

## **GSI (*Geological Strength Index*) e RMR (*Rock Mass Rating*) para as formações ferríferas bandadas da mina do Sapecado, borda leste do sinclinal Moeda, Quadrilátero Ferrífero – MG, Brasil**

Flávio Affonso Ferreira Filho  
VALE, Ouro Preto-MG, Brasil, [flavio.affonso@vale.com](mailto:flavio.affonso@vale.com)

**RESUMO:** As classificações geomecânicas têm sido utilizadas para estimar os parâmetros mecânicos dos maciços rochosos. Os projetos de cavas de mineração têm como premissa básica o ângulo geral dos taludes, visando o maior aproveitamento econômico da reserva mineral. Para a definição deste ângulo adotam-se métodos de análises de estabilidade de taludes, nos quais os valores de resistência e deformação dos maciços rochosos são preponderantes.

Para as formações ferríferas bandadas os valores dos parâmetros de resistência adotados são alvos de questionamentos, entre outros àqueles relacionados à variabilidade dos tipos litológicos e estruturas geológicas, ao número de ensaios de laboratório da rocha intacta e a transposição desses valores para os maciços rochosos.

Este artigo discute a utilização dos sistemas de classificação de maciços rochosos GSI (*Geological Strength Index*) e RMR (*Rock Mass Rating*), aplicando-os simultaneamente em taludes rochosos construídos em formações ferríferas bandadas na mina do Sapecado, da empresa VALE, localizada na borda leste do sinclinal Moeda, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil.

O trabalho constou da identificação das tipologias das formações ferríferas bandadas, itabiritos e hematitos, com a tomada das atitudes de suas estruturas geológicas. Os maciços rochosos foram associados ao quadro de maciços fraturados do GSI, utilizando o sistema RMR para ajustar o intervalo de valores. Os estudos anteriores dos maciços rochosos realizados nesta mesma mina utilizaram os quadros do ISRM (*International Society for Rock Mechanics*) relativos aos graus de alteração, consistência e fraturamento, bem como o tipo de descontinuidade, e suas características mecânicas: persistência, alteração das paredes, abertura, rugosidade, preenchimento e o RQD (*Rock Quality Designation*), o que permitiu a reclassificação dos maciços rochosos pelo sistema RMR.

Desta forma, confirmou-se a relação entre os dois sistemas para as formações ferríferas e pôde-se separar os itabiritos friáveis, intemperizados, com comportamentos mecânicos distintos. Classificaram-se também os itabiritos e hematitos compactos e médios, com modos de ruptura controlados pelas estruturas geológicas. As diferentes tipologias de formações ferríferas foram enquadradas no *chart* de maciços fraturados do GSI e descritas suas características geomecânicas sobre a ótica do sistema RMR.

Este estudo complementa os ensaios de rocha intacta de algumas minas da VALE, e destina-se a obter dados de entrada do *software RocData*, da *Rocscience*, para estimar os parâmetros de resistência e deformabilidade dos maciços rochosos em formações ferríferas bandadas.

Com esta metodologia se espera reduzir as incertezas relacionadas às avaliações de projetos em taludes rochosos de mineração, maximizando a lavra do minério, dentro das normas de segurança adotadas pelas empresas mineradoras.

**PALAVRAS-CHAVE:** maciços rochosos, formações ferríferas bandadas, RMR, quadro GSI.

## 1 INTRODUÇÃO

Segundo Castro (2004), em minas a céu aberto, devido à amplitude da cava e a dinâmica da lavra, a aplicação de classificações geomecânicas para a determinação de parâmetros de resistência dos maciços rochosos, tem sido uma prática consistente para a análise de estabilidade de taludes.

O maciço rochoso é uma entidade natural escavada para receber uma obra de engenharia, no caso estudado, taludes rochosos de mineração (TRM). Tem capacidade para armazenar tensões, sendo constituído pela matriz rochosa (rocha intacta) e por todas as descontinuidades, estruturas geológicas que interrompem a continuidade das propriedades mecânicas da rocha intacta, isolando esta em forma de blocos (Figura 1).



Figura 1. Maciço rochoso de hematita da mina do Sapecado. Notar as 3 famílias de descontinuidades e os blocos de rocha intacta, de tamanho decimétrico, individualizados.

No estudo dos maciços rochosos de taludes de mineração a céu aberto são conhecidas duas metodologias: a direta, através de ensaios de laboratório e de campo e a indireta, utilizando as diferentes classificações geomecânicas existentes na literatura (Cervantes, 2007). A adoção de uma dada metodologia é função da distribuição e quantidade de famílias de descontinuidades existentes no maciço rochoso em relação às dimensões do talude (Figura 2). Assim, se o maciço rochoso se comporta como rocha intacta ou até com dois sistemas de descontinuidades, é possível a aplicação da

metodologia direta para a avaliação. Caso o maciço rochoso seja fraturado, com um número de famílias igual ou superior a três, aplica-se a metodologia indireta (Hoek & Brown, 1988).

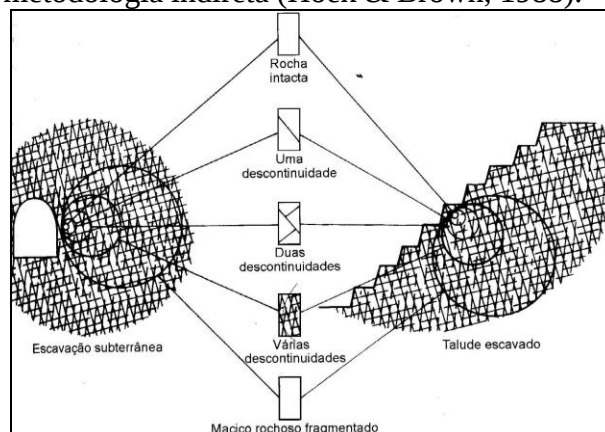


Figura 2 – Efeito escala nos maciços rochosos. Fonte: Diniz, 2005.

A saúde, ou o desempenho adequado, dos TRM depende: da história geológica e deformacional das rochas; do histórico de rupturas e deformação desses taludes; dos parâmetros mecânicos de deformabilidade e resistência dos maciços rochosos; das condições hidrogeológicas, permeabilidade e condutividade; do estado de tensões naturais e induzidas, altura e ângulo dos taludes; e também das condições de drenagem superficial (Diniz, 2005).

## 2 RMR (ROCK MASS RATING) E GSI (GEOLOGICAL STRENGTH INDEX)

Embora existam muitas classificações de maciços rochosos, possivelmente a mais utilizada e adequada para TRM seja a de Bieniawski (1989), com o índice RMR. Mais recentemente, Hoek (1994) propôs o sistema GSI que, de caráter mais qualitativo, é um elemento de entrada no *software RocData*, para a obtenção de parâmetros de deformabilidade e resistência do maciço rochoso.

O RMR é um sistema empírico proposto por Bieniawski em 1974 para classificação de maciços rochosos, reconhecido como classificação geomecânica. Foi inicialmente definido para aplicações em projetos de túneis, entretanto no decorrer do tempo maiores registros de dados foram adicionados, originando mudanças nos pesos dos diferentes

parâmetros geomecânicos, e sua expansão para aplicações em taludes. A última versão do sistema foi apresentada por Bieniawski em 1989 (In: Assis, 2013). Utiliza seis parâmetros: resistência uniaxial da rocha intacta, índice RQD (*Rock Quality Designation*), espaçamento das discontinuidades, padrão das discontinuidades, ação da água subterrânea e orientação das discontinuidades em relação à estrutura geotécnica, sejam túneis ou taludes, sendo este um fator depreciador ou não.

Na aplicação dessa classificação, o maciço rochoso é dividido em regiões, em função de características geológicas, tipos de rocha, mudanças de espaçamento das discontinuidades, etc.; e cada uma é classificada separadamente. O quadro 1 apresenta os cinco primeiros parâmetros acima listados. Estes valores são somados para obter o valor de RMR, com mínimo de 8 e máximo de 100 pontos.

Quadro 1. Parâmetros de classificação do sistema RMR com seus pesos.

| Parâmetros                                   | Faixa de valores                  | Faixa de valores   |         |             |                 | Para menores valores, recomenda-se ensaio (N) |
|----------------------------------------------|-----------------------------------|--------------------|---------|-------------|-----------------|-----------------------------------------------|
|                                              |                                   | >10                | 4-10    | 2-4         | 1-2             |                                               |
| 1 Resistência da rocha intacta (MPa)         | Resistência a compressão uniaxial | >250               | 100-250 | 50-100      | 25-50           | 5-25                                          |
| 2 RQD (%)                                    | Peso                              | 13                 | 12      | 7           | 4               | 2                                             |
| 3 Espaçamento das discontinuidades           | Peso                              | 20                 | 15      | 13          | 8               | 3                                             |
| 4 Padrão das discontinuidades (ver tabela E) | Peso                              | 30                 | 25      | 20          | 10              | 0                                             |
| 5 Ação da água subterrânea                   | Condição geral no maciço          | Completamente seco | molhado | gotejamento | fluxo abundante |                                               |
|                                              | Peso                              | 15                 | 10      | 7           | 4               | 0                                             |

Para o cálculo do RQD em afloramentos utilizou-se a proposta de Palmstrom (2005), na qual  $RQD = 115 - 3.3J_v$ , sendo  $J_v$  o índice volumétrico, ou seja, o número de fraturas em  $1m^3$  do maciço rochoso, segundo a relação:  $J_v = 1/S_1 + 1/S_2 + 1/S_3 + \dots 1/S_n$ , onde  $S_1$ ,  $S_2$  e  $S_3$  são as médias dos espaçamentos das fraturas (Figura 3).

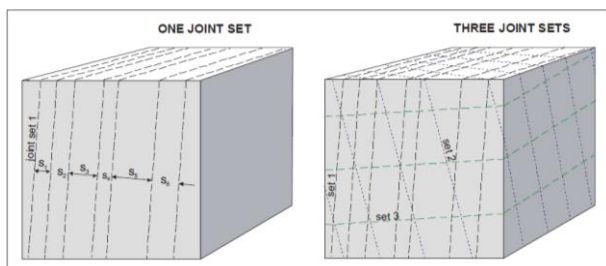


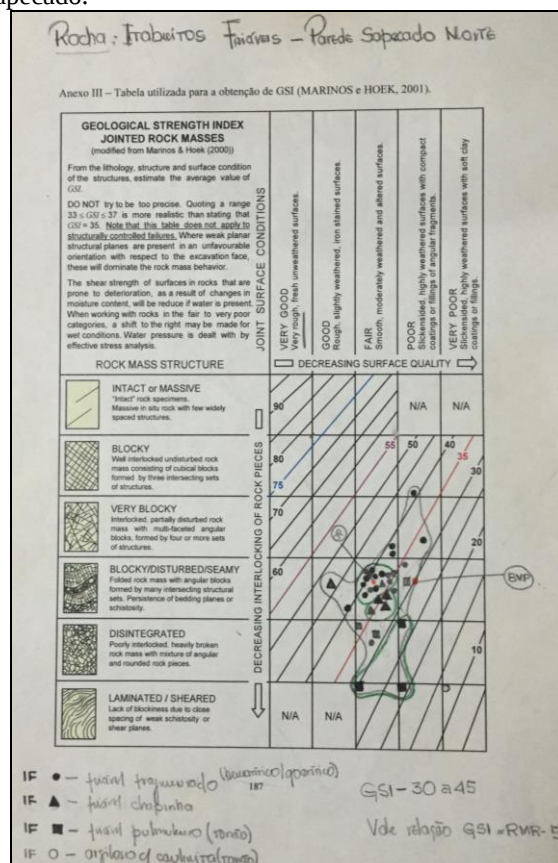
Figura 3 – Conjuntos de fraturas e o espaçamento variável entre elas. Fonte: Palmstrom, 2005.

O RMR é um valor de referência para deduzir parâmetros de deformabilidade, resistência e tempo de auto-sustentação, assim como estabelecer correlações entre outros sistemas de classificação e definir suportes de maciços rochosos (Hoek & Brown, 1980 e Bieniawski, 1989).

O índice GSI de Hoek (Hoek, 1994; Hoek *et al.*, 1998) fornece o decaimento das propriedades de resistência e deformabilidade da rocha intacta para o maciço rochoso. Estes parâmetros mecânicos são necessários para realizar análises de estabilidade de taludes, tanto por equilíbrio limite como por modelagem numérica. O quadro 2 apresenta a forma de se obter o GSI para rochas fraturadas, que leva em conta o grau de faturamento, ou número de discontinuidades, assim como o travamento entre os blocos, além das características de alteração das estruturas.

O RMR se relaciona com o GSI segundo a equação:  $GSI = RMR_{89} - 5$ , para valores de  $RMR_{89} \geq 23$  (Assis, 2013).

Quadro 2. *Chart* para a obtenção do GSI. Planilha de campo com os pontos plotados relativos a cada afloramento de itabirito friável na parede norte da cava do Sapécado.



Além do quadro de maciços fraturados para a obtenção do GSI, existe também o de rochas tipo *flysch*, ou seja, rochas formadas por intercalações sedimentares arenosas e argilas (Hoek *et al.*, 1998).

Neste trabalho foi adotado o quadro de maciços fraturados para a classificação das formações ferríferas bandadas, pois tais rochas não exibem características de *flysch*, mesmo se tratando de rochas anisotrópicas, visto que o quadro para maciços fraturados permite a classificação de rochas foliadas.

### 3 MINA DO SAPECADO

A mina do Sapecado (Figura 4), da VALE, está localizada no município de Itabirito, Minas Gerais, e faz parte do conjunto de três cavas a céu-aberto, denominadas de Galinheiro, Pico e Sapecado, alinhadas na direção sudoeste-nordeste.



Figura 4 – Foto aérea da mina do Sapecado, com o Pico do Itabirito ao fundo.

A cava do Sapecado encontra-se em franco processo de expansão, com geometria elipsoidal bastante alongada (Figura 4). Em 2015 a operação de mina movimentou 32,2 Mt com relação estéril/minério de 0,88.

Em relação à instabilização de taludes a cava, em seu estágio atual, não apresenta histórico de rupturas nem de deformação, tendo seu principal problema geotécnico relacionado à drenagem das bermas, o que ocasionou o surgimento de grandes erosões.

Essas cavas estão posicionadas no segmento sul do flanco leste do sinclinal da Moeda, estrutura geológica inserida no oeste da

Província Mineral do Quadrilátero Ferrífero (PMQFe) (Dorr, 1969) (Figura 5).

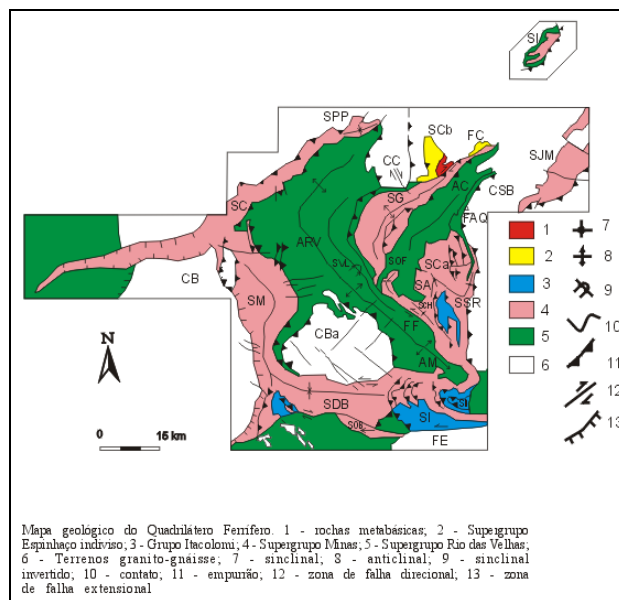


Figura 5 – Mapa geológico-estrutural do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, com a localização da mina do Sapecado (círculo preto), no sinclinal Moeda (SM).

A geologia e a litoestratigrafia do Quadrilátero Ferrífero (QFe) foram descritas em detalhe por Dorr II (1969). As principais unidades litoestratigráficas do QFe são: o embasamento granito-gnaiss do Arqueano, o cinturão de rochas verdes arqueanas do Supergroup Rio das Velhas e as unidades clásticas e químicas paleoproterozóicas do Supergroup Minas (Figura 6).

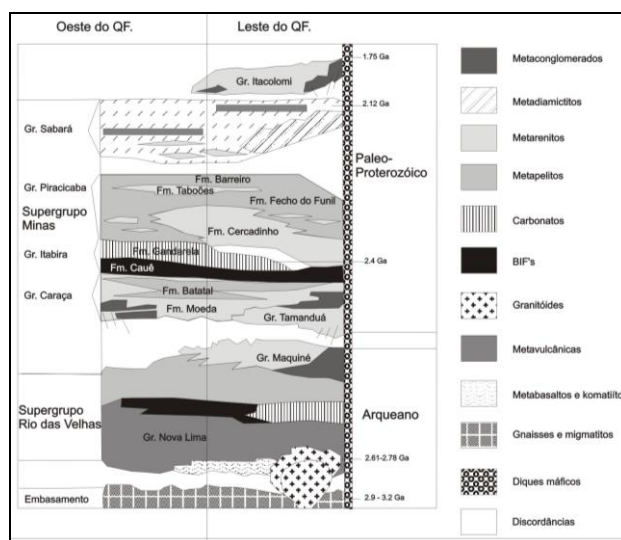


Figura 6 – Coluna cronoestratigráfica do Quadrilátero Ferrífero. Fonte: Alkmim & Marshak, 1998.

Os depósitos de classe mundial de minério de ferro do QFe estão hospedados em itabiritos (formações ferríferas bandadas metamorfisadas) da Formação Cauê, do Grupo Itabira, unidade química sedimentar intermediária do Supergrupo Minas. Processos geológicos de enriquecimento produziram grandes reservas de minério supergênico (Dorr, 1969), em geral friáveis, ou seja, de baixa compactidade.

O sinclinal Moeda estende-se por aproximadamente 40 km, e possui o flanco oeste com estratigrafia normal, de direção N-S, e o flanco leste com estratigrafia inversa, de direção NW-SE, no segmento norte, e SW-NE, no segmento sul, em contato com o Complexo Metamórfico do Bação. No flanco leste registra-se uma forte variação no mergulho da foliação principal (bandamento composicional Sb) quase sempre com caimento no sentido leste. Um complexo acervo estrutural, dúctil-rúptil, de características compressivas aponta para uma deformação com polaridade tectônica de ESE para WNW (Silva 1999). A tectônica que envolve o sinclinal Moeda abrange todas as etapas da história evolutiva do Quadrilátero Ferrífero.

A mina do Sapecado passou por processos de alteração supergênica, com enriquecimento dos itabiritos, exibindo perfis de alteração que variam de poucos metros a 200m abaixo da superfície topográfica atual. Isto produziu intercalações de itabiritos compactos (rochas duras), sem enriquecimento em ferro, com itabiritos alterados e hematititos, ambos macios, em profundidade (Spier *et al.*, 2003).

As unidades estratigráficas presentes na mina do Sapecado são itabiritos e minérios de ferro da Formação Cauê, tendo como encaixantes a leste as rochas metassedimentares clásticas das formações Moeda e Batatal, e a oeste as rochas predominantemente químicas da Formação Gandarela.

As rochas estão orientadas ao longo da direção geral do bandamento Sb, coincidente com o acamamento S0, N30°-35°E, mergulhando 45°-90° para SE e NW (Figura 7). Existem outras duas clivagens espaçadas, S2 e S3, produtos de dobras, verticais e recumbentes, sucessivamente. Essas três descontinuidades são

as principais estruturas geotécnicas impressas na formação ferrífera.

A principal formação ferrífera da mina é um típico itabirito silicoso, protominério, metamorfisado e caracterizado por um bandamento metamórfico composicional Sb com bandas milimétricas a centimétricas de quartzo intercaladas com bandas, também milimétricas a centimétricas de martita e hematita. A lixiviação total ou parcial do quartzo promoveu o enriquecimento supergênico, gerando corpos macios de minério de ferro, itabiritos ricos e hematititos (Spier *et al.*, 2003).

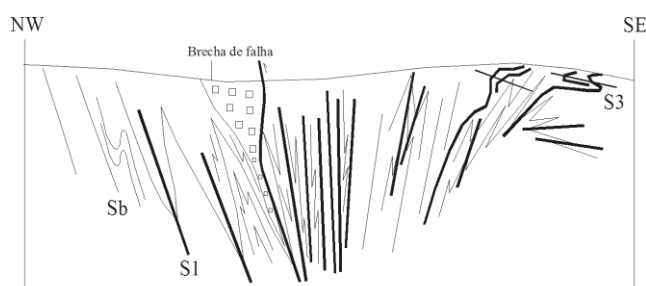


Figura 7 – Seção da mina do Sapecado, mostrando a estrutura em flor positiva. A localização da seção encontra-se na figura 8. Fonte: Ferreira Filho, 2005.

#### 4 RMR E GSI PARA AS FORMAÇÕES FERRÍFERAS DA MINA DO SAPECADO

Para o mapeamento geológico-geomecânico das formações ferríferas da mina do Sapecado adotou-se o seguinte método:

1. delimitaram-se os taludes que formam a cava;
2. as estações geológicas-geomecânicas foram feitas em cada conjunto de taludes (parede), com espaçamento variável em função das mudanças litológicas ou estruturais, para verificar se as características mecânicas dos litotipos de formação ferrífera variavam em cada parede;
3. os pontos geomecânicos levantados em trabalhos anteriores (Ouro Preto Geologia, 2005; BVP Engenharia, 2012) foram reclassificados pelo RMR versão 1989;
4. em cada estação geológica-geomecânica foi identificado o tipo litológico, tomada a atitude das descontinuidades presentes e feitas as classificações de maciços rochosos, RMR e GSI, nesta ordem, sendo plotado o GSI na

quadro de maciços fraturados (Quadro 2), adotando a relação entre os dois sistemas para melhor ajustar o valor do GSI.

A figura 8 mostra a topografia de novembro de 2015 da mina do Sapecado, base para o mapeamento geológico-geomecânico.

Foram mapeados e classificados os seguintes tipos litológicos: hematititos friável (HF), médio (HM) e compacto (HC) e os itabiritos friáveis, médios (IM) e compactos (IC). Os hematititos compactos foram divididos em HC1 e HC2, em função do espaçamento das descontinuidades, sendo o HC1 (Figura 9b) associado a charneiras de dobras decamétricas, com o S3 bem marcado, e o HC2 (Figura 9a) a corpos tabulares de dimensões decamétricas, com o S<sub>b</sub> e o S3 bem caracterizados. Os itabiritos friáveis puderam ser separados, em função da características mecânicas, em pulverulento (IFP) (Figura 10a), chapinha (IFC) e fragmentado (IFF) (Figura 10b). As características mecânicas dos tipos de formação ferífera e de suas descontinuidades, bem como a classe do maciço rochoso segundo o RMR e o valor do GSI estão mostradas no quadro 3.

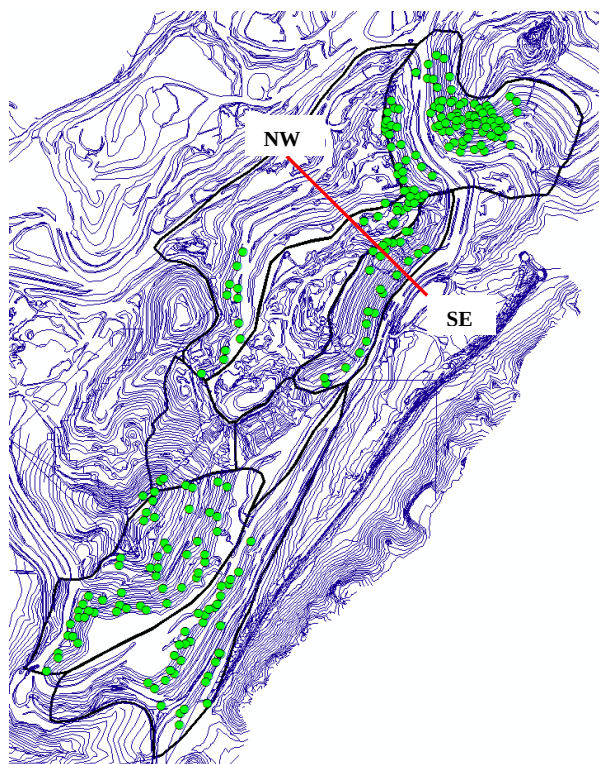


Figura 8 – Mapa topográfico da mina do Sapecado, com as estações geológicas-geomecânicas levantadas. A seção estrutural da figura 7 está marcada pela linha vermelha. Em preto estão limitadas as paredes, conjunto de taludes, da cava.

Os itabiritos, em especial os friáveis, ainda foram divididos segundo a mineralogia em: goetítico, anfibolítico e limonítico, jargão já adotado pelos geólogos da VALE.

Quadro 3. Resumo das características mecânicas dos hematititos e itabiritos da mina do Sapecado.

| Tipologia | Posição            | Friabilidade                         | Resistência (Mpa) | RQD      | Descontinuidade   | Espaçamento (cm) |
|-----------|--------------------|--------------------------------------|-------------------|----------|-------------------|------------------|
| HF1       | Crista do Talude   | Pulverulenta                         | 1 a 5             | < 25%    | S <sub>b</sub>    | < 6              |
| HF2       | Pe do Talude       | Fragmentada                          | 5 a 25            | < 25%    | S <sub>b</sub>    | < 6              |
| HM        |                    |                                      | 25 a 50           | < 25%    | S <sub>b</sub> S3 | < 6              |
| HC1       |                    |                                      | > 250             | < 25%    | S3                | 6 a 20           |
| HC2       |                    |                                      | > 251             | 50 a 75% | S <sub>b</sub> S3 | 20 a 60          |
| IF        |                    | Pulverulento, chapinha e fragmentado | < 1 a 50          | < 25%    | S <sub>b</sub> S3 | < 6 a 20         |
| IM1       | Intercalado com IF |                                      | 25 a 50           | 25 a 50% | S <sub>b</sub> S3 | 6 a 20           |
| IM2       |                    |                                      | 50 a 100          | 25 a 50% | S <sub>b</sub> S3 | 6 a 20           |
| IC        |                    |                                      | 100 a > 250       | 75 a 90% | S <sub>b</sub> S3 | 20 a 60          |

| Tipologia | Persistência (m) | Abertura (mm) | Rugosidade          | Preenchimento | Alteração Parede                | Classe RMR          | GSI     |
|-----------|------------------|---------------|---------------------|---------------|---------------------------------|---------------------|---------|
| HF1       | > 20             | Fechada       | Lisa                | Sem           | Levemente alterada              | IV alta             | 30      |
| HF2       | > 20             | Fechada       | Lisa                | Sem           | Levemente alterada              | IV alta a III baixa | 40      |
| HM        | 10 a > 20        | Até 1         | Lisa a pouco rugosa | Sem           | Levemente alterada              | III                 | 45      |
| HC1       | 10               | Até 1         | Lisa a pouco rugosa | Sem           | Levemente alterada              | II baixa            | 60      |
| HC2       | 10 a > 20        | Até 1         | Lisa a pouco rugosa | Sem           | Fresca                          | II alta             | 70      |
| IF        | 10 a > 20        | Fechada a 1   | Lisa a rugosa       | Sem           | Levemente a fortemente alterada | IV alta a III baixa | 35 a 45 |
| IM1       | 10 a > 20        | Até 1         | Lisa a pouco rugosa | Sem           | Moderada a levemente alterada   | III baixa           | 40      |
| IM2       | 10 a > 20        | Até 1         | Lisa a pouco rugosa | Sem           | Moderadamente alterada          | III alta            | 50      |
| IC        | 10 a > 20        | Até 1         | Lisa a rugosa       | Sem           | Levemente alterada a fresca     | II                  | 65      |



a) b)  
Figura 9 – Hematititos compactos da mina do Sapecado, a) HC2 com RQD bom e b) HC1 com RQD ruim.



a) b)  
Figura 10 – Itabiritos friáveis da mina do Sapecado, a) pulverulento goetítico e b) fragmentado, com o bandamento S<sub>b</sub> ortogonal ao talude e a clivagem S3 em condição favorável a instabilidade.

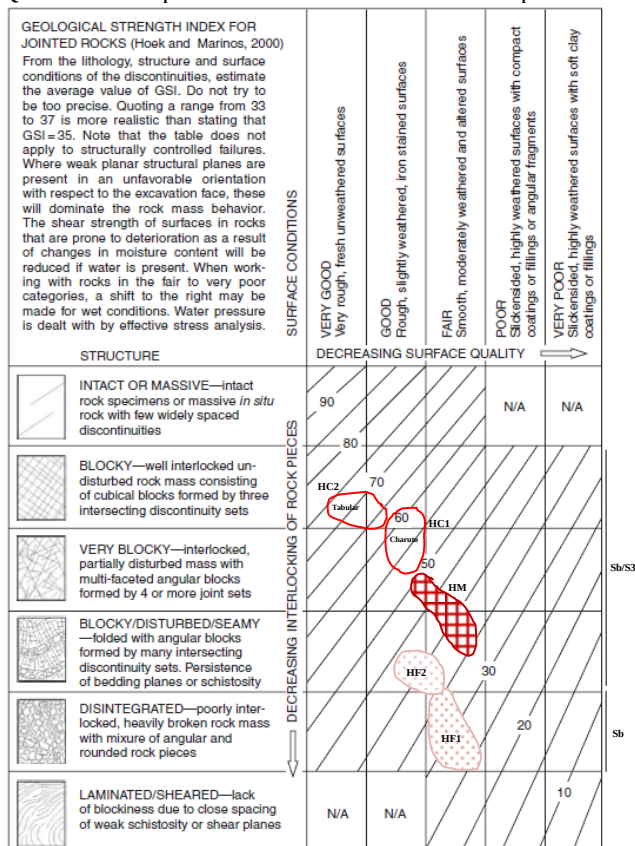
Desta forma enquadraram-se as diversas tipologias das formações feríferas bandadas da

mina do Sapecado, hematititos (Quadro 4) e itabiritos (Quadro 5) no *chart* de maciços fraturados do GSI.

## 5 CARACTERÍSTICAS GEOMECÂNICAS DOS TIPOS DE FORMAÇÃO FERRÍFERA DA MINA DO SAPECADO

As hematitas friáveis diferem pela resistência da rocha intacta e pela anisotropia, pois a HF1 não apresenta bandamento (anisotropia), portanto tipos que devem ser ensaiados em laboratório para melhor definição dos parâmetros mecânicos. Contrariamente as HC possuem a mesma resistência da rocha intacta, entretanto com espaçamento das descontinuidades diferente e RQD diferente, o que implica em uma diferença significativa do RMR, e consequente segregação pelo GSI (Quadro 4).

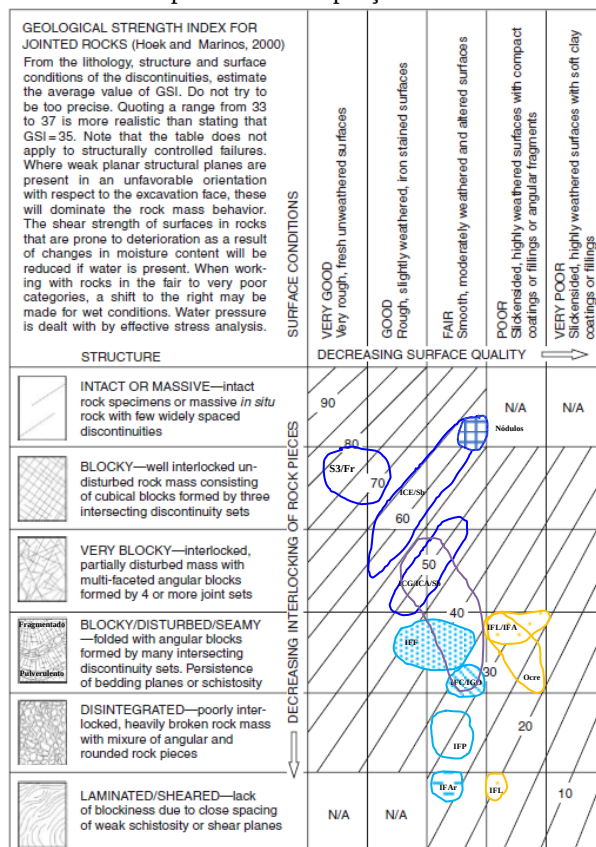
Quadro 4. GSI para os hematititos da mina do Sapecado.



Em relação aos itabiritos percebe-se no quadro 5 que houve uma sobreposição do tipo médio com os tipos compactos, goetíticos, e friáveis fragmentados a chapinha. Entretanto os tipos friáveis, tanto pela friabilidade como pela

mineralogia, puderam ser bem divididos, sendo os últimos caracterizados por superfícies de qualidade mais pobre (macia) e estriadas.

Quadro 5. GSI para os itabiritos da mina do Sapecado. Em azul escuro os IC, em roxo os IM, em azul claro os IF e em amarelo os IF: limonítico, anfibolítico e ocre, tipos dominantes nas paredes leste e porção sul da cava.



## 6 RESULTADOS

As classificações geomecânicas podem ser aplicadas as rochas brandas, levando em consideração as dificuldades e limitações inerentes a esses tipos de rochas, principalmente em relação às características mecânicas das descontinuidades.

A equação que relaciona o RMR com o GSI se verificou para formações ferríferas bandadas da mina do Sapecado.

O quadro para maciços fraturados do GSI se aplica melhor aos itabiritos e hematititos, visto que são rochas onde não existe uma variação granulométrica considerável na composição mineralógica, exceção que pode ocorrer para alguns tipos de formações ferríferas argilosas existentes em outras minas da VALE.

Os resultados obtidos foram o enquadramento das diferentes tipologias de formações ferríferas no quadro de maciços fraturados do GSI e a descrição de suas características geomecânicas sobre a ótica do sistema RMR.

Não foi observada uma variação significativa do GSI para as diferentes paredes da mina.

Este estudo complementa os ensaios de rocha intacta e destina-se a obter dados de entrada do *software RocData*, para estimar os parâmetros de resistência e deformabilidade dos maciços rochosos em formações ferríferas bandadas.

## AGRADECIMENTOS

A César Grandchamp, Quintiliano Guerra, Teófilo Aquino e Ubirajara Amaral, colegas de empresa, que se prontificaram a ouvir minhas interpelações a respeito do assunto aqui tratado e atendê-las dentro do possível e permitido pela VALE. Ao professor Dr. André Assis, da Universidade de Brasília, pelos valiosos cursos de Mecânica das Rochas, que serviram de inspiração para este estudo. A mineradora VALE S/A pela oportunidade que me foi confiada para desenvolver este trabalho.

## REFERÊNCIAS

- Alkmim, F.F. and Marshak, S. (1998) Transamazonian orogeny in the São Francisco craton, Minas Gerais, Brazil: evidence for Paleoproterozoic collision and collapse in the Quadrilátero Ferrífero. *Precambrian Research*, 90: 29-58.
- Assis, A.P. (2013) Mecânica das Rochas. *Apostila do Curso Básico*. Publicação: G.AP – AA001/13, Brasília – DF, Jan/2103.
- Bieniawski, Z. T. (1989) *Engineering Rock Mass Classification*. John Wiley, New York, NY, USA, 248p.
- BVP Engenharia (2012) Mapeamento litoestrutural e geomecânico da mina do Sapecado, Itabirito-MG. *Relatório Interno VALE*, jan/2012.
- Castro, W.J. (2004) *Síntese de Estudos de Estabilidade de Taludes de Minas de Minério de Ferro do Quadrilátero Ferrífero – MG*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, UFOP, 188 p.
- Cervantes, L.M.T. (2007) *Avaliação geotécnica de projeto de taludes de grande porte de mineração com base nos aspectos da geologia de engenharia*. Dissertação de Mestrado em Geotecnia, Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, 220 p.
- Diniz, N. C. (2005) Caracterização Geomecânica de Maciços Rochosos. Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Dept. Engenharia Civil & Ambiental Geotecnia.
- Dorr, J. V. N. II. (1969) Physiographic, stratigraphic and structural development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil . *USGS/DNPM. Professional Paper 641-A*. 110p.
- Ferreira Filho, F.A. (2005) Geologia estrutural da mina do Sapecado. Relatório interno VALE.
- Hoek, E. (1994) Strength of Rock and Masses. *ISRM, News Journal*, 2(2): pp.4-16.
- Hoek, E. & Brown, E.T. (1988) The Hoek-Brown Failure Criterion - a 1988 Update. *Proc. 15th Canadian Rock Mech. Symp.* (ed. J.C. Curran), Department of Civil Engineering, University of Toronto, Toronto, Canada, pp. 31-38.
- Hoek, E. & Brown, E.T. (1980) *Underground Excavations in Rock (in Spanish)*, McGraw-Hill Book Co, Mexico DF, Mexico, 634 p.
- Hoek, E., Marinos, P. and Benissi, M. (1998) Applicability of the Geological Strength Index (GSI) classification for very weak and sheared rock masses. The case of the Athens Schist Formation. *Bull. Engg. Geol. Env.* 57(2), 151-160.
- Ouro Preto Geologia (2005) Estudo geológico-geotécnico da mina do Sapecado. *Relatório Interno VALE*, abr/2005.
- Palmstrom, A. (2005) Measurements of and Correlations between Block Size and Rock Quality Designation (RQD). Published in *Tunnels and Underground Space Technology* 20 (2005) 362-377.
- Silva, R.G. (1999) *Análise Estrutural e Modelagem Tectônica da região centro-sul do Sinclinal da Moeda, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, 154 p.
- Spier, C.A., Oliveira, S.M.B. and Rosière, C.A. (2003) Geology and geochemistry of the Águas Claras and Pico iron mines, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. *Mineralium Deposita*, 38: 751-774.