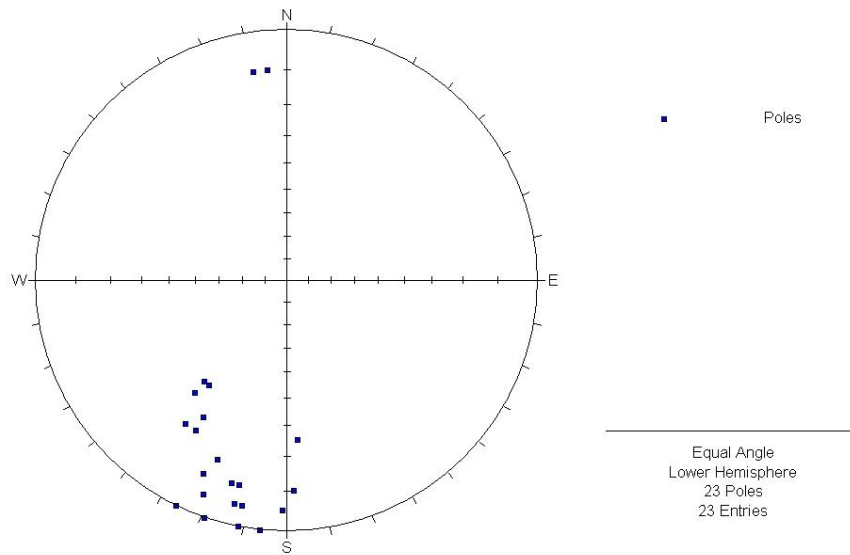


Figura 8b: Polos de descontinuidades de *trend* NNE-SSW com alto mergulho, variando de 55 a 90° - Família 2.

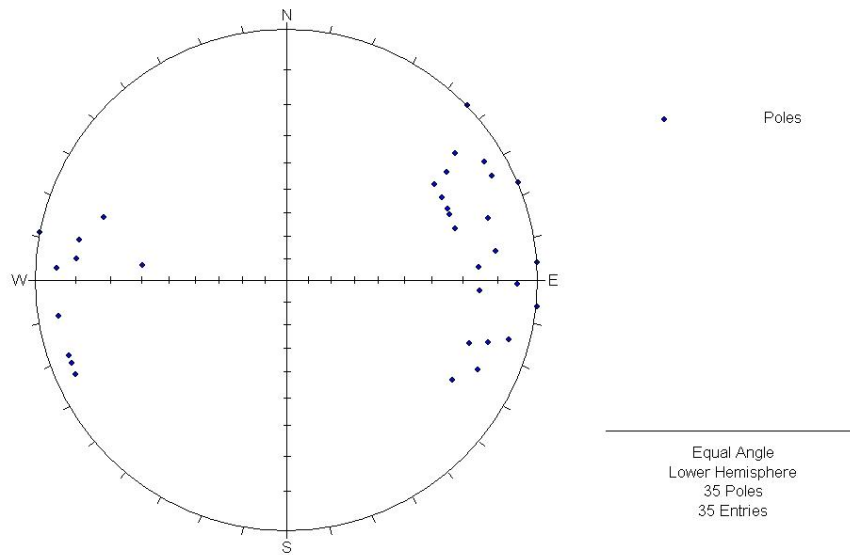


Figura 8c: Polos de descontinuidades de *trend* ENE-WSW com alto mergulho – Família 3.

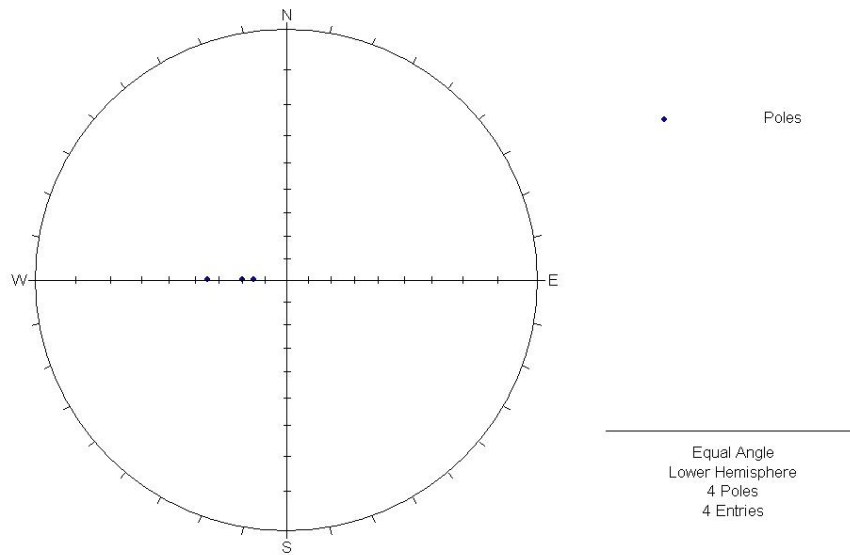


Figura 8d: Polos de descontinuidades de *trend* W-E com mergulho variando entre 15 e 35° - Família 4.

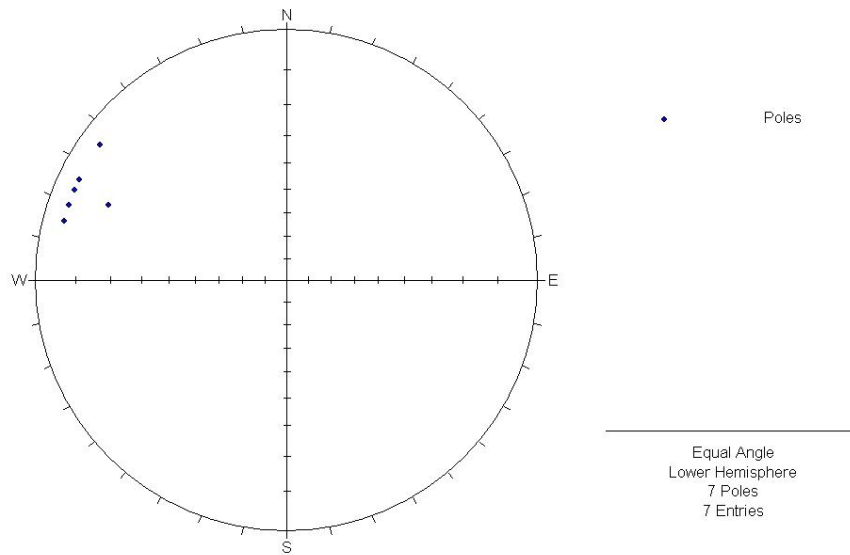


Figura 8e: Polos de descontinuidades de *trend* WNW-ESSE e alto mergulho – Família 5.

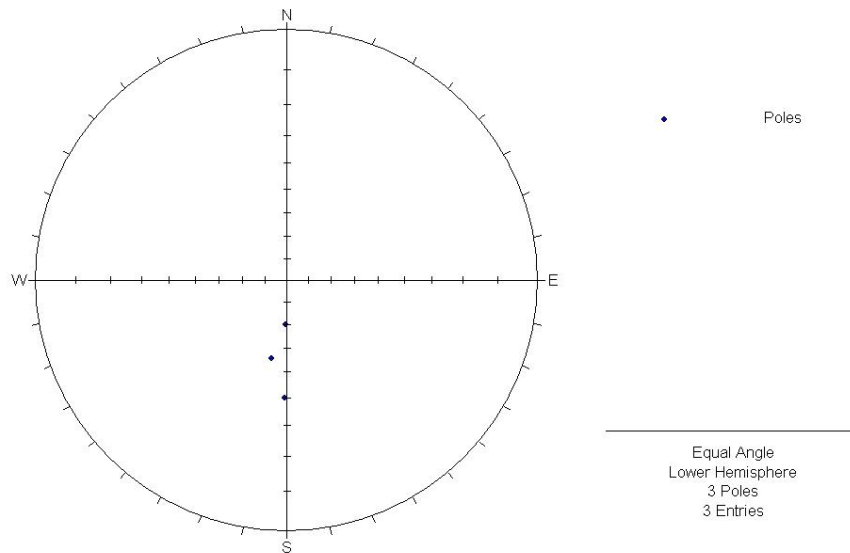


Figura 8f: Polos de descontinuidades de *trend* S-N e mergulho variando entre 20 e 50° - Família 6.

Estes diagramas de polos elaborados a partir do banco de dados compreendem as medidas que se referem as famílias de descontinuidades em geral. Porém, ocorrem ainda os polos que representam as descontinuidades derivadas da intensa foliação gnáissica presente, que corrobora o principal aspecto estrutural do local (**Figura 9**).

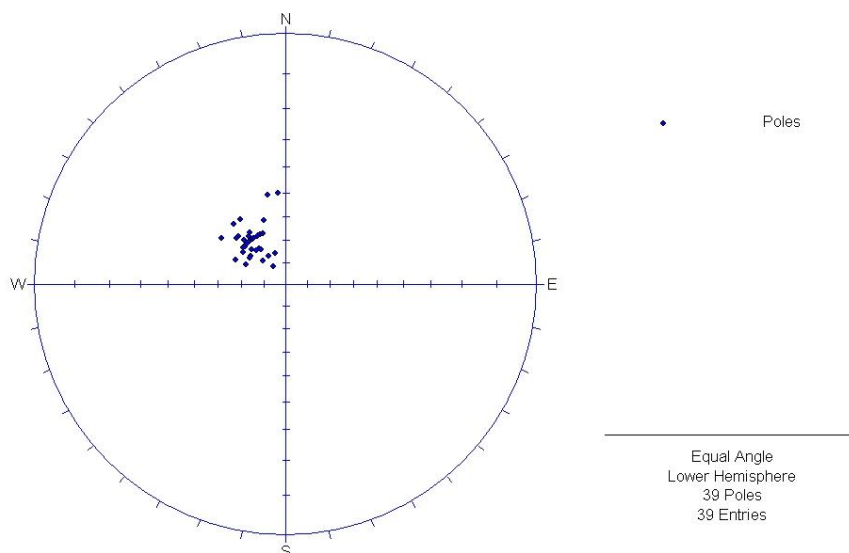


Figura 9: Polos da foliação principal da pedreira (média da foliação segundo rumo do mergulho/mergulho (Clar): 140/25°).

Ocorrem, ainda, os polos que não se enquadraram nas famílias definidas, como mostra a **Figura 10:**

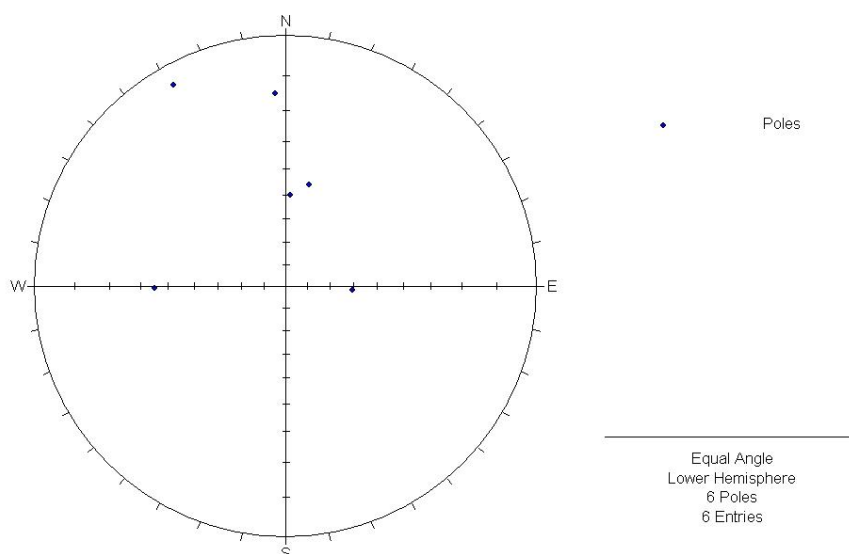


Figura 10: Medidas que não se adequaram ao agrupamento das famílias.

A ocorrência de medidas que não se agrupam nos principais *trends* é comum quando se trata de um plano amostral relativamente grande, assim como nesses contextos estruturais complexos, como é o caso da pedreira Max Brita, na Serra do Mar.

Em um estudo geotécnico de estabilidade de taludes, essas discontinuidades podem representar os maiores perigos, já que existem, mas não entram nos modelos de análises por não serem representativas perante outras. Quando descobertas no mapeamento de detalhe, deve-se atentar a persistência da mesma, ou seja, ao tamanho do traço da

descontinuidade no maciço, que, se for abrangente, pode designar o limite de um bloco com potencial de instabilidade.

3.1.3. *Tilt test*

O ensaio *Tilt Test* é uma prática simples, executável em campo, para se obter a estimativa preliminar do ângulo de atrito (Φ_b) de uma descontinuidade (Price, 2007). Consiste na amostragem de dois blocos de rocha que estejam *in situ* e sejam correspondentes às faces paralelas de uma descontinuidade, que, posteriormente, são colocados sobre uma rampa declinável e submetidos ao aumento da inclinação da mesma até o momento em que o bloco posto acima deslize sobre o correspondente abaixo (**Figura 11**).

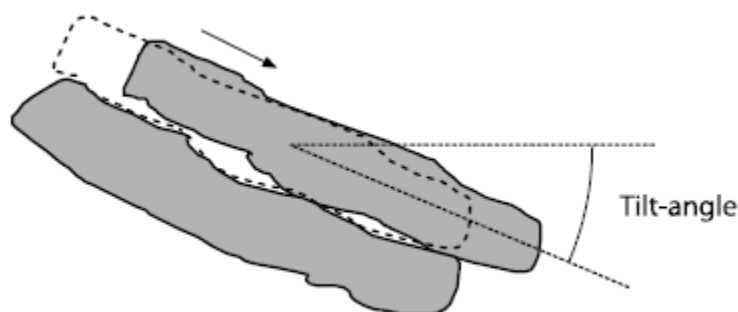


Figura 11: Posicionamento dos blocos sobre uma rampa declinável, pertencentes à mesma descontinuidade, para realização do Tilt Test (retirado de Price, 2007).

O conjunto de ensaios promovidos totalizaram 7 resultados, os quais apresentaram uma média do ângulo de atrito de $37,5^\circ$, com valor máximo de 42° e valor mínimo de 35° .

3.2. Atividades de campo

O trabalho de campo executado na pedreira, em Agosto de 2013, permitiu o reconhecimento da área, assim como o detalhamento da litologia presente e a familiarização com a disposição das descontinuidades diante dos taludes dispostos atualmente.

3.2.1. *Detalhamento da litologia predominante*

A pedreira em estudo, que extrai brita e a beneficia em diversas granulometrias, no método convencional de extração à céu aberto, é constituída basicamente por um gnaisse de foliação acentuada, variavelmente com porções onde a foliação se torna mais discreta, além de zonas parcialmente migmatizadas (**Figura 12**).



Figura 12: Gnaiss de foliação acentuada e baixo grau de alteração, na Pedreira MaxBrita.

Este gnaiss, de bandamento variavelmente acentuado e baixo grau de alteração, possui textura lepidogranoblástica com ocorrência de megacristais de feldspato, granulação grossa, minerais máficos (biotita e anfibólio), quartzo e feldspato.

3.2.2. *Definição dos quadros de estudos*

A partir da visita realizada a pedreira, notou-se a atual situação dos blocos potencialmente instáveis nos taludes e concluiu-se que devido o grande volume de rocha que vem sendo retirado em um intervalo de tempo mais curto (a produção diária da pedreira aumentou em mais de 50% após o início do ano) com o uso frequente de explosivos para detonação de bancadas, a análise dos quadros de ruptura pelo tipo tombamento de blocos torna-se inviável, visto que as detonações modificam propriedades como a abertura da descontinuidade, nestes blocos específicos que possuem menor volume e se acomodam temporariamente às frentes dos taludes (**Figura 13**).



Figura 13: Foto panorâmica da pedreira abrangendo desde o setor E (direita), ao setor NW (esquerda).

Neste trabalho os taludes que constituirão a cava final da pedreira foram analisados geométrica e cinematicamente quanto ao potencial para rupturas do tipo planar, as quais tem sido as mais recorrentes e importantes da área, já que estudos realizados pela empresa REGEA Geologia e Estudos Ambientais, calcularam um volume de mais de 100.000m³ de

rocha deslizada numa ruptura planar local, em 2011. Futuramente serão analisadas as potenciais rupturas em cunha.

3.3. Caracterização das descontinuidades

A partir dos dados de campo levantados previamente com os *scanlines*, elaborou-se um retrabalhamento dos dados a fim de estabelecer as principais características predominantes de cada família de descontinuidade. O **Anexo 1** permite a visualização completa da caracterização das descontinuidades, agrupadas por família. A seguir, as famílias são caracterizadas e postas em síntese, a partir da média dos seus atributos levantados.

Foliação:

- Orientação: direção NE-SW (141/27°);
- Persistência: continuidade muito baixa (>1,0m);
- Abertura: menor que 0,25mm;
- Preenchimento: sem preenchimento coeso e significativo;
- Rugosidade: áspera, com JRC 4,6;
- Espaçamento: menores que 20 cm;
- Fluxo d'água: seca, porém com evidências de presença de água pretérita.

Família 1:

- Orientação: direção NW-SE de alto mergulho com mergulho para ambos quadrantes (330/83°);
- Persistência: continuidade muito baixa (>1,0m);
- Abertura: menor que 0,25mm;
- Preenchimento: sem preenchimento coeso e significativo;
- Rugosidade: áspera, com JRC 4,6;
- Espaçamento: maior que 60,0cm;
- Fluxo d'água: seca, porém com evidências de presença de água pretérita.

Família 2

- Orientação: direção NNE-SSW de alto mergulho com mergulho para ambos quadrantes (025/75°);
- Persistência: continuidade média (entre 3,0 e 10,0m);
- Abertura: entre 0,5 e 2,5mm;
- Preenchimento: sem preenchimento coeso e significativo;
- Rugosidade: áspera, com JRC 5,7;
- Espaçamento: maior que 60,0cm;
- Fluxo d'água: seca, porém com evidências de presença de água pretérita.

Família 3

- Orientação: direção ENE-WSW de alto mergulho com mergulho para ambos quadrantes (255/80°);
- Persistência: continuidade média (entre 3,0 e 10,0cm);
- Abertura: entre 0,5 e 2,5mm;
- Preenchimento: sem preenchimento coeso e significativo;
- Rugosidade: áspera, com JRC 4,1;
- Espaçamento: maior que 60,0 cm;
- Fluxo d'água: seca e sem evidências de presença de água pretérita.

Família 4

- Orientação: direção E-W de mergulho baixo (091/22°);
- Persistência: continuidade baixa (entre 1,0 e 3,0m);
- Abertura: entre 0,1 e 0,25mm;
- Preenchimento: sem preenchimento coeso e significativo;
- Rugosidade: áspera, com JRC 5,5;
- Espaçamento: entre 6,0 e 20,0cm;
- Fluxo d'água: seca e sem evidências de presença de água pretérita.

Família 5

- Orientação: direção ESE-WNW de alto mergulho (113/84°);
- Persistência: continuidade média (entre 3,0 e 10,0m);
- Abertura: entre 0,25 e 0,5mm;
- Preenchimento: sem preenchimento coeso e significativo;
- Rugosidade: áspera, com JRC 7,5;
- Espaçamento: entre 20,0 e 60,0cm;
- Fluxo d'água: seca, porém com evidências de presença de água pretérita.

Família 6

- Orientação: direção NNE-SSW (004/35°);
- Persistência: continuidade muito baixa (<1,0m);
- Abertura: menor que 0,1mm;
- Preenchimento: sem preenchimento coeso e significativo;
- Rugosidade: áspera, com JRC 5,5;
- Espaçamento: entre 6,0 e 20,0cm;
- Fluxo d'água: seca, porém com evidências de presença de água pretérita.

3.4. Definição das seções críticas

De modo a direcionar e objetivar os estudos de caracterização propostos buscou-se encontrar um alvo no qual os resultados que serão apresentados oferecessem uma contribuição prática para a empresa responsável pela pedreira. Uma vez que o estudo de estabilidade atual da pedreira fora realizado entre 2011 e 2012, optou-se por inserir a presente análise nos taludes finais da pedreira, o qual é objeto de estudos na atualidade.

Assim, este projeto visará caracterizar as descontinuidades e desenvolver os estudos de estabilidade de taludes que constituirão o desenho final da cava. As direções destes taludes são apresentadas na **Figura 14**.

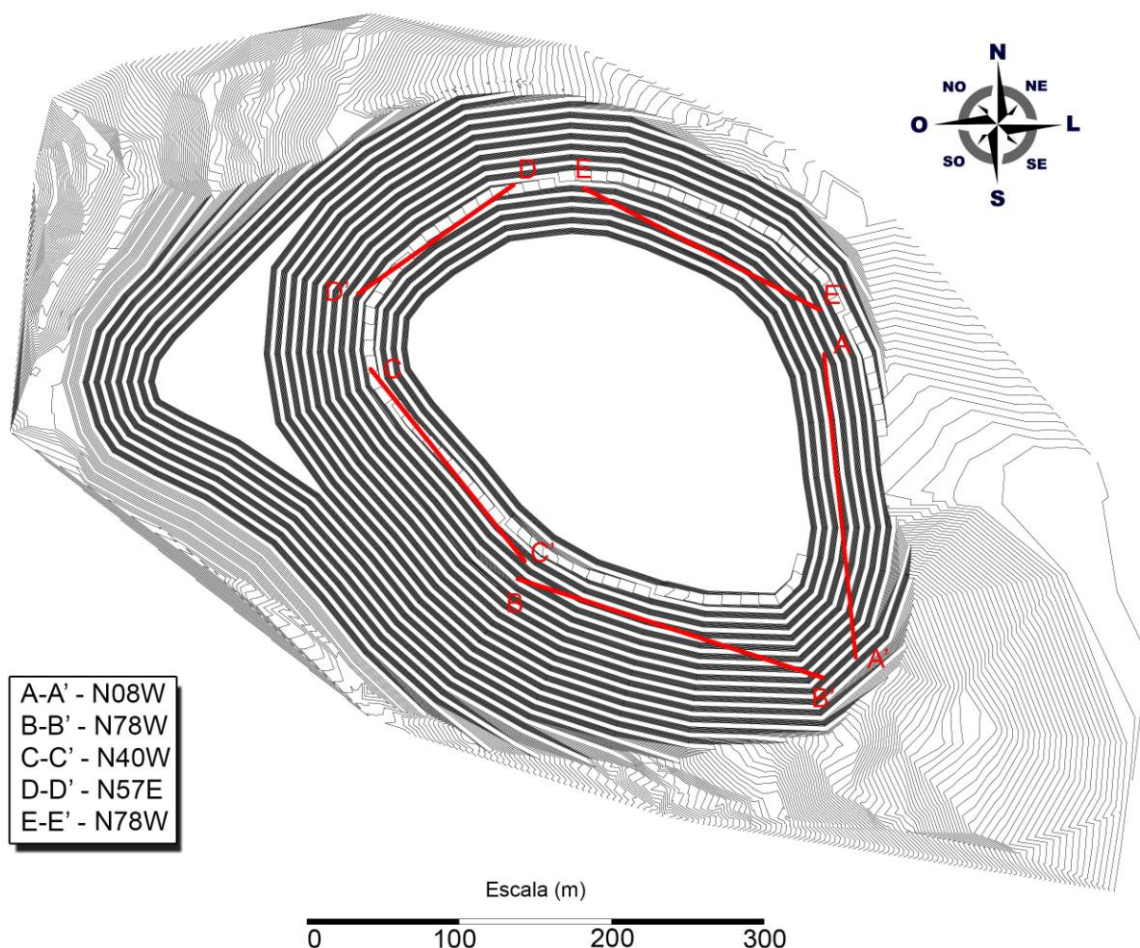


Figura 14: Proposta de modelo final da cava e suas principais direções de taludes a serem estudados.

Como estas direções de taludes constituirão o futuro da cava, elas também serão executadas no planejamento de extração de rocha, o que torna o estudo de estabilidade amplamente importante para a prática de atividades seguras na pedreira.

Embora não representados na figura, o mergulho das faces livres de rocha no modelo final da cava será de 70° , com intuito de minimizar a ampla possibilidade de tombamento de rochas, assim este será o valor utilizado no decorrer das atividades do projeto.

4. Resultados

4.1. Análises geométricas-cinemáticas

O conjunto de análises foi elaborado demonstrando a posição de um plano representativo de uma determinada família (plano calculado no *Software Dips* v. 5.1, a partir da determinação do set da distribuição dos polos da família) em comparação com as 5 atitudes das seções dos taludes que constituirão a cava final.

As seções são representadas pelas seguintes direções:

A – A': N08W/70°SW;

B – B': N78W/70°NE;

C – C': N40W/70°NE;

D – D': N57E/70°SE; e

E – E': N78W/70°SW.

Então, mediante as **Figuras 15a, 15b, 15c, 15d, 15e, 15f e 15g**, representando, respectivamente, a posição do plano representante das famílias F1, F2, F3, F4, F5, F6 e Foliação, se fez a avaliação de potencialidade de rupturas planares.

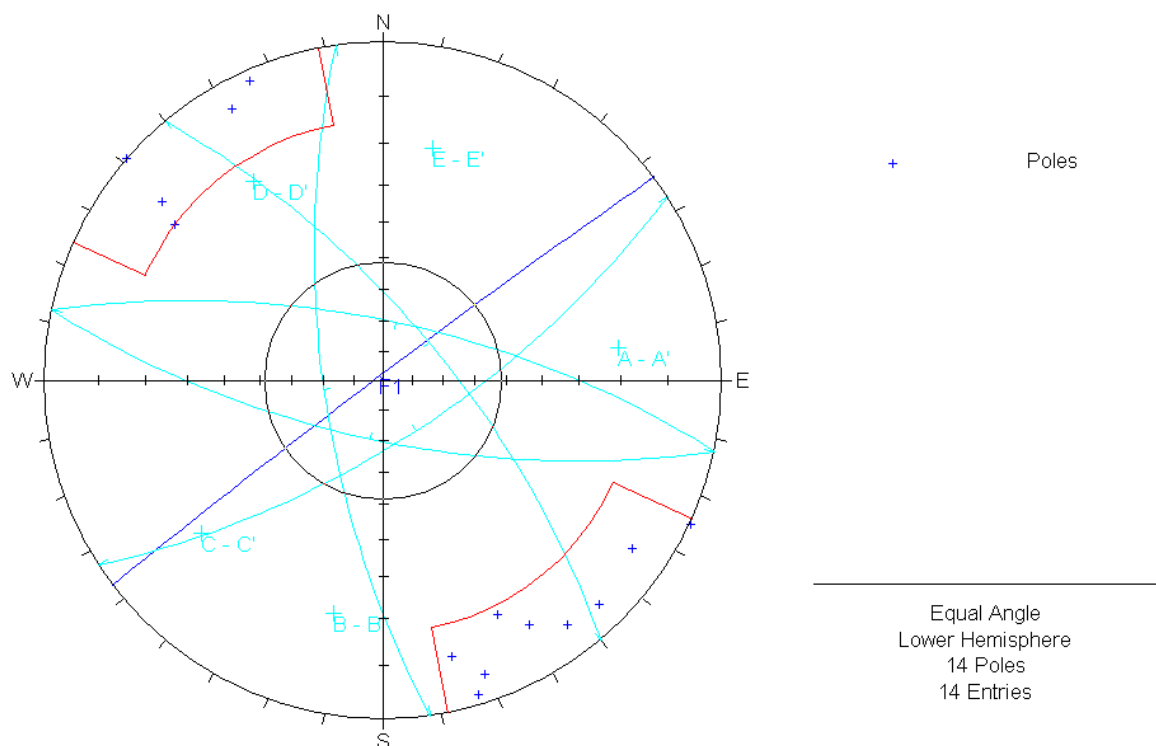


Figura 15a: Plano da Família 1 (em azul) determinado pelo set dos polos (em vermelho) em comparação com as seções da cava final (em cian).

Como demonstra a análise, não há potencial de ruptura planar da F1 (N53E/86°NW) em nenhuma das 5 atitudes de taludes propostos.

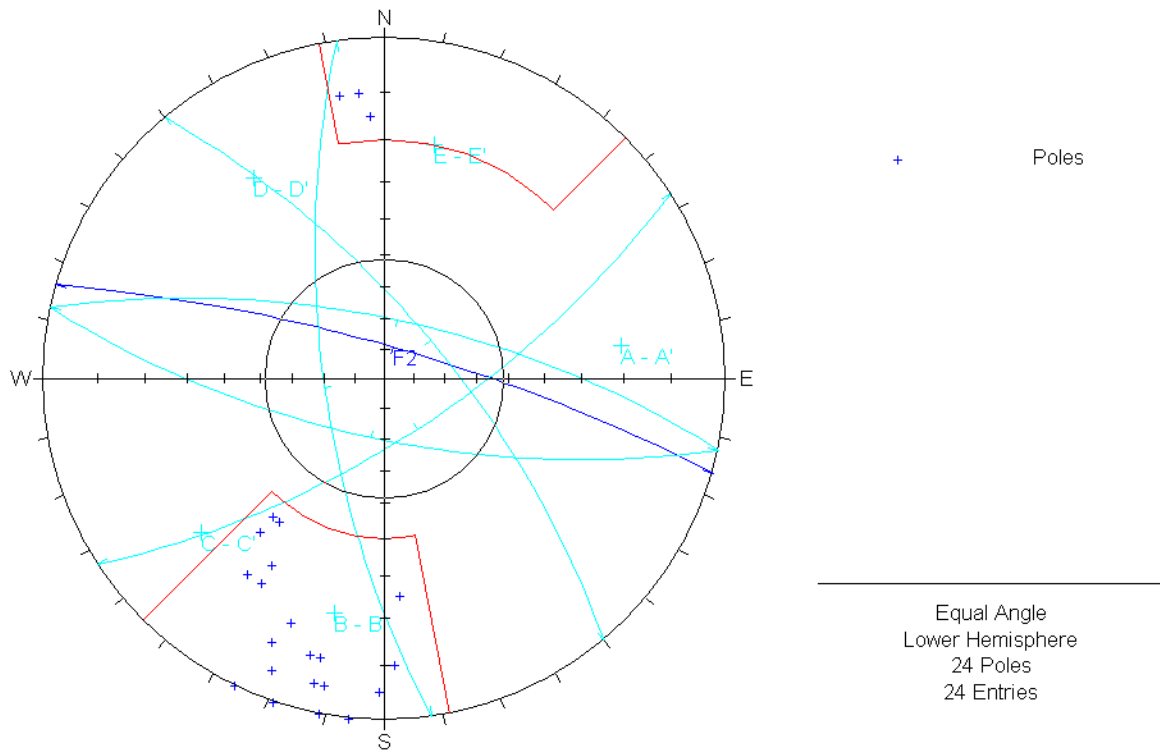


Figura 15b: Plano da Família 2 (em azul) determinado pelo set dos polos (em vermelho) em comparação com as seções da cava final (em cian).

Como demonstra a análise, não há potencial de ruptura planar da F2 (N73W/78°NE) em nenhuma das 5 atitudes de taludes propostos.

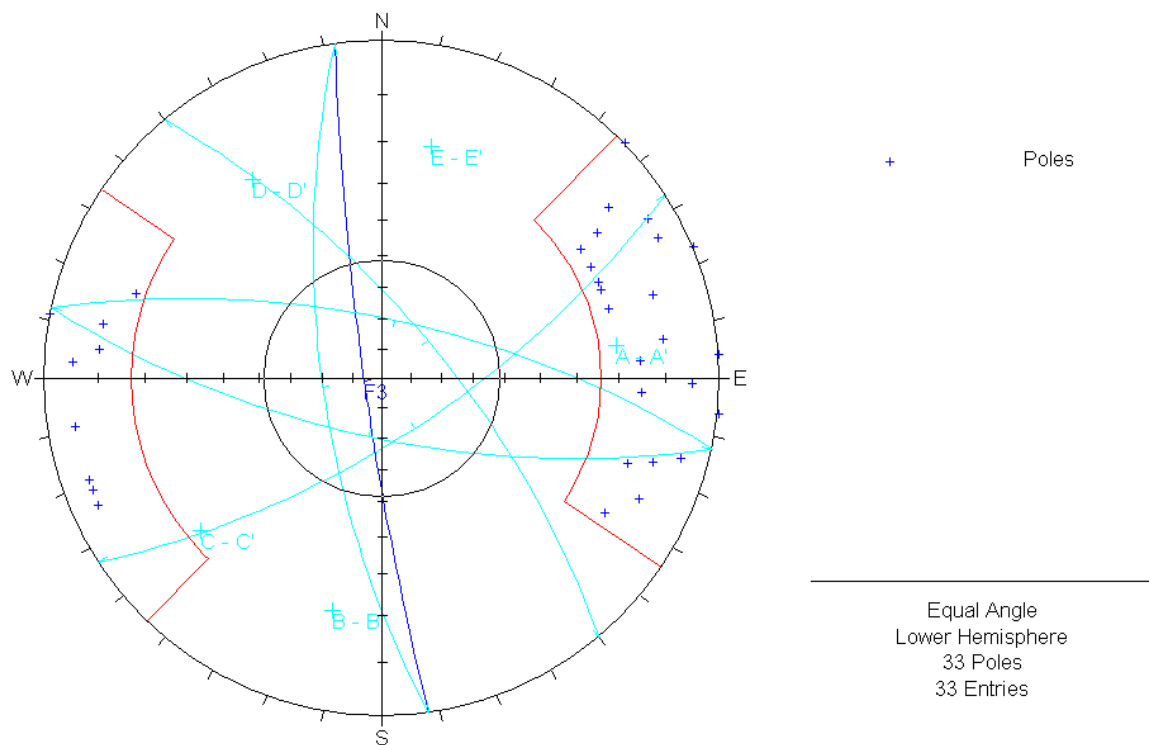


Figura 15c: Plano da Família 3 (em azul) determinado pelo set dos polos (em vermelho) em comparação com as seções da cava final (em cian).

Como demonstra a análise, não há potencial de ruptura planar da F3 (N08W/83°SW) em nenhuma das 5 atitudes de taludes propostos.

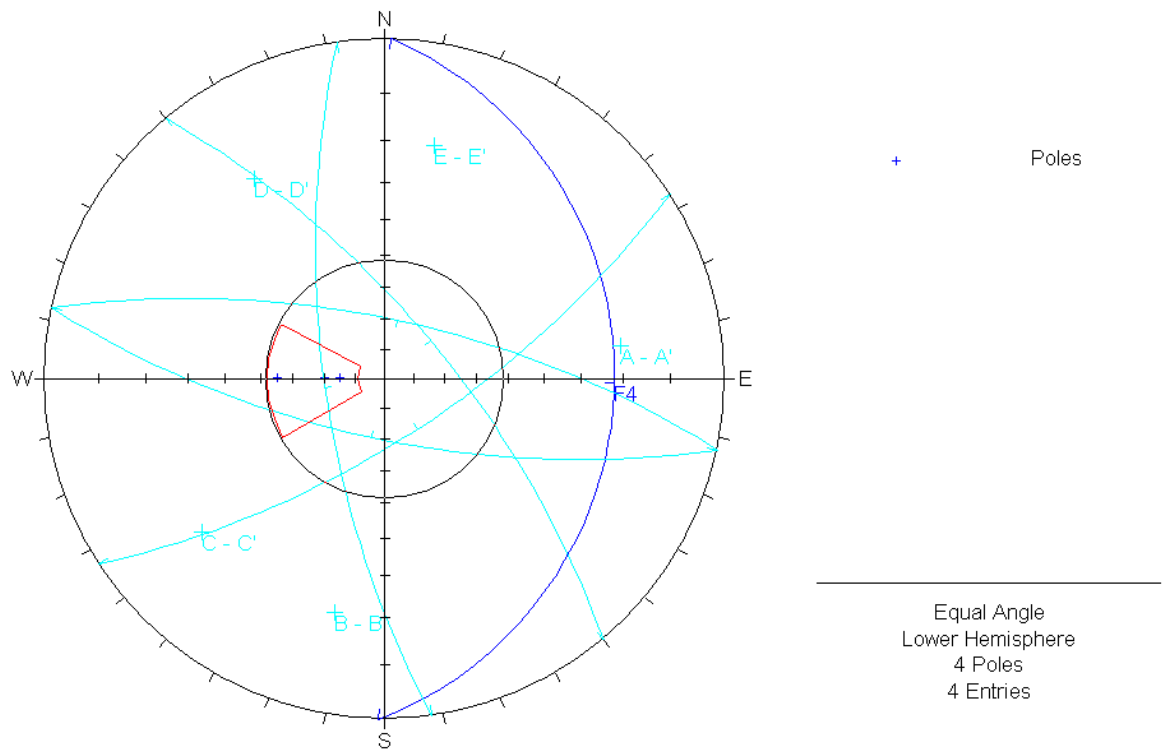


Figura 15d: Plano da Família 4 (em azul) determinado pelo set dos polos (em vermelho) em comparação com as seções da cava final (em cian).

Como demonstra a análise, não há potencial de ruptura planar da F4 (N01E/22°SE) em nenhuma das 5 atitudes de taludes propostos.

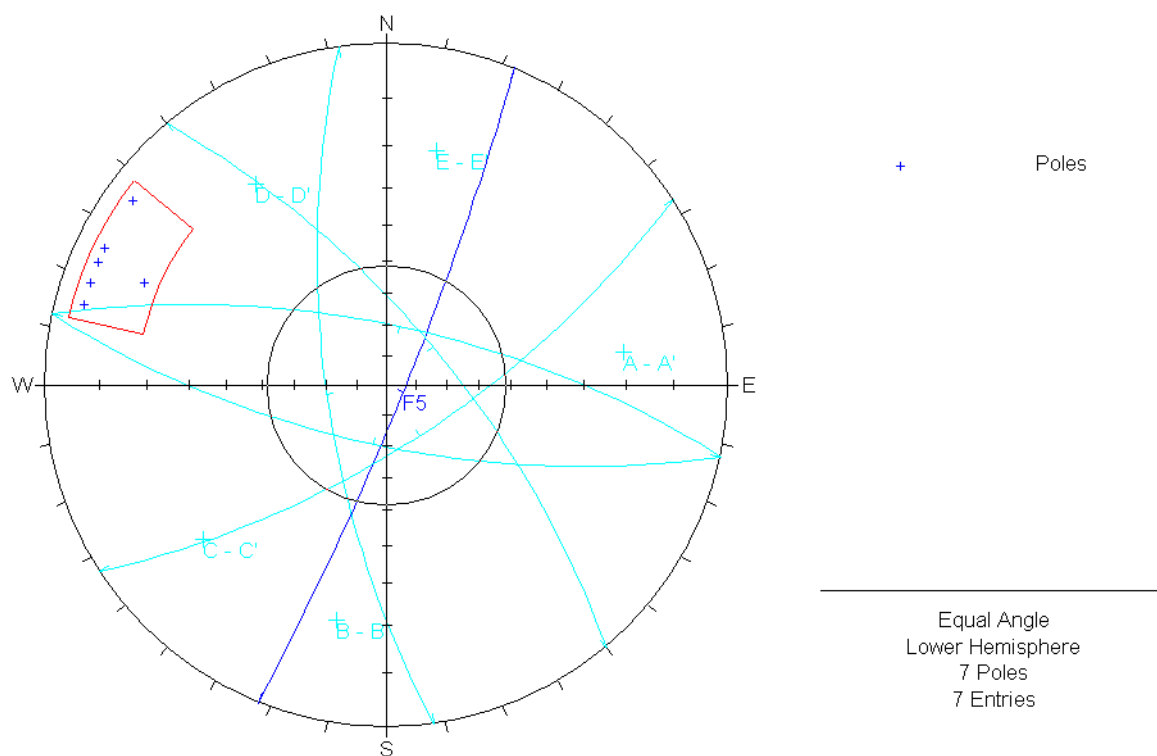


Figura 15e: Plano da Família 5 (em azul) determinado pelo *set* dos polos (em vermelho) em comparação com as seções da cava final (em cian).

Como demonstra a análise, não há potencial de ruptura planar da F5 (N22E/83°SE) em nenhuma das 5 atitudes de taludes propostos.

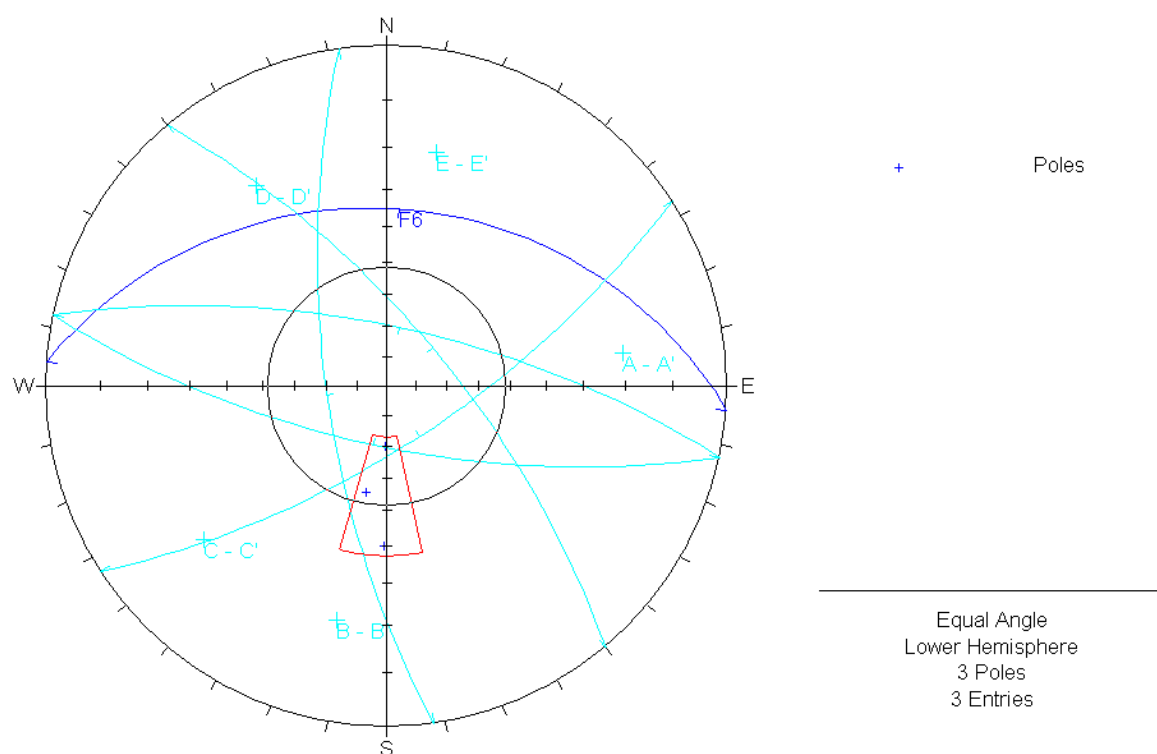


Figura 15f: Plano da Família 6 (em azul) determinado pelo *set* dos polos (em vermelho) em comparação com as seções da cava final (em cian).

Como demonstra a análise, há potencial de ruptura planar da F6 (N86W/35°NE) diante da seção B – B' (N78W/70°NE)

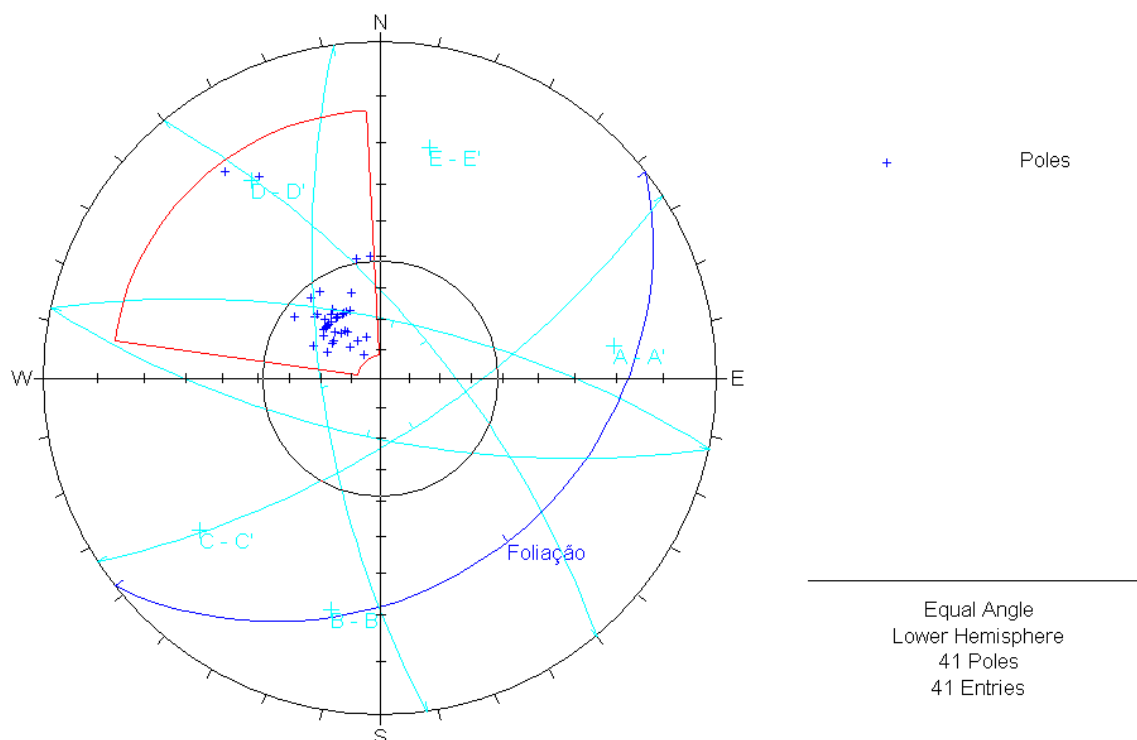


Figura 15g: Plano da Foliação (em azul) determinado pelo set dos polos (em vermelho) em comparação com as seções da cava final (em cian).

Como demonstra a análise, há potencial de ruptura planar da Foliação (N52E/21°SE) diante da seção D – D' (N57E/70°SE).

Desta maneira, conclui-se que as Famílias 1, 2, 3, 4 e 5 não apresentam potencialidade de ruptura planar nos taludes que constituirão o desenho da cava final na pedreira MaxBrita, segundo o estudo de análise geométrica apresentado.

Porém, encontrou-se potencial de deslizamento para as famílias F6 e Foliação, nas direções dos taludes B – B' e D – D', respectivamente.

4.2. Determinação dos parâmetros principais e análise de estabilidade

4.2.1. Obtenção do ângulo de atrito básico

O Ângulo de Atrito básico (Φ_b) determinado pelos ensaios de *Tilt Test* apresentados não são adequados para a caracterização geomecânica das famílias de descontinuidades, já que para isto seria necessário um conjunto de ensaios de rampa para se determinar a média de Φ_b para cada família.

Como os resultados apresentados de Φ_b foram genéricos, – média de $\Phi_b = 37,5^\circ$ em 7 ensaios sem especificação de testes em grupo para cada família – optou-se pela utilização

do ângulo de atrito básico mais conservador, encontrado no menor valor dentre os 7 ensaios: $\Phi_b = 35^\circ$.

4.2.2. Obtenção do ângulo de atrito e coesão

Para o cálculo do ângulo de atrito e coesão de cada uma das famílias envolvidas na possibilidade de ruptura, utilizou-se o *Software Rock Data*. Nele, optou-se pela escolha do critério de *Barton-Bandis* para o cálculo desejado.

Este critério permite a determinação dos parâmetros supracitados através de uma envoltória de Mohr-Coulomb, que é elaborada a partir da inserção de 3 variáveis (ângulo de atrito básico, JRC e JCS) na fórmula a seguir:

$$\tau = \sigma_n \tan \left[\phi_b + JRC \log_{10} \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right) \right],$$

onde o ângulo de atrito básico Φ_b é derivado a partir de ensaios de rampa Tilt Test para cada família, JRC é o coeficiente de rugosidade e JCS é a força de compressão da parede da descontinuidade (Barton, 1973).

Após a determinação do ângulo de atrito básico $\Phi_b = 35^\circ$ de forma a generalizar este parâmetro, ou seja, aplicá-lo tanto para a Família 6 quanto para a Foliação, buscou obter os valores de JRC e JCS, também para ambas famílias.

O coeficiente de rugosidade (JRC) foi calculado a partir da média dos valores de JRC de cada família, descritos em campo e demonstrados no **Anexo 1**. Então, para a Família 6 se obteve um valor de JRC = 5,5, e para a Foliação um valor de JRC = 4,6.

Por sua vez, é possível determinar o coeficiente de força compressiva (JCS) a partir de dados de literatura compilados no *software*. Neste caso, o valor de 175 MPa é dado a partir da média do intervalo 100-250 MPa, relativos as rochas muito fortes (*very strong rock* – gnaisses, basaltos, gabros, anfibolitos, entre outros).

Assim, com as variáveis fixadas em:

Família 6: Ângulo de atrito básico $\Phi_b = 35^\circ$; JRC = 5,5; JCS = 175MPa;

Foliação: Ângulo de atrito básico $\Phi_b = 35^\circ$; JRC = 4,6; JCS = 175MPa,

o *Software Rock Data* nos forneceu os seguintes resultados:

Família 6:

ângulo de atrito (Φ) = 40,92°

coesão (c) = 0,319 MPa

Foliação:

ângulo de atrito (Φ) = 39,96°

coesão (c) = 0,255 MPa

4.2.3. Geometria e variáveis para cálculo do fator de segurança (FS)

Para o cálculo do FS de cada família utilizou-se o *Software Rock Plane*, que por meio da inserção de dados geométricos, de um modelo de força de cisalhamento e das condições de saturação do meio (existência de pressão d'água na descontinuidade), se obtém o resultado.

Os dados geométricos envolvem altura e inclinação do talude, além do ângulo médio de mergulho da família testada.

Assim, em relação aos dados que se referem à geometria dos taludes, consultou-se o projeto de estudo do desenho da cava final na pedreira MaxBrita, e obteve-se os valores de 15m. de altura e inclinação de 70° para todos os taludes que irão compor a cava.

O ângulo médio de mergulho obtido para Família 6 foi de 35°, enquanto para a Foliação foi de 27,4°.

O modelo adotado no software de obtenção da coesão e do ângulo de atrito foi o de Mohr-Coulomb, anteriormente explicado no item 2.2.2. O valor de densidade da rocha adotado foi o de 2,7g/cm³, segundo a literatura pertinente.

E, as condições de saturação do meio escolhidas foram as de 20%, 40%, 60%, 80% e 100%.

4.2.4. Cálculo do fator de segurança e análise de estabilidade

Com todas os parâmetros definidos e apresentados, calculou-se o FS para ambas famílias que apresentaram potencial de ruptura planar.

Desta forma, a **Tabela 1** apresenta os resultados obtidos de FS a partir das variáveis expostas.

Tabela 1: Cálculo do Fator de Segurança com distintas condições de saturação.

Φb	Família	Parâmetros	Cálculo do FS para saturação igual a:				
			20%	40%	60%	80%	100%
35°	Foliação	c = 0,255	1,977	1,921	1,827	1,696	1,528
		$\Phi = 39,96$					
	Família 6	c = 0,319	1,669	1,613	1,522	1,393	1,228
		$\Phi = 40,92$					

Pode-se observar que com o aumento da porcentagem da saturação na descontinuidade, o Fator de Segurança diminui, significativamente, cerca de 25% em ambas as famílias.

No caso do estudo da Família 6, com coesão fixada em 0,319 MPa e ângulo de atrito 40,92°, nas condições de saturação total (100%), o valor do FS é igual a **1,228**. Este valor, abaixo do 1,3 observado pela NBR 11682-2009, apresenta uma condição de atenção especial, visto que neste caso as forças de resistência à ruptura estão praticamente igualadas às forças que propiciam o rompimento da descontinuidade, resultando numa condição limite de equilíbrio, ou seja, de baixa confiabilidade de segurança.

Para maior detalhamento das condições da Família 6, procurou-se determinar a condição de saturação que promove o valor final de 1,3 no FS, e chegou-se ao resultado de 91,5% de saturação para alcançar tal marca.

5. Conclusões

Este estudo de estabilidade dos taludes, que constituirão o desenho da cava final da pedreira MaxBrita, é uma excelente ferramenta no âmbito do conhecimento da segurança do local a partir do momento em que as atividades de exploração passarem a executar bancadas e taludes de direções próximas às do modelo da cava demonstrado na Monografia. Além da segurança, as rupturas do tipo planar, como as estudadas no projeto, podem ocasionar o aumento do passivo ambiental da pedreira, ou ainda causar transtornos decorrentes do rompimento de massas que se situam na Área do Parque Estadual da Serra do Mar, que é demarcado a partir da cota 100m.

As Famílias 6 (N85W/35°NE) e Foliação (N52E/21°SE), ainda que analisadas sob o potencial de ruptura planar nas seções B – B' e D – D', respectivamente, não apresentam FS menor do que 1, o que resulta em condições de equilíbrio estáveis. Em condições de saturação da descontinuidade a partir de 91,5%, (o que pode ser originado em épocas de intensa pluviosidade) a Família 6 apresenta valor de FS abaixo de 1,3, o que, segundo a NBR 11682-2009, se enquadra numa situação de risco e atenção maiores.

Assim, para maior controle e prevenção das condições de saturação é necessário que se implantem mecanismos de medida e diminuição do lençol freático nas áreas que correspondam a direções semelhantes às da seção B – B' (N78W/70°NE), para que se diminuam as condições que favoreçam a ruptura do maciço por meio desta família de descontinuidades.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2009. NBR 11682-2009 *Estabilidade de encostas*. ABNT, 33p.

Almeida, F.F.M. & Carneiro, C.D.R. 1998. Origem e Evolução da Serra do Mar. *Rev. Bras. Geoc.*, **28**(2): p.:135-150.

Barton, N., Lien, R., Lunde, J., 1974. *Engineering Classification of Rock Masses for Design of Tunnel Support*. Rock Mechanics, 6: p.: 189-236.

Dias Neto, C.M., Correia, C.T., Tassinari, C.C.G., Munha, J.M.U. 2009. Os anfíbolitos do complexo costeiro na região de São Sebastião, SP. *In: Geol. USP, Sér. cient.* [online], **9**(3): p.:71-87.

Fiori, A.P. & Carmignani, L. 2009. *Fundamentos de mecânica dos solos e das rochas: aplicações na estabilidade de taludes*. Curitiba: Ed. UFPR – 2ª ed., 209 p.

Google Earth, 2013. *Google Earth™*, serviço de mapas.

Hasui, Y., Carneiro, C.D.R., Almeida, F.F.M., Bartorelli, A., 2012. *Geologia do Brasil*. São Paulo: Beca, 900p.

Hoek, E. 2007. *Practical rock engineering*. Disponível em: http://www.rocscience.com/education/hoek_corner. Acessado em 20 mar 2013.

Hoek, E. & Bray, J.W., 1981. *Rock Slope Engineering*. London: Institution of Mining and Metallurgy – 3ª ed., 358p.

International Society of Rock Mechanics – ISRM, 1988. “*Métodos para descrição quantitativa de descontinuidades em maciços rochosos*”. Tradução: ABGE – Comitê Brasileiro de Mecânica de Rochas, São Paulo.

Norrish N. I. & Wyllie D. C., 1996. *Rock Slope Stability Analysis*. In: Turner A.T. & Schuster R.L. [eds.] *Landslides - Investigation and Mitigation*. Transportation Research Board Special Report No. 247, National Academy Press, Washington DC, p.:391-424.

Perrota, M.M., Salvador. E.D., Lopes, R.C. D'Agostinho, L.Z., Peruffo, N., Gomes, S.D., Sachs, L.L.B., Mieira, V.T., Garcia, M.G.M., Lacerda Filho, J.V. 2005. *Mapa geológico do Estado de São Paulo, escala 1:750.000*. Programa Geologia do Brasil – PGB, CPRM, São Paulo.

Price, D.G., 2007. *Engineering Geology – Principles and Practice*. Londres, 247p.

Priest, S. D., 1993. *Discontinuity analysis for rock engineering*. Londres, 104p.

Riccomini, C. 1989. *O Rift Continental do Sudeste do Brasil*. São Paulo, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. (Tese de Doutorado).

Wyllie, D. & Mah, C., 2004. *Rock Slope Engineering*. Spon Press, London – New York, 431p.

ANEXOS:

Anexo 1: Tabelas de caracterização das famílias mapeadas.