

# TELEVISAMENTO DE FUROS DE SONDAGENS NOS ESTUDOS DO METRÔ DE SÃO PAULO – PROPOSTA METODOLÓGICA PARA EXECUÇÃO E ANÁLISE

DANIELA GARROUX GONÇALVES DE OLIVEIRA

MARCELO DENSER MONTEIRO

FABRÍCIA MASSONI

HUGO CÁSSIO ROCHA

*Geólogos da Companhia do Metropolitano de São Paulo (METRÔ)*

*Rua Augusta, 1626 Cerqueira César, São Paulo-SP. CEP: 01304-902. Tel. 11 3371 7244*

*E-mail: dggoliveira@metrosp.com.br; mdmonteiro@metrosp.com.br;*

*hcrocha@metrosp.com.br; fmassoni@metrosp.com.br.*

## RESUMO ABSTRACT

A caracterização geológico-geotécnica de maciços rochosos é fundamental para identificação de condicionantes geológicos associados à estabilidade de escavações e estruturas subterrâneas. Feições como planos de foliação, dobras, falhas e sistemas de fraturas, merecem atenção especial por estarem associados a pontos de fraqueza do maciço. Em muitos locais, as condições geológicas, geomorfológicas e de ocupação urbana dificultam a exposição e identificação destas feições em superfície. Neste contexto, o meio técnico desenvolveu novas técnicas para facilitar o acesso às feições supracitadas. Dentre estas, encontra-se o televisamento de sondagens, que consiste na obtenção de imagens 360° das paredes dos furos de sondagem, fornecendo o que pode ser considerado um testemunho de sondagem virtual.

Esta técnica tem crescente aplicação em estudos e investigações de grandes obras de infraestrutura. Todavia, não há no Brasil um instrumento que oriente e padronize a realização destes serviços, assim como uma sistemática na interpretação dos dados.

É proposta uma metodologia para a descrição destes testemunhos virtuais, tendo como base os métodos sugeridos para a descrição quantitativa de descontinuidades em maciços rochosos da ISRM (1978). Sugerem-se também adaptações de alguns parâmetros de caracterização e classificação geológico-geotécnica, como o grau de fraturamento e o RQD, para testemunhos virtuais obtidos no televisamento.

## ***APPLICATION OF THE OPTICAL TELEVIEWER IN THE STUDIES OF THE SÃO PAULO METRO AND PROPOSED METHODOLOGY IN ITS EXECUTION AND ANALYSIS***

The geological and geotechnical characterization of rock masses is critical to identify geological conditions associated to stability of excavations and underground structures. Features such as plans foliation, folds, faults and fractures systems deserve special attention because they are associated with weakness points of the massif. In many places, geological, geomorphological and urban occupation conditions hinder exposure and identification of these features on the surface. In this context, professionals and researchers developed new technologies to facilitate access to the features mentioned above. Among these innovations is the optical televiewer, which consists in obtaining 360° images of the borehole walls, providing what could be considered a virtual log.

This technique has growing application in studies and investigations of major infrastructure works, however, in Brazil there isn't a tool to guide and standardize the performance of these services, as neither as a systematic interpretation of data.

A methodology is proposed for the description of these virtual logs, based on the suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses of ISRM (1978). It is also suggested adaptations of some characterizing and classifying geological and

Ressalta-se que os serviços de televisamento possuem caráter complementar aos serviços de sondagens, já há muito tempo utilizados como base de investigação direta do subsolo, não podendo ser considerados uma substituição deste método tradicional, que permite, além da obtenção de informações relevantes por meio da análise macroscópica do material, a coleta de amostras para ensaios geotécnicos e demais análises.

**Palavras-Chave** - Televisamento, Perfilagem Ótica, Descrição e Caracterização de Maciços Rochosos, Metrô de São Paulo.

## 1 INTRODUÇÃO

O que certamente se trata de uma inovação no meio técnico, contando, atualmente, com aproximadamente sete empresas que fornecem este serviço no país, o televisamento de furos de sondagem requer uma atenção especial para que seja aproveitado ao máximo, obtendo-se todas as informações possíveis para melhor caracterizar e classificar um maciço rochoso, contribuindo com a caracterização feita em testemunhos de sondagens.

Considerando que já existe um documento contendo uma sugestão de método para a descrição quantitativa de descontinuidades em maciços rochosos (ISRM, 1978), optou-se por seguir as mesmas sugestões dos parâmetros aí descritos, adaptando-o para o televisamento de furos de sondagens.

Este documento, ISRM (*op.cit.*), já admite o uso de câmeras para a determinação de características de descontinuidades, inclusive recomendando a aplicação de equipamentos de filmagem para identificação e avaliação da abertura destas, parâmetro que influenciará nas tensões cisalhantes, normais e na condutividade hidráulica do maciço rochoso.

O propósito deste estudo é atingir um mínimo grau de padronização na caracterização e classificação de descontinuidades em um maciço rochoso, além da rocha intacta propriamente dita, a partir de imagens das paredes de furos de sondagem, prevendo a necessidade de um período experimental, com a intenção de revisões ao longo do tempo.

geotechnical parameters, as the degree of fracturing and theoretical RQD to core samples.

It is noteworthy that the optical televiewer services should be considered as a complementary service to drill holes, which has been long used as a basis for direct investigation of the subsurface, not being considered a replacement of the traditional method, which allows, in addition, to obtain relevant information through macroscopic analysis of the material, collection of samples for geotechnical testing, besides other analyzes.

**Keywords** - Optical Televiewer, Rock Massif Characterization, São Paulo Subway

## 2 EQUIPAMENTO E AQUISIÇÃO DE IMAGENS

O equipamento de televisamento consiste, simplificada, em uma sonda de aço com uma câmera em sua parte interna, ligada a um cabo especial que, além de sustentar a sonda, envia as imagens adquiridas a uma central acoplada a um computador. Esta sonda é também equipada com um sistema de magnetômetros e acelerômetros tri-ortogonais, que possibilitam obter uma imagem espacialmente orientada da parede dos furos, além de um sistema de controle de profundidade.

Na aquisição das imagens é necessário que o furo esteja devidamente limpo para que a filmagem seja executada em condições adequadas.

Para a obtenção dos dados é utilizado um software de aquisição ligado diretamente à câmera. As imagens e dados obtidos são, posteriormente, exportados para outro software que permite o tratamento das informações obtidas. Na fase de interpretação, as descontinuidades podem ser identificadas e caracterizadas, obtendo-se suas respectivas atitudes, além de outros parâmetros, sendo possível elaborar estereogramas dos polos e dos planos estruturais, bem como análises estatísticas.

Durante a aquisição, ou durante o processamento, é possível incluir a declinação magnética. Entretanto, na prática, para evitar supostos erros de programas (*bugs*), recomenda-se a aquisição das imagens considerando-se o norte magnético, incluindo a correção da declinação magnética apenas em fase posterior.

### 3 CARACTERIZAÇÃO DO TESTEMUNHO VIRTUAL

Considerando que um maciço rochoso, do ponto de vista da engenharia, é um conjunto de blocos de rocha intacta delimitados por descontinuidades, é essencial que sejam descritos tanto a rocha intacta como as descontinuidades que a delimita, assim como no aplicado em testemunhos de sondagem. Sendo assim, sugere-se a divisão das descrições e interpretações em duas partes distintas, conforme apresentado nos itens a seguir.

#### 3.1 Rocha intacta

Os parâmetros sugeridos para a descrição da rocha intacta, possíveis de serem observados nas imagens de televisamento e de interesse para projetos de engenharia, são: a descrição dos litotipos, sua estrutura, textura e composição mineralógica, além do seu grau de alteração.

Propõe-se a divisão do testemunho virtual em zonas sempre que houver mudanças em um destes parâmetros, principalmente definindo intervalos com graus de alteração distintos e delimitando domínios estruturais e litológicos diferentes.

Sugere-se a elaboração de um perfil de sondagem virtual, assim como já é tradicionalmente realizado para demais testemunhos de sondagens. A figura 1 apresenta uma sugestão para este perfil virtual, tendo como base o modelo já utilizado para os perfis individuais de sondagem executados para a Companhia do Metropolitano de São Paulo. Neste perfil individual de furo televisado deverão ser indicadas todas as características que descrevem a rocha, inserindo-se parâmetros que serão descritos detalhadamente nos próximos itens.

Na caracterização da rocha intacta é extremamente essencial descrever os aspectos do corpo rochoso como um todo. Inclui-se aí as estruturas ditas penetrativas, que não interrompem, necessariamente, a continuidade física do meio rochoso, como a foliação, xistosidade, bandamento, acamamento, dobramentos, veios, etc. Estas estruturas devem ser devidamente caracterizadas, pois são de suma importância na definição do modelo geológico estrutural do maciço, diversas vezes indicando aspectos que influenciarão em seu comportamento geomecânico. Ademais, muitas

destas estruturas estão frequentemente associadas a planos descontínuos, por exemplo, um sistema de fraturas com planos paralelos à foliação da rocha.

Por tantas vezes esta distinção entre descontinuidades e feições penetrativas não é tão evidente, o que aumenta a importância da insistência em uma descrição detalhada de todas as feições observadas no maciço. Ressalta-se a importância de se demarcar a foliação ao longo de toda a imagem do furo de sondagem, verificando se há quaisquer mudanças relevantes na sua orientação, o que poderia fornecer indícios de alterações no padrão geológico-estrutural, indicando, por exemplo, a proximidade de uma zona de cisalhamento.

As figuras 2 e 3 ilustram alguns aspectos estruturais penetrativos, observados em imagens da rocha gnáissica do embasamento cristalino da Bacia de São Paulo, obtidas em televisamento de furos de sondagem ao longo de diversos projetos das linhas do Metrô.

Com relação ao estado de alteração da rocha, apenas será possível uma caracterização limitada, feita visualmente. Na prática poderão ser notadas variações no brilho e na coloração dos minerais, indicando uma maior alteração da rocha com relação aos trechos de rocha sã, exemplo figura 4. Na descrição deste parâmetro em testemunhos de sondagens, além das variações nas características dos minerais que compõem a rocha, também é avaliada a sua resistência mecânica, como, quebra com dificuldade ao golpe do martelo, ou, quebra com facilidade sob pressão dos dedos.

Nas filmagens, pode-se observar a “rugosidade” das paredes, que seria, indiretamente, a avaliação da resistência mecânica, considerando que a perfuração do furo pela sondagem mecanizada implicaria em um desgaste nestas paredes, sendo mais evidente este desgaste quanto mais alterada for a rocha. Exemplo disso pode ser observado na figura 5, onde as paredes dos furos refletem o desgaste maior da rocha devido ao seu estado de alteração.

Para a caracterização de tais intervalos alterados sugere-se o uso da tabela adaptada de IPT (1984, *apud* Serra Junior & Ojima, 1998) (Tabela 1).

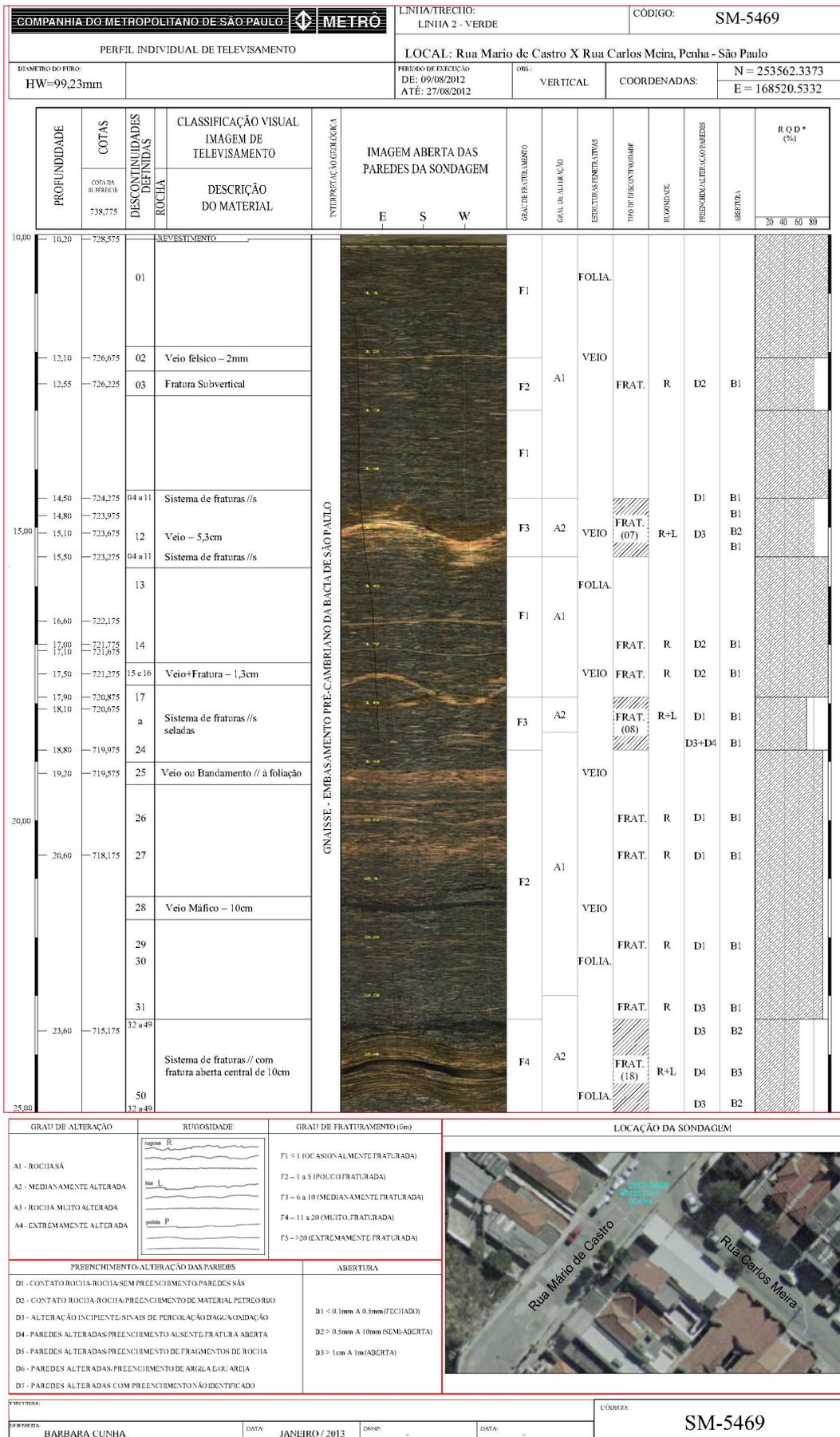
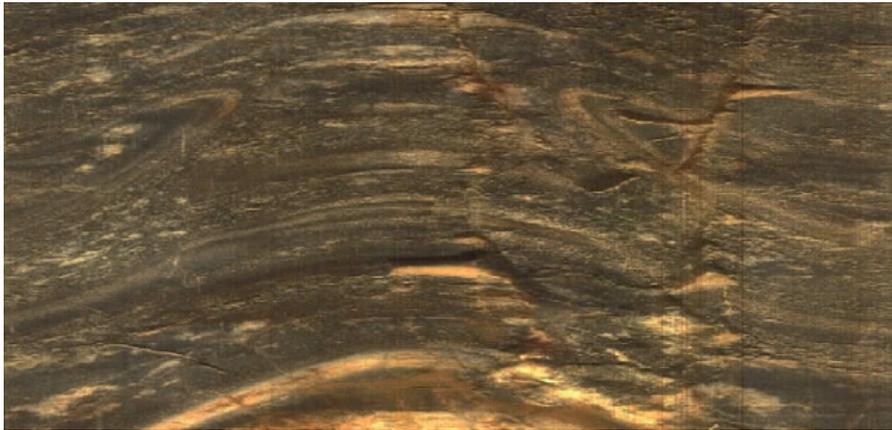
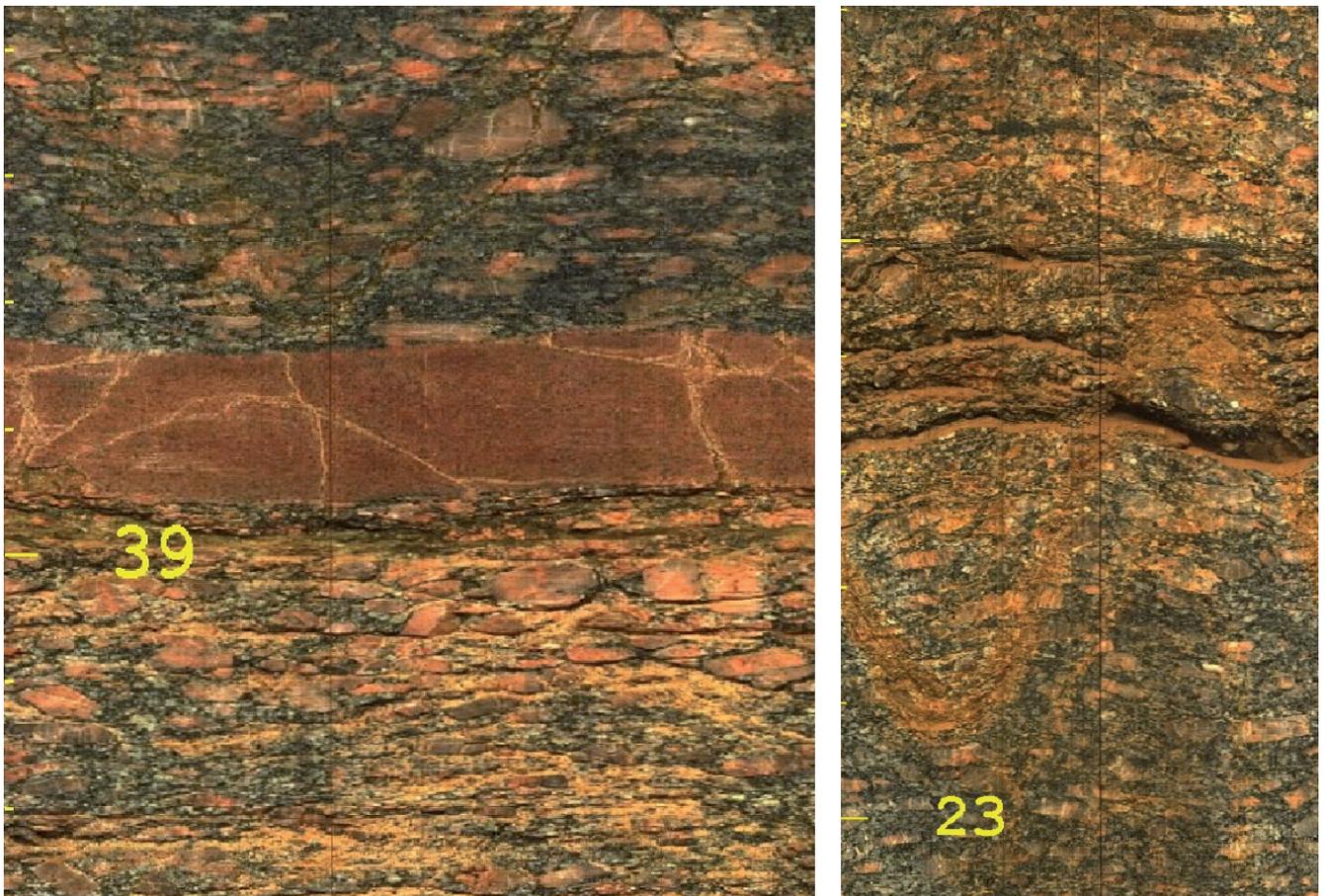


Figura 1 - Sugestão de modelo para perfil individual de televisamento (PIT).

**Tabela 1** – 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 é intensamente descolorida, aspecto de solo.

**Figura 2** – Dobras intrafoliais centimétricas.**Figura 3** – Dobra de arrasto com trecho cisalhado e cominuído. Fonte: Metrô-SP.



**Figuras 4 e 5** - Diferenças no aspecto de trechos menos e mais alterados (acima e abaixo do veio, na figura 4 e abaixo e acima do veio na figura 5). Fonte: Metrô-SP.

### 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, *op.cit.*).

O televisamento fornece a imagem do testemunho virtual “enrolado” (imagem da superfície cilíndrica das paredes dos furos de sondagem e perfurações) e “desenrolado” (analogamente, imagem da superfície cilíndrica aberta das paredes dos furos de sondagem e perfurações). Nas imagens da superfície cilíndrica aberta das paredes dos furos é possível delimitar as descontinuidades, pois estas, dependendo do mergulho da estrutura analisada, formam curvas senoidais, passíveis de serem definidas digitalmente a partir de três pontos demarcados sobre a imagem, definindo, automaticamente, uma linha, conforme

observado na figura 6, à qual corresponde a uma descontinuidade espacialmente posicionada, com sua respectiva atitude.

É certo que esta ferramenta, ao fornecer orientações destas descontinuidades e suas respectivas profundidades, já reflete uma grande vantagem no uso deste equipamento, sendo de grande utilidade na análise estrutural do maciço rochoso. Porém, a análise e interpretação destas feições podem prosseguir e fornecer mais informações relevantes do maciço rochoso.

Tendo como base os métodos sugeridos da ISRM, os demais parâmetros das descontinuidades devem ser descritos, como o tipo de estrutura (além daquelas intrínsecas à matriz rochosa e já descritas no item rocha intacta), espaçamento (definido a posteriori, após a definição das famílias de descontinuidades), rugosidade, abertura, preenchimento, alteração das paredes e percolação d’água, observados de forma indireta, já que, de modo geral, muitos destes aspectos estão nas superfícies das paredes das descontinuidades.

Outras informações de caracterização e até mesmo classificação das descontinuidades no maciço rochoso podem ser determinados, como o grau de

fraturamento e o RQD teórico, através de diversas correlações estabelecidas por distintos autores, conforme apresentado mais adiante.



**Figura 6** – Exemplo de fratura delimitada digitalmente, com uma linha vermelha (imagem “enrolada” à esquerda e “desenrolada” à direita), após análise utilizando software de televisamento RGLDIP da câmera OPTV, da *Robertson Geologing*. E exemplo de descontinuidade rugosa, citado no item *RUGOSIDADE*. Fonte: Metrô-SP.

Todos os parâmetros devem ser descritos e anexados como informações tanto no perfil individual de televisamento (PIT, Figura 1) como em uma tabela de dados (Ex.: Tabela 2), que complementar as informações inseridas neste perfil. Cada descontinuidade deverá ser enumerada na fase de processamento de dados, incluindo-se como uma das informações presentes no perfil de sondagem. A tabela 2, então, complementar este perfil com informações sobre a atitude de cada estrutura, além de fornecer informações sobre a distribuição do espaçamento para cada família de descontinuidade. Para isso, sugere-se utilizar a

tabela 2 somente para os tipos de estruturas não penetrativas, as descontinuidades como fraturas e falhas, por exemplo, que será feito observando as imagens geradas no televisamento. As estruturas ditas penetrativas, como foliação, bandamento, veios, acamamento e xistosidade deverão ser indicadas e tratadas separadamente.

Após a definição das estruturas descontínuas, estas feições podem ser separadas por *sets* de famílias, que devem ser pré-definidas em fase anterior à da elaboração da tabela 2, utilizando estereogramas de concentração de polos, caso necessário.

**Tabela 2** – Exemplo de tabela com parâmetros complementares de atitude e distribuição de espaçamento, como informações complementares do perfil individual de televisamento.

NÚMERO	PROFUNDIDADE	ESPAÇAMENTO (m)	ATTITUDE	FAMÍLIA	TIPO DE ESTRUTURA	OBSERVAÇÕES
01	22,50	0	210/40	F1	Fratura	
04	24,20	1,70	215/50	F1	Fratura	Percolação d'água
07	26,75	2,55	209/45	F1	Fratura	Presença de argila
09	28,30	1,55	213/38	F1	Fratura	Paralela a veio de 3cm
12	32,50	4,20	210/50	F1	Fratura	Sistema de 6 fraturas paralelas
13	32,58	0,08	210/48	F1	Fratura	
14	32,65	0,07	215/45	F1	Fratura	
15	32,80	0,15	220/40	F1	Fratura	
16	32,85	0,05	212/50	F1	Fratura	
17	32,95	0,10	218/45	F1	Fratura	
02	23,45	0	140/70	F2	Fratura	
08	27,90	4,45	138/64	F2	Falha	Possível deslocamento milimétrico, prov. falha normal.
09	29,45	1,55	150/75	F2	Fratura	
03	23,85	0	85/75	F3	Fratura	
05	24,85	1,00	78/80	F3	Fratura	
06	25,30	0,45	80/70	F3	Falha	Deslocamento de 2 cm
10	30,25	4,95	72/80	F3	Fratura	
11	31,20	0,95	80/75	F3	Fratura	
18	33,80	2,60	84/78	F3	Fratura	

### Tipo de estrutura

É de suma importância classificar o melhor possível os tipos de estruturas observados, principalmente buscando separar fraturas de demais estruturas como foliação, bandamento, falha, zona de cisalhamento, veios, dobras, acamamento e contato litológico, conforme já mencionado anteriormente, diferenciando as estruturas penetrativas das discontinuidades propriamente ditas. Esta delimitação de estruturas deverá estar

especificada tanto no perfil individual de furo televisado (PIT, figura 1) como na tabela com informações complementares (Tabela 2).

Algumas vezes mais de um tipo de estrutura ocorre em um mesmo trecho e isto deverá ser mencionado, como, por exemplo, o caso de fraturas dentro de um veio (Figura 7). Este veio, devido ao seu comportamento reológico distinto da rocha matriz, evidencia uma maior competência e um comportamento mais rúptil, eventualmente apresentando maior número de fraturas visíveis,

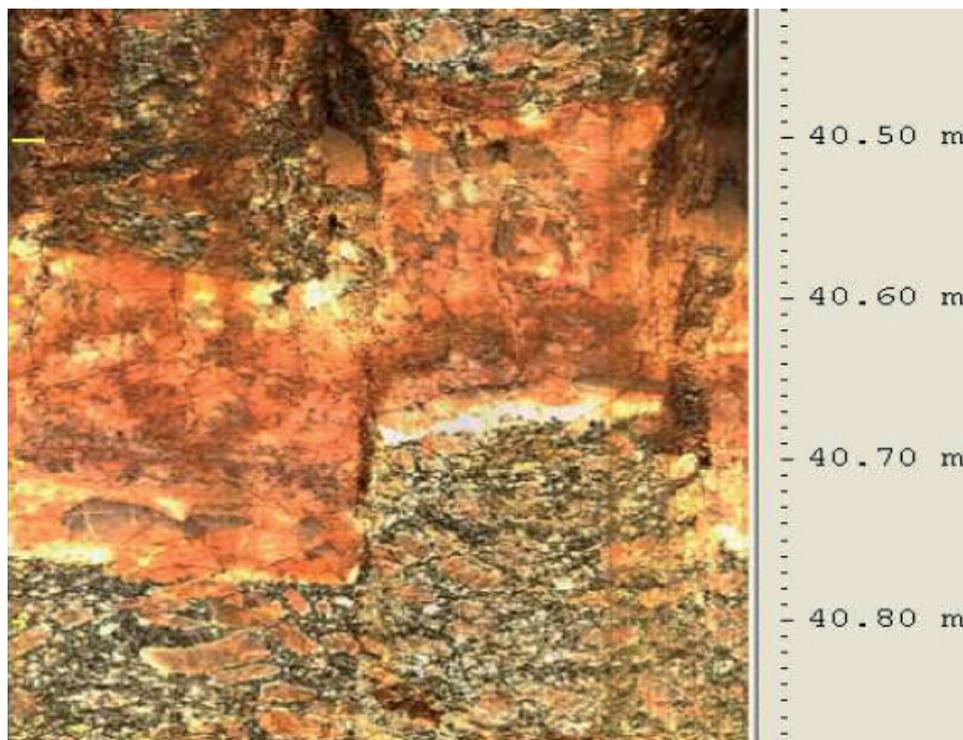
inclusive com distribuição das atitudes de famílias diferente daquelas da encaixante. Portanto, delimitar todos esses casos é essencial para compreender as mudanças na qualidade do corpo rochoso.

O software permite a definição de camadas, inclusive fornecendo a espessura real desta. Isto deverá ser utilizado para a definição de estruturas e demais feições que impliquem na necessidade de definição de espessura (Ex.: abertura e preenchimento).

Toda a ocorrência de planos de falha e cisalhamento deve ser detalhadamente caracterizada, devido a sua importância na estabilidade do maciço rochoso e sua influência nos projetos de obras de engenharia, especialmente obras subterrâneas, barragens e taludes. Sempre que possível de ser observado, indicar os rejeitos aparentes, como o exemplo da figura 8, ilustrando uma falha de componente normal e rejeito aparente de 12 cm.



**Figura 7** - Veio de 20 cm de espessura com fraturas que não se propagam para a rocha adjacente, evidência de comportamento geomecânico distinto entre os materiais. Fonte: Metrô-SP.



**Figura 8** - Falha com componente normal e rejeito aparente aproximado de 12 cm. Fonte: Metrô-SP.

## Rugosidade

A rugosidade de discontinuidades é um importante componente na resistência ao cisalhamento, especialmente no caso onde há contato parede-parede. Em termos gerais a rugosidade é caracterizada em termos de irregularidades (também definida como a rugosidade em si) e

ondulações. Na prática a ondulação afetará a direção inicial de deslizamento sobre um plano, enquanto que as rugosidades afetarão a resistência ao cisalhamento. A diferença principal está na escala de amostragem, conforme pode ser compreendido com maiores detalhes em ISRM (*op.cit.*). Na figura 9 ilustra-se um exemplo de discontinuidade rugosa filmada em um televisamento.

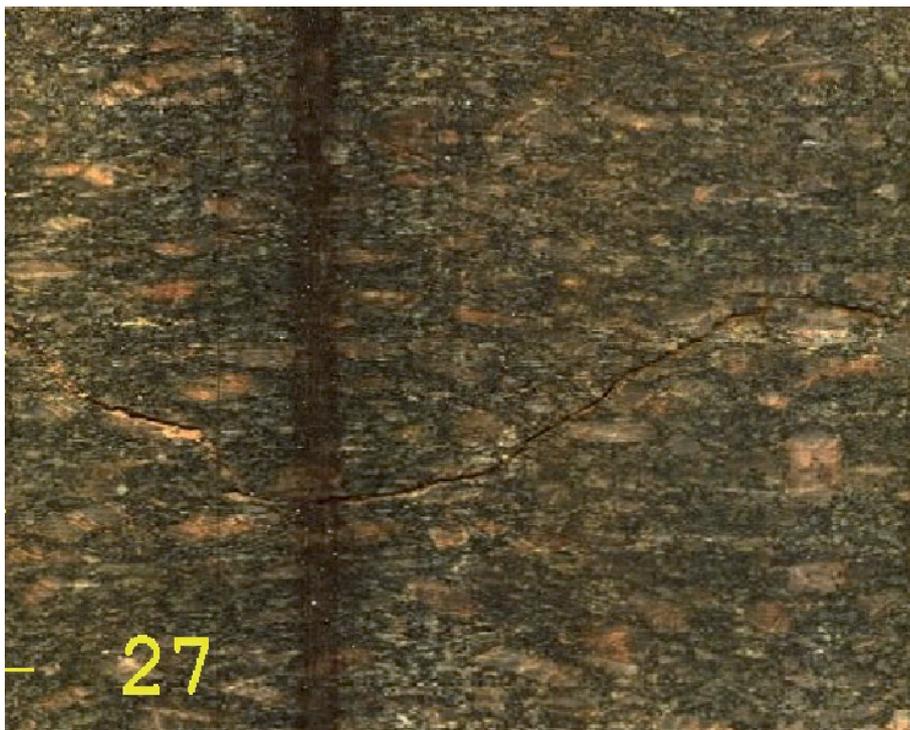


Figura 9 - Exemplo de fratura evidentemente rugosa e/ou irregular. Fonte: Metrô-SP

No caso de imagens de televisamento os diâmetros dos furos filmados com maior frequência são de 7,5 e 9,92 cm (NW e HW, respectivamente). Portanto, é possível definir as irregularidades ou rugosidades deste plano.

Segundo ISRM (*op.cit.*) a medição de irregularidades em apenas 2% do comprimento total de determinado plano é suficiente para estimar sua rugosidade média. Considerando estes 2% como sendo aquele obtido nas imagens de televisamento, poderia se extrapolar a rugosidade para planos de aproximadamente 3,75 e 4,96 metros (para diâmetros NW e HW, respectivamente).

Um dos métodos de se avaliar a rugosidade em um plano, conforme sugerido por ISRM (*op.cit.*) é a comparação do perfil de rugosidade usando uma linha reta como referência (Figura 10). No caso do televisamento considera-se como referência

a linha traçada automaticamente quando clicados os três pontos que definem o plano da discontinuidade no espaço (Ex.: Figuras 6 e 11).

Na prática, ao serem marcados os traços de discontinuidades no testemunho virtual, quanto mais esta linha fica inserida no traço da discontinuidade na imagem, menos rugosa esta seria e vice-versa.

Outra forma para se quantificar a rugosidade em imagens de televisamento, seria identificar o seu perfil geométrico, enquadrando-o entre as opções apresentadas na figura 13, adaptada dos perfis de rugosidade de Barton *et al.*(1974), apresentado na figura 12. Nos casos de testemunhos, tanto virtuais como os reais, só é possível observar a rugosidade em uma escala de detalhe, diferente do que ocorre na descrição deste mesmo parâmetro em paredes rochosas (denominada também

ondulação). A figura 12 foi modificada separando os perfis de menor detalhe, inicialmente divididos em recortada, ondulada e plana, juntando com os de maior detalhe, sendo possível a caracterização das descontinuidades apenas em rugosa, lisa ou

polida. O termo polida só deverá ser utilizado em casos aonde haja uma evidência clara de deslocamento em cisalhamento, segundo o definido em ISRM (*op.cit.*).

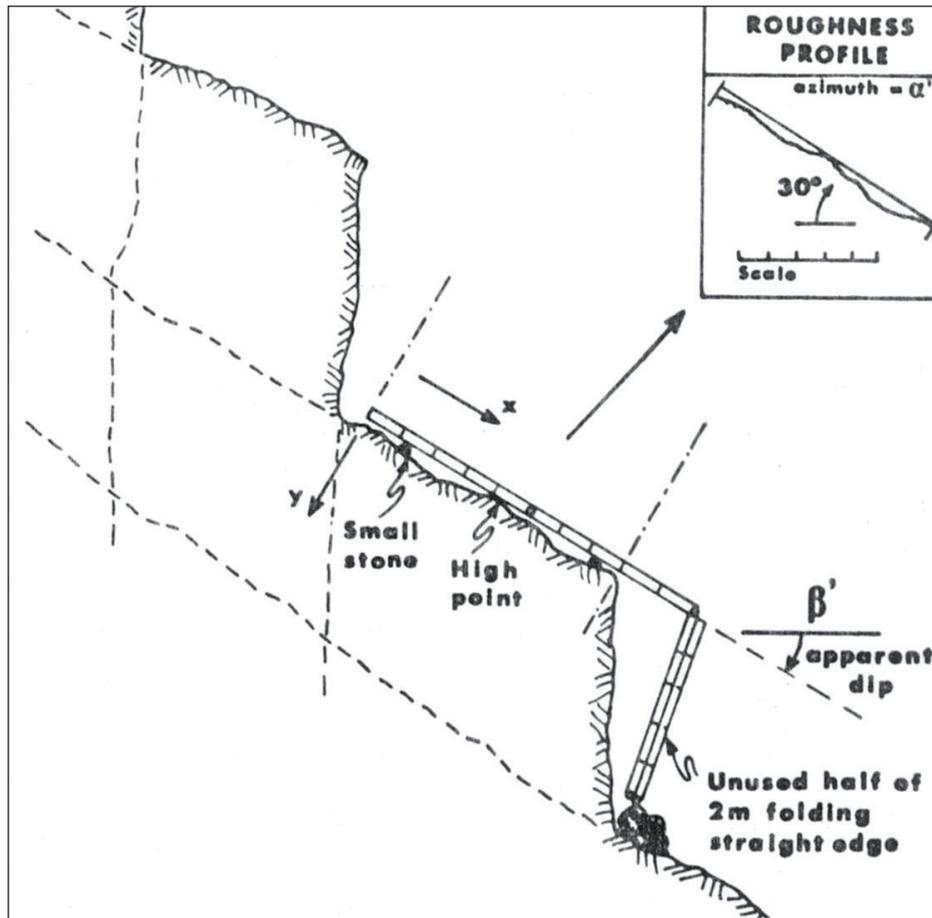


Figura 10 – Proposta de ISRM (1978) para identificação de ondulações e rugosidades em planos de descontinuidades.

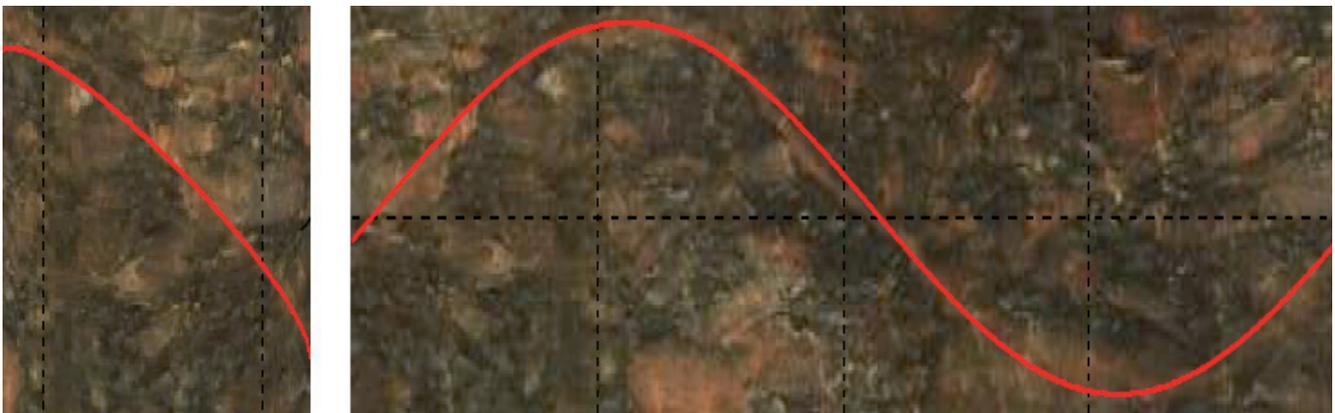


Figura 11 – Exemplo de plano de fratura lisa. Notar que é quase imperceptível a visualização da fratura devido ao “encaixe” quase perfeito com a linha de referência em vermelho. Fonte: Metrô-SP.

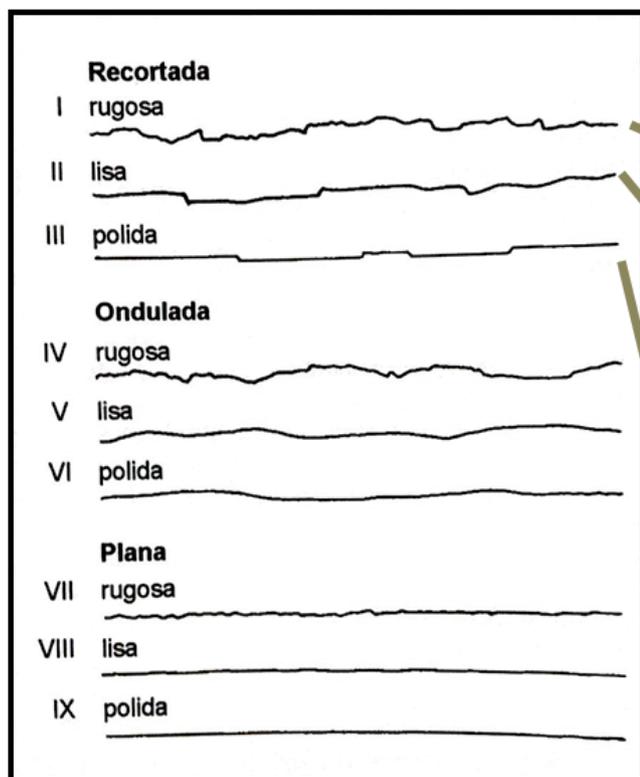


Figura 12 - Perfis de rugosidade de Barton *et al.* (1974).

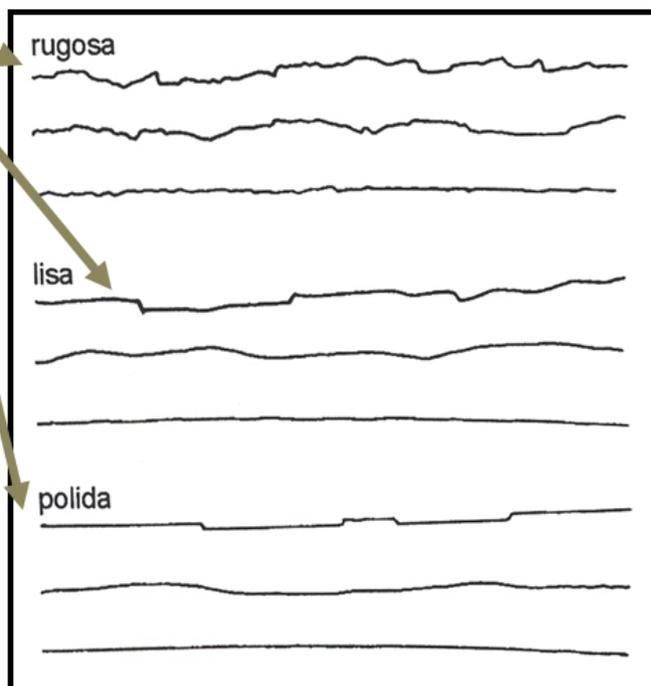


Figura 13 - Adaptação dos perfis de rugosidade de Barton para aplicação em imagens de televisamento.

## Abertura

A distância entre as paredes de uma descontinuidade, medida no sentido ortogonal, corresponde à sua abertura. Quando as descontinuidades se encontram fechadas, com paredes sãs, as propriedades do maciço podem ser equiparadas às do material que o constitui. Se ocorrerem descontinuidades abertas, a sua influência será muito importante (Serra Junior & Ojima, 1998).

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 (*op.cit.*).

Segundo Baillot *et al.* (2004), uma das principais vantagens do televisamento é fornecer dados que estão mais próximos da realidade do maciço rochoso. Isto se deve ao fato de que em testemunhos de sondagem, geralmente, a recuperação é menor quanto pior for a qualidade do maciço amostrado. Sendo assim, justamente as "piores" partes do maciço são aquelas com menor

recuperação. Ao utilizar o método de televisamento, esses níveis, de menor qualidade de rocha não recuperada, pela presença de solo e fraturas abertas, podem ser observados e devidamente caracterizados.

Portanto, este parâmetro deverá ser incluído nas observações dos testemunhos virtuais e sempre que uma fratura não for selada, deverá ser indicada a sua abertura, considerando a distância ortogonal entre as duas paredes que contemplam o topo e a base desta abertura. 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 (*op.cit.*), conforme apresentado na tabela 3. Esta mesma tabela foi inserida no perfil individual de televisamento, apresentado na figura 1.

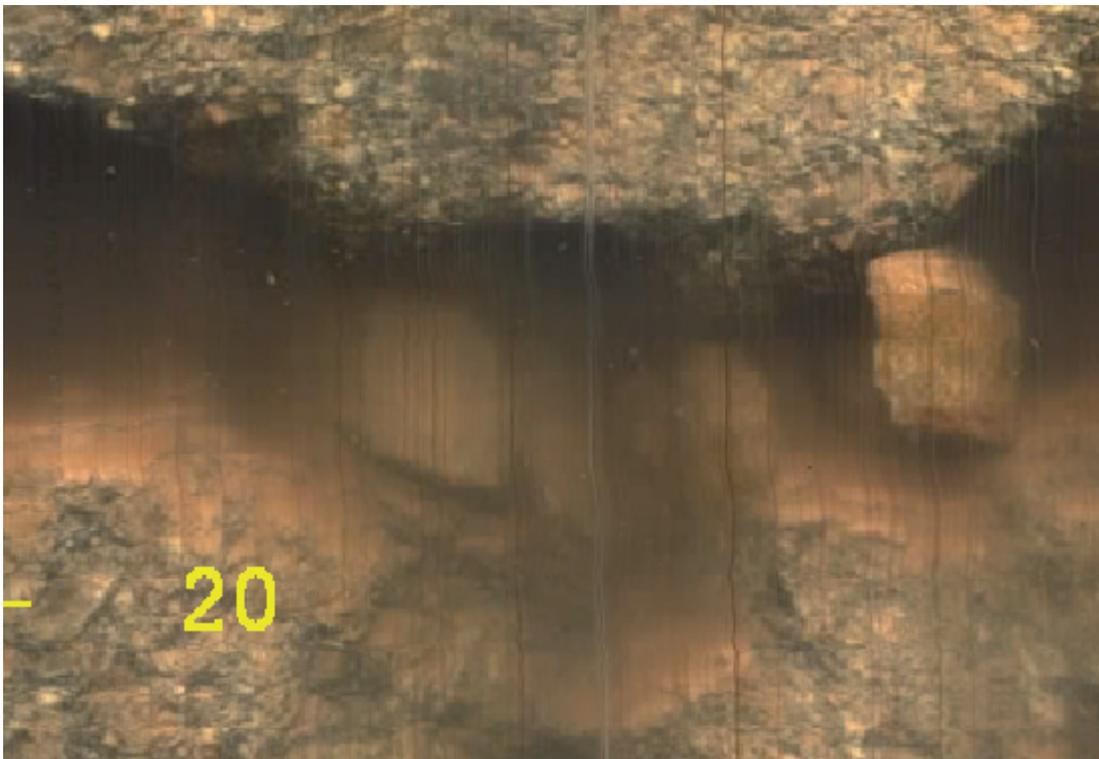
Exemplos de abertura de descontinuidades são apresentados nas figuras 14, 15 e 16. Algumas vezes uma fratura com preenchimento muito alterado pode ser lavada durante a perfuração e esta aparecerá como uma abertura, o que pode ser ocasionalmente observável, quando se resta alguma parte deste preenchimento, conforme pode

ser visto nas laterais da figura 16. Na figura 17, retirada de Baillot *et al.* (*op.cit.*), compara-se a imagem desenrolada mostrando uma fratura aberta,

com fotos do mesmo trecho de um testemunho de sondagem, onde esta mesma fratura aberta já não pode mais ser observada.

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

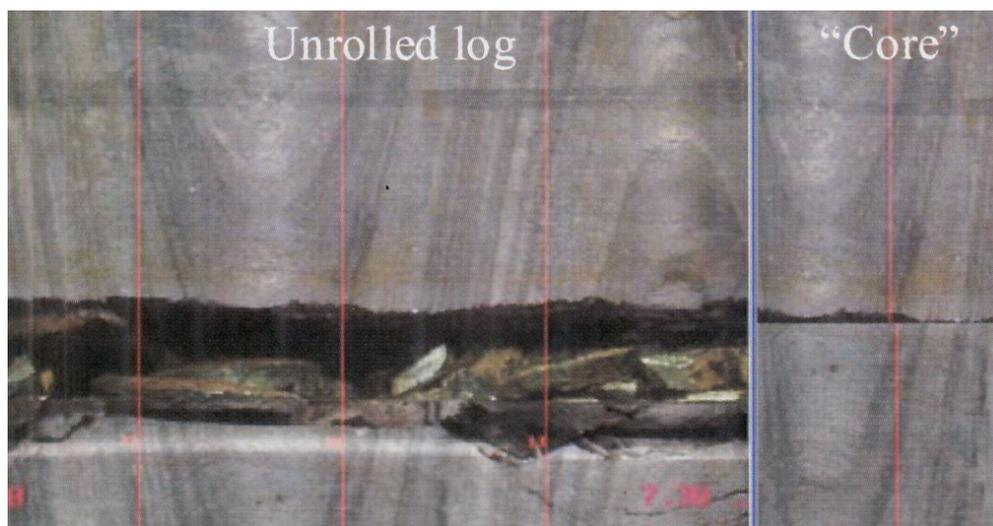
ABERTURA	DESCRIÇÃO	
<0.1 mm	Muito apertado	Feições fechadas
0.1 – 0.25 mm	Apertado	
0.25 – 0.5 mm	Parcialmente aberto	
0.5 – 2.5 mm	Aberto	Feições semi-abertas
2.5 - 10 mm	Moderadamente largo	
>10 mm	Largo	
1 – 10 cm	Muito largo	Feições abertas
10 – 100 cm	Extremamente largo	
> 1 m	Cavidade	



**Figura 14** – Exemplo de descontinuidade aberta com preenchimento de rocha triturada. Fonte: Metrô-SP.



**Figuras 15 e 16** - Planos de fraturas abertas, na primeira figura associado a um sistema de fraturas paralelas e na segunda figura observar trecho de rocha muito alterada e comiúda, provavelmente relacionada a um plano de falha, que foi lavado na perfuração de sondagem. Fonte: Metrô-SP.



**Figura 17** - Comparação entre fratura aberta no testemunho virtual e no testemunho de sondagem. Fonte: Baillot *et al.*, 2004.

*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 descontinuidades,

levando-se em consideração o brilho dos minerais ao longo das feições. A figura 5 apresenta-se como um bom exemplo para ilustrar a evidência da alteração das paredes de fraturas.

As condições de alteração das paredes e a presença de preenchimento podem ser caracterizadas utilizando-se a tabela modificada do IPT (Tabela 4), que também faz parte do perfil da sondagem virtual (Figura 1).

No caso do preenchimento é factível uma descrição, mesmo que somente visual, deste material. Aconselha-se a diferenciação, sempre que possível, de materiais que selam as fraturas, como preenchimento quartzo-feldspático, de epidoto e carbonáticos, daqueles que são materiais soltos, como areia, argila e fragmentos de rocha. Exemplos de presença de preenchimento em discontinuidades estão ilustrados nas figuras 5, 14, 16, 17 e 18.

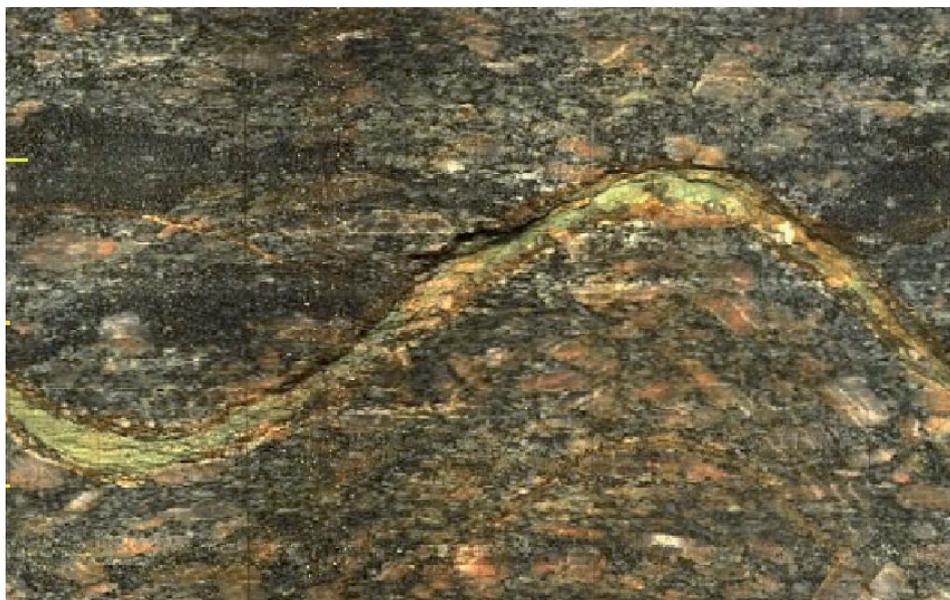
Caso haja preenchimento no interior de uma fratura aberta, este também deverá ser descrito, se possível, detalhadamente. Notar que, muitas

vezes, o preenchimento original pode ter sido removido pela lavagem durante a perfuração e o que observamos na imagem é uma abertura que se, inicialmente estava preenchida, restam, algumas vezes, apenas resquício do preenchimento então existente, como observado na figura 16 e já citado anteriormente.

Também é observável 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 (Ex.: Figura 19).

**Tabela 4** - Caracterização do preenchimento, modificado de IPT, 1984 (*apud* Serra Junior & Ojima, 1998).

SIGLAS	PREENCHIMENTO DAS DESCONTINUIDADES
D1	Contato rocha-rocha, paredes sãs, sem preenchimento, brilho intenso
D2	Contato rocha-rocha, preenchimento de material pétreo rijo (calcita, quartzo, <u>epidoto</u> )
D3	Paredes com alteração incipiente, brilho mais fraco, sinais de percolação d'água, oxidadas, sem preenchimento
D4	Paredes alteradas, brilho fraco, preenchimento ausente, fratura aberta
D5	Paredes alteradas, sem brilho, com preenchimento de fragmentos de rocha
D6	Paredes alteradas, sem brilho, com preenchimento de argila e/ou areia, detalhar sempre que possível
D7	Paredes alteradas, sem brilho, com preenchimento não identificado, detalhar



**Figura 18** - Preenchimento argiloso, coloração esverdeada, preenchimento típico de fraturas no gnaíse do embasamento da Bacia de São Paulo. Fonte: Metrô-SP.



**Figura 19** – Oxidação evidente e surgência de água no interior do furo.  
Fonte: Metrô-SP.

### Grau de fraturamento e espaçamento

O grau de fraturamento de um maciço rochoso (IPT, 1984, *apud* Serra Junior & Ojima, 1998) visa caracterizar a distribuição de descontinuidades

em testemunhos de sondagem. O fraturamento é expresso em graus de intensidade e explicita a quantidade de fraturas por metro, definido em trechos com fraturamento homogêneo (isofraturamento), conforme apresentado na tabela 5.

**Tabela 5** – Grau de Fraturamento (IPT, 1984, *apud* Serra Junior & 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

O mesmo parâmetro pode ser utilizado nos testemunhos virtuais, levando-se em consideração que um testemunho de sondagem poderá apresentar maior incidência de fraturamento devido a quebras mecânicas, dependendo das condições na perfuração e posterior descrição, podendo haver modificações significativas que dependem da experiência da equipe técnica envolvida no procedimento.

O grau de fraturamento deverá ser indicado no perfil de televisamento, utilizando os parâmetros da tabela 5, conforme pode ser observado na figura 1. Deverão ser considerados os trechos em que o espaçamento das descontinuidades é homogêneo.

Outro parâmetro essencial a ser descrito é o espaçamento, que corresponde à distância entre

descontinuidades adjacentes de uma mesma família, fator que controlará o tamanho dos blocos em um maciço rochoso.

Esta distância entre descontinuidades de um mesmo *set* deverá ser medida ortogonalmente a estas. Como nem sempre isso é possível, deverá ser realizada uma correção com relação à distância aparente e a linha medida, que no caso do televisamento, seria a própria direção do furo de sondagem. Esta correção é apresentada detalhadamente nos métodos sugeridos da ISRM (*op.cit.*) e apresenta a seguinte relação (equação 1):

$$S = dm \cdot \text{sen}\alpha \quad (1)$$

onde:

S - espaçamento real

$d_m$  - distância medida (distância aparente)

$\alpha$  - ângulo entre o plano e a linha medida

Na figura 20 ilustramos esta relação para um furo vertical televisado e a relação para um *set* de família 1. Notar que  $\alpha=90^\circ$  - mergulho da família 1.

Há sugestões do uso de equipamentos televisivos nos métodos da ISRM na observação e detalhamento do parâmetro espaçamento. Neste método sugere-se a confecção de histogramas com distribuições dos espaçamentos observados para cada *set* (Ex.: Figura 21), contribuindo assim para um levantamento sistemático e tratamento estatístico da distribuição das discontinuidades para cada família.

Como citado anteriormente no início do item 2.2, o espaçamento poderá ser visualizado ao

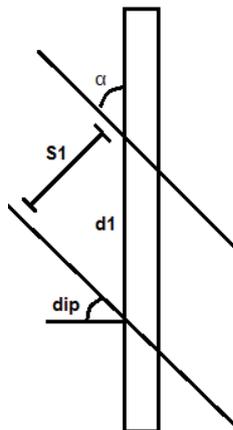


Figura 20 – Ilustração de correção de espaçamento.

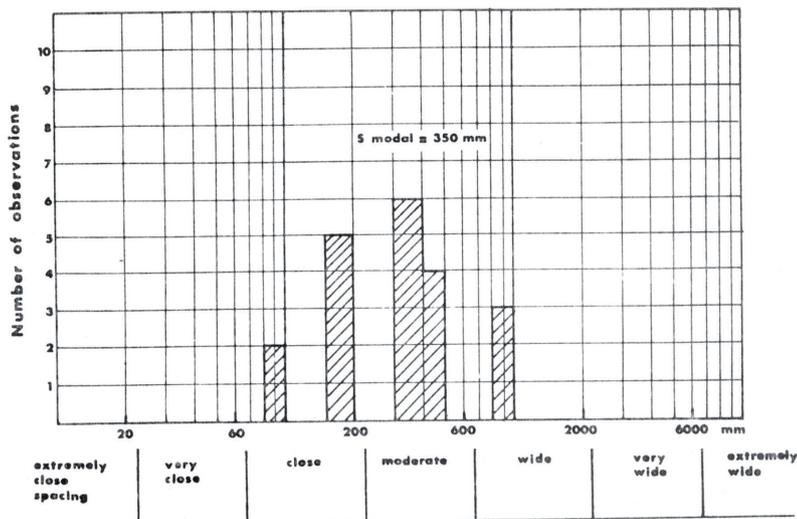


Figura 21 – Histograma de distribuição de espaçamentos para um mesmo *set*, retirado de ISRM (1978).

dividirem-se as discontinuidades por famílias, conforme apresentado na tabela 2. É importante citar que, muitas vezes, ocorrem fraturas verticais a subverticais com relação à inclinação do furo televisado, onde nem sempre é possível a demarcação destas na fase de interpretação de imagens, devido o software não permitir 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. A figura 22 ilustra um exemplo da ocorrência de um *set* de fraturas verticais.

Recomenda-se também a classificação de cada *set* utilizando tabela sugerida no método da ISRM (*op.cit.*) e adaptada para o televisamento (Tabela 6).



Figura 22 – Exemplo de ocorrência de *set* de fraturas verticais, com relação à direção do furo televisado. Fonte: Metrô de SP.

**Tabela 6** – 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

#### 4 RQD TEÓRICO

Propõe-se aqui também a aplicação do parâmetro RQD – *Rock Quality Designation* já tradicionalmente obtido em furos de sondagem. Este parâmetro, RQD, amplamente utilizado na caracterização e classificação de maciços rochosos para obras de engenharia, foi definido por Deere (1964) com o intuito de quantificar a qualidade de um maciço rochoso, considerando o percentual de segmentos intactos de rocha competente com comprimento superior a 10 centímetros, em relação ao comprimento total da perfuração (manobra) ou trecho considerado.

Deere *et al.* (1967, *apud* Priest & Hudson, 1976) sugeriu que uma *scanline*, linha de medida, pode ser diretamente análoga a um furo de sondagem, desde que o parâmetro RQD possa ser obtido em ambos os casos. A partir daí alguns autores buscaram encontrar uma correlação entre o RQD medido em furos de sondagem e o RQD, dito teórico, obtido em linhas de medidas.

Priest & Hudson (1976) obtiveram um método para a determinação do RQD teórico (RQD\*) a partir do valor médio do espaçamento ( $\lambda$ -número de descontinuidades por metro), utilizando uma função exponencial negativa, da seguinte forma (equação 2):

$$RQD^* = 100e^{-0.1\lambda}(0.1\lambda + 1) \quad (2)$$

Segundo os autores, utilizando-se dados experimentais, o RQD\* foi comparado com o RQD medido, sendo obtido um erro máximo de 5% do valor e sugerem que este método deveria ser

aplicado em uma variedade de tipos rochosos para determinar sua aplicabilidade.

La Pointe (1980) utiliza a geostatística no estudo de distribuição de descontinuidades, afirmando que cada família de juntas pode ser representada por uma função semi-variograma espacial juntamente com componente aleatório local, correspondente ao espaçamento médio das juntas mais persistentes. Entretanto, em testemunhos de sondagens, no caso de maciços rochosos não homogêneos, o uso de valores médios assim como distribuição de frequências, pode não ser realista, super, ou, subestimando valores de algumas áreas, sendo necessário obter a determinação de variabilidade espacial em mais linhas de medidas.

Sen & Eissa (1992) através de modelos conceituais e com base em medidas obtidas em *scanlines*, relacionam os parâmetros RQD e o índice volumétrico de juntas ( $J_v$ ) com a média e desvio padrão, a partir de uma distribuição log-normal, ajustada pela frequência multiplicada pelos valores de espaçamento de descontinuidades, através da seguinte relação, que determina a esperança do RQD (equação 3):

$$E(RQD) = 100 \left\{ 1 - F \left[ \frac{\ln(0.1\lambda)}{\sigma_{\ln x}} - \sigma_{\ln x} + 1 \right] \right\} \quad (3)$$

onde:

$\lambda$  - número médio de descontinuidades

$\sigma_{\ln x}$  - desvio padrão dos valores logaritizados de espaçamento

Nesta equação o valor resultante dentro dos colchetes denota a área sobre a função de

distribuição de probabilidade normal padronizada de  $-\infty$  até o valor entre os colchetes.

Os autores, neste trabalho, ressaltam a importância do desvio padrão, modificando significativamente o valor do RQD e, dessa forma, caracterizando melhor a distribuição do espaçamento das descontinuidades. Por exemplo, para maciços pouco fraturados um desvio padrão menor aumenta o valor médio do RQD, já em maciços muito fraturados um desvio padrão menor diminui o valor médio do RQD.

Um estudo mais detalhado sobre a aplicação desta técnica em pedreiras com distintos litotipos é apresentado em Oliveira (2000). Neste trabalho concluiu-se que uma distribuição exponencial negativa seria a que melhor representaria o comportamento da variação de espaçamentos das descontinuidades, para maciços rochosos graníticos e gnáissicos. No caso de rochas basálticas, com disjunções colunares, e em rochas areníticas, com acamamento regular, os valores de espaçamento de descontinuidades se aproximariam de uma distribuição normal.

Considera-se aqui que um testemunho virtual pode ser diretamente análogo a uma *scanline*, sendo sugerida esta aplicação de RQD teórico para testemunhos virtuais e comparação com os RQD's medidos nos testemunhos destas mesmas sondagens, buscando, assim, a determinação da aplicabilidade do método. É importante considerar apenas as descontinuidades relevantes, desconsiderando pequenas fissuras que, provavelmente, não implicariam em uma quebra do testemunho.

Neste caso, o RQD teórico deverá também ser obtido para trechos isofraturados, assim como sugerido para o RQD medido em testemunhos de sondagem que, ao invés de considerar manobras, conforme apresentado por Serra Junior & Ojima (*op.cit*), considera trechos em que o espaçamento das descontinuidades é homogêneo.

Sugere-se a adição de uma coluna dos valores de RQD teórico no perfil individual de televisamento (PIT, figura 1), indicando sempre qual foi a equação utilizada para a obtenção destes valores. Vale ressaltar a importância de uma comparação dos valores de RQD obtidos em imagens com os calculados diretamente nos testemunhos de sondagem, como efeito de validação desta proposta.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Foram feitas algumas considerações e propostas de diretrizes para a aplicação dos serviços de televisamento e interpretação de seus resultados, buscando a caracterização e classificação de maciços rochosos a partir desta técnica, em ampla difusão no mercado, bem como a uniformização de seus escopos. Para tanto há a necessidade de um período experimental, testando a aplicabilidade de tais sugestões, tendo como base a realização de estudos de casos, preferencialmente em contextos geológicos distintos.

Sugere-se a comparação entre os parâmetros de caracterização e classificação obtidos em testemunhos virtuais com os obtidos diretamente em testemunhos de sondagem, para que a metodologia aqui proposta possa ser verificada, testando principalmente a correlação entre RQD medido e RQD teórico obtido nestes testemunhos virtuais.

Outras correlações também poderão ser realizadas, aumentando as possibilidades de aplicação desta ferramenta, como a verificação do parâmetro persistência para planos de descontinuidades, utilizando a análise estrutural tridimensional destes planos em furos adjacentes, por exemplo.

Adicionalmente, deve-se considerar que as classificações geomecânicas mais usuais, como RMR e Q, foram estabelecidas por amostragem com testemunhos de sondagem e conduzem a estimativa de suporte baseada em correlações estatísticas da classe com o suporte. A simples utilização de melhores parâmetros classificatórios para um mesmo maciço pode levar à subestimação do suporte necessário. Portanto recomenda-se o uso criterioso de novos parâmetros com antigas classificações.

Vale lembrar que qualquer investigação geológico-geotécnica de um maciço rochoso sempre deverá levar em consideração as necessidades de cada projeto, assim como sua fase de estudo, fornecendo os subsídios para cada caso em particular. Todas as descrições realizadas em testemunhos virtuais podem, sempre que possível, ser enriquecidas por meio da comparação destes com seus testemunhos de sondagem.

Conforme citado em ISRM (*op.cit.*), na medida em que as descrições de maciços rochosos e suas descontinuidades se tornem mais completas

e unificadas, será viável projetar estruturas de engenharia em rocha reduzindo os gastos e aumentando a confiabilidade da interpretação e extrapolação dos resultados.

### Agradecimentos

Os autores agradecem à Companhia do Metropolitan de São Paulo (METRÔ) por apoiar e autorizar a publicação deste estudo. Também são prestados agradecimentos às empresas Alphageos Tecnologia Aplicada S.A., em nome do Tecg. Marcelo dos Santos e Progeo Engenharia Ltda, em nome do Geól. Daniel França, assim como o Geól. Apolo Oliva Neto, da empresa Drill Center, representante da empresa Robertson Geollogging no Brasil. Agradecimento especial à técnica Barbara G. A. P. da Cunha pela ajuda com a montagem do perfil individual de televisamento.

### REFERÊNCIAS

- BAILLOT, R.T., COLAS, R., BARTON, N., ABRAHÃO, R. & RIBEIRO JÚNIOR, A., 2004. Comparing 360° televising of drill hole walls with core logging. *Proc. International Site Investigation Conf. Portugal*.
- BARTON, N., LIEN, R. & LUNDE, J., 1974. Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. *Rock mechanical*, v. 6, n. 4, p. 189-236.
- DEERE, D.U., 1964. Technical description of rock cores for engineering purposes. *Rock Mech. Eng. Geol.*, 1, p. 17-22.
- INTERNATIONAL SOCIETY FOR ROCK MECHANICS - ISRM, 1978. Suggested methods for the quantitative description of rock masses. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, vol. 15, n. 6, p. 319-368.
- OLIVEIRA, D.G.G., 2000. Estudo geológico-geotécnico de maciços rochosos: levantamento sistemático e caracterização da distribuição de descontinuidades em taludes. *Monografia de trabalho de formatura pelo Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo -IGUSP, São Paulo*, 49 p.
- PRIEST, S.D., 1993. Discontinuity analysis for rock engineering, *Editora Chapman & Hall, Londres*. 473p.
- PRIEST, S.D. & HUDSON, J.A., 1976. Discontinuity spacings in rock. *International Journal Of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 13, p. 135-148.
- LA POINTE, P.R.A., 1988. Method to characterize fracture density and connectivity through fractal geometry. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, vol. 25, p. 421-429.
- SEN, Z. & EISSA, E.A., 1992. Rock quality charts for log-normally distributed block sizes. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, vol. 29, p. 1-12.
- SERRA JUNIOR, E. & OJIMA, L. M., 1998. Caracterização e classificação de maciços rochosos. In: OLIVEIRA, A.M.S. & BRITO, S.N.A.. *Geologia de Engenharia*, cap. 13, p. 211-226.