## 3 Caracterização Geotécnica da Mina de Morro da Mina

A mina de Morro da Mina pertencente à VALE encontra-se na fase de operação e serve de objeto para o presente estudo, pois suas características geométricas e geotécnicas estão presentes na cava, e a mina possui um bom acervo de dados técnicos, onde várias das atividades pertencentes ao PGTM, referenciadas no Capítulo 2, foram realizadas, atendendo assim as necessidades deste trabalho.

As informações apresentadas a seguir foram obtidas através de relatórios técnicos, elaborados por empresas contratadas pela VALE para estudos geotécnicos na mina, e de pesquisas bibliográficas sobre o assunto, sendo complementadas por depoimentos dos responsáveis pela mina quando da realização da visita técnica ao complexo da mina.

## 3.1. Mina de Morro da Mina

A mina de Morro da Mina situa-se ao norte da cidade de Conselheiro Lafaiete, no estado de Minas Gerais, conforme mostra a Figura 3.1, e possui uma área de 425 hectares, com 6.500m<sup>2</sup> de área construída. É uma mina de minério de manganês, e recebeu este nome porque no local existia um monte que era conhecido assim, onde havia galerias construídas provavelmente para pesquisar a existência de ouro no local. Atualmente pertence à VALE, sob responsabilidade da empresa Rio Doce Manganês – RDM.

Sua exploração tem o seguinte histórico:

- 1894 O depósito de óxido de manganês foi encontrado fora da montanha Morro da Mina.
- 1902 Primeiro embarque de minério de manganês para o mercado externo (Estados Unidos).
- 1960 A produção foi voltada para o mercado interno.
- 1970 O minério de óxido de manganês foi esgotado na mina e houve adaptações para exploração do minério de manganês sílicocarbonatado.

- 1999 A VALE se torna a única proprietária da mina. Até então a mina pertencia a Sociedade Mineira de Mineração Ltda. – SMM.
- 2004 A mina foi incorporada à Rio Doce Manganês RDM.

Os produtos da mina de Morro da Mina estão expostos na Figura 3.2.



Figura 3.1 – Localização da Mina Morro da Mina e todo seu complexo (VALE, 2006).



Figura 3.2 – Produtos da mina (VALE, 2006). Figura a: LG13 – Minério de Manganês Carbonatado Granulado (entre 6,30mm e 75,00mm); Figura b: LF01 – Minério de Manganês Carbonatado Fino (6,30mm).

O minério de manganês tem diversas aplicações, e as principais são as seguintes: fabricação de aços (exerce papel de antisulfurante e possui propriedades desoxidantes); principalmente empregado para a obtenção de ferromanganês (80% de manganês); empregado na produção de siliciomanganês (liga com 60-70% de manganês e uns 15-30% de silício); usado como despolarizador em pilhas secas e empregado na obtenção de pinturas e

na descoloração de vidro (dióxido de manganês, MnO<sub>2</sub>). Além disto, o próprio ser humano precisa consumir de 1 a 5mg deste mineral por dia.

## 3.2. Geologia da Área

Em 2004, a empresa Geoexplore Consulta e Serviços Ltda. realizou um extenso mapeamento geológico e uma análise da formação das estruturas presentes na região do complexo da mina, atualizando e aprofundando estas informações, pois em 2000 a empresa SBC também havia realizado um estudo deste tipo. Os resultados obtidos (Geoexplore, 2005) são descritos resumidamente nos parágrafos e itens seguintes. Para realização de seu trabalho, esta empresa dividiu a mina em três porções: Setor I, situado no extremo NW; Setor II, ocupando a porção central; e Setor III, no extremo sudeste da mina, conforme se observa no Anexo 1.

Atualmente, o minério explorado encontra-se na porção central da cava, e é descrito como uma rocha sílico-carbonatada, denominada Queluzito. Esta rocha apresenta-se compacta, com textura afanítica, tendo como minerais principais os seguintes: Rodocrosita (MnCO<sub>3</sub>), Quartzo (SiO<sub>2</sub>), Espessartita [Mn<sub>3</sub>Al<sub>2</sub>(Si<sub>3</sub>O<sub>12</sub>)], Rodonita (Mn<sub>3</sub>Si<sub>3</sub>O<sub>9</sub>), Tefroíta [Mn<sub>2</sub>(SiO<sub>4</sub>)], Sulfetos (pirrotita, pirita, calcopirita e galena).

Trata-se de uma rocha originalmente sedimentar, pertencente a uma seqüência de rochas verdes (*Greenstone Belt*<sup>1</sup>) que sofreu metamorfismo do tipo dinâmico ou cataclástico. O cenário deposicional original é interpretado como o de uma bacia de fundo oceânico, evoluída a partir de uma margem divergente e com suposta contribuição vulcanogênica, conforme Figura 3.3.

A geometria inicial dos corpos de minério foi controlada por processos sedimentares, principalmente fluxos de turbiditos<sup>2</sup> e sedimentação química (manganês, carbonato, chert) acompanhada de concentrações orgânicas (carbono – grafita).

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Cinturão de rochas verdes: representado por xistos máficos (ferromagnesianos) e ultramáficos, intercalados com formações ferríferas bandadas, chert e rochas vulcanoquímicas diversas, de baixo grau metamórfico, entre estruturas dômicas de granitóides TTG (throndjemito-tonalito-granodiorítico).

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Sedimentos cujo tamanho dos fragmentos varia desde conglomerado (alguns clastos possuem vários metros de diâmetro) até as frações siltico-argilosas, com o tamanho de grão dominante sendo o de arenito médio e fino. São comuns os turbiditos formarem seqüências de deposição de sedimentos finos a médios, com estratificação rítmica e gradacional, mas um turbidito pode estar representado por apenas uma camada.



Figura 3.3 – Cenário deposicional originador dos corpos de manganês (Geoexplore, 2005).

O metamorfismo do tipo dinâmico ocorre ao longo de zonas de cisalhamento, com atuação predominante de esforços de deformação, devido à elevação da pressão, e de acordo com o local de ocorrência, a zona de cisalhamento recebe nome específico, e gera diversas estruturas geológicas:

- Regiões superficiais (crustais), vizinhanças de falhas, com atuação de esforços somente mecânicos: Zona de Cisalhamento Rúptil. Causa o fraturamento, fragmentação, cominuição das rochas do local, gerando em estado rígido as descontinuidades físicas (juntas, falhas).
- Regiões mais profundas, com atuação de temperatura e esforços de deformação: Zona de Cisalhamento Dúctil. Não causa descontinuidades físicas, e sim estruturas geradas em estado de fluxo plástico (foliações, lineações, dobras).

A atuação posterior deste metamorfismo se deu em três fases, chamadas de Fases de Deformação  $D_n$ ,  $D_{n+1} e D_{n+2}$ , que deram origem ao condicionamento geométrico-estrutural atual dos corpos de minério. As duas primeiras são as responsáveis por modelar a geometria dos corpos mineralizados, e a última fase causou rompimentos e deslocamentos destes corpos. As principais feições estruturais geradas são explicadas mais adiante neste capítulo.

 Fase de Deformação D<sub>n</sub>: primeiro estágio de deformação; possibilidade de ter sido acompanhada de magmatismo ácido, com colocação de corpos de granitóides na sucessão sedimentar; gerou as seguintes estruturas: Dobramento regional B<sub>n</sub> de eixo NW-SE subhorizontal, com plano-axial subvertical (a área da mina se situa no flanco inverso de uma grande dobra, com a estrutura sinformal localizada a NE, e a antiformal a SW; parece que o transporte tectônico de massa ocorreu de SW para NE); Mesodobras de menor ordem; Xistosidades S<sub>n</sub> planoaxial das Dobras B<sub>n</sub>, subvertical, ou com forte mergulho para SE; Lineação Mineral L<sub>n</sub> e Lineação de Estiramento L<sub>m</sub>, com forte caimento para SE; *Boudin*<sup>3</sup> com eixo subhorizontal.

- Fase de Deformação D<sub>n+1</sub>: ocorrência de dois estágios de deformação, com ordem de atuação desconhecida; deu-se sob metamorfismo de baixo grau e superposição cinemática distinta; gerou as seguintes estruturas: Meso a Macrodobras B<sub>n+1</sub> com eixos subverticais, com planos-axiais de mergulhos elevados; Zonas de Cisalhamento, com direção NNW-SSE, e mergulhos subverticais; Clivagem de Crenulação S<sub>n+1</sub> plano-axial das Dobras B<sub>n+1</sub> com atitudes variáveis; Lineação Mineral L<sub>n</sub> e Lineação de Estiramento L<sub>m</sub>, oblíqua, com caimentos para NW e SE; *Boudins* com eixo subvertical, ou com forte caimento para NW e SE.
- Fase de Deformação D<sub>n+2</sub>: último estágio de deformação; fim das deformações de caráter rúptil, ocorridas na região em condições crustais; gerou as seguintes estruturas: falhas, marcadas por lineações de baixa temperatura (estrias e *slickensides*<sup>4</sup>), fraturas e juntas.

Assim, atualmente o corpo de minério que está sendo lavrado foi identificado como tendo forma de uma "amêndoa" verticalizada, repartido por estruturas em forma de sigmóides, onde suas litologias têm contatos tectônicos bruscos, principalmente por falhas e zonas de cisalhamento com as rochas encaixantes (Figura 3.4). Desenvolveu-se segundo a direção preferencial N50W, com forte caimento (80° na subvertical) para sudoeste. A espessura aparente do corpo de minério varia em torno de 100 metros. Mas ainda existem

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Salsicha: feição ou estrutura decorrente do processo de *boudinage*, que consiste no processo de deformação sofrido por camadas, bandas ou lentes mais competentes e rúpteis que se fragmentam em forma de boudins (salsichas) ao serem estirados dentro de material rochoso mais dúctil e que se escoa, quando o conjunto sofre esforços compressivos ou extensionais.

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> Espelho de falha: superfície polida de rocha originada pelo atrito dos blocos de falha ao se movimentarem. Minerais ou fragmentos mais duros provocam estrias (estrias de falha) ou, se maiores, caneluras ou *fault grooves* (caneluras de falha) no plano de falha polido e são bons indicadores cinemáticos da direção e mergulho do rejeito de falha. O espelho formado por atrito rompe-se em ressaltos (ressaltos de falha) perpendiculares ao do deslocamento e são indicadores do sentido deste deslocamento dos blocos de cada lado da falha.

corpos individualizados, que seguem ao longo das zonas de cisalhamento, com espessuras variadas, os quais foram rompidos pelos processos deformacionais mencionados anteriormente.

Antes de o minério sílico-carbonatado ser lavrado, a mina explorava o minério de manganês oxidado, que é composto pelos seguintes minerais: Pirolusita (MnO<sub>2</sub>), Psilomelano [Ba Mn<sub>8</sub> O<sub>16</sub>(OH)<sub>4</sub>], Criptomelana (KMn<sub>8</sub>O<sub>16</sub>), e Manganita [MnO(OH)]. Este apresenta maior concentração de manganês que o sílico-carbonatado.

Segundo a Geoexplore (2005), as principais rochas encaixantes do minério são: Anfibolitos, Biotita Xistos Grafitosos, e Biotita-Feldspato-Quartzo Xistos. Subordinados, ocorrem Filitos e rochas intrusivas predominantemente ácidas. Este conjunto pertence ao Supergrupo Rio das Velhas, do Quadrilátero Ferrífero, e será mais bem explicado a seguir.



Figura 3.4 – Contato tectônico do minério de manganês sílico-carbonatado com granitóide, envolvido por um dobramento isoclinal assimétrico, em zona de cisalhamento com biotita xisto carbonoso (Geoexplore, 2005).

### 3.2.1. Litotipos da Cava

As rochas de Morro da Mina pertencem a três unidades diferentes:

- 1) Rochas Metaplutônicas:
  - IAF Anfibolito: distribui-se amplamente, principalmente na porção noroeste da cava da mina, e está representado por anfibolitos finamente laminados. Freqüentemente ocorrem ainda tipos com granulação mais grossa e menos foliada. Ocorre subordinado ao biotita-feldspato-quartzo xisto de forma lenticular ou sigmóide, encaixada entre o biotita xisto grafitoso e o granitóide foliado.
  - GD Granodiorito: corresponde a uma estreita faixa de rocha localizada na porção norte da cava, que se estende longitudinalmente desde o L até NW neste maciço da mina. Apresenta-se em afloramentos muitos bem preservados na superfície mediana da cava até faixas intemperisadas de cor rósea avermelhada média no topo da cava, estando em contato brusco sobre biotita-feldspato-quartzo xisto. Sua coloração é cinza claro azulado, variando a cinza mais escuro e cor bege acinzentado nas porções próximas do contato com biotitafeldspato-quartzo xisto, onde exibe uma foliação proeminente marcada pela presença de minerais máficos na sua constituição. Possui granulometria média a fina.
  - MGD Metagranodiorito: unidade litológica de característica máfica a intermediária devido a seus constituintes mineralógicos. Apresenta-se de cor cinza esverdeada a marrom esverdeada, com granulação muito fina a fina, mas com porções de granulação média com tendência isotrópica, que ainda preservam alguma foliação. Sua área de ocorrência é restrita à porção noroeste da cava, em contato tectônico com biotita xisto grafitoso e biotita-feldspato-quartzo xisto.
  - GRF Granitóide Foliado: rocha intrusiva, variável em granulometria e composição. Mostra-se intensamente foliada, em geral acompanhando a foliação S<sub>n</sub> ou formando venulações discordantes e preenchendo fraturas e zonas de fraqueza da rocha a qual está associada. A cor varia de branco amarelada a muito branca e nas porções mais elevadas, próximas à superfície, apresenta-se intemperisada e caulinizada.

- G2 Granitóide Sin-a-Tardi-Tectônico: possui textura geralmente homogênea, isotrópica, e apresenta uma foliação muito incipiente o que pode caracterizar esta rocha como sin-a-tardi-tectônica ou mesmo pós-tectônica. Sua granulometria é variável entre muito fina e muito grossa, com tendência pegmatítica. Ocorre principalmente nas zonas de falhas e fraturas do minério de manganês sílico-carbonatado.
- 2) Rochas Químicas Metassedimentares:
  - MSC Minério de Manganês Carbonatado: composição sílicocarbonática. Possui coloração cinza amarronzada, estrutura compacta e é extremamente rígido. Apresenta-se pouco fraturado, e as freqüentes intercalações centimétricas de biotita xisto grafitoso condicionam o surgimento de descontinuidades espelhadas, normalmente subparalelas à foliação, mas também ortogonais esporádicas. Localmente são observados veios centimétricos a decimétricos de rodonita e serpentina. Reage ao ataque por HCl 1:1.
  - MOX Minério de Manganês Oxidado: duro, pesado, muito escuro, quase esgotado na mina, localizado na porção SE da cava em forma de finas lentes, e nas superfícies, porção NW, em contato com granitóides intemperisados e caulinizados, biotita xistos grafitosos e biotita xistos decompostos.
- 3) Rochas Clásticas Metassedimentares (Xistos):
  - XQB Biotita-Feldspato-Quartzo Xisto: principal litologia encaixante do corpo de minério. Pode ocorrer também como faixas intercaladas com o minério. Possui coloração cinza esverdeada com variações de cinza escuro a castanho amarelado nas porções mais intemperisadas, foliação bem desenvolvida (porém normalmente selada) e granulometria muito fina a fina. Observa-se localmente a presença de cristais de granada, disseminados pela rocha ao longo dos planos de foliação. Sulfetos ocorrem também disseminados na rocha, preenchendo planos de fraturas ou como finas venulações milimétricas ao longo da foliação. Apresenta ainda anfibólio, geralmente como ripas foliação. longitudinais paralelas à Engloba tipos litológicos subordinados que variam de Clorita Xisto (CX), Quartzito Ferruginoso (QF), Chert (Chr), e Venulações Quartzo Feldspatos (QZ).
  - XGT Biotita Xisto Carbonoso: genericamente, descrita como Biotita Xisto Grafitoso, é a unidade litológica que mais apresenta feições de deformação, com estruturas de dobramento, lineamento mineral,

lineação de estiramento, zonas de cisalhamento, clivagens de crenulação, falhas com estrias e *slickensides*, além da própria foliação milonítica expressa em todos os seus afloramentos. É representada por uma rocha de cor cinza claro a escuro, em geral parcialmente intemperisada. Esta rocha apresenta-se intercalada em todos os pacotes litológicos do depósito, com espessuras normalmente centimétricas, podendo chegar a métricas.

- XGA Biotita-Feldspato-Granada-Quartzo-Anfibólio Xisto: forma um expressivo corpo localizado à superfície inferior da cava, nas porções SE, L e NE. Apresenta-se deformado, formando lentes dobradas com flancos rompidos, que se interpõem aos fragmentos de biotitafeldspato-quartzo xisto.
- FT Filito: ocorre como uma lente de cerca de 10m de espessura no biotita-feldspato-quartzo xisto, na parte central do setor NE. Possui coloração cinza esbranquiçada, apresenta-se muito alterado e a foliação fica pouco aparente devido ao grau de intemperismo.

Em resumo, apresentam-se os tipos litológicos segundo a sua posição em relação às rochas do minério:

- Minérios: MSC, MOX.
- Rochas Encaixantes: XQB, XGT, IAF.
- Rochas Intrusivas: GD, MGD, GRF, G2, XGA, FT.

## 3.2.2. Feições Estruturais

As principais feições estruturais presentes na mina estão organizadas na Tabela 3.1:

Estruturas Planares	Estruturas Lineares		
Bandamento Composicional S <sub>0</sub>	Lineação Mineral L <sub>n</sub>		
Xistosidade S <sub>n</sub>	Lineação de Estiramento L <sub>m</sub>		
Clivagem de Crenulação S <sub>n+1</sub>	Eixos de <i>Boudin</i> $\delta_n$		
Foliação Milonítica S <sub>m</sub> em Zonas de Cisalhamento	Eixos de Dobras $\beta_n$		
Falhas/Fraturas	Estrias L <sub>ef</sub> sobre Falhas		
	S <i>lickensides</i> L <sub>sf</sub> sobre Falhas		

Tabela 3.1 – Principais elementos estruturais presentes na mina.

## 3.2.2.1. Bandamento Composicional S₀

Interpretado como estrutura primária de natureza sedimentar a vulcanosedimentar (acamamento S<sub>0</sub>), originada durante a deposição das rochas sílicocarbonatadas. Essa feição é definida pela alternância entre leitos decimétricos a submétricos, de composição mineral distinta, ou pela variação textural da rocha, muitas vezes ressaltando um caráter rítmico; localmente percebem-se leitos com gradação normal. Em geral as diversas camadas observadas revelam geometrias de aspecto tabular e espessuras com poucas variações ao longo do seu traçado. Porém, locais afetados por dobramento e *boudin* podem salientar espessamento e/ou adelgaçamento inerente ao processo deformacional, modificando as dimensões originais do pacote.

Seu mapeamento em cada setor não mostrou variações significativas quanto à orientação espacial. Em todos os setores, S<sub>0</sub> mostra baixa dispersão, com tendência geral segundo NW-SE, e mergulhos subverticais a fortes para SW. A Figura 3.5 mostra os setores com os respectivos planos médios.



Figura 3.5 – Diagrama estrutural de pólos de  $S_0$  dos Setores da mina (Geoexplore, 2005).

## 3.2.2.2. Xistosidade S<sub>n</sub>

Feição penetrativa, observada em todas as rochas mapeadas na área da mina. É bem desenvolvida nos xistos encaixantes da mineralização, onde define uma xistosidade de cristalinidade fina a média, marcada por um arranjo planar dos minerais micáceos e prismáticos. Nos corpos manganesíferos essa estrutura não é perceptível na escala de amostra de mão. É menos desenvolvida ou ausente nos granitóides félsicos. Os dados estruturais de S<sub>n</sub> revelaram

orientações gerais semelhantes àquelas encontradas para  $S_0$ , com atitudes médias de 226%0°, 229%85° e 211%82°, respectiva mente para os Setores I, II e III (Figura 3.6). Os mergulhos variam de subverticais a forte para SW. Apesar disso,  $S_n$  revela uma leve variação angular maior para norte nos Setores I e II, e para oeste no Setor III, isto é, uma disposição levemente transversal ao bandamento composicional. Sobre a xistosidade  $S_n$ , verifica-se em vários afloramentos a presença de uma notável lineação mineral  $L_n$ , associada ao seu desenvolvimento e marcada, sobretudo pelo alongamento de cristais de biotita.



Figura 3.6 – Diagrama estrutural de pólos de  $S_n$  dos Setores da mina (Geoexplore, 2005).

## 3.2.2.3. Clivagem de Crenulação S<sub>n+1</sub>

Estrutura metamórfica, planar, não penetrativa, que se desenvolve em rochas incompetentes ou pouco plásticas ao esforço de deformação, na forma de planos de descontinuidade física (físseis) e/ou de recristalização preferencial de minerais metamórficos, e que se espaçam entre si em até 2cm no máximo, paralela ou subparalelamente aos planos axiais de dobras micro a mesoscópicas de crenulação. As "fatias" de rocha entre clivagens de crenulação chamam-se microlitons. O distanciamento dos planos de clivagem a mais de 2cm leva a classificá-los de fraturas ou sistema de fraturas, e se os planos se apresentarem muito cerrados, em uma estrutura penetrativa com pouca recristalização, a clivagem de crenulação passa a ser ardosiana, e ainda, se houver intensa recristalização, passa a ser uma xistosidade (Figura 3.7).

Essa feição foi observada em alguns locais da mina, normalmente no clorita xisto e no biotita xisto carbonoso. Ocorrem associadas com zonas de maiores magnitudes de deformação, porém por apresentar orientações diversas não foi possível estabelecer o seu real significado. Algumas vezes, percebe-se apenas lineações de crenulação, sem planos associados, e algumas concentrações coincidem com os eixos de *boudin* e de dobramento.



Figura 3.7 – Exemplos de Clivagem de Crenulação. Figura a: clivagem de crenulação observada na zona de charneira de uma dobra maior (as dobras nos microlitons são simétricas); Figura b: clivagem de crenulação observada num flanco de uma dobra maior (as microdobras são assimétricas).

#### 3.2.2.4. Foliação Milonítica S<sub>m</sub> em Zonas de Cisalhamento

Estas zonas foram de extrema importância na configuração dos corpos mineralizados de manganês. Apresentam-se com portes diversificados, com espessuras variáveis de milimétricas a métricas, ou ainda visíveis somente ao microscópio. As zonas mais marcantes são aquelas que apresentam orientação levemente transversal ao *trend* principal, NNW-SSE, desenvolvidas principalmente no Setor II (Anexo 1).

Nestas zonas, percebem-se processos de milonitização, marcada pela intensificação da xistosidade que passa para uma foliação de caráter milonítico (S<sub>m</sub>). No interior dessas zonas sigmóides de rocha e de foliação há, além de lineação de estiramento e *boudins*, porfiroblastos rompidos ou estirados, simétricos, notadamente formando "sombras de pressão" em suas caudas (Figura 3.8). Os corpos mineralizados afetados pelas zonas de cisalhamento adquirem formas amendoadas ou sigmoidais, com espessamento e prolongamento em seu comprimento. Os eixos de dobras apresentam orientações subparalelas a lineação de estiramento (L<sub>m</sub>).



Figura 3.8 – Zona de Cisalhamento em biotita-feldspato-quartzo xisto, com porfiroblastos estirados e sombras de pressão em sua cauda (Geoexplore, 2005).

#### 3.2.2.5. Falhas/Fraturas

Algumas famílias de falhas (transcorrentes) e fraturas são encontradas na cava da mina, e a família com maior densidade de falha/fratura (Setor II) apresenta o seu desenvolvimento subparalelo ao bandamento  $S_0$  e às superfícies de xistosidade  $S_n$ , entretanto alguns conjuntos transversais também estão presentes (Figura 3.9, Anexo 1 e Anexo 2). Os Setores I e II da mina apresentam maior densidade de fraturamento. No primeiro domina uma família com orientação NW e mergulho forte para NE. No Setor II domina uma família com orientação NW e mergulho forte para SW (Figura 3.10). Sobre os planos das falhas percebem-se estrias ou *slickensides* (Figura 3.11), indicando a direção de cisalhamento; os degraus (*steps*) sobre alguns planos indicam o sentido de cisalhamento.



Figura 3.9 – Estilo de falhamento oblíquo em Zona de Cisalhamento, no biotita xisto grafitoso (Geoexplore, 2005).



Figura 3.10 – Diagramas estruturais de planos de falhas para os setores da mina (Geoexplore, 2005).



Figura 3.11 – Exemplo de *slickenside*. O bloco que assenta sobre a superfície observada deslocou-se da esquerda para a direita, relativamente ao bloco inferior. A seta indica o sentido do bloco de cima.

## 3.2.2.6. Eixos de *Boudin* δ<sub>n</sub>

As estruturas do tipo *boudin* são bem evidentes nas rochas da cava, moldando inclusive as camadas mineralizadas em manganês. Foram constatadas duas orientações distintas de *boudinage*, provavelmente associadas a fases de deformações e dobramentos superpostas. A família de *boudinage* d<sub>1</sub> revela lineações subhorizontais ou com baixo caimento para NW, ao passo que a família d<sub>2</sub> mostra eixos subverticais.



Figura 3. 12 – Exemplos de *Boudin*. À esquerda: exemplo geral de *boudin*. À direita: Formas de *boudinage* em biotita xisto grafitoso – Mina de Morro da Mina (Geoexplore, 2005).

# 3.2.2.7. Eixos de Dobras $\beta_n$

As rochas da cava se caracterizam por apresentarem-se intensamente dobradas em várias escalas, mostrando diversos estilos de dobramentos. Evidências fornecidas pela relação clivagem/acamamento revelam tratar-se de dobras cerradas a isoclinais, subhorizontais e com plano-axial subvertical. Ao longo dos três setores estruturais da mina, foram verificadas dobras de menor ordem, desenvolvida sobre os estratos primários das rochas sedimentares, com baixa freqüência e dimensões variando de decímetros até alguns metros, remontando outras fases de dobramento. Essas dobras variam de abertas a fechadas e apresentam eixos subverticais ou com caimentos fortes a moderados.

O Anexo 3 apresenta o mapa geológico da mina Morro da Mina, identificando os principais tipos litológicos e estruturais, e o Anexo 4 apresenta todas as estruturas presentes na mina.

66



Figura 3.13 – Em planta, dobramento isoclinal simétrico com eixos verticalizados (Geoexplore, 2005).

## 3.3. Modelagem Geomecânica e Hidrogeológica da Mina

## 3.3.1. Investigações Geotécnicas da Área da Cava

Embora a mina esteja em operação desde o século IXX, o primeiro estudo geotécnico foi realizado em 1974, pela empresa Geotécnica Ltda. Este teve um caráter preliminar e a definição das inclinações dos taludes foi feita com base na experiência da empresa. Na época, não foram realizadas as seguintes atividades que hoje são indispensáveis para um estudo geotécnico em uma mina: estudos geológicos específicos, definição de setores na cava, realização de ensaios de laboratório, sondagens geotécnicas, e análises de estabilidade.

Entre 1987 e 1993 foram realizados mais de 1.800 metros de sondagens rotativas, e em 1993 foi realizado pela própria SMM um estudo de reavaliação das reservas de minério sílico-carbonatado, baseado num mapeamento de superfície e nestes metros de sondagem. Seções geológicas foram geradas a partir destas informações, porém o mapeamento geológico até a época não possuía informações geomecânicas e as descrições dos testemunhos não seguiram uma sistemática padronizada.

Em 2000, a empresa Sérgio Brito Consultoria Ltda. foi contratada pela SMM para realização de estudo geomecânico, com realização de trabalhos de campo de mapeamento lito-estrutural e geomecânico de superfície, e análises de estabilidade. A empresa utilizou as informações coletadas em campo e as descrições das sondagens existentes para propor um modelo geomecânico em profundidade, porém para uma boa extrapolação destes dados para profundidade seriam necessárias mais sondagens rotativas, o que foi proposto na época pela empresa. Neste período, a empresa MDGEO Ltda. foi contratada para realizar um estudo hidrogeológico na mina, logo, para realização das análises de estabilidade foram elaboradas hipóteses com relação ao nível d'água nos taludes.

No ano de 2002, a empresa SBC foi contratada novamente para elaboração de modelo geomecânico, e desta vez, com foco em uma possível mineração subterrânea, devido a cava estar se aprofundando e os taludes opostos tenderem a se convergir no centro, não restando assim espaço para os equipamentos, portanto, antes desta situação tomar forma, elaborou-se este estudo. Novamente, mais de 1.800 metros de sondagem rotativa foram realizados (11 furos – Campanha 2002), com o objetivo principal de se aferir a continuidade do corpo de minério em profundidade, e a descrição dos mesmos foi realizada pela própria SBC.

Foram levantados dos furos os seguintes dados geotécnicos: Litologia, Descontinuidade Principal, Grau de Consistência, RQD, e os Índices de Influência do Sistema de Classificação de Barton et al. (1974) (J<sub>n</sub>, J<sub>r</sub>, J<sub>a</sub>, J<sub>w</sub>, SRF). A partir destas informações, a SBC classificou os trechos dos testemunhos através deste sistema, utilizou a correlação entre o valor de Q e RMR, proposta por Bieniawski (1976), para calcular o valor de RMR e classificar com base neste sistema também, e extrapolou as classes para o maciço da cava, o que auxiliou no dimensionamento da mina subterrânea.

Também foram realizados alguns ensaios de laboratório em corpos de prova de rocha intacta, obtidos de testemunhos de sondagem e/ou extraídos de blocos (minério). Estes foram submetidos a ensaios de compressão uniaxial e diametral (tração indireta). Com o primeiro tipo de ensaio foi obtida, para alguns tipos litológicos, a resistência à compressão simples ( $\sigma_{ci}$ ) e o módulo de elasticidade tangente (estático) a 40% do valor de  $\sigma_{ci}$ . Com o segundo, obtevese a resistência à tração ( $\sigma_t$ ). Algumas orientações de xistosidade em relação à carga aplicada foram ensaiadas. Porém, não foram realizados ensaios para se obter a coesão efetiva (c') e ângulo de atrito efetivo ( $\phi$ ').

68

Em 2003, uma nova campanha de sondagens rotativas foi executada e os testemunhos foram descritos mais uma vez pela empresa contratada em 2002 (18 furos). Esta campanha objetivou estimar as reservas de minério e o aperfeiçoamento do modelo geológico/geomecânico. Realizou-se uma nova classificação dos maciços da mina, a partir das informações obtidas dos testemunhos (mesmas da campanha de 2002), e assim atualizou-se o modelo geomecânico da mina em profundidade.

Outras campanhas de sondagens foram executadas em 2004 e 2005, porém com o objetivo principal de estimar as reservas minerais, e os furos foram descritos novamente pela SBC, seguindo o padrão anterior. A Tabela 3.2 resume todas as campanhas realizadas na mina ao longo dos anos, e a Figura 3.14 mostra a posição dos 39 furos utilizados. Uma tabela com a locação destes encontra-se no Anexo 5.

Campanhas	Comprimento (m)	Furos	%	Furos Utilizados	Comprimento Utilizado (m)
1987 - 1993	1.817,01	28	15,4	-	-
2002	1.835,63	11	9,3	11	1.835,63
2003	4.616,10	18	39,0	16	4.295,55
2004	2.399,85	8	20,3	-	-
2005	1.891,10	13	16,0	12	1.671,95
Total	11.823,22	78	100	39	7.803,13

Tabela 3.2 – Resumo das sondagens rotativas.



Figura 3.14 – Posição dos 39 furos de sondagem efetivamente usados, em relação à mina.

Para realização do presente trabalho, obtiveram-se os dados da descrição das Campanhas de 2002, 2003, e 2005. Porém, dois furos da campanha de 2003 não foram utilizados, pois um se encontrava fora da região modelada, e a descrição do segundo não estava completa, e não foi obtida a descrição de um furo da campanha de 2005.

## 3.3.2. Setorização Geomecânica do Maciço da Cava

No estudo realizado em 2000 pela SBC (SBC, 2001), a cava foi dividida em quatro setores (Tabela 3.3), com base na orientação dominante dos taludes, contornando a cava no sentido horário, de sudoeste para nordeste.

Setor	Direção Dominante
SW1	N73W, com inclinação para nordeste
SW2	N50W, com inclinação para nordeste
NW	N14€, com inclinação para sudeste
NE	N50W, com inclinação para sudoeste

Tabela 3.3 – Setorização adotada em 2000 pela SBC (SBC, 2001).

Conforme já mencionado no item 3.2, em 2004, a empresa Geoexplore (Geoexplore, 2005) foi contratada para realizar mapeamento geológico e análise estrutural da região da cava da mina de Morro da Mina, com a finalidade de compreender os processos que deram origem à conformação atual dos corpos de minério, e às estruturas geológicas presentes. Para isto, a mina foi dividida em três setores estruturais para auxílio na visualização do comportamento da deformação ao longo do *trend* estrutural, no qual se encontram os corpos mineralizados.

Entretanto, no presente trabalho adotou-se a setorização elaborada pela SBC (2001), pois esta foi criada para fins de estudos geotécnicos, auxiliando nas análises de estabilidade dos taludes da cava realizadas pela própria empresa, e nas elaboradas como parte deste trabalho, onde se levou em conta as informações atualizadas sobre a geologia estrutural, obtidas dos levantamentos da Geoexplore (2005). Também se pretendeu com isto comparar os resultados alcançados com os obtidos pela SBC (2001).



Figura 3.15 – Setorizações da mina: Geoexplore (2005) – Setores I, II e III; SBC (2001) – Setores SW1, SW2, NW e NE.

## 3.3.3. Parâmetros Geomecânicos

## 3.3.3.1. Caracterização

A caracterização geomecânica do maciço rochoso deu-se através da descrição dos testemunhos de sondagem, com utilização de metodologia elaborada pela SBC (2004), onde os seguintes parâmetros foram avaliados: Grau de Resistência, Grau de Consistência ou Coerência, Grau de Alteração, Condição das Descontinuidades, e RQD, e através da aplicação dos sistemas de classificação de Barton et al. (1974) e Bieniawski (1976).

Como não foram realizados ensaios de laboratório em todos os tipos rochosos da mina (somente em 3 tipos e o minério), o valor da resistência destes foi estimada seguindo o procedimento adotado pela SBC (2004) para caracterização, e os resultados existentes serviram como balizadores dos estimados.

A SBC (2004) relacionou a tabela de resistência da ISRM (1978) (modificada, com as classes variando de R1 a R7, ao invés de R0 a R6) com o grau de consistência, ou coerência (baseado na tabela encontrada em Serra Jr. & Ojima (2004), porém, variando de C5 a C1). Este foi determinado por meio da apreciação táctil-visual da rocha com utilização de martelo de geólogo, canivete, e unha, para avaliação da resistência ao impacto, resistência ao risco, e

friabilidade. Em alguns furos, a classificação foi de acordo com a nomenclatura da ISRM (1978) (R1-R7), e em outros, foi de acordo com a de grau de consistência (C5-C1), e classes intermediárias, do tipo R5/R4 ou C1/C2 foram utilizadas também. A partir da tabela da ISRM (1978) e da correlação apresentada na Tabela 3.4, foram estimados os valores da Resistência à Compressão Uniaxial  $\sigma_{ci}$  para as rochas da mina.

Porém, observou-se nas descrições a ocorrência da litologia Xisto classificada como R7, e na prática, dificilmente esta litologia alcança a resistência de mais de 200 MPa. Logo, foram criadas tabelas separadas para cada tipo rochoso, com os respectivos graus de consistência e resistência avaliados nas descrições, e os valores de resistência estimados para aquele grau (no próximo subcapítulo são apresentadas as tabelas resumo, com os valores estimados). Onde ocorreu o grau máximo (R7 ou C1), adotou-se o valor máximo comumente encontrado para aquela litologia, de acordo com os limites apresentados por Vaz (1996) (Figura 2.4 – Capítulo 2), não necessariamente igual ao valor que acusa na tabela da ISRM (1978), pois cada tipo de rocha tem uma faixa de variação do valor de sua resistência.

Devido à complexidade da geologia do maciço da mina, foi necessária a adoção de algumas simplificações com relação à descrição das litologias nos furos de sondagem para facilitar as etapas seguintes do presente trabalho:

- Os poucos trechos onde ocorria o Quartzito foram considerados como sendo XQB, pois ocorre subordinado a este (níveis de espessura centimétrica), segundo Geoexplore (2005);
- Fez-se o mesmo com os trechos de Veios de Rodonita, sendo considerados como MSC, pois este mineral é constituinte do MSC;
- Os Granitos, Granitóides (G2), Granodioritos e Metagranodioritos foram englobados numa única litologia, IGT, pois são todas rochas intrusivas e pertencentes a mesma família (rochas graníticas);
- Nos trechos onde a descrição apresentava duas ou mais litologias juntas (ex. XQB+IGT), foi assumida a existência de só uma delas (a primeira que aparecia na seqüência);
- O Solo aterro e o Solo saprolítico foram considerados apenas Solo.

O grau de alteração não foi apresentado de forma direta, por meio de uma classificação em classes de alteração baseada na avaliação macroscópica das características petrográficas da rocha dos trechos de testemunhos, e sim através de uma correlação com a resistência (**Error! Reference source not found.**), explicada em detalhes no trabalho de Vaz (1996), pois na prática observa-se decréscimo da resistência com o aumento do grau de intemperismo.

Classes de Resistência	Descrição (ISPM 1079)	σ <sub>ci</sub> (ISRM, 1978 -	Consistência/ Coerência	
(ISRM, 1978) (SBC)	Deschçad (ISKM, 1976)	Intacta)	ABGE (SBC)	
R7	Extremamente Resistente	> 250	C1	
R6	Muito Resistente	100 - 250		
R5	Resistente	50 - 100	C2	
R4	Mediamente Resistente	25 - 50	C3	
R3	Branda	5 - 25	C4	
R2	Muito Branda	1 - 5	CE	
R1	Extremamente Branda	0,25 - 1	0.5	
Grupos de Rocha Intacta (Vaz, 1996)	σ <sub>ci</sub> (Vaz, 1996 - MPa) (Rocha Intacta)	Classes de Alteração que podem estar presentes (Vaz, 1996)	σ <sub>ci</sub> (Vaz, 1996 - MPa) (Limites entre as Classes de Alteração)	
Dura	> 100	R1, R2, R3, S2	> 30	
Média	30 - 100	(R1), R2, R3, S2	2.00	
Branda	10 - 30	(R2), R3, S2	10 - 30	
Muito Branda	2 - 10	R3, S2	2 - 10	
Solo	0,50 - 2	S2	0,50 - 2	

Tabela 3.4 – Correlação entre os Graus de Resistência, Consistência, e Alteração (baseado em SBC (2004)).

Para avaliação das condições das descontinuidades, foram utilizados os índices de influência J<sub>n</sub>, J<sub>r</sub>, e J<sub>a</sub>, do Sistema de Classificação de Barton, sendo estes relacionados à rugosidade e alteração das paredes das descontinuidades. Com estes índices e o valor de J<sub>w</sub>, SRF e RQD, calculou-se o índice de qualidade Q do sistema de Barton et al. (1974) para os trechos de testemunhos. Geralmente, nos intervalos onde ocorreu classe de resistência ou consistência menor que R3 ou C4, o RQD não era calculado, e o valor de 10% era assumido para aquele trecho, porém houve intervalos com estas classes onde o RQD foi calculado, e outros de outras classes com RQD assumido igual a 10%. O valor do índice de qualidade RMR foi calculado por meio da correlação com o índice Q, elaborada por Bieniawski (1976) e apresentada no Capítulo 2.

O Furo 05-01 encontra-se no Anexo 6 como exemplo típico dos 39 furos utilizados no presente trabalho.

## 3.3.3.2. Resistência

Os parâmetros de resistência c' (coesão efetiva) e  $\phi$ ' (ângulo de atrito efetivo) foram estimados a partir dos programas RocData 4.0 e RocProp, da Rocscience, com utilização do Critério de Ruptura de Hoek-Brown Generalizado (Hoek et al., 2002), pois o maciço da mina apresenta-se bastante fraturado. Os parâmetros apresentados pela empresa SBC em seu relatório (SBC, 2001), oriundos da sua experiência com maciços de características geológico-geotécnicas semelhantes, e de pesquisa bibliográfica, serviram como base para avaliação dos resultados obtidos nestes programas (Tabela 3.5).

Consistência	Litologia	Litologia Atual	γ(KPa)	c' (KPa)	φ' (°)
	Anfibolito	IAF	18,00	40,00	32,00
C6	Granito	IGT	18,00	40,00	30,00
-	Xisto Grafitoso	XGT	18,00	20,00	25,00
	Filito	FL	21,00	50,00	30,00
<u>C5</u>	Xisto	XQB	20,00	40,00	30,00
05	Xisto Biotítico	XGA	20,00	40,00	30,00
-	Xisto Grafitoso	XGT	19,00	40,00	28,00
C4 -	Granito	IGT	23,00	70,00	35,00
	Xisto	XQB	21,00	50,00	33,00
-	Anfibolito	IAF	27,00	100,00	37,00
	Filito	FL	23,00	80,00	35,00
C3	Granito	IGT	25,00	150,00	37,00
-	Xisto	XQB	25,00	100,00	35,00
-	Xisto Grafitoso	XGT	23,00	100,00	35,00
	Anfibolito	IAF	28,00	200,00	43,00
-	Filito	FL	26,00	200,00	43,00
$\mathbf{C}^{2}$	Granito	IGT	26,00	200,00	43,00
	Xisto	XQB	26,00	200,00	43,00
	Xisto Biotítico	XGA	26,00	200,00	43,00
	Xisto Grafitoso	XGT	26,00	200,00	43,00
<u> </u>	Minério	MSC	36,10	200,00	43,00
	Granito	IGT	26,00	200,00	43,00

Tabela 3.5 – Parâmetros de Resistência estimados por SBC (2001).

Para utilização do Critério de Hoek-Brown Generalizado são necessários os seguintes dados de entrada:  $\sigma_{ci}$  (Resistência a Compressão Uniaxial da Rocha Intacta), GSI ("Geological Strength Index"), m<sub>i</sub> (Constante do material, ou petrográfica, da rocha intacta), D ("Fator de Perturbação" do maciço), MR (Índice de Módulo),  $\gamma$  (Peso Específico da rocha), H (Altura do talude).

A resistência à compressão  $\sigma_{ci}$  foi estimada de acordo com o explicado no item anterior. Para adoção do valor de GSI, levou-se em conta as descrições dos furos de sondagem, fotos dos taludes da mina, e fotos dos testemunhos de sondagem, pois este índice é baseado na avaliação visual da litologia, estruturas, e condições da superfície das descontinuidades no maciço rochoso (Marinos et al., 2005), assim, elaborou-se uma correlação entre as colunas do item "Condições da Superfície", nas tabelas de GSI utilizadas pelo programa RocData 4.0 (Figuras 2.5 e 2.6 – Capítulo 2), com os graus de consistência e resistência da SBC e ISRM (1978), conforme a Tabela 3.6.

						GSI	
ISRM (1978)	ABGE	Grupos de Bocha	Classes de Alteração	ões da rfície	Estrutura: em função da Litologia e da Resistência		
(SBC)	(000)	(Vaz, 1996)	1996) (Vaz, 1996)		IGT, MSC	XGT, XQB, XGA, IAF, GRF	FT
R7							
R7/R6	C1	Dura					
R6		Duia	Dura			)A(	
R6/R5	C1/C2		R1 (RS)	BOA	$\triangleleft$	3AL	т
R5	C2			Dort	AD	URE A"	hol
R5/R4	C2/C3	Média			-UR	AD/	sen
R4	C3				SAT	PE	de
R4/R3	C3/C4	Branda		BOA	E O	DA/ DST	CH/
R3	C4	Dianua	RZ (RAD)	BOA	Ĭ	"CC	۲. ۲
R3/R2	C4/C5	Muito		RAZOÁ-	M	ATU	Ē
R2		Branda	RJ (RAN)	VEL	_	FR	
R2/R1	C5	Solo	S2 (SA)		_		
R1		5010	52 (SA)	FORE			

Tabela 3.6 – Correlações para adoção do valor de GSI.

Logo, à medida que o grau de consistência ou resistência decresce, o valor de GSI, e os dados de entrada  $m_i$ , MR,  $\gamma$ , foram considerados decrescentes também. Os valores de Peso Específico ( $\gamma$ ) foram assumidos com auxílio do programa RocProp, que consiste em um banco de dados com informações de

ensaios em rochas de diversas partes do mundo, e de pesquisa bibliográfica (Castro, 2005; SBC, 2001). Assumiu-se ainda o valor de D igual a 1,0, (considerando o maciço rochoso muito agredido pelo processo de escavação com explosivo), e a altura do talude de 100m (altura média).

Desta forma, obtiveram-se os parâmetros de resistência apresentados na Tabela 3.7. Os seguintes dados também são estimados pelo Critério de Hoek-Brown Generalizado:  $\sigma'_{3max}$  (Tensão Principal Menor Máxima Efetiva);  $\sigma_t$ (Resistência à Tração do Maciço Rochoso);  $\sigma_c$  (Resistência à Compressão Uniaxial do Maciço Rochoso);  $\sigma'_{cm}$  (Resistência à Compressão Global do Maciço Rochoso); Em (Módulo de Deformação do Maciço Rochoso);  $m_b$  (Valor reduzido da constante petrográfica  $m_i$ , para o maciço rochoso); s, a (Constantes que dependem das características do maciço rochoso).

	Consistância/		Principais Dados de Entrada e Saída			
Lito.	Coerência	Resistência	σ <sub>ci</sub> (MPa)	γ (MN/m³)	c' (MPa)	<b>¢' (</b> ۴
		R7	250,00	0,026	1,74	58,10
	C1	R7/R6	212,50	0,026	1,59	57,14
		R6	175,00	0,026	1,44	55,96
de	C1/C2	R6/R5	125,00	0,026	1,22	53,82
tói	C2	R5	75,00	0,026	0,97	50,35
ani	C2/C3	R5/R4	56,25	0,025	0,84	48,59
5 S	C3	R4	37,50	0,025	0,71	45,62
÷	-	R4/R3	26,25	0,024	0,46	37,70
Ö	-	R3	15,00	0,023	0,36	33,73
-	-	R3/R2	9,00	0,022	0,20	23,82
	-	R2	3,00	0,020	0,12	17,60
	-	R1	0,63	0,019	0,04	7,89
	C1	R7/R6	87,50	0,026	0,82	41,40
ç ()		R6	75,00	0,026	0,75	40,29
iste nos	C2	R5	50,00	0,026	0,60	37,32
X	C2/C3	R5/R4	43,75	0,025	0,55	36,62
tit: Car	C3	R4	37,50	0,023	0,49	36,09
o (C	-	R4/R3	26,25	0,022	0,28	27,34
	-	R3	15,00	0,021	0,21	23,79
afit	C4/C5	-	9,00	0,020	0,10	14,65
× 25	_	R2	3,00	0,019	0,06	10,11
	-	R1	0,63	0,019	0,02	4,15
. 0	-	R5	40,00	0,026	0,06	8,42
Ļ	-	R2	3,00	0,021	0,01	2,86
ᄣᇤ	-	R1	0,63	0,019	0,01	1,58

Tabela 3.7 – Parâmetros de Resistência para as principais litologias da Mina.

Tabela 3.7 – Parâmetros de Resistência para as principais litologias da Mina (Continuação).

	Consistância/		Principais Dados de Entrada e Saída			
Lito.	Coerência	Resistência	σ <sub>ci</sub> (MPa)	γ (MN/m³)	c' (MPa)	φ' (°)
	C1	R6	100,00	0,028	1,11	50,50
IAF - Anfibolito	C2	R5	75,00	0,028	0,98	48,48
	C3	-	37,50	0,027	0,71	43,65
	-	R4/R3	26,25	0,025	0,41	34,13
	-	R3	15,00	0,022	0,30	30,87
IAF	-	R3/R2	9,00	0,020	0,16	21,54
	-	R2/R1	1,81	0,018	0,05	10,03
.9 0	C1	R7/R6	187,50	0,036	2,45	56,39
MSC - Minério Sílico- Carbonatado	CI	R6	175,00	0,036	2,35	55,99
	C1/C2	-	125,00	0,035	1,91	54,12
	C2	R5	75,00	0,034	1,44	50,98
	-	R4	37,50	0,033	1,02	46,30
	-	R2	3,00	0,030	0,25	22,37
	-	R5	10,00	0,016	0,05	35,00
Solo	-	R3	6,00	0,016	0,04	33,00
	-	R2	3,00	0,015	0,04	32,00
	-	R1	0,63	0,015	0,03	30,00
Feldspato-Quartzo Xisto	C1	R7/R6	155,00	0,027	1,24	45,59
	CI	R6	130,00	0,027	1,11	44,41
	C1/C2	R6/R5	102,50	0,026	0,94	43,04
	C2	R5	75,00	0,026	0,78	40,83
	C2/C3	R5/R4	56,25	0,025	0,66	39,03
	C3	R4	37,50	0,024	0,52	36,34
	C3/C4	R4/R3	26,25	0,023	0,28	26,46
ita-	-	R3	15,00	0,021	0,20	23,26
siot	-	R3/R2	9,00	0,020	0,10	14,65
<u>ш</u>	-	R2	3,00	0,019	0,06	10,11
a B	-	R2/R1	1,81	0,019	0,03	6,10
×	-	R1	0,63	0,019	0,02	4,01
	-	R5	75,00	0,026	0,94	49,82
e	-	R4	37,50	0,025	0,69	45,06
Π. Bolo	-	R3	15,00	0,023	0,33	31,96
GRI anit olia	-	R3/R2	9,00	0,022	0,19	22,22
С С С	-	R2	3,00	0,020	0,11	16,29
	-	R1	0,63	0,019	0,03	6,63
<u> </u>	-	R6/R5	87,50	0,026	0,81	40,55
tita- anada ïbólio	-	R5	75,00	0,026	0,74	39,44
<ul> <li>- Bio</li> <li>ato-Gi</li> <li>ato-Gi</li> <li>ato-Gi</li> <li>ato-Gi</li> <li>ato-Gi</li> </ul>	-	R4	37,50	0,023	0,48	35,27
XGA Idspé Iuartz	-	R3	15,00	0,021	0,20	23,02
н Ц	-	R1	0,63	0,019	0,02	3,80

Comparando-se os valores dos parâmetros adotados pela SBC com os obtidos pelo critério de ruptura observou-se que os valores de  $\phi$ ' estão coerentes com os que a SBC assumiu para realização de suas análises de estabilidade, porém os valores de c' gerados foram maiores que os da SBC.

Ao estimar valores para GSI percebeu-se que este índice influencia bastante nos resultados de c' e  $\phi$ ', pois participa nos cálculos de m<sub>b</sub>, s, e a, que são parâmetros do Critério de Hoek-Brown Generalizado utilizados para estimar os parâmetros de Mohr-Coulomb, logo, exigiu-se bastante cautela para adoção deste dado de entrada, e ainda assim, os valores adotados podem não ser os ideais, devido aos resultados de c' apresentarem-se menos conservadores que os da SBC.

## 3.3.4. Ocorrência de Intemperismo

Observou-se que o processo intempérico atua nas rochas da região da cava a partir da superfície do terreno para o interior do maciço, como é mais comum. A decomposição atinge maiores profundidades em direção ao sul da cava. Como resultado, o setor SW apresenta-se mais alterado que o setor NE quando em mesma cota (Figura 3.16). O mesmo acontece com o lado SE da mina em relação ao setor NW (Figura 3.17).



Figura 3.16 – Visualização dos taludes da cava com as direções cardeais e colaterais aproximadas (Vale, 2006).



Figura 3.17 – Visualização dos taludes da cava com as direções colaterais aproximadas (Vale, 2006).

## 3.3.5. Investigações Hidrogeológicas da Área da Cava

Conforme mencionado anteriormente, no ano de 2000, a empresa MDGEO Ltda. realizou estudos para elaboração do modelo hidrogeológico físico conceitual da mina. As seguintes atividades foram executadas: compilação dos dados de geologia, levantamentos dos pontos d'água, dos dados hidroquímicos, e dos sistemas aqüíferos, e ensaio de bombeamento. Entretanto, não houve uma investigação dos níveis d'água, através de um sistema de monitoramento piezométrico.

## 3.3.5.1. Inventário dos Pontos D'Água

Dentre os pontos inventariados, destacam-se as nascentes NA10, NA11, NA12 e NA13, que se situam na área de lavra da mina (Figura 3.18). As nascentes NA10 e NA11 relacionam-se ao fraturamento do Granodiorito (considerado encaixante pela MDGEO Ltda.), enquanto as nascentes NA12 e NA13 ao minério de manganês. Outros pontos d'água foram levantados no entorno da mina, sendo chamados de: Nascentes de depósito de tálus, de solos e manto de alteração, de pilhas de estéril e aterros, e de barragens.



Figura 3.18 – Visualização da posição das nascentes na cava da mina.

A Tabela 3.8 apresenta as coordenadas destas nascentes, suas cotas, e a vazão estimada visualmente. Percebe-se o elevado gradiente hidráulico existente entre as nascentes das encaixantes com as do minério.

Nascente —		las UTM (m)	Cota (m)	Vazão (1/s)
		E - W N - S		Vazao (L/S)
NA10	628.340	7.717.900	990	0,10
NA11	628.139	7.717.972	950	0,10
NA12	628.195	7.717.895	925	1,00
NA13	628.361	7.717.780	920	1,00
	NA10 NA11 NA12 NA13	Coordenad           E - W           NA10         628.340           NA11         628.139           NA12         628.195           NA13         628.361	Coordenadas UTM (m)           E - W         N - S           NA10         628.340         7.717.900           NA11         628.139         7.717.972           NA12         628.195         7.717.895           NA13         628.361         7.717.780	Coordenadas UTM (m)         Cota (m)           E - W         N - S         Cota (m)           NA10         628.340         7.717.900         990           NA11         628.139         7.717.972         950           NA12         628.195         7.717.895         925           NA13         628.361         7.717.780         920

Tabela 3.8 – Coordenadas, cotas e vazões das nascentes da cava da mina.

## 3.3.5.2. Análise Hidroquímica

Durante o levantamento dos pontos d'água foram medidos os parâmetros físico-químicos de todos os pontos inventariados. A Tabela 3.9 descreve os valores medidos nas nascentes da área de lavra da Mina.

Tabela 3.9 – Parâmetros físico-químicos das nascentes da cava da mina.

	Cond. (µS/cm)	рН	Eh	Cota (m)
NA10	149	6,59	253	990
NA11	208	7,02	204	950
NA12	485	7,23	176	925
NA13	1458	6,81	5	920

As nascentes relacionadas ao minério de manganês apresentam condutividade elétrica bem superior às nascentes das rochas encaixantes. Isto

indica uma maior interação água/rocha do minério, que apresenta carbonatos em sua constituição. O pH (Potencial Hidrogeniônico) das nascentes da cava situase numa mesma faixa, entre 6,50 a 7,50. O Eh (Potencial de Oxirredução), entretanto, decresce para as nascentes com cotas mais baixas. Tal fato atesta para um maior isolamento das águas surgentes nas nascentes mais profundas da atmosfera, ou um maior tempo de residência dessas águas na rocha.

## 3.3.5.3. Sistemas Aqüíferos

• Aqüíferos Fraturados:

A cava da mina Morro da Mina está inserida dentro de um sistema aquífero do tipo fraturado. As descontinuidades das rochas são os principais elementos responsáveis pelas propriedades hidrodinâmicas deste aquífero. Englobam-se neste sistema aqüífero, as rochas sílico-carbonáticas do minério de manganês e suas encaixantes, tais como: anfibolitos e xistos, todos fraturados.

Aparentemente, o minério apresenta uma maior quantidade de fraturas abertas, o que permite a definição de uma unidade aqüífera distinta para este, que é denominada de "Unidade Aqüífera do Minério". As demais rochas são designadas como "Unidade Aqüífera das Encaixantes".

Outra diferenciação dessas unidades pode ser feita pela hidroquímica. A Unidade Aqüífera do Minério permite uma boa interação água/rocha, resultando em água com alta salinidade, diferindo da Unidade Aqüífera das Encaixantes, com menor salinidade.

#### Coberturas

As coberturas rochosas aparentemente não representam um sistema aqüífero. Estão presentes por todo o entorno da mina, sendo representadas principalmente por depósitos de tálus e pelo manto de alteração das rochas (solos). Tratam-se, em geral, de meios bastante porosos e com boa capacidade de armazenamento. Os depósitos de tálus apresentam também condutividade hidráulica elevada. Já nos solos, a presença de material argiloso, tende a diminuir sua condutividade hidráulica.

Essas coberturas apresentam, no entanto, uma pequena distribuição espacial, restringindo-se às porções superficiais do terreno. Formam então, zonas aqüíferas bem superficiais, sendo, por isto, comumente referidos como Aqüíferos Rasos.

Os Aqüíferos Rasos são responsáveis pela geração de nascentes d'água, que apresentam como característica a alta variabilidade sazonal de suas descargas. Trata-se de águas com pouco tempo de residência no solo, que representam a parcela de escoamento subsuperficial ou hipodérmico.

## 3.3.6. Parâmetros Hidrodinâmicos

Características hidrodinâmicas do sistema aqüífero da mina foram obtidas por meio de ensaio de bombeamento realizado em um poço no interior da cava, chamado Poço 02. Realizaram-se medidas das variações dos níveis d'água em três pontos de observações, além do próprio poço. O bombeamento teve a duração de 24 horas, sendo monitorado o rebaixamento e a recuperação dos níveis d'água.

O Poço 02 situa-se bem próximo à principal área de lavra da mina. Sua profundidade total é de 50 metros, com diâmetro final de 8<sup>°</sup>, todo perfurado no minério. Os indicadores de nível d'água, PZ01 e PZ02, tratam-se de furos com 3<sup>°</sup> de diâmetro, situados respectivamente a 25,33m a SSW e 22,07m a ENE do Poço 02. O PZ01 possui 27,40 metros de profundidade todo perfurado no minério, e o PZ02 apresenta 23,40 metros de profundidade, com os primeiros metros iniciais no xisto e o restante no minério. O PZ03 é na realidade um poço existente na mina chamado de Poço 01, que funciona atualmente apenas como indicador de nível d'água. Este poço foi perfurado no minério, possuindo 55 metros de profundidade, com diâmetro de 8<sup>°</sup>, e situa-se a 123,04m a NW do Poço 02.

Os resultados obtidos das interpretações do ensaio de bombeamento são sintetizados pela Tabela 3.10. Os cálculos dos parâmetros foram feitos com os dados da fase de recuperação dos indicadores de nível d'água, pois os dados da fase de rebaixamento foram prejudicados pela grande variação da vazão de bombeamento ocorrida durante o ensaio. A tabela mostra valores que refletem o comportamento do aqüífero, pois este é do tipo fraturado, e os valores de condutividade hidráulica encontrados variam conforme a existência de fraturas abertas entre o poço bombeado e o ponto de observação.

Tabela 3.10 – Parâmetros obtidos da interpretação do ensaio de bombeamento (T – Transmissividade, b – espessura saturada do meio, K – Condutividade Hidráulica, S – Coeficiente de Armazenamento) (MDGEO, 2001).

Ensaio (Fase de Recuperação)	Método	T (m²/dia)	b (m)	K (m/dia)	S
PZ01	Theis	5,94		0,283	0,0019
PZ01	Recovery T & J	8,65	20,94	0,413	-
PZ01	Cooper & Jacob	12,50		0,599	0,00112
PZ02	Theis	8,89		0,513	0,00106
PZ02	Recovery T & J	12,80	17,32	0,740	-
PZ02	Cooper & Jacob	12,10		0,702	0,000588
PZ03	Theis	17,90		0,339	0,000376
PZ03	Recovery T & J	40,50	52,89	0,767	-
PZ03	Cooper & Jacob	35,90		0,678	0,00026

Através da análise de apenas três pontos de observação, torna-se difícil a definição do vetor de condutividade hidráulica para o aqüífero em estudo, segundo a MDGEO (2001). Seria necessária a existência de um número bem maior de pontos de observação para possibilitar uma melhor interpretação dos resultados. De qualquer forma, os resultados do ensaio permitem uma estimativa dos parâmetros hidrodinâmicos do aqüífero, bem como de sua tipologia. A falta de pontos de observações nas rochas encaixantes não permite uma avaliação de suas características hidrogeológicas, e nem da conexão hidráulica com o minério.

De acordo com a MDGEO (2001), os dados do PZ03 apresentaram uma melhor adequação à curva de Theis, logo, os resultados obtidos por esta interpretação são os mais representativos para a Unidade Aqüífera do Minério na direção considerada (N50W). Os valores obtidos do PZ01 e PZ02 possivelmente apresentam a influência da Unidade Aqüífera das Encaixantes.

Com relação aos níveis da água subterrânea, até o momento não existe um sistema de monitoramento piezométrico, e assim não há estudos para definição destes, o que ajudaria no entendimento pleno dos sistemas aqüíferos da mina e suas interligações, e na identificação segura das elevações da água para utilização nas análises de estabilidade.

### 3.3.7. Modelo Geomecânico Existente

Segundo a empresa SBC (2004), de uma maneira geral, a rocha encaixante (estéril) de maior ocorrência é o biotita-feldspato-quartzo xisto (XQB), que determina maciços de qualidade geomecânica muito boa (Classe II), salvo nos trechos situados no horizonte mais alterado, ou seja, acima do topo rochoso são. A elevação do topo rochoso são se apresenta bastante variada, mas podese considerar sua elevação como sendo na cota 945m. Assim, os litotipos situados acima desta elevação apresentam classes de pior qualidade geomecânica.

O biotita-feldspato-quartzo xisto quando alterado, geralmente apresenta as paredes das descontinuidades plano-lisas, ocasionalmente preenchidas com uma película de mica de baixa resistência ao atrito. Os anfibolitos (IAF) e os biotita-feldspato-granada-quartzo-anfibólio xistos (XGA) apresentam características geotécnicas bastante semelhantes ao biotita-feldspato-quartzo xisto.

Para as intrusões graníticas (IGT), ocorre uma melhora da qualidade do maciço para as profundidades inferiores a cota 945m. Portanto, as descontinuidades, menos freqüentes que nos litotipos descritos anteriormente, não apresentam preenchimento de materiais de baixa resistência, e sim levemente alteradas. Porém, o biotita xisto grafitoso, mesmo nos horizontes de alteração inferiores, onde se espera maior competência do maciço, apresenta baixa resistência e grau de fraturamento elevado. Sua ocorrência é bastante esparsa e de extensões limitadas.

O minério (MSC) determina locais com classe variando entre bom a muito bom e excelente. De uma maneira geral, o maciço em minério tem resistência constante e igual a R5 (rocha resistente). No Anexo 7 encontra-se um Mapa Geomecânico superficial da mina.

#### 3.3.8. Modelo Hidrogeológico Existente

De acordo com a empresa MDGEO (2001), a mina Morro da Mina está inserida dentro de um sistema aquífero fraturado anisotrópico, onde se distinguem a priori, duas unidades aqüíferas: Unidade Aqüífera do Minério e Unidade Aqüífera das Encaixantes. A Unidade Aqüífera do Minério é constituída pelas rochas sílicocarbonáticas do minério de manganês. Trata-se de uma unidade aqüífera anisotrópica, com condutividade hidráulica (K) variando entre 0,30 a 0,50m/dia. O coeficiente de armazenamento (S) apresenta valores entre 10<sup>-4</sup> e 10<sup>-3</sup>. São valores baixos que representam uma pequena capacidade de armazenamento de água e baixa condutividade hidráulica. A presença do carbonato nesta unidade aqüífera resulta em altos valores de salinidade da água. As nascentes NA12 e NA13, situadas dentro da cava da mina, representam os pontos de descarga desta unidade aqüífera. Com base nos parâmetros físico-químicos, as águas surgentes na nascente NA13 apresentam um caráter isolado da atmosfera, ou seja, águas subterrâneas com elevado tempo de residência no solo. Este caráter é menos pronunciado na nascente NA12.

A Unidade Aqüífera das Encaixantes é formada por todas as demais rochas existentes na mina. As nascentes NA10 e NA11, situadas nos taludes da cava, representam pontos de descarga desta unidade aqüífera. O elevado gradiente hidráulico, existente entre essas nascentes e as nascentes da unidade aqüífera do minério, indica uma baixa condutividade hidráulica desta unidade aqüífera, ou pequena conexão hidráulica entre as unidades. A salinidade das águas da Unidade Aqüífera das Encaixantes é bem inferior às do Minério.

De modo geral, todo o sistema aqüífero formado por essas duas unidades é pouco expressivo, com a água acumulada nas porções mais fraturadas das rochas. Trata-se de um sistema aquífero localizado que dificilmente terá influência dos córregos e nascentes ao redor. Todas as nascentes naturais inventariadas no entorno da mina são caracterizadas, a priori, como de aqüíferos rasos.