

■ DESCRIÇÃO QUANTITATIVA DE “TESTEMUNHOS VIRTUAIS” NA OBTENÇÃO DE UMA CLASSIFICAÇÃO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICA DAS LITOLOGIAS PRESENTES EM DEPÓSITOS DE FERRO

QUANTITATIVE DESCRIPTION OF “VIRTUAL CORES” IN OBTAINING A GEOLOGICAL – GEOTECHNICAL CLASSIFICATION OF LITOLOGIES IN IRON ORE DEPOSITS.

DOUGLAS MARCEL QUATIABARA SANDER LIBARDI

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre – RS, Brasil. quatiabara@gmail.com

PAULO SALVADORETTI

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre – RS, Brasil. paulo.salvadorette@ufrgs.br

GEORGE OLUFUNMILAYO GASPER

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre – RS, Brasil. gee_mailz@yahoo.com

OLUWAFEMI SHEKONI AYODEJI

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre – RS, Brasil. shekony@yahoo.com

TIAGO DE ALMEIDA

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre – RS, Brasil. almeida.geologia@gmail.com

JOÃO FELIPE COIMBRA LEITE DA COSTA

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre – RS, Brasil. jfelipe@yahoo.com

ELIAS KASPARY POOTER

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre – RS, Brasil. e_pooter@hotmail.com

RESUMO ABSTRACT

O *Optical Televiwer* (OTV) é um dispositivo de perfilação geofísica que produz imagens contínuas e orientadas da parede de furos de sondagem. Imagens geradas por OTV desempenham um papel auxiliar em campanhas de exploração mineral e na aquisição de informações geotécnicas. A caracterização geológico-geotécnica de maciços rochosos é fundamental para a identificação de condicionantes geológicas e estruturais associadas à estabilidade de escavações em rochas. Várias estruturas existentes no interior dos maciços não são normalmente acessadas via sondagem testemunhada, em função de dificuldade recuperação de testemunho no processo de sondagem e restrições econômicas pelo custo da sondagem. Estruturas como planos de foliação, dobras, sistemas de fraturas, per-

The *Optical Televiwer* (OTV) is a geophysical profiling device that produces continuous and oriented images of the wall of drill holes. Images generated by OTV play an auxiliary role in mineral exploration campaigns and the acquisition of geotechnical information. The geological-geotechnical characterization of rock masses is fundamental for the identification of geological and structural constraints associated with the stability of rock excavations. Several structures inside the massifs are not normally accessed via recovered core sample and probing, due to difficulty of retrieval of testimony in the probing process and economic constraints due to the cost of the survey. Structures such as foliation planes, folds, fracture systems, water percolation in the massif and openings can be completely lost by a low

colação de água no maciço e aberturas podem ser completamente perdidas por uma baixa recuperação de testemunhos. O televisionamento com OTV serve então para auxiliar na identificação e análise destas zonas de fraqueza existentes nos maciços. Neste trabalho, foram realizadas perfilagens em furos de sondagem executados em minas que fazem parte da ‘Megaestrutura Gandarela’, localizada na porção centro-norte do Quadrilátero Ferrífero, Estado de Minas Gerais (Brasil). Feições geológicas de interesse foram retiradas das imagens obtidas com a sonda OTV e dos dados de geoposicionamento oferecidos pela sonda. Um dos objetivos deste estudo foi a aplicação e avaliação de uma metodologia de aproveitamento do testemunho virtual proposta em publicações recentes, às imagens produzidas por OTV em minas situadas no Quadrilátero Ferrífero. Constatou-se também que o uso do OTV é de grande valia como ferramenta auxiliar na identificação de estruturas internas do maciço, as quais de outra forma não poderiam ser acessadas.

Palavras-chave: GEOFÍSICA, OTV, MINÉRIO DE FERRO, OPTICAL TELEVIEWER.

1 INTRODUÇÃO

O televisionamento de furos de sondagem surge atualmente como um importante auxílio na análise de problemas geotécnicos em minas a céu aberto e subterrâneas. Esta técnica de perfilagem geofísica é relativamente nova e foi introduzida no Brasil no ano de 2001 (Baillot et al., 2004). Mesmo levando-se em conta suas possíveis vantagens, apenas recentemente foi proposta uma metodologia detalhada para o aproveitamento das imagens (Oliveira et al., 2014 e Oliveira, 2015).

No presente trabalho, é feita uma aplicação da metodologia de aproveitamento do testemunho virtual proposta em Oliveira et al. (2014) e Oliveira (2015) em imagens adquiridas com OTV em furos de sondagem executados nas minas Tamanduá e Gongo Soco, situadas no Quadrilátero Ferrífero, Estado de Minas Gerais (Brasil). A Tabela 1 descreve os furos considerados neste estudo e seus respectivos comprimentos.

Nas situações onde a metodologia proposta não foi diretamente aplicável, procurou-se verificar:

- quais são as informações realmente observáveis nas imagens compiladas, dentre as citadas pela metodologia;

recovery of testimonies. The televising by OTV then serves as an auxiliary tool for the identification and analysis of the weakness zones existing in the massifs. In this work, geophysical logging were executed in boreholes in mines that are part of the ‘Gandarela Megastructure’, located in the central-northern portion of the *Quadrilátero Ferrífero*, in the State of Minas Gerais (Brazil). Geological features of interest were taken from the images obtained with the OTV probe and the geo-positioning data provided by the probe. One of the objectives of this study was the application and evaluation of a methodology for the use of the virtual testimony proposed in recent publications, to the images produced by OTV in the Tamanduá and Gongo Soco mines located in the Quadrilátero Ferrífero. It was also verified that the use of OTV is of great value as an auxiliary tool in the identification of internal structures of the rocky massif that other probing device could not accessed.

Keywords: GEOPHYSICS, OTV, IRON ORE, OPTICAL TELEVIEWER.

- quais são os possíveis empecilhos para que não se possa seguir à risca a proposta metodológica oferecida.

Ressalta-se aqui a grande valia da proposta de Oliveira (2015), a qual serve como guia em uma área onde não havia um padrão a ser seguido.

Tabela 1. Furos perfilados nas aquisições de dados.

Mina	Furos	Profundidade (m)	Comprimento Perfilado (m)
Mina Gongo Soco	GSOFG00023	115	111
	GSOFG00025	110	109
	GSOFG00027	150	49
Mina Tamanduá	TAMFD00022	120	117
	TAMFD00069	151	147

1.1 OTV e sua aplicação na caracterização de maciços rochosos

O *Optical Televiewer* (OTV) é um dispositivo de perfilagem geofísica que produz uma imagem contínua e orientada de 360° da parede do furo de sondagem. O uso de imagens de OTV é práti-

ca internacionalmente conhecida na identificação de feições geológicas dos estratos (Fredrick *et al.*, 2014). Conforme mencionado em Blake(2010), a combinação da técnica de sondagem com circulação reversa (sondagem RC) com o televisionamento dos furos pode levar a uma redução significativa de custos, reduzindo a necessidade de extração de testemunhos com sondagem rotativa. Desta forma, as imagens geradas por OTV desempenham um papel auxiliar em campanhas de exploração mineral e na aquisição de informações geotécnicas.

A aquisição de imagens com OTV envolve um *scan* radial da parede do furo, o qual é orientado no espaço tal que as características de trajetória e profundidade do furo podem ser determinadas. As imagens podem ser orientadas, possibilitando assim uma análise cuidadosa da estrutura e geologia de interesse para cada furo. Tipicamente, as informações adquiridas são exportadas para análises adicionais possibilitando a produção de *stereonets* para as estruturas. Durante a perfilação, os dados armazenados incluem a inclinação e azimute do equipamento no interior do furo de sondagem, com magnetômetros e medidores de inclinação (acelerômetros) tridimensionais.

Conforme Gwynn *et al.* (2013) e Thomas *et al.* (2015), o erro previsto na determinação da posição espacial de feições geológicas, para a técnica de sondagem orientada, pode chegar a 13°, enquanto que o OTV apresenta um erro cumulativo de $\pm 1,7^\circ$ para o *dip* e $\pm 4^\circ$ para o *dip direction*. Assim, é uma ferramenta de grande auxílio na construção de estereogramas e na análise de estabilidade cinemática.

A caracterização geológico-geotécnica de maciços rochosos é fundamental para a identificação de condicionantes geológicas associadas à estabilidade de escavações e estruturas subterrâneas. Várias estruturas existentes no interior dos maciços rochosos não são normalmente acessadas ou quando observadas via sondagem testemunhada tem um custo muito elevado, tornando o adensamento de malha economicamente inviável. Essas estruturas não acessadas ou observadas podem influenciar completamente a estabilidade da rocha intacta, afetando diretamente a estabilidade de taludes em minas a céu aberto, a estabilidade de escavações em minas subterrâneas ou a estabilidade de construções urbanas.

Estruturas como planos de foliação, dobras, conjuntos e sistemas de fraturas, percolação de água no maciço e aberturas podem ser completamente perdidas por uma recuperação de testemunho pobre. O televisionamento surge então como um auxílio na análise dos possíveis pontos de fraqueza existentes em um maciço rochoso. As imagens geradas pelo OTV não devem ser consideradas como um substituto para a sondagem testemunhada, mas sim um poderoso aliado em situações em que os materiais não são recuperados da melhor forma.

De acordo com Oliveira *et al.* (2015), embora o Manual de Sondagens da Associação Brasileira de Geologia de Engenharia (ABGE, 2013) tenha inserido tópicos sobre esta ferramenta de investigação (OTV), ainda há uma ausência de sugestões e exemplos de como esses dados poderiam ser aplicados para projetos em geral, uma vez que não existem documentos normativos para este.

Tendo em vista que um maciço rochoso pode ser representado, em muitas situações, por um conjunto de blocos de rocha intacta delimitados por descontinuidades, é essencial que sejam descritas tanto a rocha intacta quanto os tipos de descontinuidades que a limitam está pedaços intactos. Desta forma, Oliveira (2015) sugere que se faça a descrição em duas partes distintas, conforme segue:

1. Rocha Intacta
2. Descontinuidades
 - 2.a) Tipo de estrutura
 - 2.b) Rugosidade
 - 2.c) Abertura
 - 2.d) Preenchimento, percolação de água e condições de alterações das paredes
 - 2.e) Grau de Fraturamento
 - 2.f) RQD Teórico

2 LOCALIZAÇÃO E ASPECTOS GEOLÓGICOS DAS ÁREAS DE ESTUDO

Neste estudo, foram utilizados furos de sondagem executados em minas que fazem parte da 'Megaestrutura Gandarela', localizada na porção centro-norte do Quadrilátero Ferrífero, Estado de Minas Gerais - Brasil (Figura 1).



Figura 1. Localização da Mina Gongo Soco e da Mina Tamanduá.

2.1 Geologia local – Mina gongo soco

A geologia da cava da Mina Gongo Soco, onde encontram-se os 3 furos filmados com OTV, apresenta como principais litologias aflorantes: solo saprolítico, rocha intrusiva metabásica, hematitas, itabiritos, quartzitos, filitos e xistos (Anon., 2008).

Em se tratando da geologia estrutural da área, em mapeamentos feitos diretamente sobre o terreno (Anon., 2008) foram identificadas várias estruturas planares e lineares, sendo as mais importantes: bandamento (Sb), foliação (Sn), clivagem de fratura (Sn+1), famílias de fraturas (Fr) presentes nas rochas metabásicas (IN), lineação de intersecção (Li) e eixo de dobra (bn).

O bandamento (Sb) é a estrutura principal e condicionante da estabilidade dos taludes na Mina Gongo Soco, sendo possível sua identificação em quase todas as litologias da cava.

Outra estrutura penetrativa observada em praticamente todos os litotipos é a foliação Sn. A geração da Sn pode estar associada tanto a processos cisalhantes como a dobramentos.

Em se tratando das fraturas, de uma maneira geral, as juntas apresentam persistência métrica.

Suas superfícies são predominantemente lisas e onduladas, fechadas, sem preenchimento e com espaçamento pequeno a moderado (centimétrico e decimétrico).

É importante observar que o bandamento Sb, a foliação Sn e as fraturas, são as estruturas possíveis de visualização com o OTV, sendo que este fato será levado em conta nas análises posteriores.

2.2 Geologia local – Mina tamanduá

Na Mina Tamanduá, foram adquiridas imagens de OTV em dois furos, assinalados na Figura 3.

Segundo Anon. (2012), a cava atual da mina é constituída predominantemente por itabiritos friáveis (IF, IGO), itabiritos médios (IM), itabiritos compactos (IC), filitos e quartzitos, com presença subordinada de hematitas, itabiritos argilosos (IAL, IMN), rochas intrusivas e metavulcânicas.

Em termos de estruturas geológicas existentes na área, foram identificados os seguintes elementos (Anon., 2012): o acamamento So (observado nos filitos e quartzitos da encaixante), o bandamento composicional Sb, a foliação Sn e as superfícies de cisalhamento Scis.

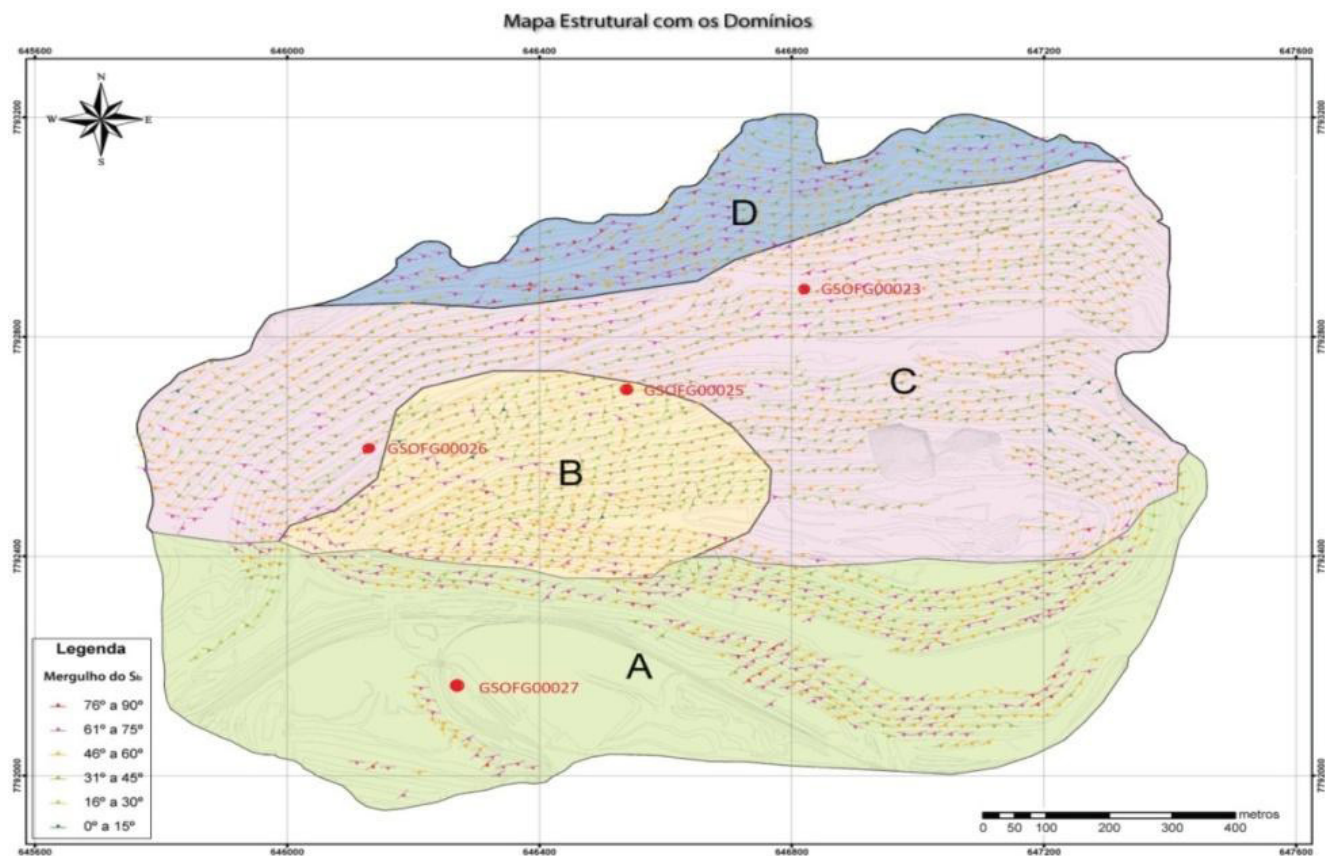


Figura 2. Mapa dos Domínios Estruturais da Mina Gongo Soco, e a localização dos quatro furos perfilados.

Fonte: Anon., 2008.

3 COLETA DE DADOS E METODOLOGIA: DESCRIÇÃO QUALITATIVA DO MACIÇO ROCHOSO

O propósito do estudo realizado por Oliveira (2015) é atingir um mínimo grau de padronização na caracterização e classificação de discontinuidades em um maciço rochoso a partir de imagens de OTV. Considerando que já existe uma sugestão para a descrição quantitativa de discontinuidades

de maciços em ISRM (1978), Oliveira (2015) optou por seguir as mesmas sugestões de parâmetros aí descritos, adaptando esses parâmetros às necessidades do televisionamento de furos. O próprio ISRM já admite o uso de câmeras para caracterizar discontinuidades, em especial quando se refere a aberturas no maciço, pois estas podem influenciar diretamente nas tensões cisalhantes e na percolação de água dentro do maciço.

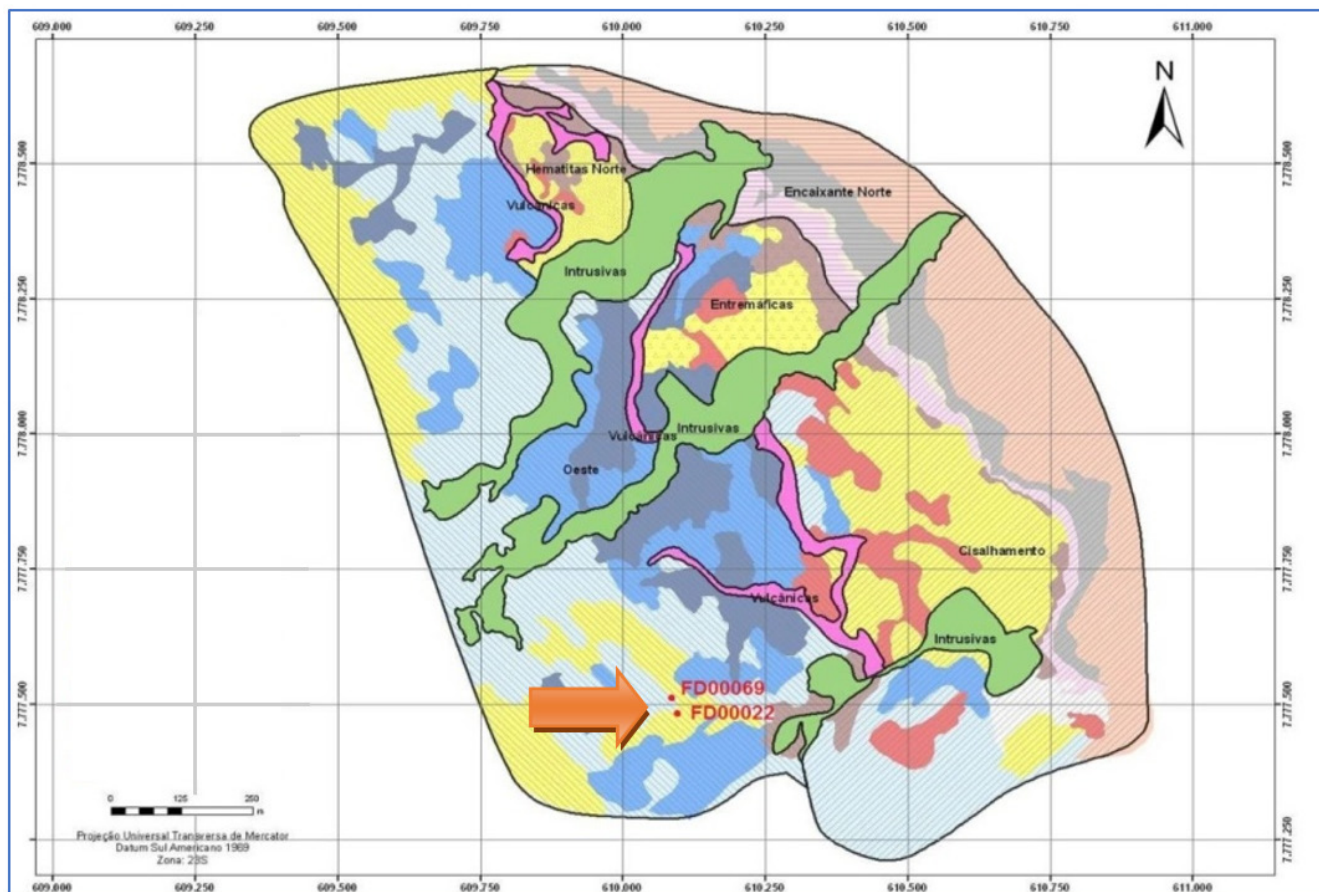


Figura 3. Domínios Litológicos da Mina Tamanduá. Os furos televisionados encontram-se no Domínio Oeste e entre os Subdomínios de Hematita Friável e Itabirito Friável Silicoso.

3.1 Rocha intacta

Os parâmetros sugeridos para a descrição da matriz rochosa possíveis de serem observados nas imagens de OTV e de interesse para análises geotécnicas, são: a descrição dos litotipos, estruturas, texturas, composição mineralógica e seu grau de alteração. *Oliveira (2015)* alerta quanto à necessidade de se descrever os aspectos do corpo como um todo, incluindo-se estruturas ditas penetrativas como foliação, xistosidades, bandamentos, acamadamentos, dobramento e veios.

É relevante ressaltar a necessidade de familiaridade do analista das imagens com relação às litologias de interesse. Furos de sondagem podem estar “sujos” pela lama usada na perfuração, fazendo com que os testemunhos apresentem colo-

ração diferente em relação às imagens ou devido à iluminação gerada pelo OTV. A filmagem pode ainda não estar bem correlacionada com a profundidade do testemunho devido a alguma perda causada por fragmentação do testemunho durante a sondagem. Na Figura 4 percebem-se as possíveis perdas de informação na recuperação do testemunho e como elas foram “recuperadas” pelas imagens. Observa-se também uma das grandes vantagens no uso do OTV, que é a visualização de estruturas ainda preservadas na rocha friável mesmo após os processos geológicos ocorridos. Neste caso, análises sobre a qualidade do material podem ainda ser realizadas, já que no testemunho apenas conclui-se que se trata de um material bastante degradado.

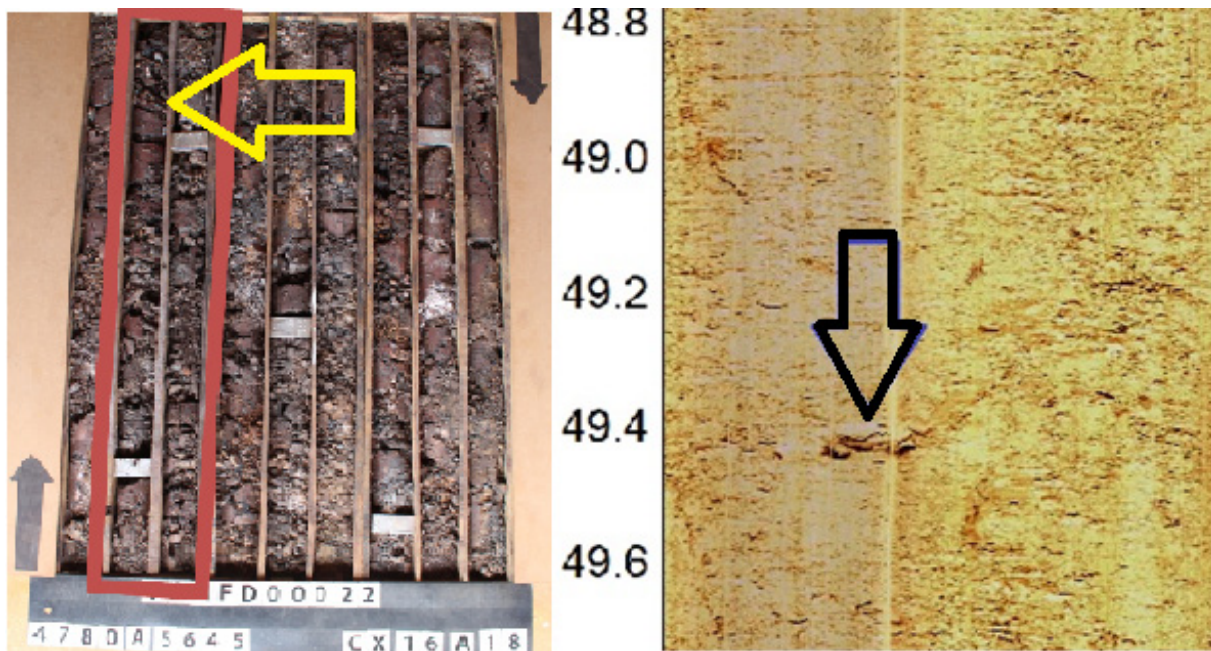


Figura 4. Foto da caixa de testemunho (à esquerda) do furo FD00022, Mina Tamanduá, comparada com o televisionamento (à direita) do mesmo furo. Ressaltada pela seta preta, uma fratura não apresentada na caixa de testemunho (ver retângulo vermelho e uma seta amarela indicando, aproximadamente, a região onde a fratura deveria ocorrer). É importante ressaltar que, neste caso específico, a diferença de coloração entre OTV e testemunhos foi gerada pela adição excessiva de flocculante usado na água do furo de sondagem, conferindo um tom amarelado à imagem de OTV.

Oliveira (2015) ressalta a importância de se demarcar a foliação/bandamento ao longo de toda a imagem do furo de sondagem, verificando as possíveis mudanças relevantes na sua orientação, o que pode indicar alterações no perfil geotécnico e estrutural e no comportamento litológico.

Na Figura 5, percebe-se o bandamento marcado em verde na imagem gerada por OTV. Não foram marcados todos os bandamentos observados para não poluir demasiadamente a imagem (a equipe de interpretação acordou que seriam marcados os bandamentos uma vez a cada um metro, aproximadamente). Outra estrutura que deve ser apresentada e indicada na imagem gerada pelo testemunho são os veios existentes no meio da estrutura principal. Estes veios são visualmente muito diferentes das rochas que os circundam. Também na Figura 5, vê-se um veio de quartzo de aproximadamente 1,0 m, cercado por filitos.

Pode-se, em alguns casos, inferir o estado de alteração da rocha, mesmo que esta caracterização seja bastante limitada. É possível elencar algumas variações no brilho e na coloração dos minerais indicando uma maior alteração da rocha com relação aos trechos de rocha sã. Com tais parâmetros, pode-se avaliar a resistência mecânica. Segundo *Oliveira (2015)*, como medida indireta desta resistência mecânica, pode-se observar a “rugosidade” das paredes, considerando que a perfuração do furo de sondagem implicaria em um desgaste nestas paredes, ficando mais evidente tal desgaste quanto mais alterada for a rocha. Observa-se um exemplo deste comportamento na Figura 6, com as paredes dos furos apresentando maior desgaste na rocha devido ao seu estado de alteração.

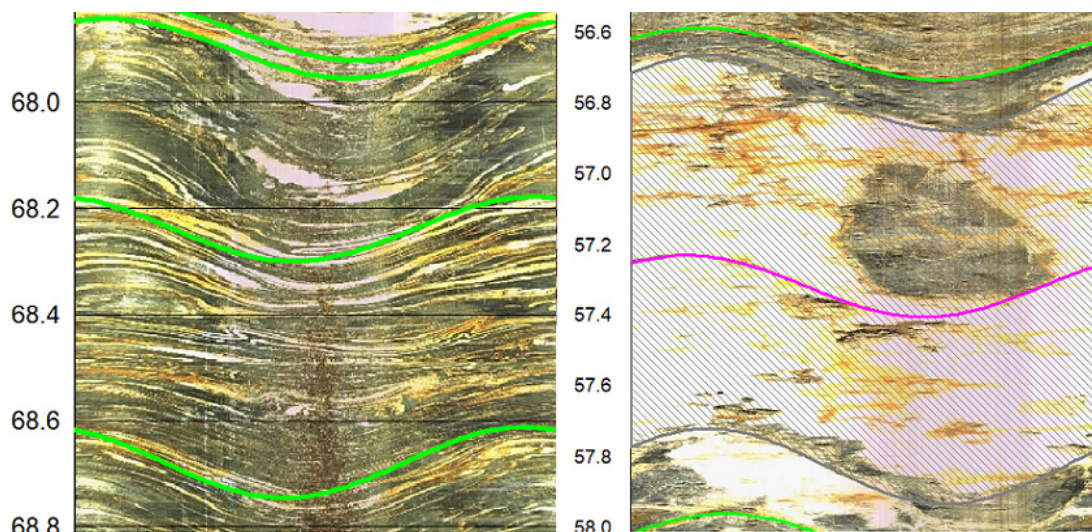


Figura 5. (Esquerda) Imagem das marcações (na cor verde) dos bandamentos no furo GSOFG00023, Mina Gongo Soco. (Direita) Imagem de um veio de quartzo no Furo GSOFG00025.

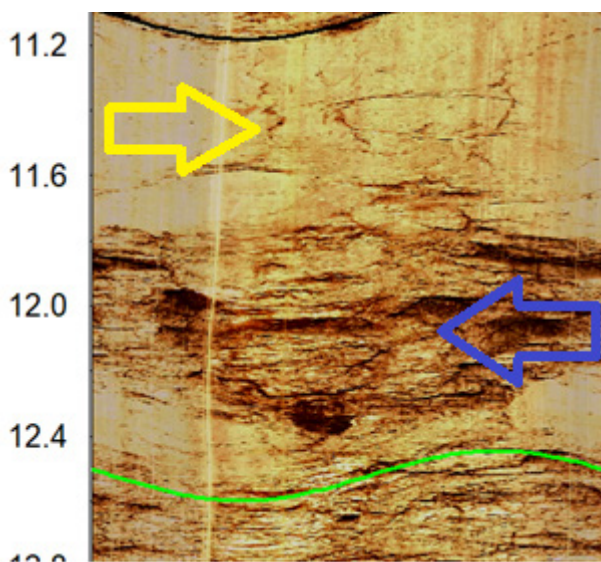


Figura 6. Mudança de estrutura lisa (indicada pela seta amarela) para rugosa (indicada pela seta azul) no furo FD00022; Mina Tamandua.

Conforme sugerido por Oliveira et al. (2014), pode-se usar a Tabela 2, adaptada do IPT (1984, apud Serra Junior & Ojima, 1998), ou adaptações de ISRM (1978) para melhor caracterizar o grau de alteração da rocha.

Fredrick et al. (2002) ressalta que a qualidade da rocha não pode ser determinada por OTV sem que haja inicialmente uma calibração utilizando a geotecnia do local. O OTV apenas oferece um indicativo da integridade da rocha, de uma forma semelhante à análise de fotografias do testemunho

da rocha. Fica assim evidenciado que OTV é um auxiliar ao programa de sondagem na construção de um projeto mineiro ou civil.

Tabela 2. Graus de alteração (adaptado de IPT, 1984, apud Serra Junior & Ojima, 1998).

Siglas	Denominações	Características da rocha
A1	Rocha sã ou praticamente sã	Apresenta minerais sem vestígios de alteração ou minerais ligeiramente descoloridos. Minerais com brilho.
A2	Rocha medianamente alterada	Apresenta minerais com menor brilho e a rocha é bastante descolorida.
A3	Rocha muito alterada	Apresenta minerais sem brilho, rocha intensamente descolorida.
A4	Rocha extremamente alterada	Apresenta minerais totalmente sem brilho e a rocha intensamente descolorida, aspecto de solo.

3.2 Descontinuidades

“Sob a designação descontinuidade engloba-se qualquer feição geológica que interrompa a continuidade física de um dado meio rochoso, como as superfícies de fraturas, falhas, etc. Em termos práticos, pode-se designar por descontinuidade qualquer superfície natural em que a resistência à tração é nula, ou muito baixa” (ISRM, 1978).

Utilizando os softwares disponíveis para compilar os dados adquiridos durante a filmagem, pode-se gerar dois tipos de imagem com o furo televisionado. A primeira delas uma imagem cônica contendo uma visão tridimensional do furo televisionado, uma imagem “enrolada” do furo. A segunda imagem é uma imagem “desenrolada”, onde abre-se a imagem tridimensional transformando-a em uma imagem bidimensional. Após desenrolar a imagem, percebem-se as descontinuidades e estruturas presentes como formas senoidais, as quais permitem determinar as orientações espaciais destas estruturas.

Conforme *Oliveira (2015)*, deve-se descrever os demais parâmetros que caracterizam uma descontinuidade tais como tipo de estruturas, espaçamento, rugosidade, abertura, presença e material de preenchimento, alteração das paredes e percolação de água, os quais pode-se observar de forma indireta. Chega-se ao ponto de caracterizar o maciço rochoso fazendo uma estimativa do RQD teórico, proposto em variadas correlações por diferentes autores.

3.3 Tipos de estruturas

É importante diferenciar as estruturas penetrativas das descontinuidades. Estruturas como acamadamentos, bandamentos, veios, dobras e contatos litológicos devem ser separados das fraturas e aberturas. Mesmo com esta tentativa de separação algumas vezes mais de um tipo de estrutura ocorrerá em um mesmo trecho. Na Figura 7, pode-se perceber a ocorrência de uma fratura em um veio de quartzo (furo GSO00025, Mina Gongo Soco). Neste caso, há uma clara identificação do veio, bem como sua real localização no interior do furo de sondagem.

Conforme *Baillet et al. (2004)* no caso de sondagem testemunhada em maciços rochosos com fraturas incipientes, as forças e vibrações geradas pela perfuratriz podem induzir um aumento na frequência de fraturas nas amostras, gerando uma redução no RQD da rocha, levando assim a uma estimativa inferior na qualidade da rocha.

Há casos em que não é possível visualizar estruturas na sondagem testemunhada, devido a uma recuperação mais baixa. O televisionamento dos furos de sondagem surge desta forma como um complemento das informações perdidas no testemunho. Pode-se, como já citado, ter uma maior precisão na localização das estruturas e sem perda na informação. Percebe-se na Figura 8, referente ao furo GSOFG00025, uma fratura levemente aberta pouco antes da sonda penetrar na água. Na foto do testemunho, não se reconhece, em lugar algum, esta mesma fratura. Caso esta sondagem não tivesse sido televisionada, esta informação teria sido perdida.

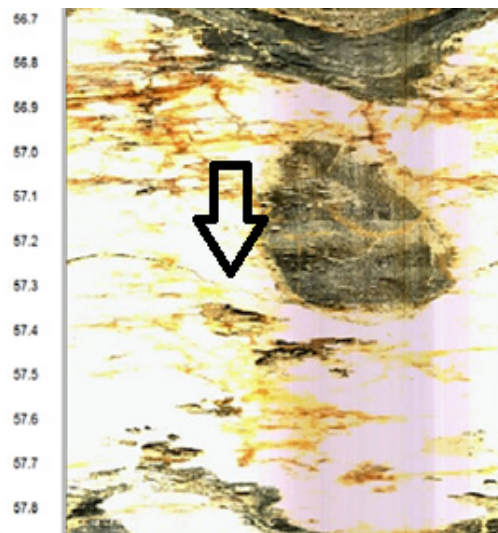


Figura 7. No Furo GSO00025 pode-se ver, via OTV, um veio de quartzo de comprimento 1 m, cortado por uma fratura, indicada pela seta.

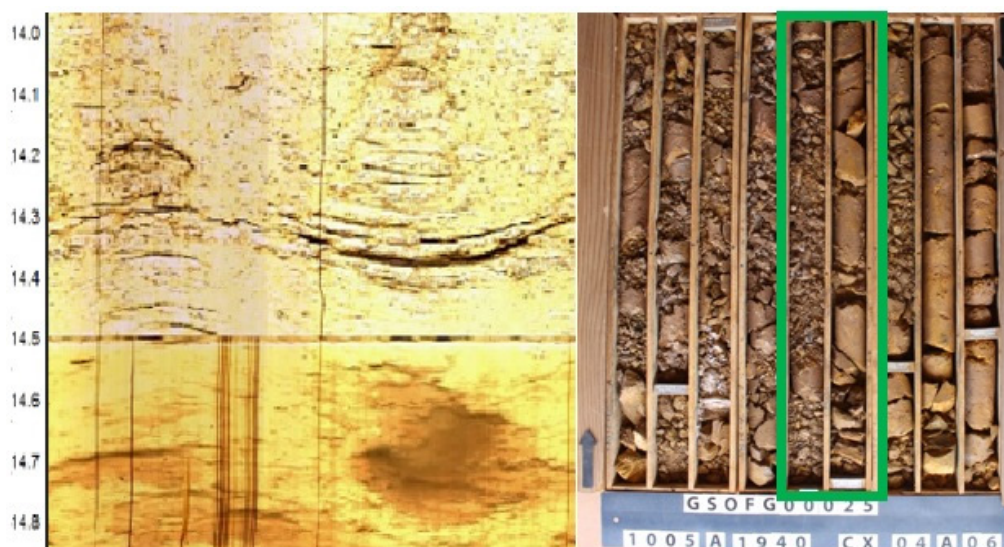


Figura 8. Fratura no furo GSOFG00025 (à esquerda), onde tem-se o nível d’água marcado claramente aos 14,5m e fotografia do testemunho de sondagem deste furo (à direita). A fotografia dos testemunhos não permite identificar a fratura visível no televisionamento.

3.4 Rugosidade

Conforme *Oliveira (2015) e ISRM (1978)*, a rugosidade de discontinuidades é um importante fator de influência na resistência ao cisalhamento, em especial no caso onde há contato parede-parede. Em termos gerais, a rugosidade é caracterizada em função das irregularidades existentes (também definida como a rugosidade em si) e ondulações. Na prática, a ondulação afeta a direção inicial de deslizamento sobre um plano, enquanto que a rugosidade afetará a resistência ao cisalhamento.

Existem duas formas de quantificar a rugosidade em imagens de televisionamento. A primeira delas seria considerar a linha traçada para a marcação de estruturas como uma referência para a rugosidade, quanto mais esta linha ficar contida no traço da discontinuidade da imagem, menos rugosa seria a fratura, quanto menos contida no traço da discontinuidade mais rugosa esta discontinuidade seria. Na Figura 9, vê-se à esquerda os perfis de rugosidade sugeridos por *Barton (1987)* e, à direita, uma modificação para as fraturas observadas em furos televisionados. Os perfis de Barton foram modificados e separados para perfis de menor detalhe, reduzindo assim a análise apenas para rugosa, lisa ou polida. O termo “polida” só pode ser usado em caso de grande

evidência de deslocamento por cisalhamento, conforme o *ISRM (1978)*.

Na Figura 10, tem-se a segunda sugestão a ser aplicada no televisionamento, com o objetivo de detalhar e buscar maior exatidão no cálculo da rugosidade dos planos de discontinuidade, conforme sugerido por *Barton (2013)*. A linha apresentada nesta figura, no canto superior esquerdo, nas imagens de televisionamento de sondagem, deve ser a linha traçada pelo programa, conforme indicado na Figura 10.

Mesmo com os dois métodos apresentados, nota-se que se trata de metodologias qualitativas e empíricas. O técnico que realizar a análise da filmagem pode ser levado por seus conhecimentos prévios do local a uma análise errônea da rugosidade das fraturas. De acordo com *Oliveira (2015)*, existem casos de fraturas que não são facilmente definidas como lisas, rugosas, outras, entretanto, são bastante evidentes. Essa dificuldade de reconhecer a rugosidade pode acontecer também no testemunho de sondagem. De qualquer forma, o procedimento é bastante qualitativo e altamente dependente do analista.

Durante o processamento dos dados do presente trabalho, optou-se pelo primeiro método, mais qualitativo e empírico. Pode-se elencar dois fatores a influenciar a análise da rugosidade de uma discontinuidade. O primeiro seria que nem

sempre a linha marcada sobre a imagem está perfeitamente alinhada com a fratura em estudo. Outro ponto bastante relevante é que, na maioria das vezes, as fraturas não são abertas o suficiente ou o

televisionamento não possui a qualidade necessária para que se possa perceber as ondulações nas fraturas (Figura 11).

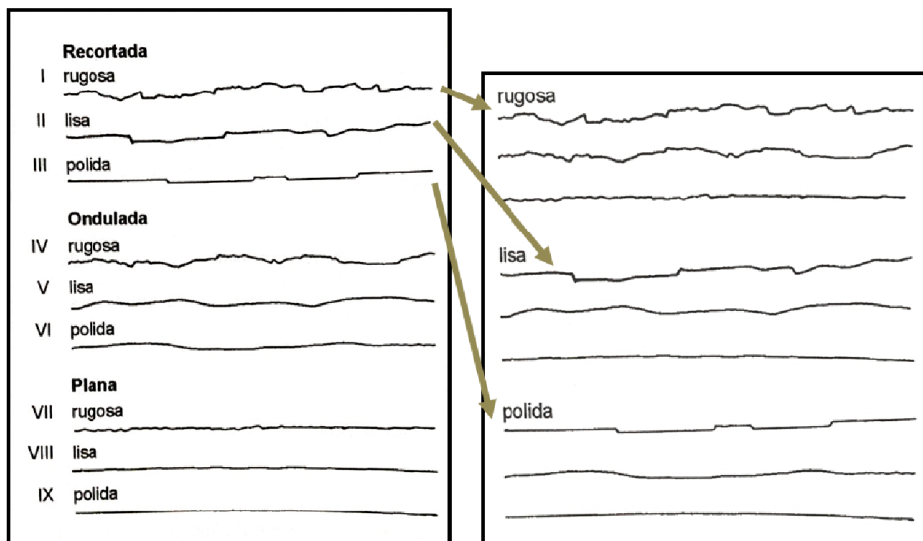


Figura 9. Perfis de rugosidade de Barton *et al.* (1974). Adaptação dos perfis de rugosidade de Barton para aplicação em imagens de televisionamento. (Oliveira *et al.*, 2014)

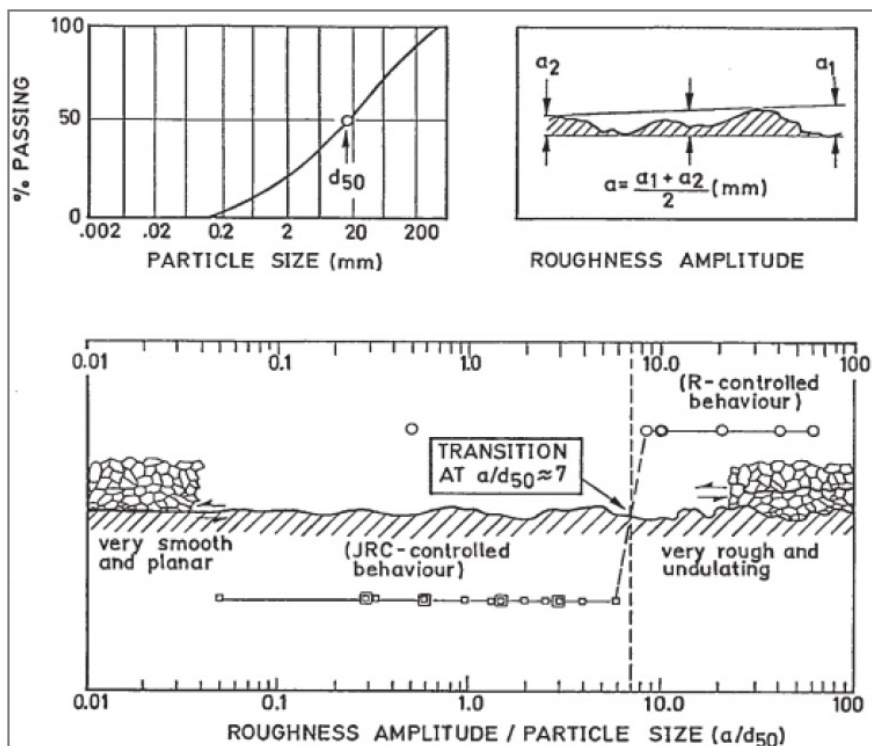


Figura 10. Cálculo da amplitude de perfis de rugosidade em superfície rochosa, considerando a amplitude da rugosidade (a) e o tamanho dos grãos (Barton, 2013)

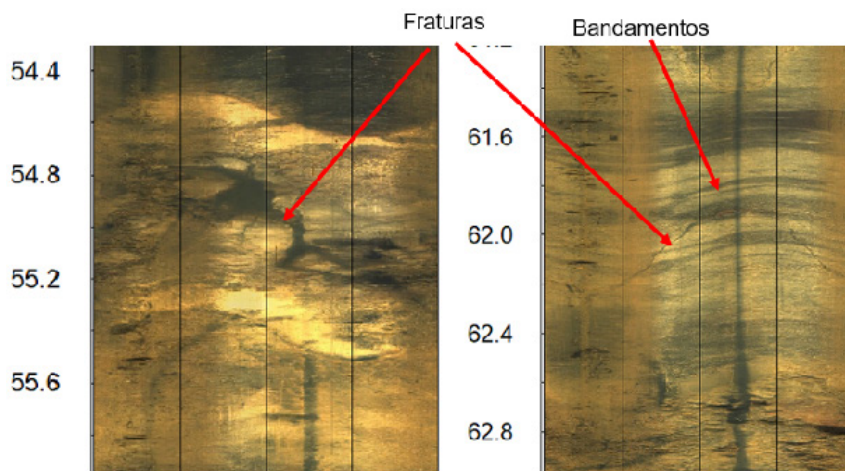


Figura 11. À esquerda, presença de fratura aberta e rugosa aos 55m de profundidade (imagem coletada na Mina Capanema – Quadrilátero Ferrífero; MG), com abertura estimada em aprox. 15cm. À direita, fratura aberta e presença de bandamento (cinza claro-escuro).

3.5 Aberturas

A distância entre as paredes de uma descontinuidade, medida no sentido ortogonal, corresponde à sua abertura. No caso do testemunho virtual, há a oportunidade de observar com detalhe a abertura da descontinuidade que, praticamente, se perde na operação de sondagem, quando da recuperação dos testemunhos. Já há recomendação do uso de equipamentos de filmagem na definição deste parâmetro pela *ISRM (1978)*.

Para *Baillet et al. (2004)*, uma das principais vantagens do *Optical Televiewer* é fornecer dados que dão um vislumbre do interior do furo de sondagem, assim se aproximando da realidade do maciço rochoso. Ao utilizar o OTV, os pontos onde se tem menor qualidade de rocha, devido à falta de uma recuperação apropriada, pela pre-

sença de solo e fraturas abertas, podem ser observados e devidamente identificados.

Para indicação da abertura de uma descontinuidade sugere-se a utilização da Tabela de abertura fornecida nos métodos de descrição e caracterização de descontinuidades da *ISRM (1978)*, conforme indicado na Tabela 3. Na Figura 12 a seguir apresentam-se exemplos de aberturas, estas apenas ocorreram no furo GSOFG00023. É possível perceber que estas aberturas são completamente ignoradas no testemunho, isso leva a crer na ocorrência de uma fratura apenas não indicando corretamente a abertura que é visível na imagem feita pelo OTV. No furo GSO00023, a descrição geológica menciona um “plano de falha na profundidade 95,9m, com marcas de degraus, fragmentando a rocha e espessura de 40cm”.

Tabela 3. Caracterização das aberturas de descontinuidades, traduzido de *ISRM 1978 (op.cit.)*.

Abertura	Descrição	
<0,1 mm	Muito apertado	
0,1 - 0,25 mm	Apertado	Feições Fechadas
0,25 - 0,50 mm	Parcialmente Aberto	
0,50 - 2,50 mm	Aberto	
2,50 - 10 mm	Moderadamente Largo	Feições semi - abertas
>10 mm	Largo	
1 - 10 cm	Muito Largo	
10 - 100 cm	Extremamente largo	Feições Abertas
> 1 m	Cavidade	

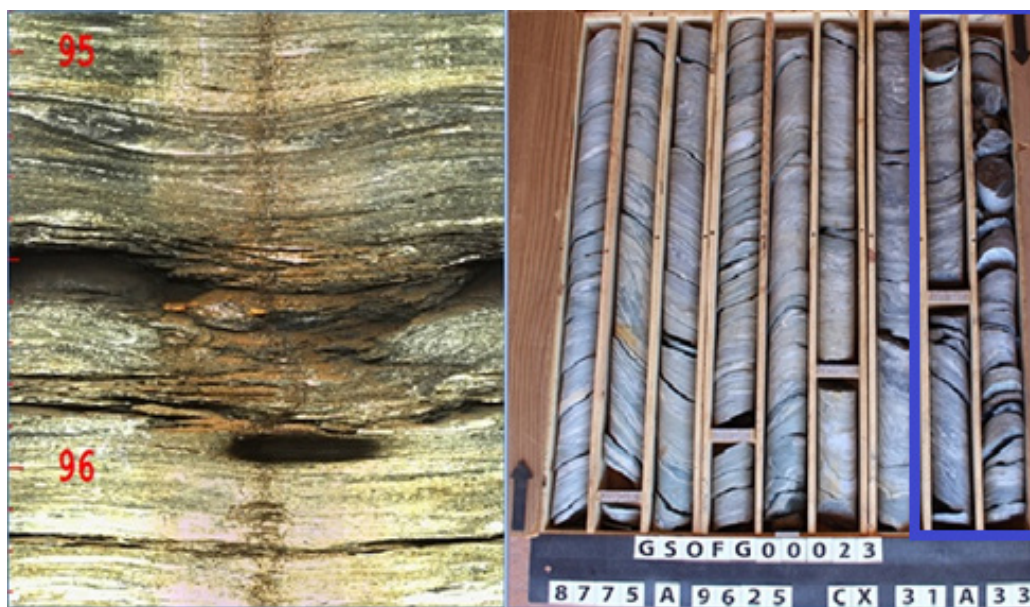


Figura 12. Esquerda: Imagem do furo GSO00023. Direita: Testemunho do furo GSOFG00023, sem condições de identificar-se os vazios vistos na imagem gerada pelo OTV (região entre 95m e 96m, assinalada em azul na caixa de testemunhos).

3.6 Preenchimento, percolação d'água e condições de alterações das paredes

A descrição das condições de alteração das paredes denota as mesmas limitações e subjetividade que a caracterização do grau de alteração da rocha. Entretanto, é possível inferir estados de alteração das paredes de discontinuidades, levando-se em consideração o brilho dos minerais o longo das feições.

No caso do preenchimento, é factível uma descrição deste material mesmo que somente visual. Aconselha-se a diferenciação, sempre que possível, de materiais que selam as fraturas, como preenchimento quartzo-feldspático, de epidoto e carbonático, daqueles que são materiais soltos, como areia, argila e fragmentos de rocha.

Também é possível observar evidências de percolação d'água, quando existente, como paredes oxidadas e a própria surgência de água no interior do furo, fator muito importante para a qualidade geotécnica de um maciço. Os dados adquiridos no presente estudo levam a crer que as aberturas (vazios) no furo GSOFG00023 (Figura 12), podem ter sido geradas por fluxo d'água. Durante a perfuração, este furo apresentou água surgente.

3.7 Grau de fraturamento

Pode-se definir de forma bem direta o que seria o grau de fraturamento, basicamente é o número de fraturas existentes na sondagem testemunhada por metro. O grau de fraturamento visa caracterizar a distribuição de discontinuidades em testemunhos de sondagem. O fraturamento pode ser expresso em graus de intensidade, conforme segue a Tabela 4.

Tabela 4. Grau de Fraturamento (IPT, 1984, apud Serra Juniro e Ojima, 1998)

Siglas	Fraturas/m	Denominações do maciço
F1	< 1	ocasionalmente fraturado
F2	1 a 5	pouco fraturado
F3	6 a 10	medianamente fraturado
F4	11 a 20	muito fraturado
F5	> 20	extremamente fraturado

Outro parâmetro essencial a ser descrito é o espaçamento, que corresponde à distância entre discontinuidades adjacentes de uma mesma família, fator que controlará o tamanho dos blocos em

um maciço rochoso. Esta distância entre descon-tinuidades de um mesmo *set* deverá ser medida ortogonalmente a estas. Na Tabela 5 apresenta-se a classificação dos espaçamentos.

Exemplos destes espaçamentos (graus de fraturamento) são vistos na Figura 13, onde aparecem espaçamentos muito pequenos (centimétricos) entre as fraturas.

Tabela 5. Classificação de espaçamento, modificado de ISRM (1978)

Descrição	Espaçamento
Espaçamento extremamente fechado	<20 mm
Espaçamento muito fechado	20 - 60 mm
Espaçamento fechado	60 - 200 mm
Espaçamento moderado	200 - 600 mm
Espaçamento amplo	600 - 2000 mm
Espaçamento muito amplo	> 2000 mm

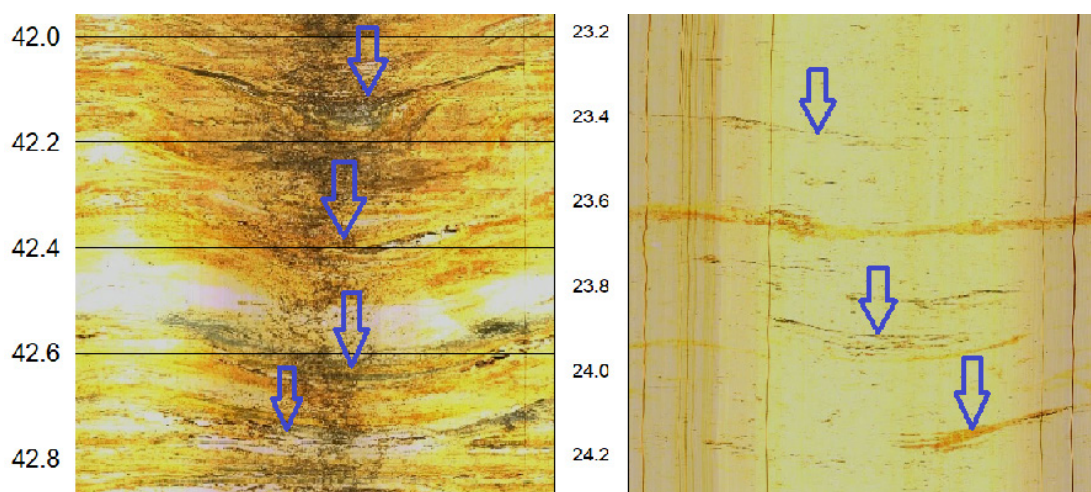


Figura 13. À esquerda, fraturas no furo GSOFG00023, com espaçamento de aproximadamente de 30cm (espaçamento moderado), apresentando assim um grau de fraturamento F2. À direita, três fraturas assinaladas no furo GSOFG00025, a inferior com uma pequena abertura.

Oliveira et al. (2014) faz referência às fraturas presentes nos furos de sondagem que não podem ser demarcadas pelos *softwares*, isso ocorre com descon-tinuidades que estão na vertical. É importante citar que, muitas vezes, ocorrem fraturas verticais a subverticais com relação à inclinação do furo televisado, onde nem sempre é possível a marcação destas na fase de interpretação de imagens. Isso ocorre, pois, os *softwares* não permitem

o fechamento de curvas senoidais extremamente abertas. Entretanto é essencial que estas feições estejam caracterizadas e façam parte dos demais parâmetros a serem descritos, como o espaçamento e o grau de fraturamento. Na Figura 14, observa-se a ocorrência de algumas fraturas verticais no furo FD00069 localizado na Mina Tamanduá. Estas fraturas não são visíveis na caixa de testemunhos.

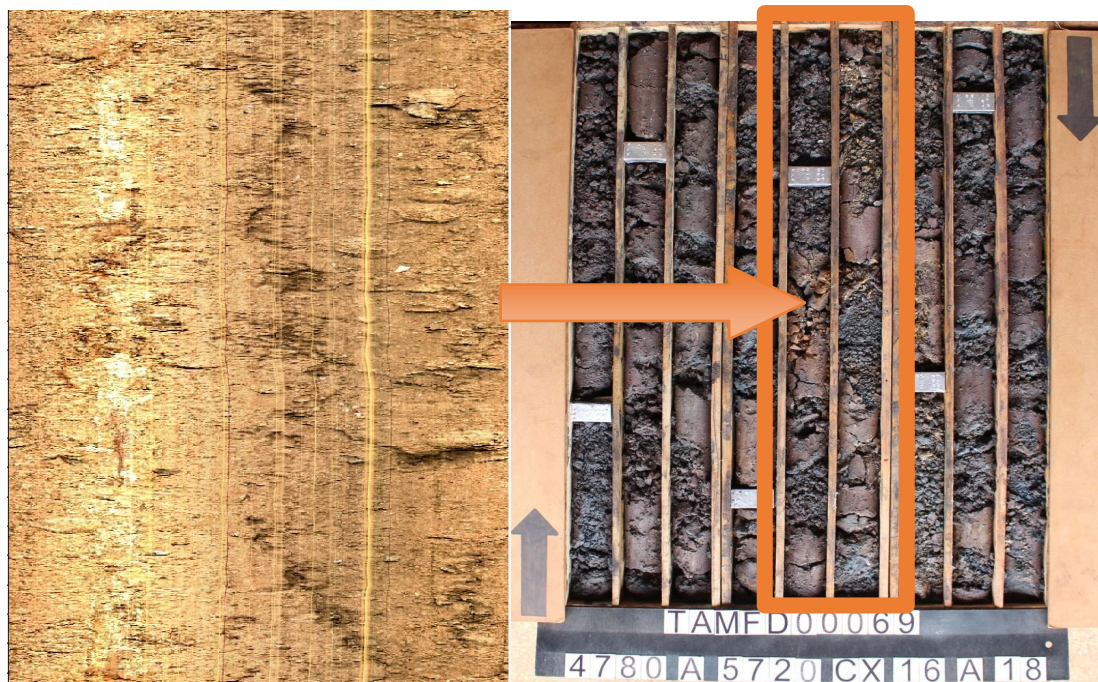


Figura 14. No furo FD00069, observa-se a existência de uma fratura vertical, que se estende por cerca de dois metros. Esta fratura não é vista no testemunho. A seta indica, aproximadamente, a possível localização desta fratura na caixa de testemunhos.

3.8 RQD Teórico

A parte final da metodologia proposta por *Oliveira et al. (2014)* faz referência à construção de um RQD teórico a partir do testemunho virtual, tratando de forma análoga a uma *scanline*. O autor aconselha a utilização do parâmetro espaçamento médio das discontinuidades, também aconselha comparar o RQD teórico com o RQD medido no testemunho de sondagem.

Analisando o furo GSO00023, da Mina Gongo Soco, o qual apresentou artesianismo, realizou-se uma comparação entre o RQD estabelecido a partir da sondagem testemunha e o RQD derivado da filmagem com OTV, após a marcação de fraturas no software *WellCad*.

As imagens oferecidas pelo OTV nas condições apresentadas pelo furo foram consideradas de boa qualidade e os contatos mais expressivos na perfilagem geralmente podem ser visualizados com facilidade. Uma observação prática a respeito dos perfis é que quando as litologias apresentam grandes contrastes de cor (contraste claro/escuro) existe a necessidade de ajustar os diferentes intervalos em profundidade com uma combinação

de brilho e contraste específica para cada trecho, mesmo assim há muita clareza na distinção destas litologias e seus contatos, o que facilita a comparação proposta.

Alguns dos pontos analisados foram os tipos de **Descontinuidades**, a **Rugosidade** de uma fratura, com uma análise simples entre *Rugosa* ou *Lisa*, a espessura das **Aberturas** existentes.

A cada contato entre litologias, observado tanto na imagem quanto no testemunho, é calculado um RQD, até que se perceba um novo contato entre litologias. Desta forma, pode-se calcular RQD's para seções do furo, e estes variam conforme o fraturamento apresentado nestas seções. Isso se deve à visualização do material *in situ*, sem a existência de "falsas" fraturas e quebras geradas na sondagem às vezes pela fragilidade do material ou por quebra mecânica devido à atividade do equipamento de sondagem.

Na Tabela 6, são apresentadas as estruturas marcadas em parte do furo GSO00023, compreendendo bandamentos, fraturas e veios. Na Figura 15 é realizada uma comparação entre o testemunho retirado do furo e a imagem gerada por OTV.

Tabela 6. Comparação entre as estruturas marcadas com OTV e as vistas no testemunho de sondagem.

	Estruturas marcadas no OTV	Estruturas observadas nos testemunhos
Furo GSO00023 96,25m - 104,6m	11	53

A forma de relacionar as estruturas marcadas nas imagens comparando-as com o testemunho é apresentada por *Milloy et al.* (2015), que em seu artigo separa também os tipos de fraturas entre as causadas de forma natural ou de forma induzida. No presente estudo ainda não é possível realizar esta distinção, mas percebe-se um número menor

de fraturas marcadas que as passíveis de serem analisadas nos testemunhos. *Milloy* (2015), *Thomas* (2015) e *Gwynn* (2013) observam que nem sempre é aconselhável fazer uso do RQD calculado diretamente a partir da imagem gerada pelo OTV; isso se deve ao fato de que, na imagem, o maciço pode ainda não apresentar o alívio de tensões, o que é fator crucial para um maior fraturamento visto em testemunhos. Naturalmente, os testemunhos estão sujeitos também às quebras mecânicas induzidas na extração, transporte e manuseio. Assim, a rocha mostra-se em geral bem mais íntegra quando observada com OTV.

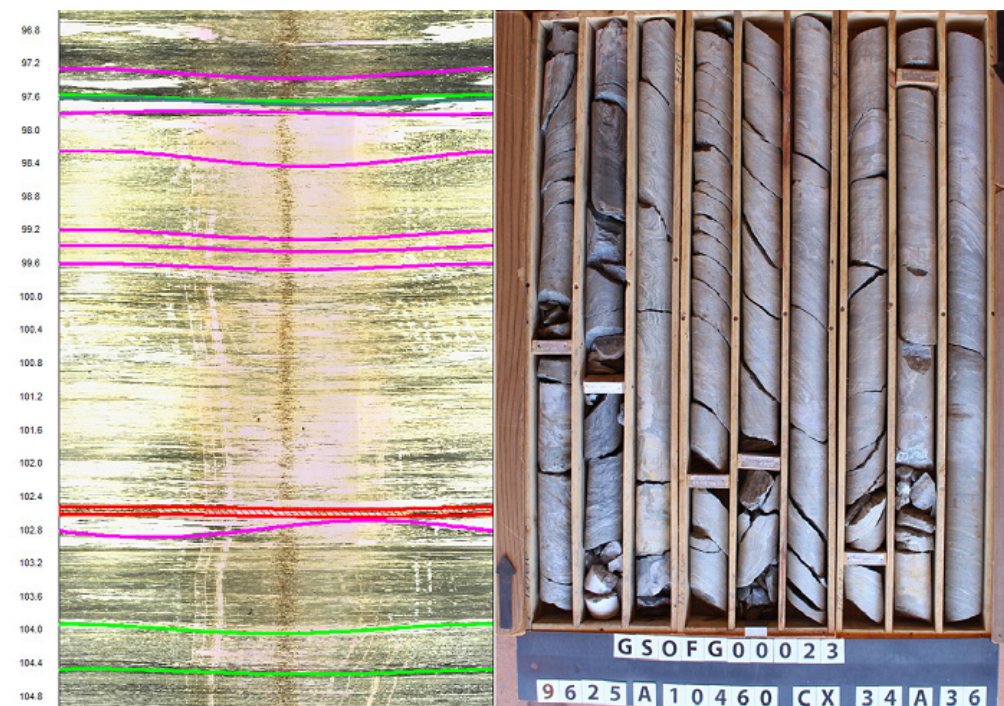


Figura 15. Seção do furo GSO00023, entre 96,25m e 104,6m de profundidade.

4 RESULTADOS

Considerando o que foi verificado em 553 metros de furos televisionados, a Tabela 7 apresenta o resultado da aplicação da proposta metodológica de Oliveira (2015) às imagens obtidas via OTV em litologias do Quadrilátero Ferrífero. Para melhor visualização destas informações, cada um

dos parâmetros considerados ao longo do tópico 3 está representado nesta tabela. Com base nos registros obtidos, conclui-se que o OTV pode fornecer importantes informações, com foco principal no posicionamento espacial (*dip e dip direction*) de descontinuidades e outras estruturas (veios, bandamentos, acamadamentos), quando estas feições são identificáveis.

Tabela 7. Resultado da aplicação da proposta metodológica de Oliveira et al. (2014) para imagens obtidas com OTV, em litologias do Quadrilátero Ferrífero.

Itens avaliados	Resultados em minério de ferro no QF
1. Rocha Intacta	Possibilidade de distinção direta entre tipos litológicos? Distinção altamente dependente dos tipos litológicos presentes e da limpeza dos furos e turbidez do fluido. Clara distinção entre materiais friáveis e compactos. Distinção visual impossível para várias litologias.
2.Descontinuidades a)Tipo de estrutura	Possibilidade de diferenciação clara entre as estruturas geológicas presentes? Bandamentos e veios são facilmente identificáveis. Contatos litológicos nem sempre visíveis, em especial quando envolvem litologias friáveis e contatos gradacionais. Como para a rocha intacta, a observação dependente da limpeza dos furos e turbidez do fluido.
2.b) Rugosidade	Possibilidade de distinção utilizando os perfis de rugosidade de Barton <i>et al.</i> (1974)? Verificou-se diferenciação apenas qualitativa entre estruturas lisas e rugosas.
2.c) Abertura	Possibilidade de uso das classificações possíveis: fechada, semiaberta e aberta ? Em geral, não foi possível. O principal foco está na comparação com o testemunho, onde a informação das aberturas é comumente perdida. Fraturas fechadas são muito difíceis de serem identificadas.
2.d) Preenchimento, percolação d'água e condições de alterações das paredes	É possível observar preenchimento, evidências de percolação d'água, quando existente, como paredes oxidadas/alteradas e a própria surgência de água no interior do furo? Não foram visualizadas aberturas preenchidas nos furos investigados. Quando presente, a percolação d'água foi de fácil identificação, como ficou evidente no furo GSOFG00023. Quanto à alteração, distinção apenas em dois níveis: A1/A2 ou A3/A4.
2.e) Grau de Fraturamento	É possível a utilização direta do Grau de Fraturamento (IPT, 1984, apud Serra Juniro e Ojima, 1998) e classificação de espaçamento, modificado de ISRM (1978)? Houve dificuldade de visualização de fraturas fechadas, levando a um grau de fraturamento errôneo. Essa dificuldade comumente ocorreu por questões operacionais (sujeira existente no furo e/ou por uma utilização de uma velocidade de televisionamento inapropriada, causando a perda de qualidade das imagens).
2.f) RQD Teórico	Possibilidade de construção de um RQD teórico a partir do testemunho virtual? É viável a obtenção de um RQD teórico com base em imagens de OTV. Entretanto, a representatividade deste RQD deve ser ponderada no caso do maciço ainda não ter sofrido o alívio de tensões, o que é fator importante para um maior fraturamento observado em testemunhos.

Como forma de ilustrar os resultados obtidos no Quadrilátero Ferrífero, os quais estão resumidos na Tabela 7, registros típicos obtidos com OTV são apresentados na Tabela 8, onde parte do furo GSO00023 foi considerada. Este trecho de 7,1 m de comprimento representa bem o comportamento médio das litologias visualizadas nos furos de sondagem. De forma sintética, pode-se dizer que o televisionamento mostrou-se bem sucedido

na identificação de *dip* e *dip direction* de descontinuidades e outras estruturas tais como veios, bandamentos e acamadamentos. Para os demais itens avaliados na Tabela 7 (rocha intacta, rugosidade de descontinuidades, abertura, etc.), alguns são apenas parcialmente distinguíveis nas imagens, enquanto outros não podem ser reconhecidos e dependem então de análise dos testemunhos para viabilizar a descrição.

Tabela 8. Aplicação dos resultados no trecho apresentado na Figura 15 (furo GSO00023).

Profundidade (m)	Rocha Intacta	Tipos de Estrutura	Descontinuidades	Dip/ Dip Direction	Rugosidade	Abertura	Preenchimento, percolação d'água e alteração das paredes	Grau de Fraturamento	RQD Teórico
97,3	Sem dispor dos testemunhos de rocha, não é possível definir-se a litologia		Fratura	50/195	Lisa	Fechada	Grau de alteração: A1/A2	Grau de fraturamento: F2	De 96,25 a 104,6: RQD = 98%
97,6		Bandamento		29/174					
97,7		Contato		39/217					
98,4		Fratura		62/204	Lisa	Fechada			
99,2		Fratura		49/203	Lisa	Fechada			
99,4		Fratura		38/212	Lisa	Fechada			
99,6		Fratura		37/195	Lisa	Fechada			
102,5		Fratura		21/233	Rugosa	Aberta	Existência de percolação de água		
102,8		Fratura		28/165	Lisa	Fechada			
104,0		Bandamento		49/179					
104,4	Bandamento		31/206						

5 CONCLUSÃO

Neste trabalho procurou-se mostrar a aplicabilidade do *Optical Televiewer (OTV)*, com relação às imagens coletadas em furos de sondagem em áreas de mineração de ferro localizadas no Quadrilátero Ferrífero (MG). Nas situações analisadas (minas do Quadrilátero Ferrífero), obteve-se êxito em confirmar o *Optical Televiewer* como uma ferramenta que permite complementar as informações geológico-geotécnicas disponíveis.

Na comparação com os trabalhos de Oliveira *et al.* (2014) e Oliveira (2015), os quais foram realizados prioritariamente em rochas compactas, o presente estudo envolveu litologias friáveis e compactas, tendo tido sucesso na identificação de *dip* e *dip direction* de descontinuidades e outras estruturas tais como veios, bandamentos e acamadamentos. Para os demais itens avaliados na proposta metodológica de Oliveira *et al.* (2015), descritos na Tabela 7, alguns são apenas parcialmente distinguíveis nas imagens, enquanto outros não podem ser reconhecidos e dependem então de análise dos testemunhos para viabilizar a descrição. Uma significativa vantagem relacionada ao uso do OTV foi verificada em um dos furos da Mina Gongo Soco (Figura 12), onde as imagens mostraram uma importante descontinuidade, não

identificada nos testemunhos de sondagem devido à fragmentação das amostras.

Com relação à construção de um RQD teórico a partir do testemunho virtual, conforme a proposição de Oliveira *et al.* (2014), verificou-se que o fraturamento apresentado pelos testemunhos de sondagem é significativamente maior que o fraturamento observado nas imagens. Percebe-se que é viável a obtenção de um RQD teórico com base em imagens de OTV, entretanto a representatividade deste RQD deve ser ponderada no caso do maciço ainda não ter sofrido o alívio de tensões, o que é fator importante para um maior fraturamento observado em testemunhos.

REFERÊNCIAS

1. Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental, ABGE, **Manual de sondagens. Boletim n°3**, 5ª edição, São Paulo, 75p, 2013.
2. BAILLOT R. T., **Televisionamento 360° das Paredes de Furos de Sondagem**, Empresa Alphageos, Divulgação Técnica, 2012.
3. BAILLOT R.T., COLAS R., BARTON N., ABRAHÃO R., RIBEIRO J. A. **Comparing 360° Televising of Drill Hole Walls with Core**

- Logging.** Proc. International Site Investigation Conf, Portugal. 2004.
4. BLAKE J.R., **Application of borehole imagery in iron ore: examples from Mount Whaleback**, Western Australia. Applied Earth Science (Trans. Inst. Min. Metall. B), VOL 119, NO 3. 2010.
5. ANON., **Mapeamento Lito-Estrutural e Geomecânico da Mina Gongo Soco**, BVP-Engenharia, Mina Gongo Soco – VALE, Relatório Interno, Setembro/2008.
6. ANON., **Mapeamento Litoestrutural e Geomecânico**, BVP-Engenharia, Mina do Tamanduá – VALE, Relatório Interno, Nova Lima – MG, 2004.
7. ANON., **Avaliação Geotécnica da Geometria dos Taludes das Cavas Finais das Minas DIFL, Avaliação Geotécnica da Cava Final da Mina Tamanduá**, BVP – Engenharia, Relatório Interno, Outubro/2012.
8. COLLIER H, RIDDER M., **Utilization of Borehole Televiewer in Fracture Analysis**, Abilene Christian University, Welenco, Inc., 1993.
9. COSTA T., **Análise de Dados de Cargabilidade, Resistividade Elétrica e Susceptibilidade Magnética na Mina do Brucutu, MG**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Geociências. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 113p. . 2007.
10. FREDRICK F., NGUYEN T., SEYMOUR C., DEMPERS G., **Geotechnical data from optical and acoustic televiewer surveys**. The AusIMM Bulletin – Journal of the Australasian Institute of Mining and Metallurgy, n.5, October. 2014.
11. GWYNN X.P., BROWN M.C., MOHR P.J., **Combined use of Tradicional Core Logging and Televiewer Imaging for Pratical Geotechnical data Collection**, SRK Consulting (UK) LTD, United Kingdom, September 2013.
12. INTERNATIONAL SOCIETY FOR ROCK MECHANICS – ISRM. **Suggested methods for the quantitative description of rock masses**. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics abstracts*, vol 15, n6, p319-368, 1978.
13. MILLOY, SOPHIE F., McLEAN K. e McNAMARA D.D., **Comparing Borehole Televiewer Logs with Continuous Core: An Example from New Zealand**, Proceedings World Geothermal Congress, Australia, 2015.
14. OLIVEIRA D.G.G., **Televisionamento óptico de sondagens – proposta metodológica para execução e suas aplicações em obras subterrâneas**, **Dissertação de Mestrado- IGc/USP**, São Paulo, 2015.
15. OLIVEIRA D. G. G., MONTEIRO M. D., MASSONI F., ROCHA H. C., **Televisionamento de Furos de Sondagens nos Estudos do Metrô de São Paulo – Proposta Metodológica para Execução e Análise**, Revista Brasileira de Geologia de Engenharia Ambiental, Brasil, 2014.
16. OLIVEIRA D.G.G., MONTEIRO M.D., ROCHA H. C., TAIOLI F., FACURI G. G., NASCIMENTO A. L., **Aplicação do Televisionamento de Sondagens em Fase de Projeto Básico do Metrô de São Paulo**, Revista Brasileira de Geologia de Engenharia Ambiental, Brasil, Vol.5, n.2, 2015.
17. THOMAS R.D.H., NEILSEN J.M., WILSON H.F., LAMB P., **Structural Interpretation from Televiewers Surveys**, Australian Centre for Geomechanics, Perth, Australia, 2015.