

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICA PARA ESTABILIZAÇÃO DE
TALUDE EM PEDREIRA NO MUNICÍPIO DE SANTOS, SP

Guilherme Nunes Fernandez

Orientador: Prof. Dr. Edilson Pissato
Co-orientador: Msc. Fernando Machado Alves

MONOGRAFIA DE TRABALHO DE FORMATURA
(TF-2012 / 21)

SÃO PAULO
2012

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICA PARA ESTABILIZAÇÃO DE
TALUDE EM PEDREIRA NO MUNICÍPIO DE SANTOS, SP

GUILHERME NUNES FERNANDEZ

Orientador: Prof. Dr. Edilson Pissato
Co-orientador: Msc. Fernando Machado Alves

MONOGRAFIA DE TRABALHO DE FORMATURA
(TF-2012 / 21)

	Nome	Assinatura
Aluno:	Guilherme Nunes Fernandez	_____
Orientador:	Prof. Dr. Edilson Pissato	_____
Co-orientador:	Msc. Fernando Machado Alves	_____

SÃO PAULO
2012

Agradecimentos

Em primeiro lugar gostaria de agradecer a Deus e minha família, em especial aos meus pais Luiz Antonio e Livian, que me ensinaram o caminho pelo qual devo andar e por acreditar na educação como sendo o bem mais importante que se pode adquirir na vida.

Agradeço a Regea por toda estrutura proporcionada para a realização deste trabalho, sem a qual não seria possível concluí-lo. Agradeço especialmente ao Geólogo Vital Assano, pela valiosa ajuda e companhia nos trabalhos de campo e todo o aprendizado sobre geologia de engenharia que ele me proporcionou, bem como ao Geólogo Msc. Fernando “Lampião” Alves pelas várias horas destinadas em escritório à compreensão de conceitos, tratamento de dados e pela atenção durante as muitas dúvidas que surgiram ao longo este trabalho.

Extendo meus agradecimentos ao meu orientador Prof. Dr. Edilson Pissato que, sempre solícito com relação às dúvidas, aceitou participar desse projeto e em muito colaborou para o meu aprendizado ao longo deste ano.

Agradeço a todos que participaram e possibilitaram, de uma forma ou de outra, a realização deste trabalho: Aos funcionários da pedreira MaxBrita, a equipe de sondagem e aos meus companheiros de escritório na Regea, que em muito me ajudaram no dia-a-dia deste trabalho.

Por fim, agradeço aos meus colegas de banco, companheiros da turma 51 do Instituto de Geociências da USP, os quais me acompanharam nessa jornada desde o princípio, tornando a vida acadêmica muito mais divertida e interessante.

“Quem ama, educa”

Içami Itiba

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICA PARA ESTABILIZAÇÃO DE
TALUDE EM PEDREIRA NO MUNICÍPIO DE SANTOS, SP

Guilherme Nunes Fernandez

Orientador: Prof. Dr. Edilson Pissato
Co-orientador: Msc. Fernando Machado Alves

MONOGRAFIA DE TRABALHO DE FORMATURA
(TF-2012 / 21)

SÃO PAULO
2012

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	3
1.1. Objetivos.....	4
1.2. Justificativas	4
1.3. Localização.....	4
1.4. Histórico da Pedreira MaxBrita.....	5
2. FUNDAMENTAÇÃO BIBLIOGRÁFICA	7
2.1. Contexto Meio Físico.....	7
2.1.1. Contexto geomorfológico.....	7
2.1.2. Contexto geológico	8
2.1.3. Contexto climático	9
2.2. Caracterização geomecânica de maciços rochosos.....	9
2.3. Classificações geomecânica	10
2.3.1. Caracterização segundo Deere (RQD)	11
2.3.2. Classificação segundo Bieniawski (RMR).....	12
2.3.3. Classificação segundo Barton (Sistema Q).....	13
2.3.4. Classificação segundo Hoek (GSI).....	14
2.4. Estabilidade de taludes em rocha	15
2.4.1. Parâmetros que influenciam a estabilidade da rocha	15
2.4.2. Tipos de ruptura.....	16
2.4.3. Fator de segurança (FS)	18
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	21
3.1. Análise estrutural.....	21
3.1.1. Levantamentos de campo (Scanline).....	21
3.1.2. Tratamento de dados	24
3.2. Caracterização geomecânica	25
3.2.1. Tilt Test.....	25
3.2.2. Análise de compressão uniaxial	26
3.3. Caracterização geométrica do talude.....	29
3.3.1. Levantamento planialtimétrico	29
3.4. Análise cinemática.....	30
3.4.1. Tombamento de blocos	31
3.4.2. Rupturas planares	31
3.4.3. Rupturas em cunha	31
3.5. Análise de estabilidade.....	32
3.5.1. Rupturas planares	33
3.5.2. Rupturas em cunha	36
4. RESULTADOS	38
4.1. Análise estrutural.....	38
4.1.1. Análise estereográfica	38
4.1.1. Análise das <i>scanlines</i>	40
4.2. Caracterização geomecânica.....	41
4.2.1. Teste de rampa (<i>tilt test</i>).....	41
4.2.2. Ensaio de compressão uniaxial.....	42
4.2.3. Classificação segundo critério GSI.....	44
4.3. Análise cinemática.....	45
4.3.1. Tombamento de blocos	45
4.3.2. Rupturas planares	46
4.3.3. Rupturas em cunha	46
4.4. Análise de estabilidade do talude.....	47
4.4.1. Tombamento de blocos	47
4.4.2. Rupturas planares	48
4.4.3. Rupturas em cunha	50
5. CONCLUSÕES	52
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	53

RESUMO

Foi realizada a Caracterização geológico-geotécnica para avaliação da estabilidade de um talude de rocha de uma pedreira localizada em Santos, para esta avaliação foram realizados coleta de dados estruturais e caracterização geomecânica do maciço rochoso, que permitiram uma análise estrutural das descontinuidades, análise cinemática e por fim análise da estabilidade do talude com calculo do fator de segurança.

A caracterização permitiu que as estruturas fossem separadas em 5 famílias e foliações. As atitudes médias observadas foram: foliação (138/25), família 1 (351/87), família 2 (016/83), família 3 (247/81), família 4a (093/20), família 4b (111/86) e família 5 (005/35). E em geral o maciço rochoso, de rocha gnáissica foi considerado pouco alterado, em superfície, e estas condições nortearam as avaliações de movimentação e equilíbrio limite de forças (avaliação da estabilidade).

A análise cinemática indicou a possibilidade de três tipos de ruptura do maciço: tombamento de blocos, ruptura planar e ruptura em cunha. Para os tipos de ruptura as famílias de estruturas que possibilitam a movimentação para esta atitude de talude foram família 1, 2 e 5. Para o tombamento de blocos e rupturas em cunha, o talude foi considerado estável, com fator de segurança superior a 1,3 mesmo com presença de água no maciço rochoso.

Para ruptura planar, a análise apontou, para condições do maciço drenado, fator de segurança superior ao desejável de 1,3. Contudo, esta condição drenada raramente ocorre e para condições 100% saturadas, deve-se considerar instável, passível de ruptura. Para as condições intermediárias, saturações da ordem de 40%, podem ser consideradas seguras ($FS > 1,3$). Este panorama indica necessidade de intervenção no talude, no qual a presença de água subterrânea possa ser monitorada e drenada.

ABSTRACT

A geological and geotechnical characterization was carried out in a mine stone located in Santos to assessment a rock slope stability, for this evaluation were conducted a structural data collection and a geomechanical characterization of the rock slope, which allowed an structural analysis of discontinuities, kinematic analysis and slope stability analysis to calculate the slope's safety factor.

The structures were separated into 5 families and foliation. Attitudes averages were: foliation (138/25), family 1 (351/87), family 2 (016/83), family 3 (247/81), family 4a (093/20), family 4b (111 / 86) and family 5 (005/35). In general, under superficial conditions, the slope of gneissic rock is considered slightly weathered bedrock, and these conditions guided the analysis of movement and limit equilibrium of forces (stability evaluation).

Kinematic analysis indicated the possibility of three types of failure: toppling failure, planar failure and wedge failure. To those types of failure the families of structures which allow the movement of slope were family 1, 2 and 5. For the toppling failure and wedge failure, the slope was considered stable, with safety factor above 1.3 even with the presence of water in the rock mass.

For planar failure, at drained conditions the analysis indicated safety factor above 1.3. However, this drained condition rarely occurs and to 100% saturated conditions, the slope has to be consider unstable and susceptible to failure. For intermediate conditions, saturation of approximately 40% can be considered safe ($FS > 1.3$). This scenario requires intervention on the slope, where the presence of groundwater can be monitored and drained.

1. INTRODUÇÃO

A atividade de mineração faz parte da História da humanidade, dando base para a construção da civilização e suportando os moldes da sociedade moderna. Os materiais e métodos de exploração dos bens minerais evoluíram junto à sociedade. Mas a evolução dos métodos e das boas práticas, principalmente no que tange à segurança, não acompanhou tal evolução na mesma velocidade.

É de suma importância a garantia da segurança para trabalhadores, instalações e arredores da área produtiva, protegendo sociedade e meio ambiente. Para tal, é necessário o conhecimento geológico e geotécnico da área em questão, e o domínio de métodos que visem erradicar ou ao menos minimizar riscos, sejam estes de qualquer ordem ou espécie.

A análise de segurança a partir do estudo de estabilidade em taludes de rocha constitui um ramo de valiosa importância dentro das geociências, nele, um dos principais métodos de aprendizado sobre o tema é a proposição de modelos a partir de dados obtidos em superfície através da observação em campo, ou em subsuperfície através de sondagens e análises de seus testemunhos. Para que assim, esses dados sirvam de subsídio para a proposição de modelos geológico-geotécnico, os quais têm sido utilizados e testados ao longo do tempo.

Assim, a avaliação da Geologia de Engenharia aplicada ao ramo da mineração se mostra imprescindível para a compreensão e o desenvolvimento de novos métodos e boas práticas que visem a garantia da segurança de todas as partes envolvidas nesse tipo de exploração.

O presente trabalho permitiu avaliar as condições de estabilidade em rocha do talude sul N110/85NE (20/85) da pedreira MaxBrita em Santos-SP. A análise foi baseada em levantamentos de campo, caracterização geomecânica do maciço rochoso, análise estrutural das descontinuidades, análise cinemática e por fim análise da estabilidade do talude com cálculo do fator de segurança.

1.1. Objetivos

O objetivo principal deste trabalho foi o de aplicar conhecimento de geologia estrutural à estudos de geologia de engenharia, para realizar uma análise de estabilidade em talude de rocha da pedreira MaxBrita. Para tanto foi utilizado levantamento de suas descontinuidades, caracterização dos parâmetros geomecânicos, análise cinemática baseado em estereogramas e calculo do fator de segurança dos taludes quanto aos possíveis movimentos de rocha selecionados.

1.2. Justificativas

As atividades realizadas durante este trabalho fazem parte de um projeto mais amplo, que por sua vez, visa a compreensão do contexto geológico-geotécnico no qual a pedreira está inserida, e sob o qual ocorreu uma movimentação de grandes proporções em abril de 2011. Desta maneira, este projeto faz parte de um estudo maior realizado pela empresa de consultoria REGEA – Geologia e Estudos Ambientais.

Devido a recentes acidentes em taludes de rocha, incluindo o próprio caso desta pedreira, este estudo pode contribuir para o entendimento geológico-geotécnico e estrutural, de estabilidade de taludes em pedreira no contexto da Serra do Mar, o qual apresenta particularidades importantes para o desenvolvimento técnico das atividades de mineração neste contexto.

Destaca-se ainda que estudos geotécnicos desta natureza podem contribuir não apenas com as atividades minerais neste contexto, mas também para taludes e cortes para fins rodoviários, ferroviários, habitacionais, redes de distribuição (energia, gás, etc.) no contexto da Serra do Mar (Santos, A.R.).

1.3. Localização

A área alvo do estudo se localiza ao litoral do estado de São Paulo, e está inserida no contexto do Complexo Costeiro, juntamente à Serra do Mar. O local se situa em área lindeira ao Parque Estadual da Serra do Mar, cujo limite é estabelecido topograficamente pela cota 100m.

Mais especificamente, a área de estudo é determinada pelos limites da concessão de lavra cedida à Pedreira MaxBrita, a qual se localiza ao km 245,5 da Rodovia Rio-Santos,

BR-101, (no trecho a rodovia é identificada como SP-55, Rodovia Doutor Manuel Hipólito do Rego). No bairro do Monte Cabrão, área continental de Santos.

O acesso a partir de São Paulo pode ocorrer tomando-se a Rodovia dos Imigrantes, a partir desta entrando na Rodovia Cônego Domenico Rangoni no sentido Guarujá e acessando a Rodovia Rio-Santos no sentido Bertioga a partir do trevo de entroncamento das duas rodovias.

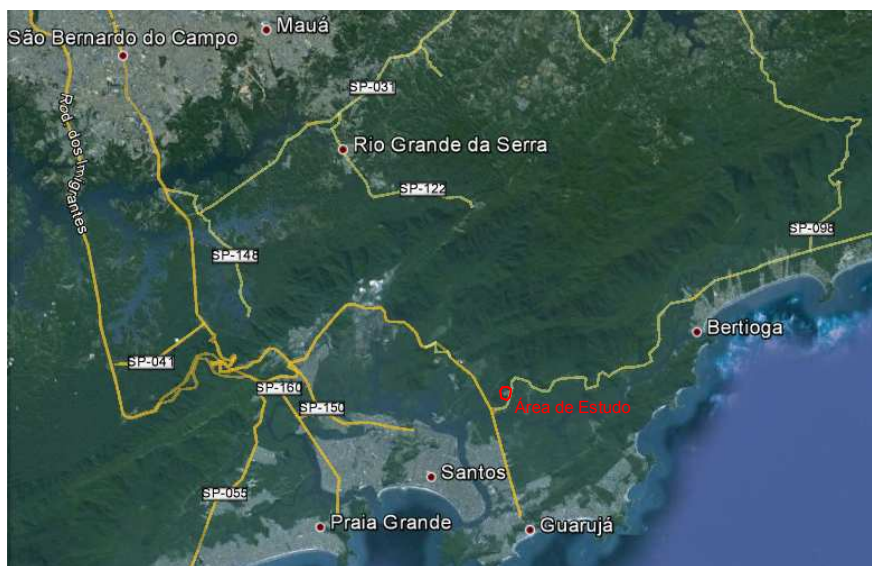


Figura 1.1: Mapa de localização da área de estudo, a partir de Google™ Earth, imagem de 22/06/2009. Norte apontando para o topo da imagem, sem escala.

1.4. Histórico da Pedreira MaxBrita

A pedreira apresenta um curto, porém intenso histórico relativo a movimentos de massa. Afim de facilitar o entendimento desse histórico, a área da pedreira foi subdividida em duas, Norte e Sul. Os limites das áreas são destacados na **figura 1.4.1**.



Figura 1.2: representação espacial das áreas norte e sul da pedreira, fonte Google™ Earth, imagem de 22/06/2009, norte para o topo da imagem e distância lateral de 900m.

O presente trabalho foca no estudo da estabilidade de taludes contidos na área sul, a qual, de devido às estruturas observadas, apresenta em um primeiro momento um favorecimento à estabilidade, o que possibilitou que no passado a lavra fosse realizada com taludes verticalizados. Porém, durante o processo de lavra a cota que delimita o Parque Estadual da Serra do Mar foi alterada de 200m para 100m. Essa mudança paralisou o avanço em direção ao Sul, o que deixou seus cortes de solo e rocha sem possibilidade de tratamento ou estabilização. Com isso, as modificações induziram situações propícias à deflagração de instabilidades em solo e em rocha neste setor.

Desta maneira os estudos do presente trabalho foram realizados apenas no âmbito desta área Sul, especificamente no talude Sudoeste com mergulho para nordeste. Uma vez que a área norte, atualmente apresenta cenário complexo, de difícil acesso e apresentando riscos múltiplos devido a um escorregamento de rocha e solo de grandes proporções (aproximadamente 500 mil toneladas).

2. FUNDAMENTAÇÃO BIBLIOGRÁFICA

A Fundamentação bibliográfica ocorreu continuamente durante diversas fases do trabalho, num primeiro momento procurou-se obter informações relacionadas ao contexto geológico da área de estudo e seus entorno, aspectos estruturais e tectônicos.

Paralelamente realizou-se um levantamento e estudo da bibliografia publicada a respeito dos métodos para coleta de dados, e tratamento para estes dados estruturais relativos a descontinuidades. Possibilitando assim, um entendimento sobre as técnicas e métodos empregados neste trabalho.

De maneira contínua ao longo deste trabalho o levantamento e estudo da bibliografia foram desenvolvidos, procurando assim complementar o conhecimento sobre o tema. Para tal, o levantamento foi realizado principalmente através do acervo da Biblioteca do Instituto de Geociências da USP e bibliografia em formato digital disponível na internet.

2.1. Contexto Meio Físico

2.1.1. Contexto geomorfológico

A área de estudo está inserida na porção continental do município de Santos, litoral do Estado de São Paulo, e sua geomorfologia está associado ao Complexo Costeiro e à dinâmica da Serra do Mar.

Constituído predominantemente por escarpas rochosas do Complexo Costeiro, o litoral sudeste apresenta-se freqüentemente recortado por pequenas baías pouco reentrantes e de forma semi-elíptica constituídas por sedimentos quaternários (SUGUIO & TESSLER, 1984).

Geomorfologicamente, tais bolsões correspondem a escarpas bastante dissecadas, com topos aguçados e convexos, cuja rede de drenagem apresenta-se adaptada às direções das estruturas relacionadas com falhas, fraturas e contatos litológicos (ROSS & MOROZ, 1997). Devido às altas declividades, predominam solos rasos e pouco desenvolvidos do tipo Cambissolos e Litólicos, sendo comuns, afloramentos rochosos.

O relevo da região da Serra do Mar é composto fundamentalmente por estruturas escarpadas festonadas com direção NE-SW, e sua extensão é de aproximadamente 1.000 quilômetros, sua altitude no Estado de São Paulo é frequentemente de 800 a 1200m (Almeida, 1998).

2.1.2. Contexto geológico

A evolução tectônica e estrutural de toda região está relacionada aos esforços envolvidos no Rift Continental do Sudeste do Brasil (RCSB), o qual comportou cinco fases tectônicas distintas (Riccomini, 1989). A primeira, Eocênica, distensiva e de direção NNW-SSE, a segunda, Neogênica, com transcorrência sinistral E-W com distensão NW-SE e, localmente, compressão NE-SW, a terceira fase, inserida no intervalo Pleistoceno/Holoceno teve transcorrência dextral E-W, com compressão NW-SE. A quarta fase tectônica, Holocênica, compreende distensão NW (WNW)-SE (ESE), a quinta e última fase, atuante do Holoceno até hoje, apresenta compressão E-W, caracterizada por juntas conjugadas de direção ENE e WNW (Riccomini, 1989).

De acordo com o Mapa Geológico do Estado de São Paulo (Perrota *et al.*, 2005), a região que abriga a pedreira é composta por rochas ortoderivadas Neoproterozóicas do Complexo Costeiro, mais especificamente a unidade granito gnáissica migmatítica, composta regionalmente por hornblenda-biotita gnaiss granitoide pórfiróide e augen gnaiss, datados em 647-578 Ma U-Pb (Passareli, 2001, *apud* Perrota *et al.*, 2005), como visto na **figura 2.1**.

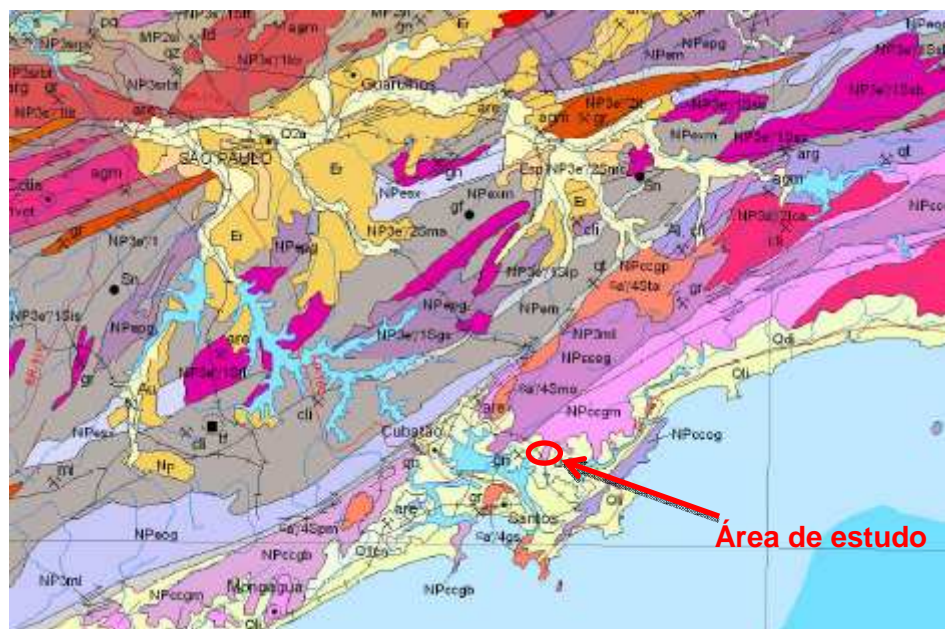


Figura 2.1: Extraído do Mapa Geológico do Estado de São Paulo, Perrota *et al.* 2005, Norte para o topo da imagem, sem escala.

2.1.3. Contexto climático

O município de Santos apresenta um clima tropical úmido, com temperaturas médias anuais entre 19 °C e 27 °C e precipitação média de 3.200 mm por ano (CIIAGRO, 2012). A Pedreira Max Brita se localiza no bairro do Monte Cabrão, área continental de Santos, dada a proximidade à região da Serra do Mar, a sua umidade é maior, se comparada à média do município, dados obtidos junto ao DAEE apontam uma média anual de 3408 mm, como observado na **figura 2.2**, esses dados são referentes à base de Caete, instalada próxima à pedreira.

As chuvas se concentram entre os meses de outubro e abril, com médias superiores a 400 mm nos dois primeiros meses do ano. Entre junho e agosto temos os três meses mais secos, com médias de precipitação inferiores a 175 mm.

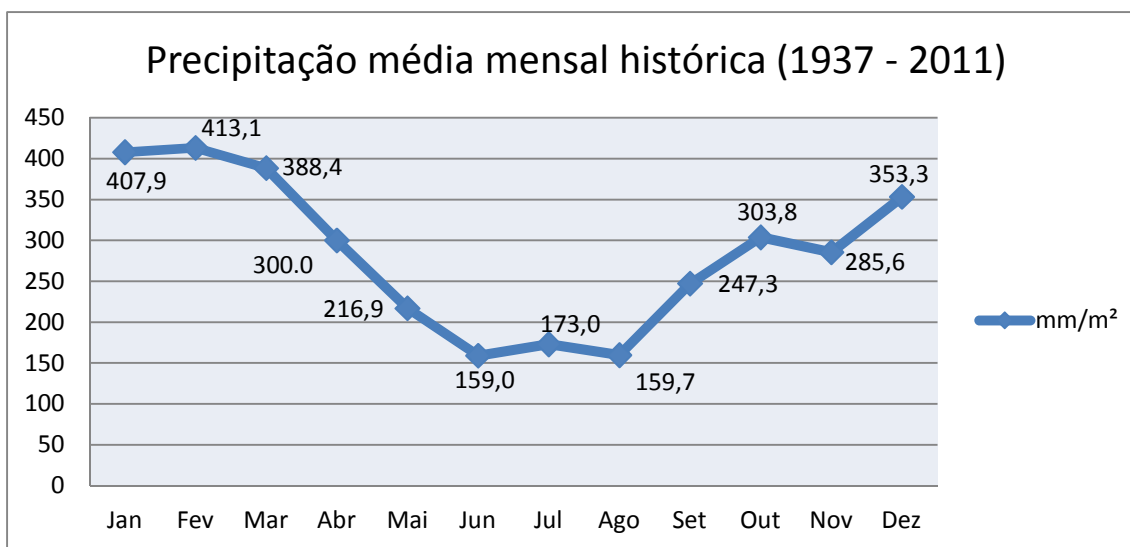


Figura 2.2. Gráfico construído a partir dos dados pluviométricos da estação do Caete, área continental do município de Santos, fonte: Banco de Dados Pluviométricos do Estado de São Paulo, DAEE.

2.2. Caracterização geomecânica de maciços rochosos

O passo inicial para compreender um maciço rochoso é caracterizando-o a partir de parâmetros geomecânicos que atendam as questões inerentes ao uso para o qual determinado maciço rochoso será utilizado.

Para tanto, faz-se necessário o levantamento de uma série de parâmetros de interesse, assim, as características mais interessantes para o estudo de estabilidade em taludes relacionam-se à deformabilidade, à resistência, ao estado das tensões naturais e à permeabilidade.

Desta maneira, Serra Junior & Ojima (1998) elencam alguns fatores de grande importância para uma caracterização geomecânica voltada para obras de geotecnia, sendo eles: litologia, estado de alteração, coerência e características de suas descontinuidades.

Diferentes litologias podem oferecer parâmetros geomecânicos completamente diferentes, a caracterização litológica tem grande utilidade na avaliação da representatividade dos resultados de ensaios pontuais e sua extrapolação para o maciço como um todo.

Estado (ou Grau) de alteração é resultado da ação do intemperismo, podendo reduzir significativamente a resistência mecânica de um determinado litotipo, Serra Junior & Ojima (1998) define as denominações de graus de alteração como sendo: rocha sã ou praticamente sã, rocha medianamente alterada, rocha muito alterada e rocha extremamente alterada.

A coerência está relacionada ao grau de alteração, Guiducini *et al.* (1972) definem coerência em graus de coerência a partir da resistência à quebra por golpe de martelo e/ou por pressão dos dedos, dividindo assim entre rochas coerentes, medianamente coerentes, pouco coerentes e incoerentes.

A análise de descontinuidades é de fundamental importância para a caracterização geomecânica de um maciço, se relacionando fortemente ao comportamento de um maciço, especialmente em relação à deformabilidade, resistência e permeabilidade, podendo controlar toda a estabilidade do meio rochoso (Serra Junior & Ojima, 1998). Dentro da análise de descontinuidades, podem-se destacar os parâmetros de persistência, espaçamento, rugosidade, tipo de material de preenchimento e tamanho da abertura.

2.3. Classificações geomecânica

Classificações geomecânicas são realizadas sistematicamente com o intuito de determinar e hierarquizar os parâmetros obtidos na caracterização de um maciço rochoso, a fim de obter uma primeira previsão de seu comportamento. De acordo com Serra Junior & Ojima (1998), em um sistema de classificação de maciços rochoso, os principais parâmetros levantados são: resistência da rocha intacta, resistência e orientação das descontinuidades, densidade de compartimentação do maciço, influência da água e estado de tensão ao redor da área escavada.

2.3.1. Caracterização segundo Deere (RQD)

O método desenvolvido por Deere *et al.* (1967), que responde pela sigla RQD (*Rock Quality Designation*), é baseado na recuperação de testemunhos de sondagem para um dado intervalo de sondagem em diâmetro NW (54,73 mm). Esse diâmetro foi escolhido como mais representativo das propriedades mecânicas das rochas, diâmetros menores podem implicar numa maior fragmentação da rocha (Fiori & Carmignani, 2011).

O valor RQD corresponde à porcentagem recuperada em um determinado comprimento de testemunhos, nesse método soma-se apenas os pedaços recuperados maiores que 10 cm. Assim, ao somar os trechos maiores que 10 cm e dividir essa somatória pelo comprimento total do trecho da sondagem obtém-se a porcentagem que é o próprio RQD. A partir dessa definição, Barton *et al.* (1974) *apud* Fiori & Carmignani (2011) classificam a qualidade da rocha em questão de acordo com a **tabela 2.1** abaixo:

RQD (%)	Descrição da rocha
90-100	excelente qualidade
75-90	boa qualidade
50-75	qualidade regular
25-50	má qualidade

Tabela 2.1: RQD x Qualidade da rocha.

Os valores RQD são inversamente proporcionais à frequência de fraturamento do maciço, quanto mais for o fraturamento, menor RQD terá o intervalo amostrado. Identificar trechos com maiores ou menores RQD's pode ser útil na segmentação de um maciço em porções de maior ou menor qualidade de rocha.

Embora o RQD seja importante na caracterização, sozinho ele não é o bastante para caracterizar um maciço rochoso, pois não leva em consideração fatores importantes sobre as descontinuidades como por exemplo, rugosidade e preenchimento destas.

Aliado à outros parâmetros, o RQD é utilizado para uma descrição detalhada de um maciço. Originalmente aplicado a túneis, o valor percentual obtido no RQD é utilizado em boa parte dos métodos de classificação propostos por outros autores após este, tanto para obras subterrâneas quanto para obras em superfície.

2.3.2. Classificação segundo Bieniawski (RMR)

O sistema RMR tem por objetivos caracterizar os parâmetros que condicionam o comportamento do maciço, compartimentar o maciço em classes por qualidade e compreender cada classe de maciço e seu comportamento, afim de prover dados para o projeto geomecânico.

Originalmente proposto em 1973 e atualizado em 1989 por Bieniawski, o sistema RMR (*Rock Mass Rating*) leva em consideração os seguintes parâmetros: resistência à compressão simples, RQD, espaçamento entre as descontinuidades, padrão das descontinuidades, ação da água e orientação das descontinuidades em relação à escavação (Serra Junior & Ojima, 1998).

O autor criou então, um sistema de classificação geomecânica em forma de tabela, na qual os parâmetros citados acima são quantificados, e à cada um deles é conferido um peso relativo. Os pesos podem ser positivos (aqueles que favorecem à estabilidade), iguais a zero (não interferem na estabilidade), ou negativos (desfavoráveis à estabilidade). Assim, somando-se os pesos, é obtido um valor numérico de 0 a 100, a partir do qual é feita subdivisão em 5 classes, cada uma significado diferente, como visto na **tabela 2.2**.

Classe	I	II	III	IV	V
Descrição	Muito bom	Bom	Regular	Pobre	Muito Pobre
Soma dos Pesos	100-81	80-61	60-41	40-21	<20
Coesão	>400 KPa	300-400 KPa	200-300 KPa	100-200 KPa	<100 KPa
Âng. de atrito	>45°	35-45°	25-35°	15-25°	<15°

Tabela 2.2: Classificação geomecânica de Bieniaswki (RMR). Parâmetros de tempo de sustentação e vão de seção, que também são subprodutos do RMR, foram retirados (modificado de Serra Junior & Ojima, 1998).

2.3.3. Classificação segundo Barton (Sistema Q)

O sistema Q, proposto por Barton *et al.* (1974), busca quantificar o comportamento geomecânico de maciços rochosos, o sistema leva em consideração o parâmetro RQD, além de quatro parâmetros adicionais: número e condição das descontinuidades, interferência da ação da água subterrânea e estado de tensões nas vizinhanças da escavação (Serra Junior & Ojima, 1998).

A expressão que define o valor de Q é a seguinte:

$$Q = [RQD / J_n] \times [J_r / J_a] \times [J_w / SRF]$$

Sendo:

RQD = índice de designação de qualidade da rocha;

J_n = índice de influência do número de famílias das descontinuidades;

J_r = índice de influência da rugosidade das paredes das descontinuidades;

J_a = índice de influência da alteração das paredes das descontinuidades;

J_w = índice de influência da ação da água subterrânea;

SRF = índice de influência do estado de tensões no maciço no entorno da cavidade (*Stress Reduction Factor*).

Uma vez realizados os cálculos e obtidos os valores específicos para cada índice da equação, calcula-se o parâmetro Q pelo produto das três parcelas, permitindo uma classificação nominal do maciço. O resultado final Q então é plotado em escala logarítmica variando entre aproximadamente 10^{-3} e 10^3 , abrangendo desde rochas brandas até maciços são.

2.3.4. Classificação segundo Hoek (GSI)

Introduzido por Hoek (1994) o GSI (*Geological strenght Index*) remete a um índice de resistência de um maciço rochoso obtido através da observação das estruturas presentes em um maciço fraturado, no qual a densidade do fraturamento e a qualidade das superfícies de descontinuidades são fundamentais para estimar um índice numérico que varia de 0 a 100, como visto na **tabela 2.3**, abaixo:


GEOLOGICAL STRENGTH INDEX FOR JOINTED ROCKS (Hoek and Marinos, 2000) From the lithology, structure and surface conditions of the discontinuities, estimate the average value of GSI. Do not try to be too precise. Quoting a range from 33 to 37 is more realistic than stating that GSI = 35. Note that the table does not apply to structurally controlled failures. Where weak planar structural planes are present in an unfavourable orientation with respect to the excavation face, these will dominate the rock mass behaviour. The shear strength of surfaces in rocks that are prone to deterioration as a result of changes in moisture content will be reduced if water is present. When working with rocks in the fair to very poor categories, a shift to the right may be made for wet conditions. Water pressure is dealt with by effective stress analysis.		SURFACE CONDITIONS				
STRUCTURE		DECREASING SURFACE QUALITY →				
	INTACT OR MASSIVE - intact rock specimens or massive in situ rock with few widely spaced discontinuities	90	80	70	60	N/A
	BLOCKY - well interlocked undisturbed rock mass consisting of cubical blocks formed by three intersecting discontinuity sets					
	VERY BLOCKY - interlocked, partially disturbed mass with multi-faceted angular blocks formed by 4 or more joint sets					
	BLOCKY/DISTURBED/SEAMY - folded with angular blocks formed by many intersecting discontinuity sets. Persistence of bedding planes or schistosity					
	DISINTEGRATED - poorly interlocked, heavily broken rock mass with mixture of angular and rounded rock pieces					
	LAMINATED/SHEARED - Lack of blockiness due to close spacing of weak schistosity or shear planes	N/A	N/A			10
		← DECREASING INTERLOCKING OF ROCK PIECES				
		VERY GOOD Very rough, fresh unweathered surfaces GOOD Rough, slightly weathered, iron stained surfaces FAIR Smooth, moderately weathered and altered surfaces POOR Slackensided, highly weathered surfaces with compact coatings or fillings or angular fragments VERY POOR Slackensided, highly weathered surfaces with soft clay coatings or fillings				

Tabela 2.3: Caracterização de maciço rochoso fraturado (GSI). Retirado de Hoek (2011).

Inicialmente, logo após a sua proposição, o índice GSI era estimado a partir do valor RMR, entretanto essa correlação se mostrou incerta quando aplicada a maciços de baixa qualidade ou com peculiaridades geológicas. Por consequência, é recomendado que o GSI seja estimado então, diretamente a partir da tabela proposta pelo autor.

A questão mais importante a respeito deste índice refere-se a quando adotá-lo ou não, se o espaçamento entre as fraturas for grande se comparado à obra, o índice não deve ser utilizado e cada descontinuidade deve ser tratada individualmente. Quando o espaçamento for compatível com a escala de trabalho, a tabela pode ser utilizada Hoek (2011).

2.4. Estabilidade de taludes em rocha

A estabilidade de taludes em rocha é condicionada pela geometria presente entre a face (vertente) do talude e das discontinuidades que o compõem e o regime de tensões internas e externas envolvidas no contexto do talude.

Para isso existem alguns critérios simples e de notável aplicabilidade como o critério de ruptura de Mohr-Coulomb, no qual é composto por uma reta envelope que tangencia o círculo de Mohr, que representa as condições críticas de combinações de esforços principais, denominados σ_1 e σ_3 **figura 2.3** (Fiori & Carmignani, 2011). Valores positivos para σ são indicadores de compressão, enquanto negativos indicam tração.

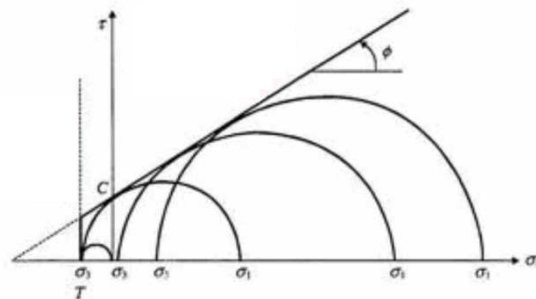


Figura 2.3: Critério de ruptura de Mohr-Coulomb. Modificado de Fiori & Carmignani (2011).

A equação da reta envelope, acima da qual deverá ocorrer ruptura, é determinada pela relação:

$$t = c + \sigma_n \operatorname{tg} \Phi$$

Onde t representa a resistência ao cisalhamento, Φ é o ângulo de atrito interno ou entre duas superfícies de interesse, c é a coesão do material e σ_n é o esforço normal que atua perpendicularmente ao plano de ruptura. A partir então, de alguns dos parâmetros, pode-se construir um gráfico semelhante ao mostrado acima, obtendo valores para os parâmetros desconhecidos.

2.4.1. Parâmetros que influenciam a estabilidade da rocha

Além das propriedades inerentes a rocha, tal como sua coesão, ângulo de atrito, grau de fraturamento, estruturas internas e parâmetros de resistência, alguns outros parâmetros também atuam na estabilidade de um talude de rocha, estes últimos são

descritos por Augusto Filho e Virgili (1998), voltados para a dinâmica ambiental brasileira: características climáticas, pluviometria, características geomorfológicas como inclinação e formato do perfil do talude, regime de águas em superfície e em subsuperfície, e características de uso e ocupação dessa área.

2.4.2. Tipos de ruptura

A partir de uma análise estrutural de taludes de rocha, é possível obter projeções estereográficas polares dos planos de descontinuidades presentes nestes. Assim, a partir da análise dessas projeções ante à face (devidamente orientada) de interesse, é possível classificar previamente tipos de ruptura que podem ou não acontecer. A essa análise geométrica de parâmetros dá-se o nome de análise cinemática.

A cinemática refere-se à movimentação de corpos, sem fazer, entretanto, referência às forças que causam o movimento (Fiori & Carmignani, 2011). A **figura 2.4** abaixo mostra as características de cada um dos quatro tipos mais comuns de ruptura. O tipo a) ruptura circular, está relacionado principalmente a solo ou rocha densamente fraturada, sendo assim excluído da análise cinemática que será discutida posteriormente. Os demais tipos de ruptura serão alvo dessa análise, ruptura planar, em cunha e tombamento de blocos.

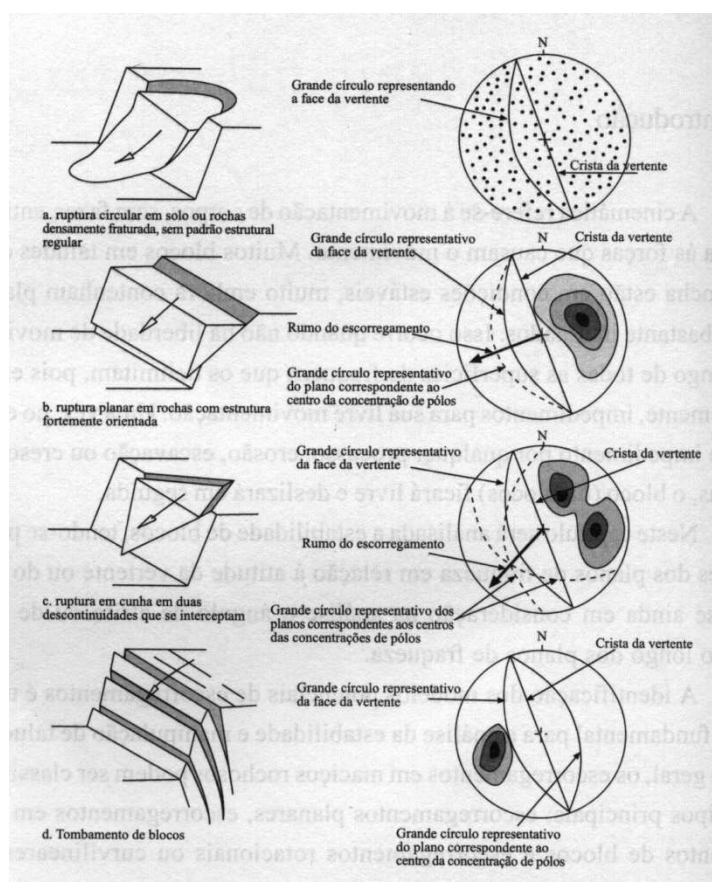


Figura 2.4. Principais tipos de deslizamento em vertentes e estereogramas de estruturas que podem dar origem a esses deslizamentos (Retirado de Fiori & Carmignani, 2011).

Rupturas planares

Escorregamentos segundo estruturas planares envolvem o deslocamento de massa rochosa ao longo de uma ou mais superfícies subparalelas, como planos de falha, planos de acamamento, planos de foliação, de juntas, etc. Para que o escorregamento possa ocorrer, essas estruturas devem ser aflorantes e inclinadas na direção da face livre da vertente a um ângulo superior ao ângulo de atrito interno e menor que o ângulo da inclinação da superfície livre da vertente. O deslizamento se dará ao longo da direção do mergulho, admitindo-se nas análises uma variação de 20 graus em torno dessa direção. Onde houver a possibilidade de ocorrência desses deslizamentos, é importante controlar a água subterrânea e superficial. (Fiori & Carmignani, 2011).

Ruptura em Cunha

Deslizamentos em cunha envolvem escorregamentos translacionais ao longo de pelo menos dois planos que se intersectam. As orientações desses dois conjuntos são críticas para o condicionamento do escorregamento em cunha, para que este ocorra, três condições devem ser observadas: a) as superfícies de deslizamento devem intersectar ou aflorar na vertente; b) a linha de intersecção dos dois planos de deslizamento deverá aflorar na vertente; c) o caimento da linha de intersecção deverá ser maior que o ângulo de atrito dos planos. (Fiori & Carmignani, 2011).

Tombamento de blocos

O tombamento de blocos envolve um mecanismo diferente de movimentação não ligado a escorregamentos, e sim a blocos individualizados que rotacionam sobre eixos fixos, tombando sobre a face livre da vertente. O tombamento de blocos depende da presença de planos estruturais bem definidos, para a análise de tombamento devem ser observadas três condições: a) deverá haver duas famílias de descontinuidades que se interceptem, inclinada uma a favor e outra contra a inclinação da vertente; b) a família contra a vertente mergulha a ângulo maior que (90°-ângulo de atrito) e a família que mergulha a favor deverá ter inclinação menor que o ângulo de atrito; c) os rumos de mergulho desses planos deverão se situar dentro de 20° do rumo de mergulho da face da vertente (Fiori & Carmignani, 2011).

2.4.3. Fator de segurança (FS)

O cálculo do fator (ou coeficiente) de segurança é um método analítico numérico baseado na teoria do equilíbrio-limite e nos modelos matemáticos de tensão e deformação com intuito de se obter um valor que expresse a estabilidade de um talude. A **tabela 2.4**, abaixo expressa o significado dado a cada valor de fator (coeficiente) de segurança.

COEFICIENTE DE SEGURANÇA (CS)	CONDIÇÃO DO TALUDE
CS < 1,0	Talude instável; caso o talude venha a ser implantado (corte ou aterro) nestas condições, deverá sofrer ruptura.
CS = 1,0	Condição limite de estabilidade associada à iminência de ruptura; também condição adotada geralmente nos cálculos de retroanálise.
CS > 1,0 (pouco maior)	Condição estável; quanto mais próximo de 1,0 for o CS, mais precária e frágil será a condição de estabilidade do talude.
CS >> 1,0 (muito maior)	Condição estável; quanto maior for o CS, menores serão as possibilidades do talude vir a sofrer ruptura quando submetido a condições críticas (percolação d'água, etc.).

Tabela 2.4. Coeficientes de segurança determinísticos e as respectivas condições de estabilidade do talude. Retirado de Carvalho (1991) *apud* Augusto Filho & Virgili (2004).

Estes coeficientes são calculados pelo quociente entre a resistência do terreno e as forças motoras ao longo de uma superfície em questão. Necessita-se antes, um preestabelecimento da geometria envolvida no talude e nas suas descontinuidades.

A adoção de um determinado valor de FS, num projeto visando à implantação ou contenção de taludes, depende de vários fatores, entre os quais se destacam as consequências potenciais associadas à instabilização do talude (área urbana, mineração, estradas, etc.), a dimensão do talude, a heterogeneidade do maciço investigado, a base de dados utilizada, etc. (Augusto Filho & Virgili, 2004).

Um exemplo aplicado de formulação do tipo equilíbrio-limite para cálculo de fator de segurança (FS) de uma ruptura planar, considerando inclusive a ação de um tirante, é apresentado na **figura 2.5**.

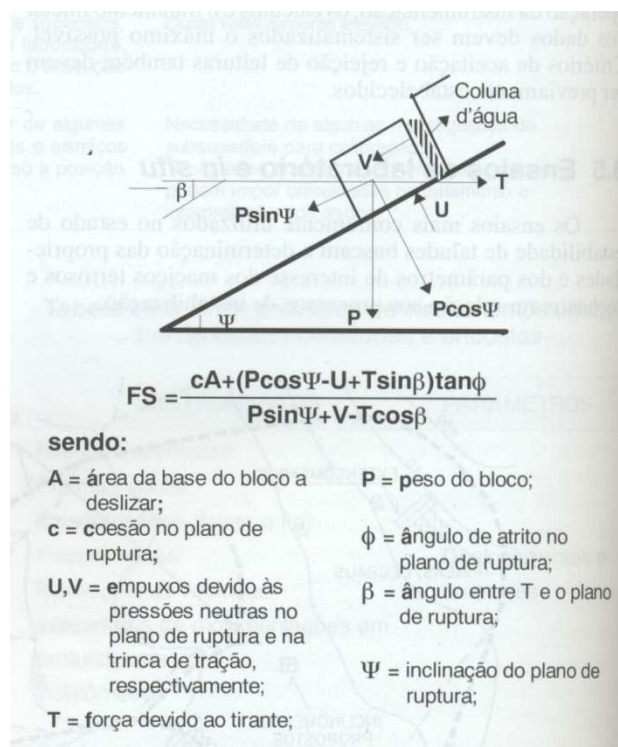


Figura 2.5: Exemplo de formulação do tipo equilíbrio-limite para o cálculo de FS de ruptura planar.
Hoek & Bray, 1981 *apud* Augusto Filho & Virgili (2004).

Os fatores de segurança mínimos a serem atingidos nas análises de estabilidade foram adotados de acordo com as recomendações da Norma Brasileira de Estabilidade de Encostas, NBR 11682/2009, que preconiza que para definição do fator de segurança (FS) deverão ser considerados os níveis de segurança contra perda de vidas humanas (Tabela 2.3) e contra danos materiais e ambientais (Tabela 2.4), e a relação entre o nível de segurança com o fator de segurança (Tabela 2.5).

Nível de Segurança	Critérios
Alto	Áreas com intensa movimentação e permanência de pessoas, como edificações públicas, residenciais ou industriais, estádios, praças e demais locais, urbanos ou não, com possibilidade de elevada concentração de pessoas Ferrovias e rodovias de tráfego intenso
Médio	Áreas e edificações com movimentação e permanência restrita de pessoas Ferrovias e rodovias de tráfego moderado
Baixo	Áreas e edificações com movimentação e permanência eventual de pessoas Ferrovias e rodovias de tráfego reduzido

Tabela 2.3. Nível de segurança desejado contra perda de vidas humanas.

Nível de Segurança	Critérios
Alto	Danos materiais: Locais próximos a propriedades de alto valor histórico, social ou patrimonial, obras de grande porte e áreas que afetem serviços essenciais Danos ambientais: Locais sujeitos a acidentes ambientais graves, tais como nas proximidades de oleodutos, barragens de rejeito e fábricas de produtos tóxicos
Médio	Danos materiais: Locais próximos a propriedades de valor moderado Danos ambientais: Locais sujeitos a acidentes ambientais moderados
Baixo	Danos materiais: Locais próximos a propriedades de valor reduzido Danos ambientais: Locais sujeitos a acidentes ambientais reduzidos

Tabela 2.4. Nível de segurança desejado contra perda de vidas humanas.

Nível de segurança contra danos materiais e ambientais	Nível de segurança contra danos a vidas humanas		
	Alto	Médio	Baixo
Alto	1,5	1,5	1,4
Médio	1,5	1,4	1,3
Baixo	1,4	1,3*	1,2

* FS adotado na pedreira.

Tabela 2.5. Fator de segurança e Nível de segurança desejado contra danos materiais, ambientais e perda de vidas humanas.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Análise estrutural

3.1.1. Levantamentos de campo (Scanline)

A prática das linhas de varredura (*scanlines*) foi adotada como primeiro e mais importante passo para a caracterização do maciço rochoso gnáissico. Assim, foram adotadas três linhas de varredura com diferentes orientações ao longo da pedreira, afim de caracterizar o maciço, em concordância com o proposto por Priest (1993).

O método de *scanlines* é um levantamento estrutural clássico da Geologia de campo, no qual são analisadas, descritas e mensuradas as descontinuidades do maciço rochoso ao longo de um segmento linear em uma face rochosa. As áreas para varredura de descontinuidades foram escolhidas mediante à representatividade na escala e no contexto do maciço rochoso em questão.

Criou-se então, uma planilha para preenchimento em campo de parâmetros inerentes à caracterização do maciço, utilizando-se o *software Microsoft Excel 2007*®, a **planilha 3.1** desenvolvida e adotada para o trabalho é apresentada abaixo, essa planilha foi criada utilizando planilhas já existentes na bibliografia, como a também proposta por Priest, e a planilha de levantamento quantitativo de descontinuidades de Magalhães e Cella (2004);

A partir da análise desta planilha de dados, aliada à utilização de projeções estereográficas, tais como serão citadas posteriormente, foi possível à separação de conjuntos de descontinuidades com geometrias e características comuns, a esses conjuntos foi dado o nome de família. Durante os trabalhos de *scanline* em campo já é possível visualizar de maneira simplificada a presença dessas famílias, porém, ao analisar os dados essa distinção em conjuntos comuns fica fortemente evidenciada.

Levantamento de Descontinuidades

[illegible]

Planilha 3.1: Planilha criada no presente trabalho para sistematizar a observação de parâmetros relevantes de um maciço rochoso qualquer.

A planilha criada durante o projeto encerra informações como, local, data e localização das *scanlines*, atitude do plano analisado, autor e número de página. A baixo da grade existe o gabarito para preenchimento, indicando por números ou siglas as características observadas em cada superfície de descontinuidade estudada.

Os parâmetros de mergulho e direção são medidos com bússola, preferencialmente do tipo *Clar*, devido a sua facilidade e rapidez para a aferição de numerosas medidas. A coluna “tipo” remete a gênese da descontinuidade, quando observada. Persistência é a continuidade (largura) da descontinuidade, quantidade de terminações visíveis, abertura da descontinuidade.

Sobre preenchimento destaca-se a natureza deste e a força (resistência) desse preenchimento de descontinuidade. Leva-se em consideração também a rugosidade da superfície descontínua, sua forma, ondulação, tamanho e amplitude, o coeficiente de rugosidade JRC proposto por Barton & Choubey (1977) é verificado, além do fluxo de água, espaçamento observado e um último campo de observações.

Assim, para as três seções foram analisadas áreas aproximadamente iguais de varredura, as áreas foram limitadas esticando-se horizontalmente uma trena com cerca de 30,0m à frente da face a ser analisada, e marcando com tinta os limites da área. Nas três análises adotou-se a altura da área como 1,50m a partir do chão, o que totaliza 45m² de análise para cada *scanline*, e conseqüentemente, 135m² somando-se todas.

A seção MB-01 foi realizada junto ao topo do talude rochoso localizado na porção NW da pedreira, a segunda seção, denominada MB-02, está situada na bancada à margem da estrada de acesso à cava da pedreira, na porção Sul, a terceira e última seção, MB-03, localiza-se na bancada superior do talude de rocha do limite leste da cava, próximo ao britador.

A localização de cada uma das seções foi levantada com GPS de mão, as coordenadas de localização de cada seção consta na **figura 3.1** abaixo, criada sobre a planta topográfica fornecida.

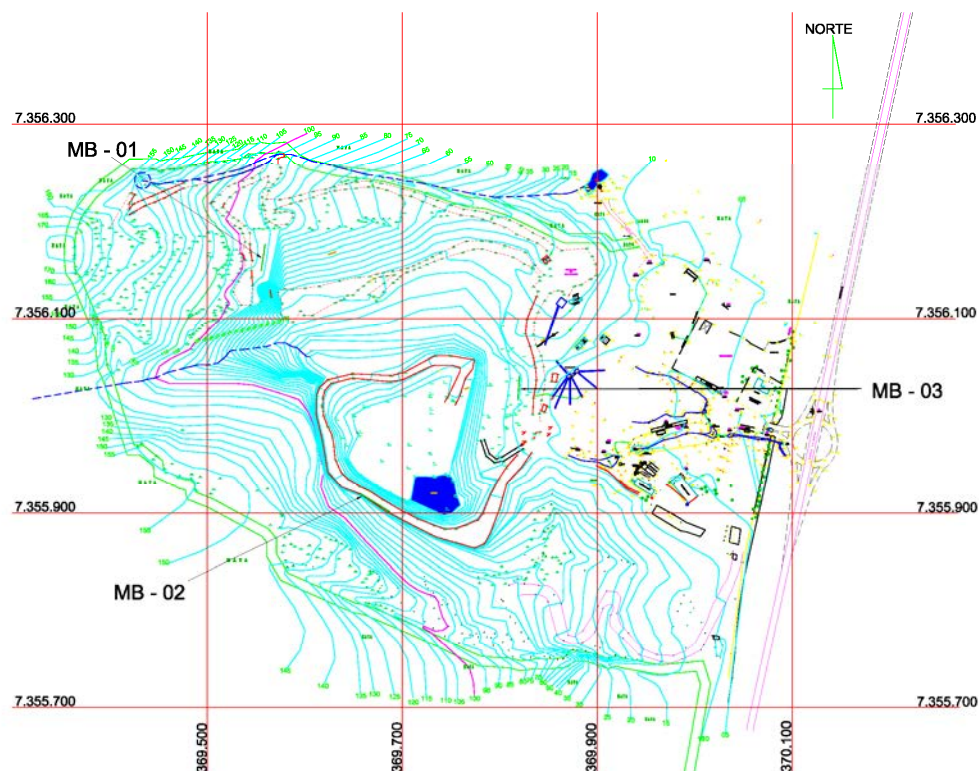


Figura 3.1: Localização dos *Scanlines* MB-01, MB-02 e MB-03.

3.1.2. Tratamento de dados

A partir dos dados obtidos nas três *scanlines* foram confeccionados estereogramas de projeção em hemisfério inferior, utilizando o *software OpenStereo* (Grohmann & Campanha, 2010)

Primeiramente foram somados os dados de descontinuidades das três *scanlines* realizadas, transformando-os em uma tabela simples de duas colunas (rumo de mergulho e mergulho) e 132 linhas relativas às 132 medidas obtidas em campo, essa tabela foi criada sob o formato computacional *.txt* (formato de entrada de dados no *software Open Stereo*).

Uma vez inseridos os dados no programa através da opção “D/D” (*dip direction/dip*), optou-se pelo rede de igual área (Schmidt-Lambert) graduada de 10 em 10 graus, afim de nela imprimir dados de pólos de planos e a densidade da concentração dessas medidas através de contornos.

Desta maneira foi possível visualizar focos distintos de maiores e menores concentrações, definindo famílias de descontinuidades e suas densidades, informações utilizadas na etapa da análise cinemática.

3.2. Caracterização geomecânica

3.2.1. Tilt Test

O ensaio denominado *tilt test* é uma estimativa preliminar de ângulo de atrito em descontinuidades, que pode ser realizado em campo afim de compor uma análise inicial das condições do maciço, o ensaio ocorre em escala métrica, pequena se comparada a grandes maciços.

O ensaio detalhado por Price (2007) é realizado a partir da amostragem de dois pedaços de rocha que contenham uma descontinuidade entre si, ambas as peças são inclinadas a partir da horizontal. O conjunto é posto sobre um plano horizontal e a inclinação do conjunto é gradativamente variada e mensurada através de um clinômetro, como observado na **figura 3.2**.

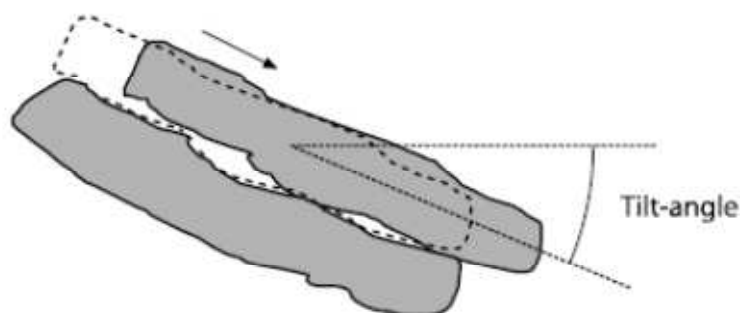


Figura 3.2 – posicionamento dos blocos para *tilt test* (retirado de Price, 2007).

Não havendo material de preenchimento nesta descontinuidade e os dois blocos originalmente formavam superfícies encaixadas de maneira sobreposta, o ângulo de inclinação obtido equivale à soma do ângulo de rugosidade em pequena escala e do ângulo de atrito da superfície do material (Price, 2007). Assim, tal teste se mostra representativo apenas em pequena escala e para situações de baixas tensões normais.

Foi realizado o ensaio de teste de rampa (*tilt test*) baseado no ensaio proposto por Price (2007). Afim de obter uma estimativa do valor angular de atrito em uma descontinuidade não preenchida que represente o maciço.

Assim, escolheu-se um bloco de rocha *in situ* para o ensaio, como observado na **figura 3.3**, antes da sua remoção a orientação foi medida em N65W / 45SW, então, o mesmo foi retirado com a ajuda de um funcionário da pedreira que utilizou marreta e talhadeira para a sua retirada. O bloco então foi levado para o galpão da oficina da pedreira.

Foram realizados 7 ensaios, para tanto uma estrutura semelhante a descrita por Price (2007) foi criada, utilizando-se uma tábua de madeira como plano inclinável, o qual erguido por uma de suas pontas utilizando-se um guincho pneumático de acionamento manual. O bloco inferior foi fixado à tabua, enquanto o superior encontrava-se em balanço (**figura 3.4**) afim de garantir que apenas o atrito entre os blocos evitasse a movimentação relativa entre os blocos.

A inclinação foi aumentada gradativamente e medida através do clinômetro de bússola tipo *Brunton*, anotando o ângulo da primeira movimentação (quando presente) denominado neste ensaio como ângulo de acomodação e o ângulo de deslizamento propriamente dito, que é quando ocorre a movimentação completa entre os blocos através da descontinuidade.



Figura 3.3: Tomada de orientação do bloco escolhido ainda *in situ*.



Figura 3.4: Estrutura montada para *tilt test* e um dos ensaios em execução

3.2.2. Análise de compressão uniaxial

A resistência a compressão uniaxial é um parâmetro essencial para o estudo de um maciço rochoso, o ensaio de compressão uniaxial é definido pela norma estabelecida pela ASTM (2007), o valor obtido nesse ensaio se refere a tensão necessária para provocar ruptura da rocha sob esforços compressivos unidimensionais.

Para o ensaio são selecionadas amostras representativas do maciço, intactas (não fraturadas), com geometria cilíndrica, onde a altura da amostra equivale aproximadamente 2,5 vezes o diâmetro da amostra. A compressão é realizada com aumento contínuo e gradativo da tensão axial empregada, deformações radiais e axiais são mensuradas até o momento da ruptura.

A tensão de ruptura é dada pela seguinte relação:

$$\sigma_c = w / A$$

onde:

σ_c = Tensão de ruptura (Pa)

w = força de ruptura (N)

A = área de carga (m²)

Para os ensaios foram utilizadas amostras intactas e cilíndricas de rocha, sem conter descontinuidade aparente, para a obtenção de amostras e para possibilitar a realização deste ensaio, foi realizada nos meses de janeiro e fevereiro de 2012 uma campanha de sondagem na pedreira pela empresa Almeida Sondas.

A campanha utilizou de sondagem rotativa em rocha com recuperação de testemunho por meio de equipamento moto-mecanizado que combina a rotação de coroa diamantada com aplicação de pressão vertical, de acordo com ABGE (1990).

O trecho amostrado para o ensaio é referente à sondagem executada nas coordenadas UTM Leste 369.621 e Norte 7.356.154, e relativa a intervalos intactos contidos entre 20,15m e 21,43m contados a partir do solo, o diâmetro do furo é NW, recuperando amostras cilíndricas com diâmetro de 54,73 mm. A **figura 3.5** mostra um dos furos de sondagem em execução na pedreira.



Figura 3.5 – Furo de sondagem rotativa com recuperação de testemunho em execução.

Uma vez obtidas as amostras, foram realizados ensaios de compressão uniaxial, com intuito de determinar parâmetros como tensão de ruptura (σ_c), módulo de deformabilidade (E) e coeficiente de Poisson, os ensaios foram realizados pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT).

Como previsto pela norma e recomendado pelo IPT, foram escolhidos trechos homogêneos não fraturados dos testemunhos de rocha, onde a altura dos cilindros fosse ao menos 2,5 vezes o diâmetro das amostras, que é de 5,46 cm. Sendo a partir daí selecionados cinco trechos com pelo menos 15,0 cm de altura que foram encaminhados ao IPT (**figura 3.6**).

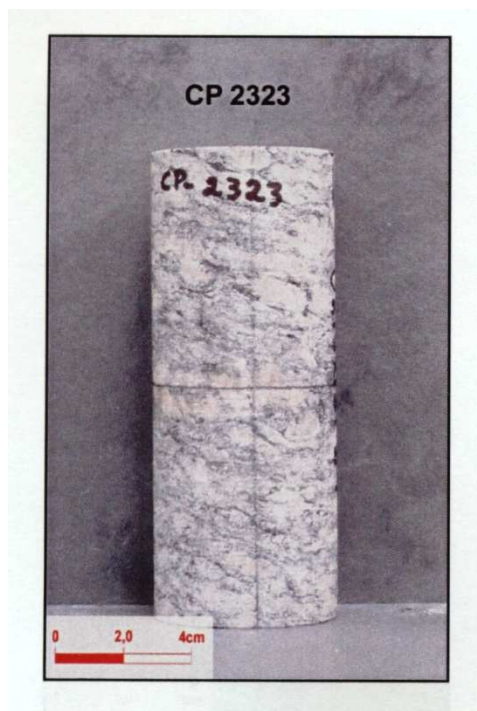


Figura 3.6: corpo de prova identificado como c.p. 2323, antes do ensaio de compressão uniaxial.

3.3. Caracterização geométrica do talude

3.3.1. Levantamento planialtimétrico

O levantamento topográfico e planialtimétrico foi fornecido pela pedreira MaxBrita, realizado pelo Agrimensor Pedro Nunes de Oliveira – CREA 5060047931 na plataforma *AutoCAD* na forma de arquivos *.dwg*. Afim de que pudessem ser manipulados durante o trabalho de escritório.

Este levantamento foi utilizado para locar pontos de sondagem, seções de *scanline*, e para confecção de perfis ao longo dos taludes, uma vez que a caracterização geométrica do talude estudado é fator de grande importância tanto na análise cinemática, quanto na análise de estabilidade, ambas expostas a seguir.

Podem ser listados a partir do levantamento planialtimétrico parâmetros geométricos importantes como direção e mergulho do talude, e do material de cobertura sobre o mesmo, e características da berma (quando presente).

Foi elaborado na plataforma *AutoCAD* um perfil perpendicular ao talude alvo de estudo neste trabalho, o perfil é observado na **figura 3.7** a seguir.

Perfil face Sul

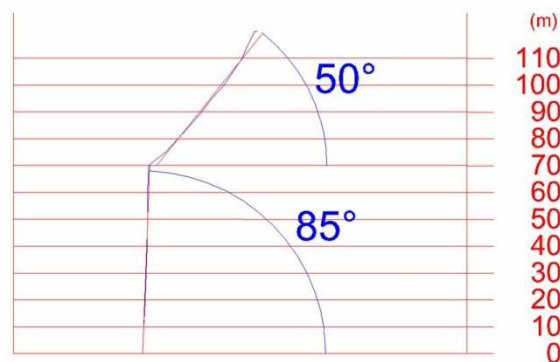


Figura 3.7: perfil perpendicular à face sul, talude (vertente) mergulhando 85° e altura de 70m, acima mergulho de 50° na mesma direção e altura de 40m.

3.4. Análise cinemática

A cinemática refere-se à movimentação de corpos, sem fazer, entretanto, referência às forças que causam o movimento (Fiori, 2004). Assim, a análise cinemática se mostra uma importante ferramenta para avaliação preliminar de estabilidade, identificando potenciais de ruptura apenas analisando o comportamento geométrico das descontinuidades, através das suas projeções em estereogramas.

Ao realizar uma análise cinemática, pode-se observar previamente a estabilidade inerente a um bloco, ou a um talude levado-se em consideração suas relações angulares. Ao analisar a dispersão das medidas polares das descontinuidades em estereogramas, é possível ainda identificar possíveis tipos de rupturas envolvidas, como pôde ser visto anteriormente no item 2.4.2.

A análise das representações estereográficas funciona como um indicador de susceptibilidade aos eventos de ruptura, funcionando como fator capaz de eliminar eventos que provavelmente não serão observados na relação do maciço rochoso em questão e a atitude da face de um talude. A relação entre a direção sob a qual um bloco pode se movimentar e a orientação do talude deve ser observada nas projeções estereográficas (Wyllie, 2004).

Desta maneira, a análise cinemática através da geometria observada em projeções estereográficas é capaz de oferecer uma boa indicação sobre as condições de estabilidade,

sem levar em conta forças envolvidas ou fatures externos como presença de água em fraturas ou perturbações geradas por vibrações no maciço.

3.4.1. Tombamento de blocos

O mecanismo para analisar a possibilidade de ocorrência é estritamente geométrico, e uma vez atendidas as premissas citadas no item 2.4.2 pode haver tombamento de bloco, a solução estereográfica comporta dados simples como direção e mergulho da vertente em questão, ângulo de atrito e a ocorrência ou não de superfícies de descontinuidades cujos polos de seus planos estejam contidos nas áreas de instabilidade potencial (Fiori & Carmignani, 2011).

3.4.2. Rupturas planares

Para o estudo de rupturas planares, faz-se necessária também à análise das projeções estereográficas, nela deve constar, as polos dos planos de descontinuidades e a vertente livre e o ângulo de atrito.

Rupturas planares estão limitadas a acontecer dentro de uma variação máxima de 20° para qualquer direção a partir o rumo de máximo mergulho da vertente, e onde ocorram planos com ângulos de mergulho maiores que o ângulo de atrito, assim é possível construir uma “janela” no estereograma que contenha medidas potencialmente instáveis, havendo famílias de descontinuidades ou poucas medidas de descontinuidade contidas nessa janela, tais medidas colocam a vertente em risco de rompimento planar.

As outras medidas de descontinuidades não contidas nessa representação de intervalo tridimensional de risco serão descartadas da análise de estabilidade posterior.

3.4.3. Rupturas em cunha

O tratamento da análise é semelhante aos descritos anteriormente, o condicionante geométrico da vertente e a análise por estereogramas das descontinuidades ante às premissas que devem ser atendidas para que haja possibilidade ruptura em cunha.

Ao analisar as famílias, as que apresentaram mergulho menor que o ângulo de atrito foram descartadas. Foi utilizada a ferramenta *daylight* do DIPS, e a partir da sua análise

foram excluídas famílias não aflorantes na vertente. Assim, o cone de atrito de 35° foi lançado no estereograma, e a medidas de grandes círculos das famílias selecionadas plotados.

A última premissa é verificada ao notar o cruzamento de dois planos dentro da área contida entre a face livre da vertente e o cone de atrito, para esses cruzamentos é realizada a análise de estabilidade.

3.5. Análise de estabilidade

De maneira simplificada, a análise de estabilidade é análise sobre o equilíbrio de forças atuantes sobre um corpo a fim de prever se o mesmo pode vir a se movimentar ou não, a análise de estabilidade é precedida pela análise cinemática, esta última define tridimensionalmente os possíveis movimentos em um talude de rocha, por exemplo.

A partir da análise cinemática, a análise de estabilidade se propõe a analisar as forças envolvidas dentro de um sistema em que há a pré-disposição à movimentação constatada através das projeções estereográficas.

Essas análises de estabilidade podem ser realizadas pelo Método do Equilíbrio-Limite com estimativa do Fator de Segurança (FS) que é a relação entre forças motoras e forças resistentes ao movimento de uma massa rochosa.

Paratanto são adotadas funções de distribuição de probabilidade para cada parâmetro, exceto para o peso específico da água, num procedimento coerente com o enfoque probabilístico que norteia este tipo de estudo. A de funções de probabilidade para os parâmetros geomecânicos implica uma análise das condições de estabilidade de taludes bem mais realista que a executada por valores médios dos parâmetros, por englobar as incertezas de determinação e a própria variabilidade geoestatística de tais parâmetros.

Adicionalmente, esse procedimento permite o cálculo da probabilidade de ruptura dos respectivos FS calculados, assim como outros parâmetros estatísticos associados, mediante o emprego do Método de Monte Carlo, que consiste na simulação de uma grande quantidade de modelos, adotando-se valores para os parâmetros sorteados segundo a distribuição probabilística adotada para cada um, resultando uma distribuição de FS.

Quanto ao método de cálculo do FS, em análises executadas através do método de equilíbrio-limite, é calculado como sendo a razão entre o módulo da resultante das forças ou momentos máximos mobilizáveis resistentes à ruptura pelo módulo da resultante das forças

ou momentos motores atuantes favoráveis à ruptura. Fatores de segurança menores que 1,00 implicam que as forças de ruptura superaram as forças resistentes.

Determinando-se a distribuição probabilística de FS, a porcentagem de valores de FS menor ou igual a 1, é a própria probabilidade de ruptura.

3.5.1. Rupturas planares

Para análise da estabilidade de rupturas planares a configuração junto à base ou em um ponto qualquer da superfície do talude pode ser representada como na Figura 3.8, abaixo.

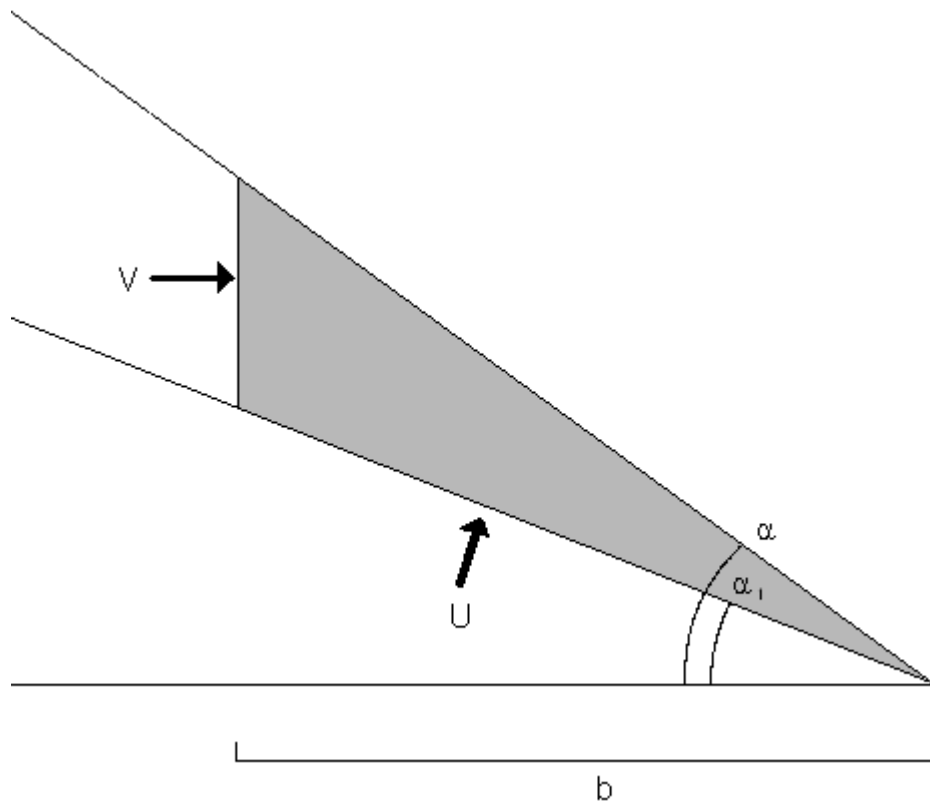


Figura 3.8. Representação da base do talude em análise.

Sendo:

α_1 : inclinação das famílias de descontinuidades críticas no talude, junto à área do escorregamento;

α : inclinação média do talude

U e V: pressões neutras máximas atuantes, respectivamente, na base da cunha de rocha definida por α_1 , e numa fenda de tração hipotética a uma distância b do pé do talude;

Assim, FS é calculado pela **equação 3.1** (Fiori & Carmignani, 2011):

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

Equação 3.1. cálculo de fator de segurança para ruptura planar.

Onde:

$$A = \frac{\cos \alpha_1}{b}$$

Equação 3.2. A: área de atuação da coesão, em unidade de profundidade.

$$W = \gamma_r . b^2 (\tan \alpha - \tan \alpha_1)$$

Equação 3.3. W: peso da cunha de rocha.

$$U = \frac{\gamma_h}{2} . b^2 (\tan \alpha - \tan \alpha_1)$$

Equação 3.4. U: pressão neutra na base da cunha.

$$V = \frac{\gamma_h}{2} . [b(\tan \alpha - \tan \alpha_1)]^2$$

Equação 3.5. V: pressão neutra na fenda de tração.

Sendo:

c: coesão aparente das discontinuidades, atuando numa área A;
 φ : ângulo de atrito entre as discontinuidades; e
 γ_r e γ_h : peso específico da rocha e da água, respectivamente.

A fenda de tração pode ser formada pelas discontinuidades subverticais, enquanto as discontinuidades de menor mergulho podem formar a base sobre a qual a cunha pode ser formada.

São consideradas as famílias com maior mergulho aparente, projetado na seção perpendicular à maior inclinação dos taludes, mediante a **equação 3.6**:

$$i' = \arcsen[\cos(p - s) \cdot \sen i]$$

Equação 3.6. Mergulho aparente, onde: i' : ângulo de mergulho aparente das descontinuidades; p : azimute da direção do mergulho do talude; s : azimute da direção das descontinuidades; e i : ângulo de mergulho real da descontinuidade.

Para a análise de estabilidade de talude na face sul da pedreira, mediante a risco de rupturas planares, foi utilizado o *software RocPlane*, o qual apresenta realiza cálculos de fator de segurança mediante a alimentação do mesmo sob três aspectos: geométrico, de resistência e de tensões envolvidas.

No que diz respeito à geometria, os dados de mergulho, altura e direção do talude foram observados a partir do levantamento planialtimétrico e de perfil construído a partir deste (**figura 3.7**). A densidade da rocha foi adotada $2,7 \text{ t/m}^3$, o ângulo de mergulho de cada família foi obtido através das projeções estereográficas e a ondulação foi calculada como equivalente ao desvio padrão das médias dos mergulhos da família em questão.

No aspecto da resistência, utilizou-se o valor obtido no ensaio de compressão uniaxial, a classificação GSI obtida em campo, a constante de rocha intacta adotada foi a mais conservadora possível para gnaiss, ou seja, $m_i=23$, fator de perturbação 1,0 relativo às cavas abertas com desmonte a fogo.

E relativamente às forças, foi levado em consideração a pressão de água em função da porcentagem de saturação do talude, determinando assim, quais são os limites seguros a partir da altura de coluna d'água (que pode ser medida através de poços e medidores de nível d'água).

3.5.2. Rupturas em cunha

A análise de ruptura em cunha de um talude no qual dois ou mais sistemas de descontinuidades isolam porções da rocha é um tema bastante complexo. Na literatura são observados diversas abordagens, em geral complexa, envolvendo análises bidimensionais e tridimensionais para o tema. Hoek e Bray (1981) oferecem variedade de técnicas para a análise da ruptura em cunha, com uso de ábacos e estudo de vetores para o cálculo de estabilidade. A análise rigorosa é considerada complexa do ponto de vista matemático e por isso é recomendado o uso de métodos computacionais, que permite levar em consideração variações da pressão da água e a coesão ao longo dos planos de escorregamento, fornecendo um valor mais preciso do fator de segurança de uma vertente. A equação a seguir apresenta o cálculo básico do Fator de segurança para rupturas em cunha.

$$F_s = \frac{(R_a + R_b) \times \operatorname{tg} \phi}{P \times \operatorname{sen} i}$$

Equação 3.7. Equação geral para F_s para rupturas em rocha. Onde: R_a e R_b são reações normais nos planos A e B; i é o ângulo formado pela intersecção desses dois planos com a horizontal; e ϕ é o ângulo de atrito nos planos A e B.

Neste trabalho será utilizado soluções em computador com uso da metodologia de análise de Hoek e Bray (1981). Nesta metodologia as equações a seguir são utilizadas na resolução do problema.

$$F_s = \frac{3}{\gamma H} (C_A X + C_B Y) + \left(A - \frac{\gamma_a}{2\gamma} X \right) \operatorname{tg} \phi_A + \left(B - \frac{\gamma_a}{2\gamma} Y \right) \operatorname{tg} \phi_B$$

Equação 3.8. Equação para F_s para rupturas em cunha em rocha com talude, parâmetros geotécnicos e presença de água. Onde: C_a e C_b representam as resistências coesivas nos planos A e B; ϕ_A e ϕ_B são os ângulos de atrito nos planos A e B; γ é o peso específico da rocha; γ_a é o pesos específico da água; H é a altura da cunha; e X, Y, A e B são fatores adimensionais que dependem da geometria.

$$X = \frac{\operatorname{sen} \theta_{24}}{\operatorname{sen} \theta_{45} \cos \theta_{2.na}}$$

$$Y = \frac{\operatorname{sen} \theta_{13}}{\operatorname{sen} \theta_{35} \cos \theta_{1.nb}}$$

$$A = \frac{\cos \Psi_a - \cos \Psi_b \cos \theta_{na.nb}}{\operatorname{sen} \Psi_5 \operatorname{sen}^2 \theta_{na.nb}}$$

$$B = \frac{\cos \Psi_b - \cos \Psi_a \cos \theta_{na.nb}}{\operatorname{sen} \Psi_5 \operatorname{sen}^2 \theta_{na.nb}}$$

Equação 3.9 a 3.13. Equações de fatores para F_s (equação 3.8). Onde: Ψ_a e Ψ_b representam os mergulhos dos planos A e B; e Ψ_5 é o caimento da intersecção dos planos A e B. A posição dos demais ângulos. A **Figura 3.9.**

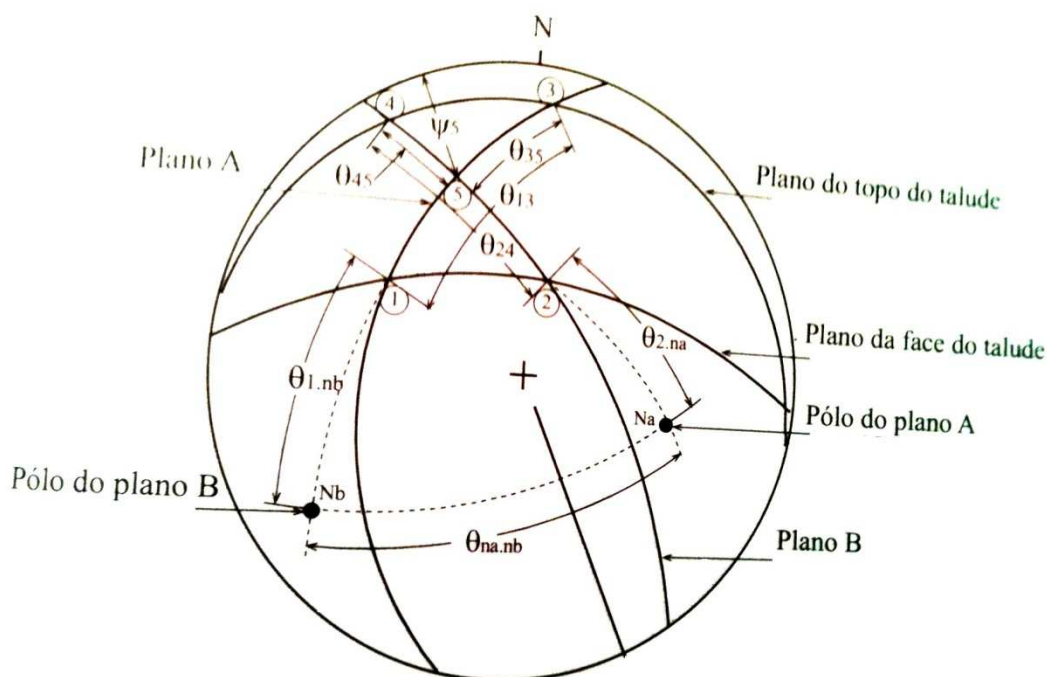


Figura 3.9. Estereograma apresentando os parâmetros a entrar no cálculo de ruptura em cunha (extraído de Fiori & Carmignani 2011).

Para a análise de estabilidade de talude na face sul da pedreira, mediante a risco de rupturas em cunha, foi utilizado o *software Swedge*, que semelhante ao citado no item anterior, realiza cálculos de fator de segurança mediante a alimentação do mesmo sob aspecto geométrico do talude, atitude das famílias de descontinuidades, coesão, ângulo de atrito, e tensões envolvidas.

O programa é alimentado com as feições geométricas do talude, densidade da rocha, com a direção e mergulho de duas famílias que serão analisadas, e ângulo de atrito, todos estes fatores já conhecidos pelos métodos aplicados anteriormente no trabalho.

No caso de análise da formação de cunhas, o software permite apenas a utilização de parâmetros geomecânicos de acordo com os critérios de Mohr-Coulomb, assim a coesão da rocha foi adotada através do *software RocLab* a partir dos valores já conhecidos por meio dos critérios geomecânicos de Hoek-Brown utilizados neste estudo, neste caso a coesão estimada e utilizada para as contas foi de 69 ton/m². E à semelhança da análise para planos, é possível alterar a porcentagem de saturação de água e avaliar a interferência da coluna d'água no Fator de Segurança.

4. RESULTADOS

4.1. Análise estrutural

4.1.1. Análise estereográfica

A soma entre as observações de campo e análise das *scanlines* em projeções estereográficas possibilitou a separação das discontinuidades em famílias, assim, são apresentados a seguir as projeções estereográficas das famílias.

Ao analisar a projeção de todos os 132 pólos de planos de discontinuidades medidos, nota-se áreas de concentração de pólos. A maior concentração de polos refere-se às foliações da rocha (gnáissica), uma vez que as descrições de campo para tais medidas remetiam a essa característica genética, os demais focos de concentração de discontinuidades foram chamados de família 1, família 2, família 3, família 4-a, família 4b e família 5, estas últimas sem distinção genética.

A seguir estão expostos as projeções estereográficas geradas a partir das seções analisadas:

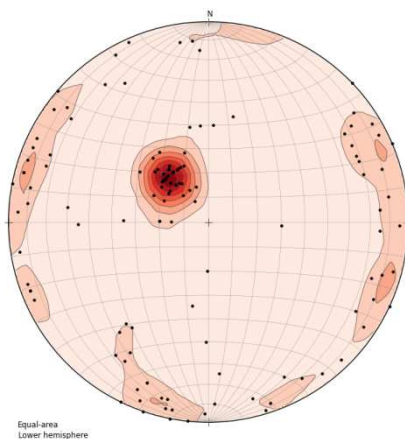


Figura 4.1. Estereograma com representação de concentração das polares aos planos das discontinuidades das três seções levantadas

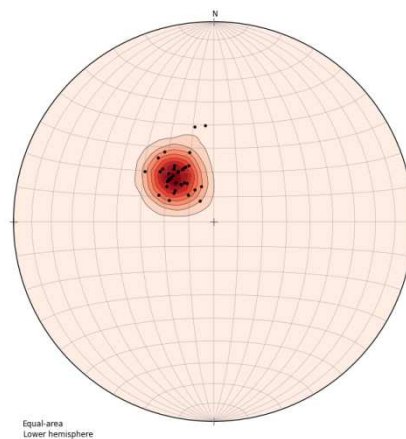


Figura 4.2. Estereograma com representação polar das discontinuidades de foliação. Atitude da família: 138/25.

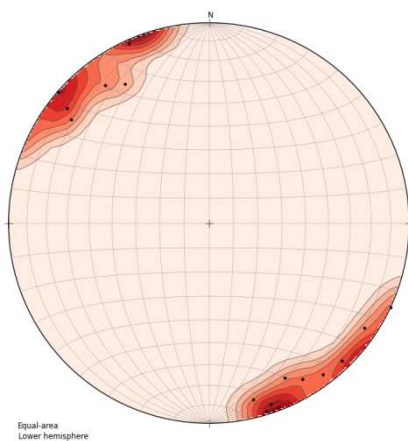


Figura 4.3. Estereograma com representação polar das fraturas da família 1. Atitude da família: 351/87.

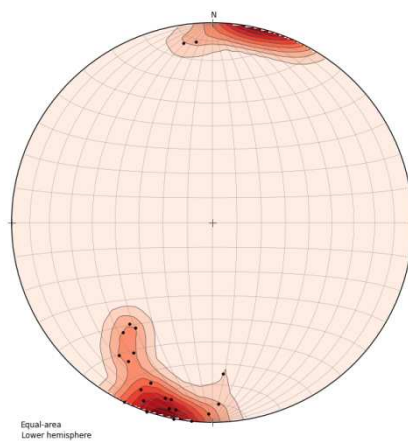


Figura 4.4. Estereograma com representação polar das fraturas da família 2. Atitude da família: 016/83.

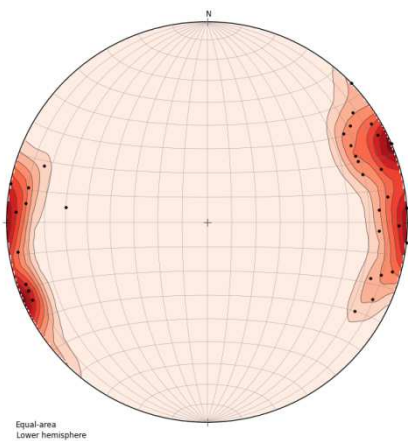


Figura 4.5. Estereograma com representação polar das fraturas da família 3. Atitude da família: 247/81.

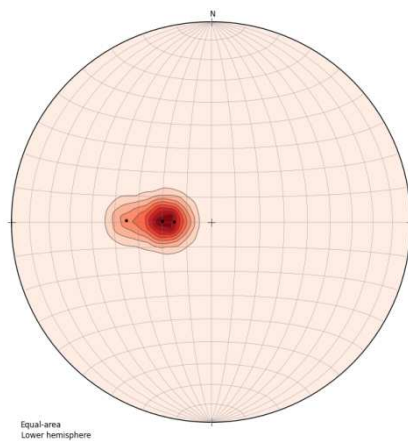


Figura 4.6. Estereograma com representação polar das fraturas da família 4a. Atitude da família: 093/20.

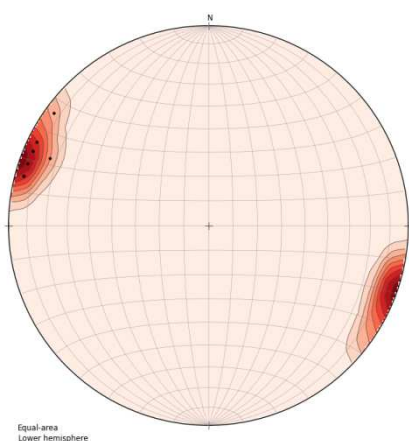


Figura 4.7. Estereograma com representação polar das fraturas da família 4b. Atitude da família: 111/86.

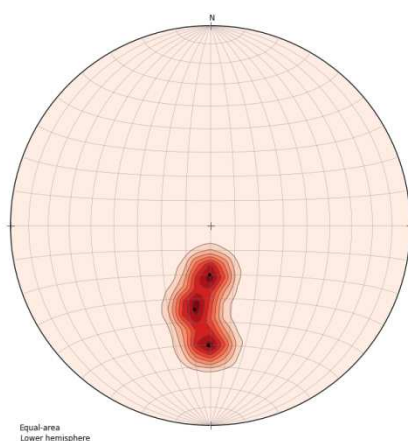


Figura 4.8. Estereograma com representação polar das fraturas da família 5. Atitude da família: 005/35.

4.1.1. Análise das scanlines

As três linhas de *scanlines* foram realizadas segundo a descrição do capítulo anterior. A seguir são e apresentadas as **figuras 4.9, 4.10 e 4.11**, compostas a partir das fotografias retiradas durante os *scanlines*. Os resultados dos três *scanlines* foram tabelados e são apresentados no **ANEXO X**



Figura 4.9: *Scanline* MB-01, perfil S-N subvertical, largura entre as marcações em tinta de 30m.



Figura 4.10: *Scanline* MB-02, perfil ESE-WNW subvertical, largura entre as marcações em tinta de 30m.



Figura 4.11: *Scanline* MB-03, perfil NNE-SSW subvertical, largura entre as marcações em tinta de 30m.

A localização das seções realizadas pode ser observada sobre a planta topográfica da pedreira na **figura 3.1**, exposta no capítulo anterior.

A **tabela 4.1** a seguir, apresenta as famílias (estabelecidas no item 4.1), e sua proporção relativa para cada perfil (todos subverticais).

Perfil	Orientação do perfil	Foliação (n)	Fam 1		Fam 2		Fam 3		Fam 4a		Fam 4b		Fam 5	
			Nº	%	Nº	%	Nº	%	Nº	%	Nº	%	Nº	%
MB-01	N-S	27	14	35,9	9	23,1	13	33,3	0	0	0	0	3	7,69
MB-02	N70W	8	1	3,57	15	53,6	12	42,9	0	0	0	0	0	0
MB-03	N25E	6	0	0	0	0	10	45,5	5	22,7	7	31,8	0	0
TOTAL	-	41	15		24		35		5		7		3	

Tabela 4.1. Apresentação das estruturas classificadas em família para cada perfil. Onde n=número de ocorrência, e a % relativa sobre o total de descontinuidades, excluindo a foliação.

4.2. Caracterização geomecânica

4.2.1. Teste de rampa (*tilt test*)

A realização do teste de rampa se dividiu em 7 ensaios em sequência, afim de quantificar, ainda que de forma simplificada, o ângulo de atrito inerente ao material rochoso da pedreira. Os resultados do ensaio de teste de rampa (*tilt test*) estão descritos abaixo na **tabela 4.2.**

Ensaio	Ângulo de Acomodação	Ângulo de Atrito
1	35°	42°
2	-	34°
3	36°	37°
4	-	38°
5	-	38°
6	-	37°
7	34°	38°

Os ensaios 1, 3 e 7 apresentaram movimentação anterior ao momento de movimentação completa, interpretados como um ângulo de acomodação entre os blocos separados por descontinuidades, essa movimentação não superou o ângulo de atrito no momento em que ocorreu, sendo o ângulo final anotado na coluna seguinte. Os ensaios 2, 4, 5 e 6 não apresentaram essa movimentação anterior.

Ao analisar os resultados é notável a constante repetição de valores angulares entre 37° e 38°, assim os resultados obtidos nos dois primeiros ensaios foram descartados por destoarem dos demais, embora a moda entre os 5 últimos ensaios aponte para o valor de 38°, conservadoramente foi adotado 35° como sendo valor de referência para ângulo de atrito.

4.2.2. Ensaio de compressão uniaxial

Os resultados obtidos pelo ensaio realizado pelo IPT nos corpos de prova selecionados estão expostos na **tabela 4.3** a seguir.

A partir destes resultados para compressão uniaxial, adotou-se cautelosamente, o menor valor para tensão de ruptura. Assim, foi adotado o valor de 99,71MPa como sendo tensão compressiva uniaxial capaz de provocar ruptura no maciço rochoso intacto e são.

Amostra	Profundidade		Corpo de Prova										
Furo/Identificação			Nº	Diâmetro (cm)	Altura (cm)	Área (cm²)	Velocidade de onda P (m/s)	Força de ruptura (kN)	Tensão de ruptura (Mpa)	Módulo de deformação		Coeficiente de Poisson	
	Topo (m)	Base (m)								Secante (Mpa)	Tangente (Mpa)	Secante	Tangente
Amostra 3-4	20,15	20,3	2323	5,46	14,06	23,404	5559	233,35	99,71	65424	60982	0,25	0,35
Amostra 9-10	20,57	20,72	2324	5,46	14,06	23,418	5558	249,85	106,69	64582	64078	0,26	0,33
Amostra 11-12	20,76	20,91	2325	5,46	14,07	23,43	5539	283,86	121,15	72721	59977	0,24	0,27
Amostra 13-14	21,07	21,22	2326	5,46	14,06	23,43	5558	275,78	117,7	65903	61625	0,21	0,27
Amostra 15-16	21,28	21,43	2327	5,46	14,06	23,421	5558	262,31	112	77132	66270	0,27	0,37

Tabela 4.3. Resultados dos ensaios de compressão uniaxial com medidas de deformação e coeficiente de Poisson

4.2.3. Classificação segundo critério GSI

A classificação do maciço segundo o critério GSI (Geological strength index) para rochas fraturadas de Hoek (1994) foi realizada a partir do observado nas faces rochosas dos *scanlines* e, além disso, do que foi visto nos demais trabalhos de campo desenvolvidos na pedreira, uma vez que por estar em atividade, a pedreira oferece um gigantesco volume de rocha aflorante.

Assim, classificou-se a rocha como sendo de estrutura fragmentada à muito fragmentada, e suas condições superficiais como sendo boas à regulares. A **figura 4.12**, abaixo mostra o campo determinado sobre a tabela de classificação pelo critério GSI.

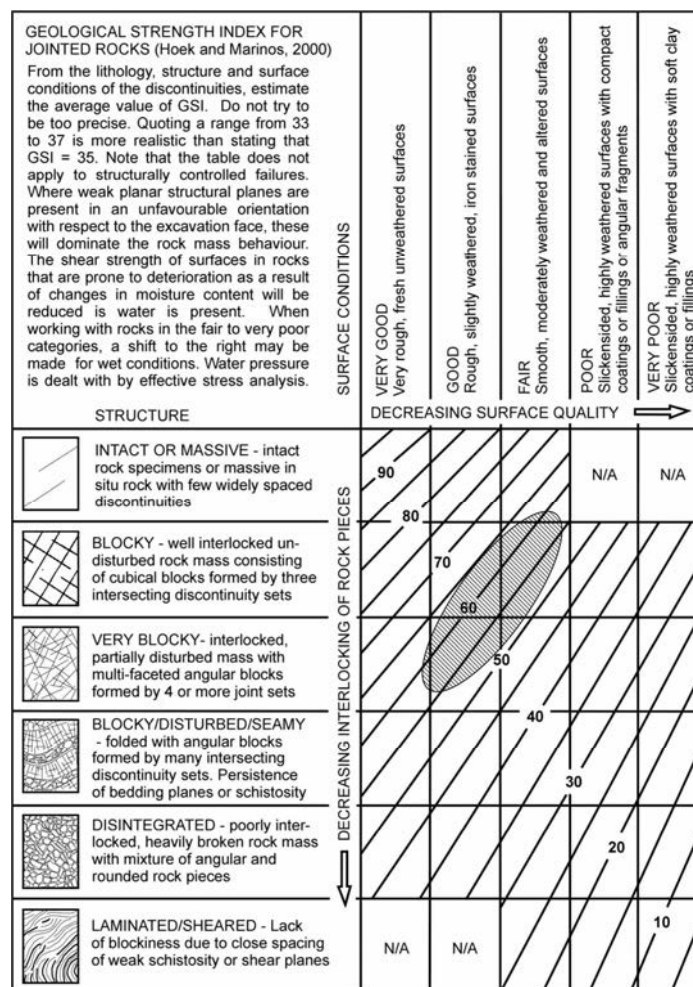


Figura 4.12: campo de classificação do maciço rochoso marcado pela área hachurada, índice GSI adotado: 55.

4.3. Análise cinemática

Todas as análises aqui expressas levam em consideração a vertente sul da pedreira, com direção 20/85 (N110/85NE), e ângulo de atrito de 35°.

4.3.1. Tombamento de blocos

A partir do método apresentado foi realizado a análise cinemática para tombamento de blocos. Foi elaborado um estereograma contendo todas os polos de descontinuidades obtidos nas *scanlines*, e nele inseridas duas janelas de potencial instabilidade para tombamento de blocos. As janelas levam em consideração a direção e mergulho da vertente, ângulo de atrito e uma variação de 10° a partir no rumo de máximo mergulho da vertente. Assim foi criada a **figura 4.13**.

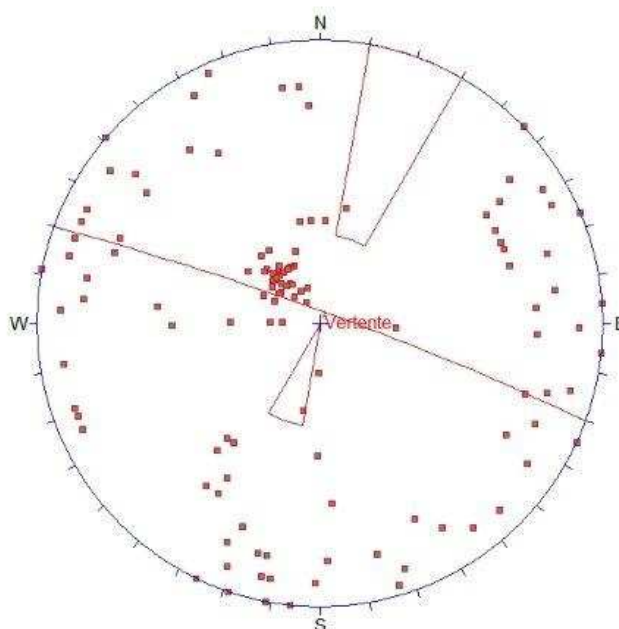


Figura 4.13: Representando janelas de instabilidade para risco de tombamento de blocos.

Sob uma perspectiva cautelosa, existe uma combinação passível de risco entre uma medida de foliação discrepante do seu comportamento regular e uma medida relativa à família 5. Ainda que seja pouco provável a ocorrência de tombamento de blocos, a existência de uma combinação de risco não permite o descarte da possibilidade de que ocorra um tombamento de bloco. Desta maneira, recomenda-se que os taludes dessa orientação sejam verificados quanto a presença de estruturas da família 5, as *scanlines* MB-01 e 03, são relativamente perpendiculares à vertente e a família 5, e de acordo com a tabela 4.1 a frequência relativa de ocorrência desta família pode ser considerada baixa.

4.3.2. Rupturas planares

Valendo-se da rotina proposta, foi realizada a análise cinemática para rupturas planares. Criou-se através do DIPS um estereograma contendo as polares obtidas nas *scanlines*, e nele inserida a janela de potencial instabilidade para rupturas planares. A janela leva em consideração a direção e mergulho da vertente, ângulo de atrito, ângulo de mergulho menor que o da vertente e uma variação de 20° a partir no rumo de máximo mergulho da vertente. Assim foi criada a **figura 4.14**.

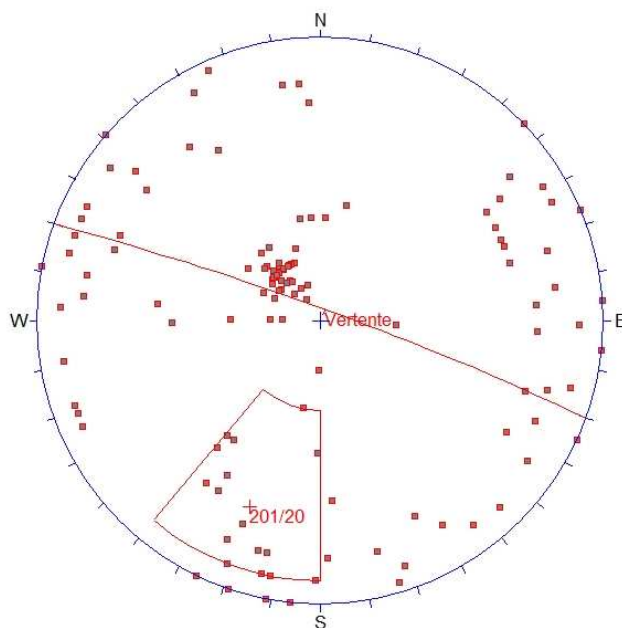


Figura 4.14: Representando janela de instabilidade para risco de ruptura planar. Atitude referência para as medidas contidas na janela: 201/20 (ou seja, plano 021/70)

Das 16 polares contidas na janela, 14 correspondem a família 2 e duas a família 5, com intuito de embasar melhor a análise de estabilidade futura, resultados mais parecidos foram reunidos em três grupos, com atitude de referência (já transformados em polares de planos): 005/42, 035/68 e 017/81.

Da análise cinemática é possível então concluir que na vertente em questão, a foliação gnáissica não gera risco de ruptura planar, bem como as famílias de descontinuidades 1, 3, 4-a, e 4b. Ficando estas, fora da análise de estabilidade.

4.3.3. Rupturas em cunha

Para a análise cinemática de rupturas em cunha foram inseridas individualmente o conjunto de polos das famílias, selecionando assim as que apresentaram no mínimo uma medida polar no campo de possibilidade de interceptar outra estrutura planar, dentro das

condições estabelecidas no método (item 3.5.2), essa rotina possibilitou a exclusão das famílias 3, 4-b e a foliação.

A partir disso, foi traçada a vertente, o cone de atrito, e as medidas dos grandes círculos para as famílias selecionadas, com intuito de visualizar quais cruzamentos entre as famílias se interceptam dentro do cone de atrito, a favor do mergulho da vertente, assim foi gerada a **figura 4.15**.

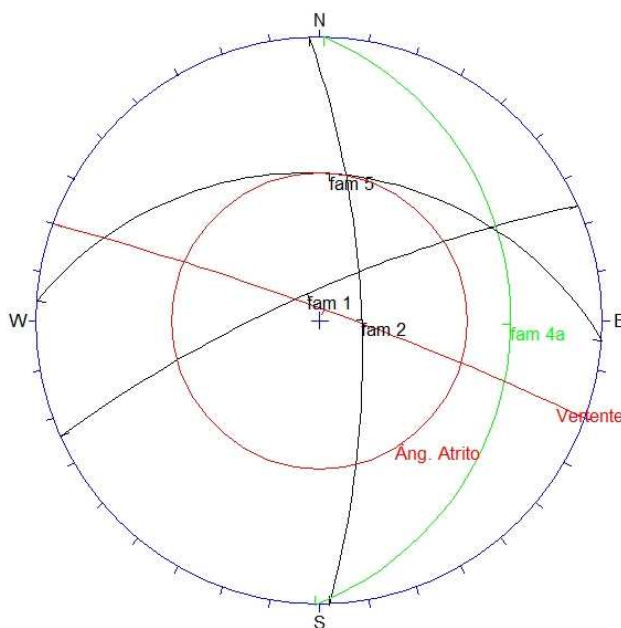


Figura 4.15: Representando as famílias possivelmente formadoras de cunha na vertente.

A partir da **figura 4.15** foi possível também excluir a família 4-a, a qual apresenta mergulho menor que o ângulo de atrito, além disso indica duas interseções a serem analisadas na análise de estabilidade: o cruzamento entre as famílias 2 e 5 e o cruzamento entre as famílias 1 e 2, este último aparentemente mais suscetível à ruptura.

4.4. Análise de estabilidade do talude

4.4.1. Tombamento de blocos

A análise cinemática de tombamento de blocos é suficiente para caracterizar a presença ou não de risco na vertente analisada, uma vez que seus parâmetros são geométricos e não numéricos, assim, a análise de estabilidade não se aplica para tombamento de blocos. Contudo os resultados da análise cinemática, frente a baixa frequências da família 5, pode se considerar o talude estável.

4.4.2. Rupturas planares

Foram geradas 4 análises de estabilidade através do *software RocPlane*, de acordo com a separação proposta pela análise cinemática: análise total dos pólos, e 3 subdivisões dentro deste.

Os dados foram organizados sob a forma de tabelas, a fim de apresentar os dados que alimentaram a análise de estabilidade via *software* e o Fator de Segurança (FS) calculado para cada análise. O modelo de resistência ao cisalhamento escolhido foi Hoek-Brown Generalizado (seguindo a escolha prévia feita pelo trabalho original da consultoria), a baixo seguem as tabelas e o resultado comentado de cada uma delas.

Planar Total (considerando a concentração de todos os polos possíveis de ruptura planar)

Planar Total - drenado		Planar Total - 46% Saturado	
Mergulho da vertente (°)	85	Mergulho da vertente (°)	85
Altura da vertente (m)	70	Altura da vertente (m)	70
Densidade (t/m ³)	2,7	Densidade (t/m ³)	2,7
Mergulho do plano analisado (°)	70	Mergulho do plano analisado (°)	70
Ondulação (°)	10	Ondulação (°)	10
Mergulho da face acima (°)	50	Mergulho da face acima (°)	50
Rest. Comp. Uniaxial (t/m ²)	10167,6	Rest. Comp. Uniaxial (t/m ²)	10167,6
Constante de rocha intacta mi	23	Constante de rocha intacta mi	23
GSI	55	GSI	55
Fator de perturbação	1	Fator de perturbação	1
Porcentagem de Saturação (%)	0	Porcentagem de Saturação (%)	46
Fator de Segurança	1,95	Fator de Segurança	1,3

Ao analisar todas as descontinuidades contidas na janela de instabilidade para rupturas planares geradas na análise cinemática, nota-se fatores de segurança satisfatórios acima de 1,3 para condições de saturação de água inferiores a 46%.

Para que se atinja esses 46% de saturação é necessário que a coluna d'água exceda os 50m de altura, algo passível de monitoramento através de medições de nível de água na pedreira. Medidas estruturais como implantação de drenos podem contribuir com a segurança do talude.

Ruptura planar na concentração de polo (017/81)

Planar (017/81) - drenado	
Mergulho da vertente (°)	85
Altura da vertente (m)	70
Densidade (t/m³)	2,7
Mergulho do plano analisado (°)	80
Ondulação (°)	10
Mergulho da face acima (°)	50
Rest. Comp. Uniaxial (t/m²)	10167,6
Constante de rocha intacta mi	23
GSI	55
Fator de perturbação	1
Porcentagem de Saturação (%)	0
Fator de Segurança	3,32

Planar (17/81) – 26% saturado	
Mergulho da vertente (°)	85
Altura da vertente (m)	70
Densidade (t/m³)	2,7
Mergulho do plano analisado (°)	80
Ondulação (°)	10
Mergulho da face acima (°)	50
Rest. Comp. Uniaxial (t/m²)	10167,6
Constante de rocha intacta mi	23
GSI	55
Fator de perturbação	1
Porcentagem de Saturação (%)	26
Fator de Segurança	2,84

. Para o conjunto acima, o fator de segurança em meio drenado é superior ao calculado para a análise total 3,32. Ainda neste caso, o *software* apresentou algumas limitações, uma vez que realizava o cálculo do fator de segurança apenas até o limite de 26% de saturação, para saturações superiores a esta, neste caso, não foi possível determinar o fator de segurança.

Ruptura planar na concentração de polo (035/59)

Planar (035/59) - drenado	
Mergulho da vertente (°)	85
Altura da vertente (m)	70
Densidade (t/m³)	2,7
Mergulho do plano analisado (°)	59
Ondulação (°)	5
Mergulho da face acima (°)	50
Rest. Comp. Uniaxial (t/m²)	10167,6
Constante de rocha intacta mi	23
GSI	55
Fator de perturbação	1
Porcentagem de Saturação (%)	0
Fator de Segurança	2,02

Planar (35/59) - 47% saturado	
Mergulho da vertente (°)	85
Altura da vertente (m)	70
Densidade (t/m³)	2,7
Mergulho do plano analisado (°)	59
Ondulação (°)	5
Mergulho da face acima (°)	50
Rest. Comp. Uniaxial (t/m²)	10167,6
Constante de rocha intacta mi	23
GSI	55
Fator de perturbação	1
Porcentagem de Saturação (%)	0
Fator de Segurança	1,29

Semelhantemente à análise total, este conjunto apresenta valores de fator de segurança acima de 1,3 para condições de saturação inferior a 46%.

Ruptura planar na concentração de polo (005/42)

Planar (005/42) - drenado		Planar (5/42) - 100% saturado	
Mergulho da vertente (°)	85	Mergulho da vertente (°)	85
Altura da vertente (m)	110	Altura da vertente (m)	110
Densidade (t/m³)	2,7	Densidade (t/m³)	2,7
Mergulho do plano analisado (°)	42	Mergulho do plano analisado (°)	42
Ondulação (°)	5	Ondulação (°)	5
Mergulho da face acima (°)	0	Mergulho da face acima (°)	0
Rest. Comp. Uniaxial (t/m²)	10167,6	Rest. Comp. Uniaxial (t/m²)	10167,6
Constante de rocha intacta mi	23	Constante de rocha intacta mi	23
GSI	55	GSI	55
Fator de perturbação	1	Fator de perturbação	1
Porcentagem de Saturação (%)	0	Porcentagem de Saturação (%)	0
Fator de Segurança	2,38	Fator de Segurança	1,75

Dentro das três subdivisões analisadas, está confere os maiores valores de fator de segurança, onde num caso extremo em condições de saturação total, não deverá ocorrer ruptura planar.

Vale ressaltar que, nesse último caso, foi utilizada altura total da vertente de 110m e mergulho da face de cima como horizontal, uma vez que ao analisar um plano com mergulho 42° sob um mergulho de face superior de 50° não ocorre um fechamento geométrico que proporcione o cálculo do fator de segurança.

4.4.3. Rupturas em cunha

Para análise da estabilidade do talude mediante rupturas em cunha, foram realizadas a análise de duas combinações sugeridas pela análise cinemática: a) interceptação das famílias 2 e 5; b) interceptação das famílias 1 e 2. A **tabela 4.5** apresenta resumidamente os resultados obtidos.

Família A	Parâmetros família A (°; t/m²)	Família B	Parâmetros família B (°; t/m²)	FS seco	Saturação em água (%)	F.S.	Observação
F2 (88/73)	Ø=35°; coesão 69	F1 (336/78)	Ø=35°; coesão 69	6,70	79	2,67	Acima de 80% erro de calculo
F2 (88/73)	Ø=35°; coesão 69	F5 (4/35)	Ø=35°; coesão 69	2,80	-	-	Com 100% FS=2,48

Tabela 4.5: Resumo dos resultados da análise de estabilidade para rupturas em cunha.

Abaixo seguem as tabelas com os dados que alimentaram cada análise de ruptura em cunha, seus fatores de segurança calculados e comentários.

Família 2 x Família 5

Cunha F2 x F5 - drenado		Cunha F2 x F5 - 100% saturado	
Mergulho da vertente (°)	85	Mergulho da vertente (°)	85
Rumo mergulho da vertente (°)	20	Rumo mergulho da vertente (°)	20
Altura da vertente (m)	110	Altura da vertente (m)	110
Densidade (t/m³)	2,7	Densidade (t/m³)	2,7
Direção mergulho set 1 (°)	88	Direção mergulho set 1 (°)	88
Mergulho set 1 (°)	73	Mergulho set 1 (°)	73
Direção mergulho set 2 (°)	4	Direção mergulho set 2 (°)	4
Mergulho set 2 (°)	35	Mergulho set 2 (°)	35
Coesão (t/m²)	69	Coesão (t/m²)	69
Ângulo de atrito (°)	35	Ângulo de atrito (°)	35
Mergulho da face acima (°)	50	Mergulho da face acima (°)	50
Direção da face acima (°)	20	Direção da face acima (°)	20
Porcentagem de Saturação (%)	0	Porcentagem de Saturação (%)	0
Fator de Segurança	2,8	Fator de Segurança	2,48

A interceptação das duas famílias apresenta um mergulho de 35°, mesmo valor utilizado como sendo de ângulo de atrito, assim, dificilmente geraria risco de ruptura neste talude. Os valores calculados para valor de segurança denotam isso, sendo igual a 2,48 mesmo em condição de saturação total.

Família 2 x Família 1

Cunha F2 x F1 - drenado		Cunha F2 x F1 - 79% saturado	
Mergulho da vertente (°)	85	Mergulho da vertente (°)	85
Rumo mergulho da vertente (°)	20	Rumo mergulho da vertente (°)	20
Altura da vertente (m)	110	Altura da vertente (m)	110
Densidade (t/m³)	2,7	Densidade (t/m³)	2,7
Direção mergulho set 1 (°)	88	Direção mergulho set 1 (°)	88
Mergulho set 1 (°)	73	Mergulho set 1 (°)	73
Direção mergulho set 2 (°)	336	Direção mergulho set 2 (°)	336
Mergulho set 2 (°)	78	Mergulho set 2 (°)	78
Coesão (t/m²)	69	Coesão (t/m²)	69
Ângulo de atrito (°)	35	Ângulo de atrito (°)	35
Mergulho da face acima (°)	50	Mergulho da face acima (°)	50
Direção da face acima (°)	20	Direção da face acima (°)	20
Porcentagem de Saturação (%)	0	Porcentagem de Saturação (%)	79
Fator de Segurança	6,7	Fator de Segurança	2,48

Nessa segunda análise entre famílias são observado valores de fator de segurança bastante satisfatórios até 79% de saturação em água, para valores acima disso, o *software* se mostra limitado, não realizando cálculos de fator de segurança para tais valores.

O que permite dizer que o talude estudado esta segura quanto a possibilidade de ruptura em cunha.

5. CONCLUSÕES

O presente trabalho permitiu avaliar as condições de estabilidade em rocha do talude sul N110/85NE (20/85) da pedreira MaxBrita em Santos-SP. A análise foi baseada em levantamentos de campo, caracterização geomecânica do maciço rochoso, análise estrutural das descontinuidades, análise cinemática e por fim análise da estabilidade do talude com cálculo do fator de segurança.

O levantamento de campo e análise estrutural permitiu que as estruturas fossem separadas em 5 famílias e foliações. As atitudes médias observadas foram: foliação (138/25), família 1 (351/87), família 2 (16/83), família 3 (247/81), família 4a (93/20), família 4b (111/86) e família 5 (005/35).

A análise cinemática indicou a possibilidade de três tipos de ruptura do maciço: tombamento de blocos, ruptura planar e ruptura em cunha. Para os tipos de ruptura as famílias de estruturas que possibilitam a movimentação para esta atitude de talude foram família 1, 2 e 5.

Para o tombamento de blocos a análise cinemática, apresentou apenas uma combinação possível para ruptura, dentre todas as medidas realizadas no trabalho, e estas medidas representam pontos de desvios dentro das famílias, desta maneira considera-se este talude seguro, embora seja necessária observação da ocorrência das estruturas da família 5 e da foliação.

Por fim, para a ruptura em cunha, a intersecção das famílias 1 e 2, e 2 e 5 possibilitam movimentação, mas para as condições geomecânicas e de saturação, os fatores de segurança estão acima de 1,3 com saturações de no máximo 80%, o que pode ser considerado seguro.

Para ruptura planar, a análise total e discretizada apontou estruturas das famílias 2 e 5 como passíveis de causar ruptura, em geral para condições do maciço drenado, este apresenta fator de segurança superior ao desejável de 1,3. Contudo, esta condição drenada raramente ocorre. Para condições 100% saturadas, embora o cálculo pelo software não tenha apresentado valores, deve-se considerar instável, passível de ruptura. E para as condições parcialmente saturadas, saturações da ordem de 40%, podem ser consideradas seguras (acima de 1,3), o que indica necessidade de intervenção neste talude, seja por meio de retaludamento com ângulo mais suavizado que 85°, seja com a adoção de instalação de drenos na rocha (comumente dreno horizontal profundo-DHP), mas para ambas soluções indica-se a necessidade de instalação de piezômetros para monitoramento da água no maciço.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABGE – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA. 1990. Diretrizes para execução de sondagens. ABGE, São Paulo.
- ALMEIDA, F.F.M. & CARNEIRO, C.D.R. 1998. Origem e Evolução da Serra do Mar. *In: Revista Brasileira de Geociências* – 28(2): 135-150, junho de 1998.
- ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING. 2007. *Standard Test Method for Compressive Strength and Elastic Moduli of Intact Rock Core Specimens under Varying States of Stress and Temperatures. ASTM Subcommittee 018.12 on Rock Mechanics.*
- AUGUSTO FILHO, O. 1992. Caracterização geológico-geotécnica voltada à estabilização de encostas, uma proposta metodológica. *In: CONFERÊNCIA BRASILEIRA SOBRE ESTABILIDADE DE ENCOSTAS*, 1., 1992, Rio de Janeiro. Anais. Rio de Janeiro: ABMS/ABGE. P. 721-733.
- AUGUSTO FILHO, O.; VIRGILI, J.C. 1998. *In: Cap. XV - Geologia de Engenharia – ABGE. OLIVEIRA, A.M.S. & BRITO, S.N.A. São Paulo.*
- BARTON, N. & CHOUBEY, Y. 1977. *The shear strength of rock joints in theory and practice - Rock Mechanics*, v. 10.
- BARTON, N. 1997. *Advanced topics of rock mechanics.*- São Paulo, EPUSP, Depto. de Eng. De Minas.
- DE SOUZA, L.A.P.; DA SILVA, R.F.; IYOMASA, W.S. 1998. *In: Cap. XI - Geologia de Engenharia – ABGE. OLIVEIRA, A.M.S. & BRITO, S.N.A. São Paulo.*
- FERNANDES, F.S. 2010. Aplicação de fotogrametria terrestre digital na análise de descontinuidades em maciços rochosos: exame comparativo com técnicas tradicionais. São Paulo, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. (Dissertação de Mestrado).
- FIORI, A.P. & CARMIGNANI, L. 2011 – Fundamentos de mecânica dos solos e das rochas – aplicações na estabilidade de taludes. 2ªed., Curitiba.
- Guidicini, G. Nieble, C.M, Cordines, A.T., Berrino, S.E.,Rodrigues, J.D. 1972. Um método de classificação geotécnica preliminar de maciços rochosos. *In: Semana Paulista de Geologia Aplicada*, 4, São Paulo. Anais...São Paulo:ABGE,v.3,p.285-331.
- GROHMANN, C. H. ; Campanha, G.A.C. 2010. "OpenStereo": *Open Source, Cross-Platform Software for Structural Geology Analysis*. *In: AGU 2010 Fall Meeting*, 2010, San Francisco.
- GUIDICCINI, G. & NIEBLE, C.M. 1976. Estabilidade de taludes naturais e de escavação. São Paulo
- HOEK, E. & BRAY, J. 1981. *Rock Slope Engineering*. 3 ed. Londres.
- HOEK, E. & BRAY, J. 1989. *Rock Slopes: Design, Excavation, Stabilization. U.S. Department of Transportation.*
- HOEK, E. (2007) *Practical rock engineering*. Hampshire, Reino Unido.
- IG – INSTITUO GEOLÓGICO. 2011. Vistoria técnica na pedreira da empresa Max Brita, Santos.
- IPT – INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. 2011. Relatório de inspeção na pedreira Santa Teresa – Empresa MaxBrita Comercial. São Paulo
- IPT – INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. 2012. Relatório Técnico 127 632-205. 05 de abril de 2012. Ensaio para determinação da resistência à tração indireta (método brasileiro) e à

compressão uniaxial com módulo de deformabilidade e coeficiente de Poisson em amostras de rochas. São Paulo

ISRM – INTERNATIONAL SOCIETY OF ROCK MECHANICS. 1988. “Métodos para descrição quantitativa de descontinuidades em maciços rochosos”. Tradução: ABGE – Comitê Brasileiro de Mecânica de Rochas, São Paulo.

MAGALHÃES, F.S.; CELLA, P.R.C. 1998. *In*: Cap. III - Geologia de Engenharia – ABGE. OLIVEIRA, A.M.S. & BRITO, S.N.A. São Paulo.

NBR-11682/2009 – “ESTABILIDADE DE TALUDES”. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.

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.

PRIEST, S.D. 1993. *Discontinuity analysis for rock engineering*. Londres.

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

ROSS, J.L.S.; Moroz, I.C. Mapa geomorfológico do Estado de São Paulo. São Paulo, SP: FFLCH/USP e IPT/FAPESP, 1997. Mapas e Relatório.

SANTOS, A. R. 2004. A grande barreira da Serra do Mar : da trilha dos Tupiniquis à Rodovia dos Imigrantes. São Paulo : O Nome da Rosa, 128pp.

SERRA JUNIOR, E.; OJIMA, L.M. 1998. *In*: Cap. XIII - Geologia de Engenharia – ABGE. OLIVEIRA, A.M.S. & BRITO, S.N.A. São Paulo.

SUGUIO, K.; TESSLER, M.G. Planícies de Cordões Litorâneos Quaternários do Brasil: origem e nomenclatura. *In*: LACERDA, L.D.; ARAÚJO, D.S.D; CERQUEIRA, R.; TURCO, B. (Org.) : Restingas: origem, estrutura, processos. Niterói: CEUFF, 1984. p. 15-25.

WYLLIE, D.C. & MAH, C.W. (2004) *Rock slope engineering – Civil and mining*. 4^a. ed. Nova Iorque.

Links:

CIIAGRO – CENTRO INTEGRADO DE INFORMAÇÕES AGROMETEOROLÓGICAS, <http://www.ciiagro.sp.gov.br/ciiagroonline/Listagens/Resenha/LResenhaLocal.asp>, acessado em 02/04/2012.

DAEE – DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA, <http://www.sigrh.sp.gov.br/cgi-bin/bdhtm.exe>, acessado em 26/03/2012

GOOGLE™ EARTH, imagens de 22/06/2009

ANEXOS

Levantamento de Descontinuidades

Informações Gerais		Data		localização (UTM)		Altitude do plano		Autor		tabela nº	
Local	Ponto			início	fim						
Max Brita	MB-01	09/01/2012		369523/7356171	369521/7356144	N-S / SV		Guilherme/Vital		1	4

Natureza e Orientação da Descontinuidade

cota/profundidade	tipo	mergulho	direção	declinado	persistência	terminação	abertura/largura	natureza do preenchimento	força de preenchimento	rugosidade superficial	forma superficial	ondulação e tamanho	amplitude de onda	coeficiente de rugosidade JRC	fluxo de água	espaçamento	observações
	6	25	175	156	1	0	2	1	R2	1	2	pouco	<1,0cm	3	1	3	fraturamento paralelo ao plano de foliação
	6	25	163	144	1	0	2	1	R2	1	2	pouco	<1,0cm	3	1	3	fraturamento paralelo ao plano de foliação
	6	10	165	146	1	0	2	1	R2	1	2	pouco	<1,0cm	3	1	3	fraturamento paralelo ao plano de foliação
	6	27	162	143	1	0	2	1	R2	1	2	pouco	<1,0cm	3	1	3	fraturamento paralelo ao plano de foliação
	6	25	172	153	1	0	2	3	S2	1	2	pouco	<1,0cm	3	1	3	fraturamento paralelo ao plano de foliação
	6	15	155	136	1	0	2	1	R2	1	2	pouco	<1,0cm	3	1	3	fraturamento paralelo ao plano de foliação
	6	30	155	136	1	0	2	2	S2	1	2	pouco	<1,0cm	3	1	3	fraturamento paralelo ao plano de foliação
	6	25	158	139	1	0	2	1	R2	1	2	pouco	<1,0cm	3	1	3	fraturamento paralelo ao plano de foliação
	6	25	170	151	1	0	2	1	R2	1	2	pouco	<1,0cm	3	1	3	fraturamento paralelo ao plano de foliação
	6	28	164	145	1	0	2	1	R2	1	2	pouco	<1,0cm	3	1	3	fraturamento paralelo ao plano de foliação
	6	22	155	136	1	1	2	1	R2	1	2	pouco	<1,0cm	3	1	3	fraturamento paralelo ao plano de foliação
	6	20	158	139	2	0	3	4	S2	1	2	pouco	<1,0cm	3	1	3	fraturamento paralelo ao plano de foliação
	6	30	152	133	2	0	2	1	R2	1	2	pouco	<1,0cm	3	1	3	fraturamento paralelo ao plano de foliação
	6	20	148	129	1	0	2	1	R2	1	2	pouco	<1,0cm	3	1	3	fraturamento paralelo ao plano de foliação
	6	25	150	131	2	0	2	1	R2	1	2	pouco	<1,0cm	3	1	3	fraturamento paralelo ao plano de foliação
	6	25	164	145	1	0	2	1	R2	1	2	pouco	<1,0cm	2	1	2	fraturamento paralelo ao plano de foliação
	6	25	150	131	1	0	2	1	R2	1	2	pouco	<1,0cm	2	1	2	fraturamento paralelo ao plano de foliação
	6	25	153	134	1	0	2	1	R2	1	2	pouco	<1,0cm	2	1	2	fraturamento paralelo ao plano de foliação
	6	15	168	149	1	0	2	1	R2	1	2	pouco	<1,0cm	2	1	2	fraturamento paralelo ao plano de foliação
	6	25	154	135	1	1	2	4	S2	1	2	pouco	<1,0cm	2	1	2	fraturamento paralelo ao plano de foliação

tipo	persistência	abertura/largura	natureza do preenchimento	resistência à compressão	fluxo de água (aberto)	fluxo de água (preenchido)
0. zona de falha	1. muito baixa	<1m	1. muito fechada (<0.1mm)	1. limpo	Mpa	6. material de preenchimento
1. falha	2. baixa	1-3m	2. fechada (0.1-2.5mm)	S1 argila muito mole	<0.025	muito consolidado e seco,
2. junta	3. média	3-10m	3. parcialmente aberto (0.25-0.5mm)	S2 argila mole	0.025-0.05	fluxo aparentemente impossível
3. clivagem	4. alta	10-20m	4. aberto (0.5-2.5mm)	S3 argila média	0.05-0.10	1. descontinuidade seca, sem
4. xistossidade	5. muito alta	>20m	5. moderadamente espaçado (2.5-10mm)	S4 argila rígida	0.10-0.25	evidência de fluxo de água
5. cisalhamento			6. espaçado (10-100mm)	S5 argila muito rígida	0.25-0.50	2. descontinuidade seca, mas com
6. fratura			7. muito espaçado (1-10cm)	S6 argila dura	>0.50	evidência de fluxo de água
7. rachadura de tensão			8. extremamente espaçado (10-100cm)	R0 Rocha extrem. Fraca	0.25-1.0	3. descontinuidade úmida mas sem
8. foliação			9. cavenoso (>1m)	R1 rocha muito fraca	1.0-5.0	água livre presente
9. acamamento				R2 rocha fraca	5.0-25.0	4. descontinuidade com infiltração,
				R3 rocha dureza média	25-50	ocorrem gotas mas sem fluxo contínuo
				R4 rocha dura	50-100	5. descontinuidade com fluxo contínuo
				R5 rocha muito dura	100-250	de água (descrever pressão)
				R6 rocha extrem. Dura	>250	
					JRC FOTO	
terminação	forma su forma superficial	rugosidade superficial	espaçamento			
0. nenhuma terminação visível	1. degrai 1. degraus	1. áspero	1. extremamente fechado			
1. uma terminação visível	2. ondula 2. ondulado	2. suave	2. muito fechado			
2. ambas terminações visíveis	3. planar 3. planar	3. polido	3. fechado			
		4. "deslizado"	4. moderadamente espaçado			
			5. espaçamento amplo			
			6. espaçamento muito amplo			
			7. extremamente amplo			

Levantamento de Descontinuidades																	
Informações Gerais		Ponto		Data		localização (UTM)				Atitude do plano		Autor		tabela nº			
Local		MB-01		09/01/2012		início 369523/7356171 fim 369521/7356144				N-S / SV		Guilherme/Vital		2		4	
Natureza e Orientação da Descontinuidade																	
cota/profundidade	tipo	mergulho	direção	declinado	persistência	terminação	abertura/largura	natureza do preenchimento	força de preenchimento	rugosidade superficial	forma superficial	ondulação e tamanho	amplitude de onda	coeficiente de rugosidade JRC	fluxo de água	espaçamento	observações
	6	20	162	143	3	1	2	3	R2	1	2	pouco	<1,0cm	2	1	3	fratura paralela ao plano da foliação
	6	19	164	145	2	1	2	3	R2	1	2	pouco	<1,0cm	2	1	3	fratura paralela ao plano da foliação
	6	27	156	137	2	1	2	3	R2	1	2	pouco	<1,0cm	2	1	3	fratura paralela ao plano da foliação
	6	35	158	139	2	1	2	3	R2	1	2	pouco	<1,0cm	2	1	3	fratura paralela ao plano da foliação
	6	25	135	116	2	1	2	3	R2	1	2	pouco	<1,0cm	2	1	3	fratura paralela ao plano da foliação
	6	24	146	127	3	1	5	4	S2	1	2	pouco	1,0cm	2	3	4	fratura paralela ao plano da foliação
	6	20	158	139	3	1	2	3	R2	1	2	pouco	<1,0cm	2	1	3	fratura paralela ao plano da foliação
	6	88	175	156	3	0	4	3	S2	1	2	pouco	<1,0cm	3	2	5	
	6	85	88	69	3	0	4	3	S2	1	2	pouco	<1,0cm	3	2	5	
	6	80	05	346	1	1	4	2	R2	1	2	pouco	<1,0cm	4	2	5	
	6	80	348	329	1	1	4	2	R2	1	2	pouco	<1,0cm	3	2	5	
	6	88	02	343	1	1	4	2	R2	1	2	pouco	<1,0cm	3	2	5	
	6	84	342	323	1	1	4	2	R2	1	2	pouco	<1,0cm	3	2	5	
	6	83	323	304	1	1	4	2	R2	1	2	pouco	<1,0cm	3	2	5	
	6	60	58	39	1	2	1	1	R2	1	2	pouco	<1,0cm	2	1	5	
	6	90	150	131	1	1	2	2	R2	1	2	pouco	<1,0cm	2	2	5	
	6	85	335	316	1	1	2	2	R2	1	2	pouco	<1,0cm	2	2	5	
	6	75	353	334	1	1	2	2	R2	1	2	pouco	<1,0cm	2	2	5	
	6	90	314	295	1	1	2	2	R2	1	2	pouco	<1,0cm	2	2	5	
	6	75	146	127	1	1	2	2	R2	1	2	pouco	<1,0cm	2	2	5	
tipo	persistência		abertura/largura		natureza do preenchimento		resistência à compressão		Mpa		fluxo de água (aberto)		fluxo água (preenchido)				
0. zona de falha	1. muito baixa		<1m		1. muito fechada (<0,1mm)		1. limpo		S1 argila muito mole		0. descontinuidades leves e secas,		6. material de preenchimento				
1. falha	2. baixa		1-3m		2. fechada (0,1-2,5mm)		2. manchas superficiais		S2 argila mole		fluxo aparentemente impossível		muito consolidado e seco,				
2. junta	3. média		3-10m		3. parcialmente aberto (0,25-0,5mm)		3. não coeso		S3 argila média		1. descontinuidade seca, sem		fluxo improvável				
3. clivagem	4. alta		10-20m		4. aberto (0,5-2,5mm)		4. argila ou matriz argila		S4 argila rígida		evidência de fluxo de água		7. material de preenchimento				
4. xistosidade	5. muito alta		>20m		5. moderadamente espaçado (2,5-10mm)		5. argila expansiva ou matriz argila		S5 argila muito rígida		2. descontinuidade seca, mas com		úmido, mas sem água livre				
5. cisalhamento					6. espaçado (10-100mm)		6. cimentado		S6 argila dura		evidência de fluxo de água		8. material de preenchimento				
6. fratura					7. muito espaçado (1-10cm)		7. clorita, talco ou gipsita		R0 Rocha extrem. Fraca		3. descontinuidade úmida mas sem		molhado, eventuais gotas				
7. rachadura de tensão					8. extremamente espaçado (10-100cm)		8. outra (especificar)		R1 rocha muito fraca		água livre presente		9. material de preenchimento				
8. foliação					9. cavernoso (>1m)				R2 rocha fraca		4. descontinuidade com infiltração,		com sinais de <i>outwash</i> , fluxo				
9. acamamento									R3 rocha dureza média		ocorrem gotas mas sem fluxo contínuo		contínuo (estimar vazão)				
									R4 rocha dura		5. descontinuidade com fluxo contínuo		10. material lavado, alto fluxo,				
									R5 rocha muito dura		de água (descrever pressão)		(estimar vazão e pressão)				
									R6 rocha extrem. Dura								
terminação	forma super		forma superficial		rugosidade superficial		espaçamento						JRC FOTO				
0. nenhuma terminação visível	1. degraus		1. degraus		1. áspero		1. extremamente fechado		<20mm								
1. uma terminação visível	2. ondulado		2. ondulado		2. suave		2. muito fechado		20-60mm								
2. ambas terminações visíveis	3. planar		3. planar		3. polido		3. fechado		60-200mm								
					4. "deslizado"		4. moderadamente espaçado		200-600mm								
							5. espaçamento amplo		600-2000mm								
							6. espaçamento muito amplo		2000-6000mm								
							7. extremamente amplo		>6000mm								

Levantamento de Descontinuidades																	
Informações Gerais		Ponto		Data		localização (UTM)				Altitude do plano		Autor		tabela nº			
Local		MB-01		09/01/2012		início 369523/7356171 fim 369521/7356144				N-S / SV		Guilherme/Vital		3		4	
Natureza e Orientação da Descontinuidade																	
cota/profundidade	tipo	mergulho	direção	declinado	persistência	terminação	abertura/largura	natureza do preenchimento	força de preenchimento	rugosidade superficial	forma superficial	ondulação e tamanho	amplitude de onda	coeficiente de rugosidade JRC	fluxo de água	espaçamento	observações
	6	80	148	129	1	1	2	2	R2	1	2	pouca	<1,0cm	2	2	5	
	6	85	00	341	1	1	2	2	R2	1	2	pouca	<1,0cm	2	2	5	
	6	80	190	171	3	0	2	2	R2	1	2	pouca	<1,0cm	2	2	5	
	6	65	015	356	1	0	2	4	S2	1	2	pouca	<1,0cm	2	2	5	
	6	85	020	1	3	1	5	4	S2	1	2	pouca	<1,0cm	2	4	5	
	6	80	017	358	1	1	2	2	R2	1	2	pouca	<1,0cm	2	2	5	
	6	90	025	6	1	1	2	2	R2	1	2	pouca	<1,0cm	2	2	5	
	6	90	38	19	1	1	2	2	R2	1	2	pouca	<1,0cm	2	2	5	
	6	90	45	26	1	1	2	2	R2	1	2	pouca	<1,0cm	2	2	5	
	6	80	194	175	1	1	2	2	R2	1	2	pouca	<1,0cm	2	2	5	
	6	85	88	69	1	0	2	1	R2	1	2	pouca	<1,0cm	2	1	5	
	6	80	120	101	1	0	2	1	R2	1	2	pouca	<1,0cm	2	1	5	
	6	90	120	101	1	0	2	1	R2	1	2	pouca	<1,0cm	2	1	5	
	6	35	030	11	1	1	1	2	S2	1	2	pouca	<1,0cm	3	3	3	
	6	50	020	1	1	1	1	2	S2	1	2	pouca	<1,0cm	3	2	3	
	6	20	020	1	1	2	1	2	S2	1	2	pouca	<1,0cm	3	2	3	
	6	75	320	301	2	0	2	1	R2	1	2	pouca	<1,0cm	2	1	5	
	6	85	290	271	2	0	2	1	R2	1	2	pouca	<1,0cm	2	1	5	
	6	80	281	262	2	0	2	1	R2	1	2	pouca	<1,0cm	2	1	5	
	6	90	295	276	2	0	2	1	R2	1	2	pouca	<1,0cm	2	1	5	

tipo 0. zona de falha 1. falha 2. junta 3. clivagem 4. xistosidade 5. cisalhamento 6. fratura 7. rachadura de tensão 8. foliação 9. acamamento	persistência 1. muito baixa 2. baixa 3. média 4. alta 5. muito alta	abertura/largura 1. muito fechada (<0.1mm) 2. fechada (0.1-2.5mm) 3. parcialmente aberto (0.25-0.5mm) 4. aberto (0.5-2.5mm) 5. moderadamente espaçado (2.5-10mm) 6. espaçado (10-100mm) 7. muito espaçado (1-10cm) 8. extremamente espaçado (10-100cm) 9. cavernoso (>1m)	natureza do preenchimento 1. limpo 2. manchas superficiais 3. não coeso 4. argila ou matriz argila 5. argila expansiva ou matriz argila 6. cimentado 7. clorita, talco ou gipsita 8. outra (especificar)	resistência à compressão S1 argila muito mole S2 argila mole S3 argila média S4 argila rígida S5 argila muito rígida S6 argila dura R0 Rocha extrem. Fraca R1 rocha muito fraca R2 rocha fraca R3 rocha dureza média R4 rocha dura R5 rocha muito dura R6 rocha extrem. Dura	Mpa <0.025 0.025-0.05 0.05-0.10 0.10-0.25 0.25-0.50 >0.50 0.25-1.0 1.0-5.0 5.0-25.0 25-50 50-100 100-250 >250	fluxo de água (aberto) 0. descontinuidades leves e secas, fluxo aparentemente impossível 1. descontinuidade seca, sem evidência de fluxo de água 2. descontinuidade seca, mas com evidência de fluxo de água 3. descontinuidade úmida mas sem água livre presente 4. descontinuidade com infiltração, ocorrem gotas mas sem fluxo contínuo 5. descontinuidade com fluxo contínuo de água (descrever pressão)	fluxo d'água (preenchido) 6. material de preenchimento muito consolidado e seco, fluxo improvável 7. material de preenchimento úmido, mas sem água livre 8. material de preenchimento molhado, eventuais gotas 9. material de preenchimento com sinais de <i>outwash</i> , fluxo contínuo (estimar vazão) 10. material lavado, alto fluxo, (estimar vazão e pressão)
terminação 0. nenhuma terminação visível 1. uma terminação visível 2. ambas terminações visíveis	forma sup./forma superficial 1. degrau: 1. degraus 2. ondular: 2. ondulado 3. planar 3. planar	rugosidade superficial 1. áspero 2. suave 3. polido 4. "deslizado"	espaçamento 1. extremamente fechado 2. muito fechado 3. fechado 4. moderadamente espaçado 5. espaçamento amplo 6. espaçamento muito amplo 7. extremamente amplo	<20mm 20-60mm 60-200mm 200-600mm 600-2000mm 2000-6000mm >6000mm	JRC FOTO		

Levantamento de Descontinuidades

Informações Gerais		Ponto		Data		localização (UTM)		Atitude do plano		Autor		tabela nº	
Local													
Max Brita		MB-02		21/03/2012		369678 / 7355969 ; 369659 / 7355939		N70W		Vital / Guilherme		1	2

Natureza e Orientação da Descontinuidade

cota/profundidade	tipo	mergulho	direção	declinado	persistência	terminação	abertura/largura	natureza do preenchimento	força de preenchimento	rugosidade superficial	forma superficial	ondulação e tamanho	amplitude de onda	coeficiente de rugosidade JRC	fluxo de água	espaçamento	observações
	8	30	152	133	5	0	4	4	S2	2	3	-	-	2	2	4	
	8	25	152	133	5	0	4	4	S2	2	3	-	-	2	2	4	
	8	20	135	116	5	0	4	4	S2	2	3	-	-	2	2	4	
	8	25	155	136	5	0	4	4	S2	2	3	-	-	2	2	4	
	8	15	180	161	5	0	5	4	S2	2	3	-	-	2	2	4	
	8	30	180	161	5	0	5	4	S2	2	3	-	-	2	2	4	
	8	40	188	169	5	0	5	4	S2	2	3	-	-	2	2	4	
	8	40	194	175	5	0	5	4	S2	2	3	-	-	2	2	4	
	6	65	50	31	3	2	4	4	S2	1	2	muito	<1,0cm	4	2	3	
	6	80	42	23	3	2	4	4	S2	1	2	muito	<1,0cm	4	2	3	
	6	70	54	35	3	2	4	4	S2	1	2	muito	<1,0cm	4	2	3	
	6	90	30	11	3	2	4	4	S2	1	2	muito	<1,0cm	4	2	3	
	6	85	40	21	3	2	4	4	S2	1	2	muito	<1,0cm	4	2	3	
	6	80	34	15	3	2	4	4	S2	1	2	muito	<1,0cm	4	2	3	
	6	80	32	13	3	2	4	4	S2	1	2	muito	<1,0cm	4	2	3	
	6	85	32	13	3	2	4	4	S2	1	2	muito	<1,0cm	4	2	3	
	6	85	30	11	3	2	4	4	S2	1	2	muito	<1,0cm	4	2	3	
	6	75	40	21	3	2	4	4	S2	1	2	muito	<1,0cm	4	2	3	
	6	75	40	21	3	2	4	4	S2	1	2	muito	<1,0cm	4	2	3	
	6	70	50	31	3	2	4	4	S2	1	2	muito	<1,0cm	4	2	3	

tipo	persistência	abertura/largura	natureza do preenchimento	resistência à compressão	Mpa	fluxo de água (aberto)	fluxo d'água (preenchido)
0. zona de falha	1. muito baixa	<1m	1. muito fechada (<0.1mm)	S1 argila muito mole	<0.025	0. descontinuidades leves e secas, fluxo aparentemente impossível	6. material de preenchimento muito consolidado e seco, fluxo improvável
1. falha	2. baixa	1-3m	2. fechada (0.1-2.5mm)	S2 argila mole	0.025-0.05	1. descontinuidade seca, sem evidência de fluxo de água	7. material de preenchimento úmido, mas sem água livre
2. junta	3. média	3-10m	3. parcialmente aberto (0.25-0.5mm)	S3 argila média	0.05-0.10	2. descontinuidade seca, mas com evidência de fluxo de água	8. material de preenchimento molhado, eventuais gotas
3. clivagem	4. alta	10-20m	4. aberto (0.5-2.5mm)	S4 argila rígida	0.10-0.25	3. descontinuidade úmida mas sem água livre presente	9. material de preenchimento com sinais de <i>outwash</i> , fluxo contínuo (estimar vazão)
4. xistossidade	5. muito alta	>20m	5. moderadamente espaçado (2.5-10mm)	S5 argila muito rígida	0.25-0.50	4. descontinuidade com infiltração, ocorrem gotas mas sem fluxo contínuo	10. material lavado, alto fluxo, (estimar vazão e pressão)
5. cisalhamento			6. espaçado (10-100mm)	S6 argila dura	>0.50		
6. fratura			7. muito espaçado (1-10cm)	R0 Rocha extrem. Fraca	0.25-1.0		
7. rachadura de tensão			8. extremamente espaçado (10-100cm)	R1 rocha muito fraca	1.0-5.0		
8. foliação			9. cavernoso (>1m)	R2 rocha fraca	5.0-25.0		
9. acamamento				R3 rocha dureza média	25-50		
				R4 rocha dura	50-100		
				R5 rocha muito dura	100-250		
				R6 rocha extrem. Dura	>250		
terminação	forma su forma superficial	rugosidade superficial	espaçamento		JRC FOTO		
0. nenhuma terminação visível	1. degrai 1. degraus	1. áspero	1. extremamente fechado	<20mm			
1. uma terminação visível	2. ondula 2. ondulado	2. suave	2. muito fechado	2-6cm			
2. ambas terminações visíveis	3. planar 3. planar	3. polido	3. fechado	6-20cm			
		4. "deslizado"	4. moderadamente espaçado	20-60cm			
			5. espaçamento amplo	60-200cm			
			6. espaçamento muito amplo	200-600cm			
			7. extremamente amplo	>600cm			

Levantamento de Descontinuidades

Informações Gerais		Ponto		Data		localização (UTM)		Atitude do plano		Autor		tabela nº	
Local	Max Brita	Ponto	MB-03	Data	23/03/2012	localização (UTM)	369804 / 7356029 ; 369808 / 7356054	Atitude do plano	N25E SV	Autor	Vital / Guilherme	tabela nº	1
													2

Natureza e Orientação da Descontinuidade

cota/profundidade	tipo	mergulho	direção	declinado	persistência	terminação	abertura/largura	natureza do preenchimento	força de preenchimento	rugosidade superficial	forma superficial	ondulação e tamanho	amplitude de onda	coeficiente de rugosidade JRC	fluxo de água	espaçamento	observações
	8	35	110	91	2	0	2	-	-	1	2	pouco	<0,5cm	3	1	3	
	8	20	110	91	2	0	2	-	-	1	2	pouco	<0,5cm	3	1	3	
	8	25	168	149	2	0	2	-	-	1	2	pouco	<0,5cm	3	1	3	
	8	35	145	126	2	0	2	-	-	1	2	pouco	<0,5cm	3	1	3	
	8	35	164	145	2	0	2	-	-	1	2	pouco	<0,5cm	3	1	3	
	8	20	110	91	2	0	2	-	-	1	2	pouco	<0,5cm	3	1	3	
	8	20	145	126	2	0	2	-	-	1	2	pouco	<0,5cm	3	1	3	
	8	15	110	91	2	0	2	-	-	1	2	pouco	<0,5cm	3	1	3	
	6	85	132	113	3	1	3	4	S2	1	2	médio	<1,0cm	4	2	3	
	6	85	128	109	3	1	3	4	S2	1	2	médio	<1,0cm	4	2	3	
	6	85	124	105	3	1	3	4	S2	1	2	médio	<1,0cm	4	2	3	
	6	85	124	105	3	1	3	4	S2	1	2	médio	<1,0cm	4	2	3	
	6	85	135	116	3	1	3	4	S2	1	2	médio	<1,0cm	4	2	4	
	6	85	145	126	3	1	3	1	-	1	2	médio	<1,0cm	4	1	4	
	6	75	132	113	3	1	3	1	-	1	2	médio	<1,0cm	4	1	4	
	6	70	168	149	3	1	3	1	-	1	2	médio	<1,0cm	4	1	4	
	6	75	162	143	3	1	3	1	-	1	2	médio	<1,0cm	4	1	4	
	6	70	265	246	2	2	2	1	-	1	2	pouco	<1,0cm	3	1	4	
	6	80	252	233	2	2	2	1	-	1	2	pouco	<1,0cm	3	1	4	
	6	70	272	253	2	2	2	1	-	1	2	pouco	<1,0cm	3	1	4	

tipo	persistência	abertura/largura	natureza do preenchimento	resistência à compressão	fluxo de água (aberto)	fluxo d'água (preenchido)
0. zona de falha	1. muito baixa	<1m	1. limpo	S1 argila muito mole	0.025	6. material de preenchimento
1. falha	2. baixa	1-3m	2. manchas superficiais	S2 argila mole	0.025-0.05	7. material de preenchimento
2. junta	3. média	3-10m	3. não coeso	S3 argila média	0.05-0.10	8. material de preenchimento
3. clivagem	4. alta	10-20m	4. argila ou matriz argila	S4 argila rígida	0.10-0.25	9. material de preenchimento
4. xistosidade	5. muito alta	>20m	5. argila expansiva ou matriz argila	S5 argila muito rígida	0.25-0.50	10. material de preenchimento
5. cisalhamento			6. cimentado	S6 argila dura	>0.50	
6. fratura			7. clorita, talco ou gipsita	R0 Rocha extrem. Fraca	0.25-1.0	
7. rachadura de tensão			8. outra (especificar)	R1 rocha muito fraca	1.0-5.0	
8. foliação				R2 rocha fraca	5.0-25.0	
9. acamamento				R3 rocha dureza média	25-50	
				R4 rocha dura	50-100	
				R5 rocha muito dura	100-250	
				R6 rocha extrem. Dura	>250	
					JRC FOTO	
terminação	forma su forma superficial	rugosidade superficial	espaçamento			
0. nenhuma terminação visível	1. degrai 1. degraus	1. áspero	1. extremamente fechado			
1. uma terminação visível	2. onduli 2. ondulado	2. suave	2. muito fechado			
2. ambas terminações visíveis	3. planar 3. planar	3. polido	3. fechado			
		4. "deslizado"	4. moderadamente espaçado			
			5. espaçamento amplo			
			6. espaçamento muito amplo			
			7. extremamente amplo			

