

GUILHERME DE REZENDE TAMMERIK

ESCARIFICABILIDADE DE ROCHAS BRANDAS

Dissertação apresentada à
Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo
para obtenção do título de
Mestre em Engenharia

São Paulo
1994

GUILHERME DE REZENDE TAMMERIK

ESCARIFICABILIDADE DE ROCHAS BRANDAS

Dissertação apresentada à
Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo
para obtenção do título de
Mestre em Engenharia

Área de Concentração:
Engenharia Mineral

Orientador:
Eduardo Camilher Damasceno

São Paulo
1994

À minha esposa, Gisele, pelo carinho e estímulo
Aos meus pais, Guilherme e Ignez.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Lindolfo Soares, antes de tudo, amigo e pelo apoio e orientação na elaboração deste trabalho.

À Figueiredo Ferraz-Consultoria e Engenharia de Projeto Ltda pelo apoio técnico e logístico na elaboração desta dissertação.

Aos professores Lineu Azuaga e Tarcísio Celestino e aos colegas Paulo Cella e Evandro Gama, pelas discussões e incentivos.

SUMÁRIO

Lista de figuras

Lista de tabelas

Resumo

"Abstract"

O TEMA PROPOSTO

1 INTRODUÇÃO	1
2 CONSIDERAÇÕES SOBRE ESCAVAÇÃO DE MACIÇOS	6
3 CONDICIONANTES DA ESCARIFICAÇÃO DE MACIÇOS	18
3.1 Litologia	18
3.2 Descontinuidades	26
4 CLASSIFICAÇÃO DOS MACIÇOS QUANTO À ESCARIFICAÇÃO	32
4.1 Classificação baseada em velocidade de ondas sísmicas	33
4.2 Classificações geomecânicas de maciços	36
4.2.1 Classificação de Franklin	39
4.2.2 Classificação de Weaver	40
4.2.3 Classificação de Kirsten	43
4.2.4 Classificação de Smith	56
4.2.5 Classificação de Singh, Denby & Egreti	57
4.3 Avaliação das classificações de maciços	63

5 CLASSIFICAÇÃO DAS ROCHAS BRANDAS QUANTO À ESCARIFICAÇÃO	70
5.1 Distribuição e ocorrência de maciços brandos no Brasil	71
5.2 Critérios de classificação	73
5.3 Caracterização de maciços brandos	75
5.3.1 Investigações de campo	77
5.3.2 Investigações de laboratório	80
5.4 Parâmetros a serem utilizados	83
6 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	91
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	95
BIBLIOGRAFIA RECOMENDADA	103

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.1 - Trator de esteiras com escarificador acoplado
- Figura 3.1 - Mecanismo de escarificação: penetração do dente do escarificador e escarificação do maciço
- Figura 3.2 - Análise dos esforços causados nos maciços a partir da escarificação
- Figura 4.1 - Exemplo de tabela de velocidades de ondas sísmicas para determinação da escarificabilidade de maciços
- Figura 4.2 - Sondagem geofísica para determinação da velocidade de propagação de ondas sísmicas
- Figura 4.3 - Resultados da avaliação da escarificabilidade de maciços segundo o RMR(Bieniawski, 1974) e o sistema Q (Barton et al, 1974).
- Figura 4.4 - Representação vetorial das forças de desalojamento de blocos de rocha durante a escarificação
- Figura 4.5 - Gráfico de eficiência de escarificação comparada com as classificações de maciços
- Figura 4.6 - Correlação entre o "rippability rating (RR)", a velocidade de ondas sísmicas e o trator indicado para escarificar o maciço
- Figura 4.7 - Intervalos de valores de velocidades de ondas sísmicas para materiais de transição
- Figura 5.1 - Distribuição das bacias sedimentares brasileiras
- Figura 5.2 - Intervalos de resistência à compressão simples para definição de rochas brandas

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Descrição dos materiais para identificação da resistência mecânica

Tabela 3.2 - Classificação da rocha de acordo com o índice de abrasividade cherchar

Tabela 3.3 - Descrição do grau de alteração de maciços rochosos

Tabela 3.4 - Descrição do grau de alteração do material rochoso

Tabela 4.1 - Principais sistemas de classificação de maciços atualmente em uso

Tabela 4.2 - Classificação de rocha quanto à escarificabilidade

Tabela 4.3 - Definição do tamanho das partículas e materiais-tipo

Tabela 4.4 - Resistência do maciço constituído por solos granulares baseado no ensaio SPT (Ms)

Tabela 4.5 - Resistência do maciço constituído por solos granulares com base no ensaio de palheta (Ms)

Tabela 4.6 - Resistência do maciço constituído por rocha (Ms)

Tabela 4.7 - Resistência do maciço constituído por detritos (Ms)

Tabela 4.8 - Índice de número de descontinuidades por metro cúbico para determinação do RQD (Jc)

Tabela 4.9 - Índice do número de famílias de descontinuidades (Jn)

Tabela 4.10 - Índice da direção das estruturas do maciço em relação à direção do escarificador (Js)

Tabela 4.11 - Índice de rugosidade das descontinuidades (Jr)

Tabela 4.12 - Índice de alteração das descontinuidades (Ja)

Tabela 4.13 - Classificação do maciço quanto á escavabilidade para levantamento de campo

Tabela 4.14 - Classificação do maciço quanto á escavabilidade para bases contratuais

Tabela 4.15 - Comparação entre o método de escavação recomendado e o método utilizado para as obras da adutora Nooitgedacht-Vereeniging (Southern Transvaal, África do Sul)

Tabela 4.16 - Classificação quanto à escarificabilidade

Tabela 4.17 - Determinação da escarificabilidade de maciços

Tabela 4.18 - Índices de campo e de laboratório do arenito castanho com vistas à escarificabilidade

Tabela 4.19 - Índices de campo e de laboratório do arenito cinza com vistas à escarificabilidade

Tabela 4.20 - Parâmetros dos maciços rochosos empregados na avaliação da escarificabilidade, segundo os diversos autores estudados

Tabela 5.1 - Valores dos níveis de coerência e de resistência à compressão simples

Tabela 5.2 - Parâmetros a serem empregados na avaliação da escarificabilidade de rochas brandas

RESUMO

A escarificação é um processo de escavação que utiliza um "ripper" ou escarificador acoplado a um trator de esteiras para remover materiais de resistência intermediária entre solos e rochas duras em serviços de escavação em obras civis e de mineração.

Normalmente é realizada em uma gama muito grande de maciços, desde aqueles constituídos por solos endurecidos, até rochas brandas. Esses materiais são classificados como de 2ª categoria de escavação em projetos de terraplenagem.

A determinação da escavação desses materiais depende do tipo e potência dos equipamentos utilizados e das características geológico-geotécnicas dos maciços rochosos envolvidos. Os equipamentos têm passado por uma evolução muito grande que ampliou a capacidade de escarificação, mesmo envolvendo rochas mais resistentes. A escavação em maciços muito resistentes envolve, por vezes, desgaste excessivo dos equipamentos e baixo rendimento, deixando de ser interessante do ponto de vista econômico.

É difícil avaliar-se o tipo de equipamento mais adequado a ser utilizado e os custos da escarificação, condição esta normalmente ligada às peculiaridades das obras. A avaliação vai depender do equipamento disponível (ou da verba para aquisição), do executor da obra, além das características do projeto.

O projeto de escavação leva em conta as características da rocha (gênese, mineralogia, granulometria, descontinuidades, resistência, abrasividade, etc) e do maciço rochoso (falhas, fraturas, estruturas, heterogeneidade, umidade, grau de alteração, etc), que determina o método de escavação mais apropriado (convencional, com escarificador ou a fogo) e os tipos de equipamentos a serem utilizados. Essa definição depende do levantamento de todas as características dos materiais envolvidos e da aplicação de critérios que indiquem a quantidade de informações necessárias para classificar o maciço em uma determinada categoria de escavação.

Entre os maciços rochosos, as rochas brandas são as que apresentam características de resistência que situam-nas como o universo mais favorável ao estudo dos critérios para indicação da escarificabilidade dos maciços rochosos.

As rochas brandas apresentam uma grande variedade de tipos litológicos associados ao termo: rochas vulcânicas porosas, sedimentares friáveis e metamórficas de baixo grau, além de produtos de alteração e desagregação de rochas duras.

Esses maciços possuem ampla distribuição geográfica no território brasileiro, associados às bacias sedimentares, faixas de metamorfismo de baixo grau e aos espessos mantos de intemperismo.

Existem diversos métodos de classificação que avaliam as características dos maciços que influenciam a escarificação. Os mais antigos, envolvem a

RESUMO

A escarificação é um processo de escavação que utiliza um escarificador ("ripper") acoplado a um trator de esteiras para remover materiais de resistência intermediária entre solos e rochas duras em serviços de escavação em obras civis e de mineração.

Normalmente é realizada em uma gama muito grande de maciços, desde aqueles constituídos por solos endurecidos, até rochas brandas. Esses materiais podem ser classificados como de 2ª categoria de escavação.

A determinação da escavação desses materiais depende do tipo e potência dos equipamentos utilizados e das características geológico-geotécnicas dos maciços envolvidos. Os equipamentos têm passado por uma evolução muito grande que ampliou a capacidade de escarificação, mesmo envolvendo rochas de resistência mecânica mais elevada.

É difícil avaliar-se o tipo de equipamento mais adequado a ser utilizado e os custos da escarificação, condição esta normalmente ligada às peculiaridades de cada obra.

O projeto de escavação leva em conta as características da rocha (gênese, mineralogia, granulometria, descontinuidades, resistência, abrasividade, etc) e do maciço rochoso (falhas, fraturas, estruturas, heterogeneidade, umidade, grau de alteração, etc), que vão determinar o método de escavação mais apropriado (convencional, com escarificador ou a fogo) e os tipos de equipamentos a serem utilizados. Essa definição depende do levantamento de todas as características dos materiais envolvidos. ...]

Entre os maciços rochosos, aqueles constituídos por rochas brandas são os que apresentam características de resistência mecânica que situam-nos como o universo mais favorável ao estudo dos critérios para indicação da escarificabilidade.

Esses maciços possuem ampla distribuição geográfica no território brasileiro, associados às bacias sedimentares, fai-

xas de metamorfismo de baixo grau e aos espessos mantos de intemperismo. Existem diversos métodos de classificação que avaliam as características dos maciços que influenciam a escarificação. Os mais antigos, envolvem a utilização de tabelas de velocidades de ondas sísmicas relacionadas ao tipo e potência do trator a ser utilizado. Entretanto, a velocidade de ondas sísmicas indica características médias do maciço, não fazendo distinção de regiões peculiares. Essas características são melhor determinadas através de sistemas de classificação geomecânica que permitem melhor caracterização e distinção das diferentes propriedades do maciço em estudo. Foram pesquisados cinco sistemas de classificação de maciços rochosos quanto à escarificação: Franklin (1970), Weaver (1975), Kirsten (1982), Smith (1986) e Singh, Denby, Egretli & Pathan (1986). Observa-se que é importante a aplicação de mais de um critério de classificação possibilitando a comparação dos resultados, eliminando-se dúvidas quanto ao comportamento do maciço. Sugere-se a utilização dos sistemas propostos por Kirsten (op.cit), para rochas duras, e os de Smith (op.cit) e Singh et al (op.cit) para rochas de baixa resitência. Eventualmente, podem ser feitas adaptações para as condições peculiares dos maciços em análise.

utilização de tabelas de velocidades de ondas sísmicas relacionadas ao tipo e potência do trator a ser utilizado. Entretanto, a velocidade de ondas sísmicas indica características médias do maciço, não fazendo distinção de regiões peculiares. Essas características são melhor determinadas através de sistemas de classificação geomecânica que permitem melhor caracterização e distinção das diferentes propriedades do maciço em estudo.

Foram pesquisados cinco sistemas de classificação de maciços rochosos quanto à escarificação: Franklin (1970), Weaver (1975), Kirsten (1982), Smith (1986) e Singh et al (1986).

Observa-se que é importante a aplicação de mais de um critério de classificação que permite a comparação dos resultados, eliminando-se dúvidas quanto ao comportamento do maciço.

Sugere-se a utilização dos sistemas propostos por Kirsten (op.cit), para rochas duras, e os de Smith (op.cit) e Singh et al (op.cit) para rochas de baixa resistência, que apresentaram bons resultados, eventualmente com adaptações para as condições peculiares dos maciços em análise.

"ABSTRACT"

Rippability is an excavation method using a ripper pulled by a tractor to excavate rocks with low resistance in mining and engineering ground preparation.

A range of different rock masses are present in these works, since hard soils until soft rocks. These materials are classified in second category of excavation in engineering works.

The evaluation of rippability involves tractor weight and horsepower and geological factors. The technological development increased the usefulness of tractor-mounted ripper and extended the capability of the ripper in rock. Ripper in hard rocks involves high costs and may be not economic.

It's difficult to assess the equipments and ripper costs because it has direct relationship with the work's peculiarities. Each work (engineering or mining excavation) will depend on the equipment disposable (or financial resources), the work's contractor and the characteristics of the design and the rock masses.

The excavation design evaluates rock parameters (rock type, mineral composition, grain size, discontinuities, strenght, abrasiveness, etc) and rock masses parameters (faults, discontinuities, heterogeneity, weathering, etc) that will determine the appropriated excavation method (conventional, ripper or blasting) and the equipments. This assessment will depend on geotechnical parameters surveys that will indicate the essential informations to situate each rock mass in a excavation category.

Among rhe rock masses, the weaks are those who present the most favorable characteristics for rippability studies, like low uniaxial compressive strength, (situated between 0.5 to 20 MPa). The study of these rock parameters leads to the assessment of the best criteria for rippability.

There are a lot of rock masses associated with the term "weak rock": porous vulcanic, sedimentary and low grade metamorphic rocks and weathering products.

These rock masses have a wide geographic occurrence in brazilian territory associated to sedimentary basins, low grade metamorphic rocks and also on deep weathered products.

There are many classification systems that stablish rock mass parameters to indicate rippability. The older ones use seismic velocity charts associated with tractor weight and horsepower, establishing velocity ranges where rock is rippable.

However, seismic velocities suggest average behaviour of rock masses without indicating peculiar portions of the rock with different characteristics. These characteristics are better established with engineering rock mass classifications, that indicates parameters to every portion of the rock mass,

letting us know, by information transposition, the characteristics and average behaviour of the materials with important dispersions.

Five engineering rock mass classifications used to estimating rippability are compared here: Franklin (1970), Weaver (1975), Kirsten (1982), Smith (1986) and Singh et al (1986).

The better way to assess the rippability of a rock mass is to apply different rock mass classifications and check the ratings eliminating doubts related to the behaviour of rock masses.

This paper suggest the use of Kirsten's rock mass classification to hard rock and Smith's (op.cit) and Singh's et al (op.cit) to low resistance rock. These rock mass classifications show good results in evaluation of rippability, sometimes making adaptations to the rock mass conditions.

O TEMA PROPOSTO

A definição do método de escavação de um maciço para obras de engenharia não apresenta grandes dificuldades quando envolvem equipamentos convencionais de terraplenagem e/ou escavação a fogo.

Entretanto, existe uma faixa intermediária - dos materiais escarificáveis denominados de 2ª categoria de escavação - onde a classificação carece de sistemas objetivos de avaliação, estando ligada, atualmente, mais a um "sentimento" do profissional, do que a critérios geotécnicos.

A ocorrência desses materiais, reflete-se no custo da obra uma vez que a escarificação é sensivelmente mais barata que escavação a fogo.

Na literatura nacional, são escassos os trabalhos sobre o tema, geralmente apresentando avaliações de maciços através da utilização de tabelas de velocidades de ondas sísmicas e/ou de ensaios de escarificabilidade.

O trabalho mais recente sobre o tema foi apresentado por Gripp (1993) no II Congresso Ítalo-Brasileiro de Engenharia de Minas realizado em São Paulo. O autor apresenta alguns métodos de determinação da escarificação de maciços como a velocidade de ondas sísmicas e o sistema de classificação de Kirsten (1982), porém sem entrar em detalhes sobre a aplicabilidade dos métodos ou apresentar resultados comparativos.

Este trabalho apresenta alguns métodos de classificação propostos por autores estrangeiros para a determinação da escarificabilidade dos maciços, comparando-os quanto à aplicabilidade e resultados obtidos na sua utilização. Espera-se, assim, fornecer aos profissionais que atuam nessa área subsídios para classificação de materiais escarificáveis.

Nessa avaliação, são utilizadas as propriedades geológico-geotécnicas de maciços rochosos brandos, cujo intervalo de resistência à compressão simples, situam-nos, em princípio como maciços escarificáveis. São descritas as peculiaridades dos maciços brandos e os parâmetros geomecânicos a serem utilizados nos sistemas de classificação, procurando-se indicar aquele mais aplicável.

Os dados que envolvem escarificação de maciços são hoje escassos e pouco divulgados. Esses resultados poderiam auxiliar no desenvolvimento do presente estudo, tanto em termos de aplicabilidade dos sistemas classificatórios analisados, como da avaliação da escarificação em obras civis e de mineração.

1 INTRODUÇÃO

A escavação pode ser definida como a movimentação de uma parte da crosta terrestre para instalação de uma obra de engenharia. Pode ser dividida em subterrânea e superficial e, nesta última, encontra-se o conceito de escarificabilidade, que é a medida da possibilidade de fragmentação de um maciço rochoso a partir do uso de escarificador (Figura 1.1).

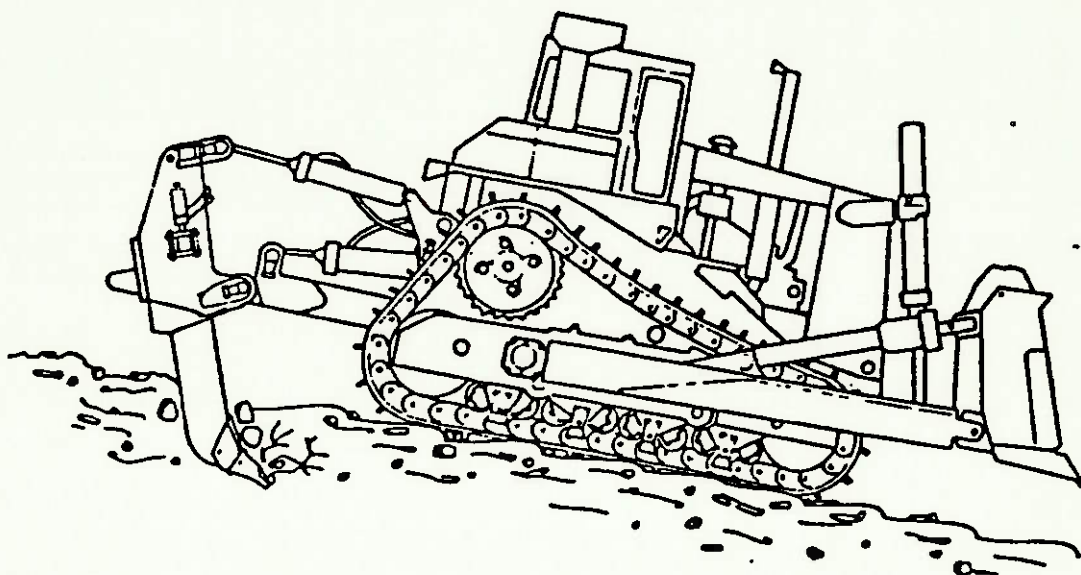


Figura 1.1 - Trator de esteiras com escarificador acoplado

A escarificação de um maciço rochoso, por sua vez, está ligada à avaliação de dois grandes grupos de critérios: a) critérios não ligados à rocha, onde se avaliam os tipos de equipamentos disponíveis na obra (tipos de escarificadores e de tratores), rendimento do trabalho e cominuição desejada e b) critérios ligados à rocha, onde são avaliadas as características geotécnicas dos maciços a serem escarificados.

Atualmente, com a evolução tecnológica dos equipamentos, maciços escavados anteriormente somente através de explosivos, devido sua elevada resistência mecânica, podem ser escarificados. Os critérios para avaliação da escarificação de um maciço passam a ser principalmente econômicos, ou seja, o equipamento mais adequado à execução de uma determinada obra e a comparação custo x benefício.

O uso de escavação mecânica em relação ao de explosivos apresenta alguns pontos positivos. Apesar de estudos e técnicas cada vez mais apuradas no uso de explosivos, a escavação mecânica é muito menos perigosa, principalmente em condições especiais como áreas urbanizadas, proximidade a reservatórios de combustível, entre outras. A nível da mecânica das rochas, cabe destacar que, enquanto os explosivos funcionam a partir da propagação de ondas, a escavação mecânica faz esforços mais localizados no maciço, implicando em uma superfície melhor acabada e em condições de perturbação em menor escala.

A escarificação ganha importância no nosso meio devido à existência de grande quantidade de maciços que podem ser considerados de baixa resistência mecânica. A faixa correspondente à transição entre rochas com alta resistência à compressão simples e os solos, envolve uma série de materiais que apresentam comportamento de maciços rochosos, condicionados pelas estruturas presentes na massa, apesar da matriz apresentar-se muito alterada (Nieble e Franciss, 1976).

Além desses produtos de alteração, o território brasileiro apresenta um número muito grande de bacias sedimentares, onde ocorrem rochas classificadas como brandas (arenitos, siltitos, folhelhos, etc). A proporção de rochas brandas cresce consideravelmente, se consideradas também as rochas metamórficas de baixo grau (xistos, filitos, ardósias, etc). Esses maciços têm possibilidade do uso de escarificadores para sua escavação.

A escarificação de um dado maciço, predispõe o conhecimento de suas características e do conhecimento do mecanismo de escarificação. As principais características do maciço que se correlacionam com as condições de escarificabilidade segundo Smith (1986) apud IPT (1990) são:

- tipo de rocha;
- esforços de compressão;
- esforços de tração;
- esforços de cisalhamento;
- grau de alteração;
- estrutura da rocha;
- fabric; e
- velocidade de ondas sísmicas.

Existe interdependência de algumas destas características e a avaliação correta da importância de cada uma delas permite diagnosticar o grau de dificuldade de escarificação (Weaver, 1975 apud IPT, 1990).

A Caterpillar, fabricante de tratores e escarificadores, utiliza tabelas de velocidade de ondas sísmicas na previsão da escarificabilidade de maciços. Essas tabelas foram obtidas a partir de estudos estatísticos para diversos tipos de rocha e desempenho de equipamentos, desenvolvidos a partir de 1958 (Smith, 1986).

O valor da velocidade de propagação de ondas sísmicas é, contudo, consequência da influência combinada de fatores ligados ao maciço como: tipo de rocha, dureza, estratificações, alteração, etc. Em geral, materiais de velocidade mais baixa, podem ser escarificados, existindo, entretanto, algumas faixas de velocidade onde a possibilidade de escarificação é indeterminada.

Em função das dificuldades de classificação dos maciços quanto à escarificabilidade, outros métodos foram desenvolvidos.

Franklin (1970) propôs a classificação de maciços para determinar a possibilidade de escarificação a partir da análise combinada da resistência a compressão simples do material e o grau de fraturamento.

Weaver (1975) elaborou um sistema de classificação baseado nas propriedades mecânicas e estruturais do maciço a partir da classificação geomecânica de Bieniawski (1974), elaborada para capacidade de suporte em túneis. Foram atribuídos pesos relativos para cada característica do maciço, a partir da análise do mecanismo de escarificação.

Smith (1986), aprimorou o método de Weaver (op. cit.), definindo o "Rippability Rating - RR" e comparando a nota do maciço com a velocidade de ondas sísmicas, sem avaliá-la como parâmetro de entrada.

Kirsten (1982) apresenta um sistema de classificação a partir da determinação de parâmetros geomecânicos, baseado no sistema de classificação proposto por Barton et al (1974) que compreende a escavação de maciços com equipamentos convencionais, escarificadores ou com uso de explosivos.

O trabalho de Singh et al (1986) apresenta uma descrição dos esforços realizados pelo equipamento no maciço, considerando a resistência à compressão simples na penetração do dente, e a resistência à tração na escarificação, com o caminhamento do trator. Esse autor avalia o maciço utilizando a resistência à tração e a abrasividade do material, não levantados por nenhum dos outros autores.

A esses sistemas de classificação dos maciços, somam-se os testes de escavação experimental realizados com intuito de determinar a escarificabilidade e a produção dos equipamentos empregados, importantes na avaliação do rendimento do método.

As rochas brandas (particularmente as rochas sedimentares brandas), nesse contexto, apresentam características geotécnicas que sugerem o uso da escarificação como o método de escavação mais adequado. A maior

dificuldade reside na determinação e emprego dos parâmetros geotécnicos que melhor traduzem o comportamento desses maciços frente aos esforços da escarificação.

A determinação da escarificabilidade de um maciço rochoso passa necessariamente pela avaliação dos parâmetros desse maciço de forma global, ou seja, sua classificação geomecânica. O presente trabalho apresenta as classificações citadas anteriormente e procura discutir os métodos mais adequados para determinação da escarificabilidade, dando ênfase à classificação dos maciços constituídos por rochas sedimentares brandas.

Os critérios não ligados à rocha não serão discutidos em profundidade neste trabalho, devido ao pequeno conhecimento do autor sobre os equipamentos disponíveis e usualmente utilizados em serviços de escarificação e por não se enquadrar nos objetivos deste trabalho.

2 CONSIDERAÇÕES SOBRE ESCAVAÇÃO DE MACIÇOS

A implantação de obras civis, o aproveitamento de recursos minerais ou a ação combinada desses trabalhos, envolve a remoção e movimentação de materiais. Esses trabalhos implicam em escavações, ocasionando uma interação dinâmica entre os equipamentos utilizados e os maciços rochosos envolvidos.

A escavação de materiais ganha por vezes, importância fundamental nos processos de implantação de obras e envolve capacidade técnico-econômica do projetista e do executor da obra.

A determinação das condições de escavação dos maciços envolvidos é de fundamental importância, por implicar em custos ligados ao método empregado, tipo de equipamento utilizado e ao tempo de duração dos trabalhos.

A quantidade relativa de rocha e solo que será escavada, tem importância muito grande na composição do custo final da obra, pois o custo de escavação em rocha é cerca de cinco vezes maior do que a escavação em solo.

A escavação em rocha geralmente demanda o uso de explosivos e de equipamentos de apoio como perfuratrizes, jumbos, pás carregadeiras, etc, além de utilizar técnicas sofisticadas de operação. Já para a escavação em solo, utiliza-se equipamentos e técnicas convencionais de escavação.

As obras subterrâneas executadas em maciços rochosos com litologias de resistência elevada, por exemplo, ganharam grande impulso com o desenvolvimento do "Tunnel Bore Machine"(TBM). As escavações puderam ser realizadas dispensando o uso de explosivos, não necessitando de paralisações e remoção de pessoal e equipamentos da frente de trabalho para

as detonações. Esse fato aumentou bastante a velocidade de escavação. Necessita-se, entretanto, um comprimento mínimo de túnel a ser executado, para justificar o investimento no equipamento.

Alguns maciços, entretanto, apresentam baixo rendimento para escavação com equipamentos convencionais ou com o uso contínuo de explosivos. São geralmente maciços rochosos muito fraturados ou solos muito endurecidos.

A diferença de comportamento dos maciços frente à escavação, levou à adoção de uma divisão, segundo o método a ser utilizado. Os maciços são divididos em tres grupos ou categorias de escavação, definidos, resumidamente, com se segue:

1ª categoria de escavação - maciços escavados com a utilização de equipamentos convencionais de terraplenagem;

2ª categoria de escavação - maciços escavados com a utilização de equipamentos pouco convencionais de terraplenagem (escarificadores) ou com eventual emprego de explosivos (fogacho);

3ª categoria de escavação - maciços escavados com o uso contínuo de explosivos.

A título de ilustração, são transcritas algumas definições destas tres categorias de escavação, segundo alguns órgãos que utilizam essa metodologia para classificação.

Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER-ES-T 03-70)

Material de 1ª categoria

Compreendem solos em geral, residual ou sedimentar, seixos rolados ou não, com diâmetro máximo inferior a 0.15 m, qualquer que seja o teor de umidade que apresentam.

Material de 2ª categoria

Compreendem os materiais com resistência ao desmonte mecânico inferior à da rocha não alterada, cuja extração se processe por combinação de métodos que obriguem a utilização do maior equipamento de escarificação exigido contratualmente; a extração eventualmente poderá envolver o uso de explosivos ou processos manuais adequados. Estão incluídos nesta classificação, os blocos de rocha de volume inferior a 2 m³ e os matacões ou pedras de diâmetro médio compreendido entre 0,15 e 1,00 m.

Material de 3ª categoria

Compreendem os materiais com resistência ao desmonte mecânico equivalente à da rocha não alterada e blocos de rocha com diâmetro médio superior a 1,00 m ou de volume igual ou superior a 2 m³, cuja extração e redução, a fim de possibilitar o carregamento, se processem somente com o emprego contínuo de explosivos.

Petróleo Brasileiro S.A. - PETROBRAS (N862c)

Materiais de 1ª categoria

são materiais compreendendo solos em geral, residual ou sedimentar, rochas em adiantado estado de alteração, seixos rolados ou não, com diâmetro máximo de 15 cm, qualquer que seja o teor de umidade que apresentem.

Materiais de 2ª categoria

são materiais compreendendo solos com resistência ao desmonte mecânico inferior à da rocha não alterada, cuja extração se processe por combinação de

métodos que obriguem à utilização do maior equipamento de escarificação exigido, blocos de rocha com volume inferior a 1,0 m³, matacões e pedras com diâmetro médio compreendido entre 0,15 e 1,0 m.

Materiais de 3ª categoria

são materiais compreendendo solos com resistência ao desmonte mecânico equivalente à da rocha não alterada e blocos de rocha com diâmetro médio superior a 1,0 m, ou de volume igual ou superior a 1,0 m³, cuja extração e redução se processem somente com emprego contínuo de explosivos.

A PETROBRAS, inclui ainda uma categoria não utilizada por outros órgãos

Materiais especiais

são materiais compreendendo solos não incluídos nas categorias acima, tais como argila orgânica ou brejosa, turfa, argila marinha, cuja retirada exige equipamentos não convencionais de corte, e que não devem ser utilizados como aterros.

Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - IPT S.A. (1981)

Materiais de 1ª categoria

Materiais de aluvião (turfas areias siltes argilas); solos residuais de baixa compactidade ou de consistência mole para cuja escavação e remoção não seja necessário o uso de explosivos e sejam feitas exclusivamente com o emprego de tratores de lâminas "scrapers" escavadeira e eventualmente escarificador leve.

Em desmonte subaquático os materiais desta categoria são facilmente removidos com uso de dragas ou "dragline".

Materiais de 2ª categoria

Argilas vermelhas argilas compactas e materiais cujas características sejam semelhantes às do Taguá ou solo de alteração de rocha com alta consistência ou compacidade; rocha muito alterada e muito fraturada cuja extração se processa com o uso contínuo e indispensável de escarificador leve ou pesado ou o uso combinado de explosivos máquinas de terraplenagem e ferramentas manuais usuais.

Apresenta baixo rendimento à dragagem convencional podendo ser algo melhorado com o uso de explosivos.

Materiais de 3ª categoria

Materiais de alteração de rocha de compacidade média a dura rochas alteradas matacões e rochas de alta coesão (igual ou superior ao granito) cuja extração se processa com o uso contínuo de explosivos máquinas e ferramentas apropriadas: martelotes compressores e outras. Definida em terraplenagem como rocha dura.

Para materiais submersos a utilização de ensecadeira para a escavação e remoção torna bastante nítido o limite entre esta e a categoria anterior

Companhia Energética de São Paulo - CESP - Especificações de Serviços de Escavação

Escavação em Material de 1ª Categoria

Este tipo refere-se à escavação onde não haja necessidade do uso de explosivos, ou seja, aos materiais terrosos de fácil desagregação ou rocha decomposta que possam ser derrocadas com o auxílio de equipamentos leves e convencionais.

Na classificação de materiais terrosos de fácil desagregação estão englobados os materiais que não necessitam fogo ou qualquer outro meio especial para extração, compreendendo solos em geral residuais, coluviais ou sedimentares, seixos rolados ou não, com qualquer teor de umidade. Incluem-se nesta classificação, todos os blocos soltos de rocha ou material duro de tamanho transportável por um homem.

Escavação em Material de 2ª Categoria

Esta categoria compreende os materiais com resistência ao desmonte mecânico inferior à da rocha não alterada, cuja extração se processe por combinação de métodos que obriguem a utilização do maior equipamento de escarificação exigido contratualmente. A extração eventualmente poderá envolver o uso de explosivos ou processos manuais adequados. Estão incluídos nesta Especificação, os blocos de rocha, de volume inferior a 2 m³ e os matacões ou pedras de diâmetro médio inferior a 1 metro, porém não transportável por um homem.

Deverão ser aprovados pela Fiscalização os processos e a execução de todas as atividades ligadas à escavação, incluindo o transporte, estocagem, drenagem, secagem, remanejamento, bota-fora, ou outras atividades correlatas.

Todo e qualquer material escavado será de propriedade do Contratante que poderá, através da Fiscalização, autorizar a utilização do mesmo em outros locais sem interesse para o projeto.

Material de 3ª Categoria

Classificar-se-á nesta categoria, para efeitos de pagamento, todas as formações naturais provenientes da agregação natural de grãos minerais, ligados por forças coesivas permanentes e de grande intensidade, com resistência ao desmonte mecânico equivalente à da rocha não alterada.

Todavia, será requisito para classificar um material como rocha, que tenha uma dureza e uma contextura tal que não possa ser afrouxado ou desagregado com ferramentas de mão e que só possa ser removido com uso prévio de explosivos, cunhas, ponteiros ou dispositivos mecânicos de natureza semelhante.

Inclui todos os matacões que tenham mais de dois metros cúbicos e/ou diâmetro superior a um metro. Este tipo de escavação só poderá ser feito com prévia autorização da Fiscalização.

O derrocamento a fogo será feito de modo a não prejudicar a rocha considerada, não ocasionar "over breaking" considerável. O comprimento dos furos e suas cargas serão determinados de acordo com as condições locais. A última camada será escavada com cargas fracas e o derrocamento

deverá ser feito de tal maneira que a superfície da rocha não apresente saliências de mais de 0,5 m.

A Fiscalização indicará os casos em que o desmonte deve ser feito a frio. Depois de iniciada a concretagem, não será permitida a escavação a fogo nas áreas próximas a essa concretagem, a critério da Fiscalização.

Deverá ser submetido à aprovação da Fiscalização o programa detalhado dos trabalhos de escavação, indicando os processos a serem usados em cada local.

O Empreiteiro deverá conduzir os trabalhos de modo que a superfície da rocha, depois de concluída a escavação se apresente bem rugosa.

Os trabalhos de escavação só serão dados por concluídos e aprovados pela Fiscalização depois que o local a ser examinado estiver limpo a jato d'água e desimpedido de fragmentos de rocha, lama ou detritos de qualquer espécie.

A ocorrência eventual de fendas ou falhas na rocha escavada, além de fraturas ocasionadas pelas explosões, serão, a critério da Fiscalização, tratadas convenientemente, só se permitindo a continuação dos serviços após comprovada a eficácia desses tratamentos pela Fiscalização.

A CESP emprega, ainda, uma categoria definida como escavação mista

Escavação Mista

Quando o volume de material a classificar for composto de volumes parciais de 1ª e 2ª categorias, determinar-se-á de forma estimativa, a percentagem que cada um destes materiais entra na composição do volume total considerado. Se o material de 1ª estiver entremeado com o de 2ª, numa proporção igual ou inferior a 20% do volume total considerado, e de tal forma que não possa ser escavado separadamente, todo o material será considerado como de 2ª. Para

classificar o material, só se levará em conta o estipulado nos parágrafos anteriores deste item.

Os cortes que apresentarem misturas de 3ª categoria com as demais, com limites pouco definidos, deverão merecer atenção especial da Fiscalização, de maneira a permitir uma classificação justa dos materiais escavados.

A análise das definições apresentadas mostra que os materiais são divididos em categorias segundo seu comportamento quanto à escavação e não segundo as características que determinariam esse comportamento. Esse fato gera grande dificuldade para situar um maciço rochoso nas categorias citadas. A determinação dos materiais de 1ª categoria e de 3ª categoria, independentemente da especificação utilizada é mais fácil, tornando-se difícil à medida que esses materiais aproximam-se de seus limites com os de 2ª categoria de escavação.

Observa-se que, nas definições citadas, a aplicação dos escarificadores dá-se em escavações superficiais de maciços classificados como de 2ª categoria, segundo as normas de execução.

O desenvolvimento de equipamentos cada vez mais potentes, tem estendido a faixa de maciços rochosos escarificáveis. O ideal, portanto, é realizar a classificação do maciço antes da licitação da obra definindo o tipo de equipamento de escavação mais adequado.

Os equipamentos de escarificação têm acompanhado a evolução tecnológica, a ponto de discutir-se a possibilidade da substituição dos explosivos, mesmo em maciços muito duros (Schmidt, 1978).

Hughes (1971) analisou a energia requerida pela escavação mecânica, comparando a resistência à compressão simples da rocha com leis de cominuição, indicando que o esforço requerido para penetrar o dente do escarificador em um maciço é muito maior que o esforço para removê-lo.

Dessa maneira, a existência de descontinuidades no maciço, favoráveis à penetração do dente do escarificador, auxilia a execução da escavação, mesmo em rochas muito resistentes. A Caterpillar, desenvolveu recentemente (Roussin, 1987) um trator com escarificador de impacto, buscando facilitar a penetração do dente em maciços de resistência elevada.

A execução de um serviço de escarificação, entretanto, não pode levar em conta somente a capacidade do equipamento. As obras civis obedecem a critérios rígidos de projeto, necessitando, por vezes, de superfícies bem acabadas. Tratores que apresentam potência elevada (770 HP) e peso próximo a 90 toneladas, como o D10 da Caterpillar, dificultam a obtenção de superfícies bem acabadas, por exemplo, em taludes de rodovia.

Em escavações de mineração, entretanto, os taludes escavados não necessitam de conformação final bem acabada e tratores de grande porte são perfeitamente compatíveis. Por outro lado, as escavações de mineração objetivam maior cominuição dos materiais escavados.

A utilização de escarificadores tende a resultar em maior fragmentação (Jackson, 1979), diminuindo, assim, a necessidade de fogo secundário em determinados tipos de maciços.

O aumento do tamanho, peso e potência dos tratores, têm levado a um incremento no uso de escarificadores em mineração a céu aberto. Materiais mais resistentes, por vezes podem ser escavados com maior produção, implicando em vantagens econômicas sobre a escavação com o uso de explosivos (Jackson, op.cit).

Comparando-se a eficiência operacional entre a escarificação e o desmonte por explosivos, tem-se que, em maciços com descontinuidades ou muito porosos, a energia liberada pela potência do explosivo é dissipada através desses vazios ou planos de fraqueza. Nessas condições, a eficiência da operação diminui e o custo por volume desmontado cresce. Por outro lado, as

descontinuidades permitem a penetração do dente do escarificador, aumentando a eficiência da operação e diminuindo custos (Fites, 1968).

A avaliação do uso de escarificadores em maciços rochosos, deve levar em conta como parâmetros básicos, o custo e o rendimento da operação. Outros fatores, como a disponibilidade dos equipamentos, impactos no meio ambiente, etc, devem ser analisados também.

Adam (1983), além dos comentários relativos ao custo de escavação e propriedades desejáveis dos maciços para a determinação da escarificabilidade, destaca a experiência e habilidade do operador do trator como fator importante na operação. O operador tem que ter experiência para aumentar a produção, maximizar a vida útil do equipamento e prevenir avarias, que implicariam em custos adicionais à operação. O operador deve atentar, ainda, ao ângulo de penetração da ponta do escarificador, velocidade da operação, presença de enclaves de maciços de comportamento diferente, profundidade do dente durante a operação, etc, que reduzem o custo da operação, através da diminuição das despesas com manutenção.

Os custos de escarificação não podem ser generalizados para diferentes maciços, mas sempre há a possibilidade de comparar o custo de escavação a fogo com o da escarificação em uma mesma unidade litológica (Adam, op.cit - modificado).

As características de obras civis viárias (rodovias, ferrovias, metrô, etc) implicam na intercepção de uma grande variedade de maciços ao longo do traçado, sendo, portanto, de grande importância a previsão do método de escavação dos materiais ao longo da obra, de forma a buscar-se a minimização de custos e prazos.

A execução de obras civis em zonas urbanizadas ou com ocupação, vem sofrendo restrições de entidades preservadoras do meio ambiente, limitando o

uso e potência dos explosivos, devido a ruído, sobressopro, vibração, ultralanchamentos, poeira e/ou interrupção do tráfego.

A análise das considerações expostas permite concluir que o fator econômico é preponderante na escolha do método de escavação. Esse fato obriga ao emprego de métodos classificatórios fundamentados em condicionantes geológico-geotécnicos criteriosamente selecionados. Essa classificação deve definir, objetivamente, as propriedades dos maciços envolvidos indicando os métodos e equipamentos mais adequados a serem empregados.

3 CONDICIONANTES DA ESCARIFICAÇÃO DE MACIÇOS

Vários fatores influenciam a escavação dos maciços. Neste capítulo serão abordados os principais condicionantes geológico-geotécnicos.

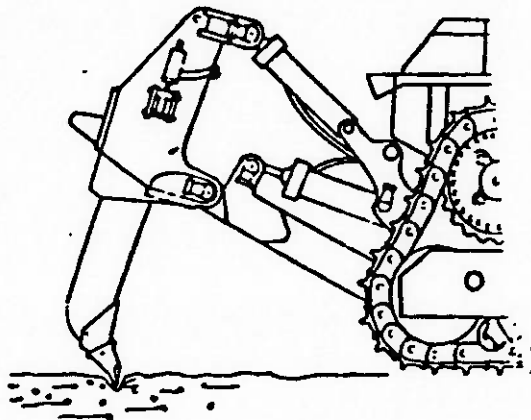
A determinação da escavação de um maciço passa pela sua caracterização geológico-geotécnica, analisando-se as características litológicas, as descontinuidades e as condições hidrogeológicas dos maciços. Para essa caracterização, sugere-se a utilização da metodologia proposta pelo ISRM (1981).

Se por um lado, na escavação com explosivos atuam ondas de choque, representadas por tração e compressão no maciço, na escarificação estão presentes esforços mecânicos de compressão, tração e flexão.

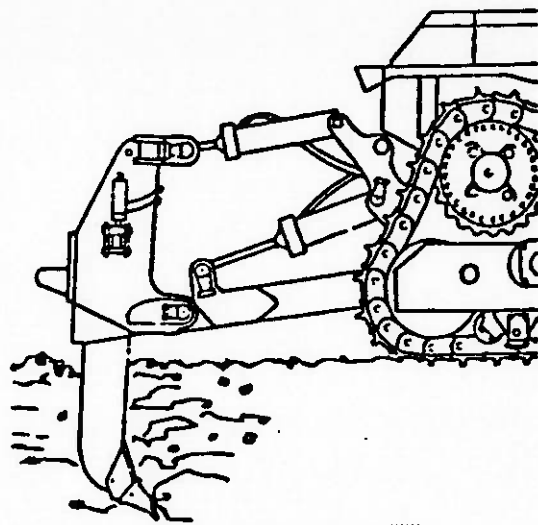
O mecanismo de escarificação pode ser dividido em duas partes: a penetração do dente do escarificador no maciço, onde predominam esforços de compressão, e o arrancamento do material pelo caminhamento do trator, onde predominam esforços de tração e flexão. As figuras 3.1 e 3.2 ilustram o mecanismo de escarificação e as forças atuantes nos maciços.

3.1 - Litologia

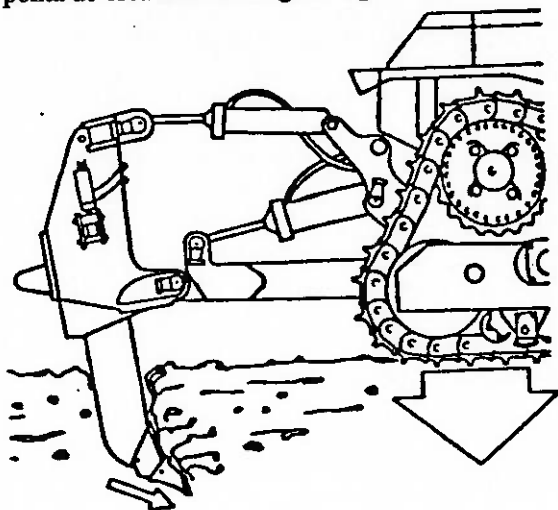
A determinação do método ou, em outras palavras, da categoria de escavação de um maciço tem como primeira característica a ser analisada o tipo de litologia presente no local. A presença de um granito ou gnaisse, rochas de elevada resistência, podem levar à adoção, por vezes precipitada, do uso de explosivos para sua escavação. A presença de um arenito não é determinante do método de escavação a ser empregado, devido à existência de vários tipos



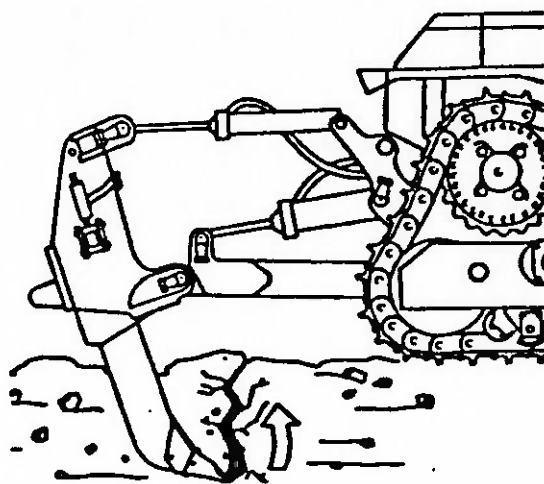
a penetração inicial do dente começa com o porta-ponta do escarificador angulado para trás



o porta-ponta encontra-se todo no interior do material, pronto para iniciar a escarificação



o porta-ponta do escarificador é ajustado após a penetração do dente no material



este é o melhor ângulo para escarificação, pois a força exercida na pequena área da ponta, inicialmente fratura e desagrega o material de baixo para cima.

de maciços, desde muito resistentes, que não apresentam estruturas ou intercalações, até rochas muito brandas e fraturadas, que apresentam baixa resistência mecânica.

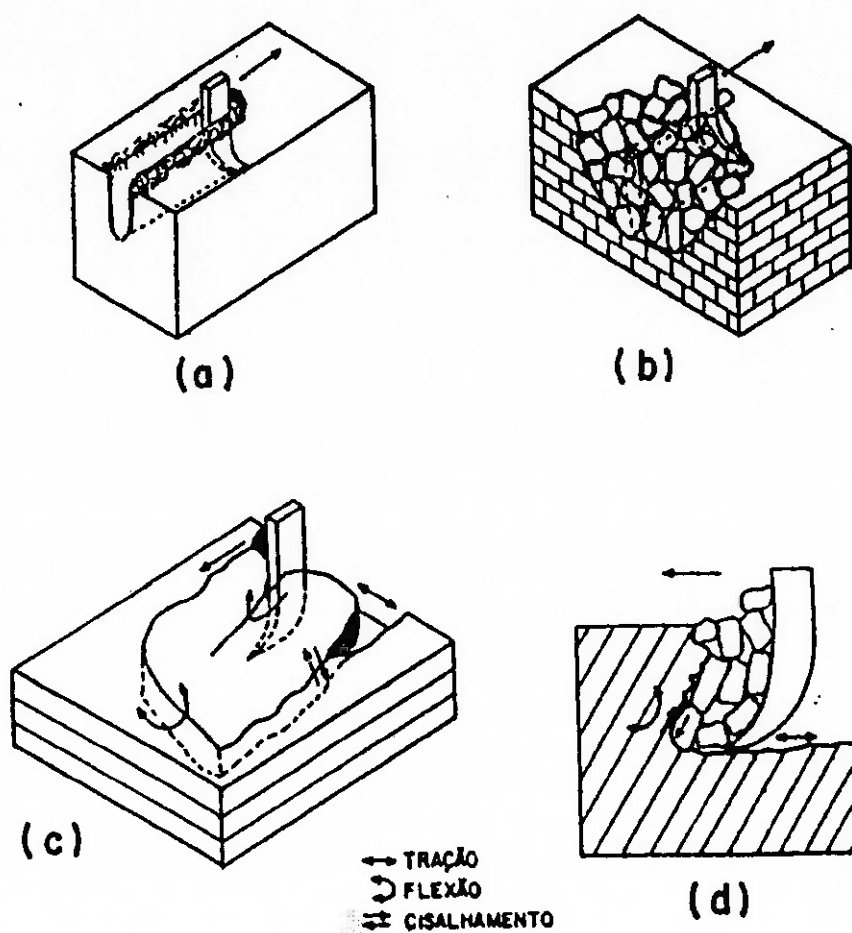


Figura 3.2 - Análise dos esforços causados nos maciços a partir da escarificação

De maneira geral, a origem da rocha (ígneas, metamórficas ou sedimentares) indica, em princípio sua resistência mecânica e, portanto, o grau de dificuldade de escarificação.

Em condições de pouca ou nenhuma alteração e baixo grau de fraturamento, pode-se afirmar que as rochas ígneas são aquelas que apresentam maior

dificuldade, ou mesmo impossibilidade, de escarificação, devido sua natureza cristalina de contato entre grãos bastante fortes.

Em geral, as rochas metamórficas são mais difíceis de serem analisadas como um todo. Gnaisses e migmatitos são semelhantes às rochas ígneas, possuindo natureza cristalina e alta resistência mecânica. Os quartzitos também podem ser considerados de alta resistência, apesar da existência de termos litológicos menos resistentes. Essas rochas são difíceis de escarificar-se.

Por outro lado, xistos, filitos, ardósias, possuem alta resistência mecânica somente na direção perpendicular à xistosidade, decrescendo violentamente em outros planos. Nesses tipos de maciços, a determinação da direção da xistosidade da rocha, favorável ou não à escarificação, vai facilitar a remoção através de escarificadores.

As rochas sedimentares são as que possuem menor resistência mecânica e geralmente apresentam estruturas de deposição que facilitam sua escarificação. Atenção deve ser dada à quantidade de quartzo presente na litologia, que pode determinar um elevado desgaste dos equipamentos, aumentando os custos da escavação. As rochas sedimentares, de maneira geral, são as mais facilmente removidas através de escarificadores.

O ISRM (1981) propõe a avaliação da resistência da rocha, através de procedimentos simples de identificação no campo que podem ser correlacionados com sua resistência medida em ensaios de laboratório (Tabela 3.1).

O "fabric" das litologias influenciam a escarificação dos maciços rochosos. Rochas muito granulares (com grãos > 5 mm) são mais fáceis de escarificar que as finas (< 1mm).

Tabela 3.1 - Descrição dos materiais para identificação da resistência mecânica

Grau	Descrição	Identificação em campo	Intervalo aproximado de resistência à compressão simples (MPa)
S1	argila muito mole	facilmente penetrada várias polegadas pelo punho	< 0.025
S2	argila mole	facilmente penetrada várias polegadas pelo polegar	0.025-0.050
S3	argila firme	pode ser penetrada várias polegadas pelo polegar a partir de esforço moderado	0.05-0.10
S4	argila rija	prontamente identada pelo polegar mas somente com grande esforço	0.10-0.25
S5	argila muito rija	prontamente identada pela unha do polegar	0.25-0.50
S6	argila dura	identada com dificuldade pela unha do polegar	> 0.50
R0	rocha extremamente branda	identada pela unha do polegar	0.25-1.0
R1	rocha muito branda	desagrega com golpes firmes da ponta do martelo de geólogo; pode ser descascada por canivete	1.0-5.0
R2	rocha branda	descascada com dificuldade pelo canivete; cavidades pouco profundas feitas por golpes firmes de martelo de geólogo	5.0-25
R3	rocha média	não pode ser arranhada ou descascada com canivete; amostra pode ser quebrada com somente um golpe firme do martelo de geólogo	25-50
R4	rocha dura	amostras precisam de mais de um golpe de martelo de geólogo para quebrar-se	50-100
R5	rocha muito dura	amostras requerem muitos golpes de martelo de geólogo para quebrar-se	100-250
R6	rocha extremamente dura	amostras somente são lascadas através de golpes de martelo de geólogo	> 250

A abrasividade de um material é o resultado da conjugação de uma série de características entre elas:

-composição e proporção mineralógica, incluindo dureza dos minerais constituintes, tamanho e forma dos grãos, dureza e resistência do material da matriz;

-propriedades físicas da rocha, incluindo resistência e dureza.

Singh et al (1986), propõem a determinação do índice de abrasividade, segundo a Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Classificação da rocha de acordo com o índice de abrasividade cherchar

Classe	índice cherchar	porcentagem de minerais duros	arredondamento dos minerais	material cimentante	índice rigidez (T)
muito pouco abrasivo	< 1.2	2 - 10	bem arredondado	sem cimento ou rochas com 20% de vazios	< 9
pouco abrasivo	1.2 - 2.5	10 - 20	arredondado	ferruginoso, argila ou ambos	9 - 15
moderadamente/medianamente abrasivo	2.5 - 4.0	20 - 30	subarredondado	calcita ou calcita e argila	15 - 25
muito abrasivo	4.0 - 4.5	30 - 60	subangular	argila siltosa ou calcita com inter-crescimento de quartzo	25 - 45
extremamente abrasivo	> 4.5	60 - 90	angular	cimento quartzoso ou de quartzo remobilizado	> 45

(Singh, 1983 - modificado)

O índice de abrasividade é dado com base nas propriedades dos minerais formadores de rochas duras, angularidade dos minerais duros, resistência dos minerais cimentantes, índice cherchar e índice de rigidez da rocha. O índice de rigidez é determinado por:

$$T = (\sigma_c^2 / 2E) \times 100$$

onde:

T = índice de rigidez;

σ_c = resistência à compressão simples;

E = módulo de elasticidade.

Alteração

A avaliação do grau de alteração de rocha é de difícil determinação, uma vez que é feita de forma descritiva, não apresentando nenhuma informação quantitativa.

Cada tipo litológico sofre evolução específica do seu estado de sanidade, segundo as condições do meio físico em que se encontra. Surge a necessidade de determinar-se o estado de alteração para sua caracterização.

A avaliação do grau de alteração é definido pelo estado de desagregação e decomposição, relativamente à rocha sã original.

As tabelas 3.3 e 3.4, a seguir, apresentam os graus de alteração de maciços e do material rochoso, definidos pela ISRM (1981).

Na determinação da escarificabilidade, a avaliação do grau de alteração assume importância muito grande devido à perda de resistência e aumento da deformabilidade do material causada pelos processos de alteração. Assim, num mesmo tipo litológico, a rocha será menos resistente e mais deformável quanto mais alterada apresentando, portanto, maior facilidade de ser escarificada.

Tabela 3.3 - Descrição do grau de alteração de maciços rochosos

Termo	Descrição	Grau
Fresco	sem sinal visível de alteração do material rochoso; eventualmente pequena descoloração nas superfícies das descontinuidades principais	I
Pouco Alterado	descoloração indica alteração do material rochoso e das superfícies das descontinuidades. Todo o material pode estar descolorido pela alteração e pode estar um tanto mais fraco externamente que em sua condição fresca	II
Moderadamente alterado	menos que metade do material rochoso está decomposto e/ou desintegrado para solo. Rocha fresca ou descolorida está presente como armação de colunas de rochas contínuas	III
Muito alterado	mais da metade do material rochoso está decomposto e/ou desintegrado. Rocha fresca ou descolorida está presente como armação de colunas de rochas contínuas	IV
Completamente Alterado	todo o material rochoso está decomposto e/ou desintegrado. A estrutura original do maciço continua intacta na maior parte	V
Solo Residual	todo o material rochoso alterou-se para solo. A estrutura do maciço e o fabric do material estão destruídos. Há uma grande mudança de volume mas o solo não tem movimentação significativa	

Pode se observar nas tabelas apresentadas, que os extremos são mais facilmente definidos, enquanto que para materiais graus III e IV, por exemplo, a distinção, em campo, por vezes é difícil de ser feita.

Os maciços sedimentares, excetuando-se aqueles inconsolidados como os aluviões, apresentam maior dificuldade na definição do grau de alteração que

maciços constituídos por rochas ígneas ou metamórficas. Maciços constituídos por rochas cristalinas geralmente alteram sua coloração original, apresentando clara diferenciação entre termos alterados e mais frescos. Esse fato geralmente não ocorre em rochas sedimentares, cujos produtos de alteração apresentam cor semelhante, principalmente em graus mais baixos.

Alem disso, alguns maciços sedimentares submetidos a alteração podem apresentar melhores características mecânicas, como é o caso de arenitos limonitizados. Por isso, os maciços sedimentares podem apresentar variações localizadas de resistência, devido à remoção ou precipitação de material cimentante. Devido a essas características, nesses tipos litológicos, pode ser importante a definição do grau de coerência, correlacionável com a resistência mecânica.

Tabela 3.4 - Descrição do grau de alteração do material rochoso

Fresco	sem sinal visível de alteração
Descolorido	a cor do material rochoso fresco foi alterada. O grau de mudança da cor original pode ser indicada. Se a mudança de cor restringe-se à constituintes minerais específicos isso deve ser indicado
Decomposto	a rocha está alterada para a condição de um solo que mantém o "fabric" original mas com todo ou parte dos grãos minerais decompostos
Desintegrado	a rocha está alterada para a condição de um solo no qual o "fabric" original ainda encontra-se intacto. A rocha é friável mas os grãos minerais não estão decompostos.

Para as condições de intemperismo reinantes no território brasileiro, muitas vezes a espessura do material intemperizado dificulta ou mesmo impossibilita o acesso direto ao maciço rochoso subjacente que será escavado, dificultando a determinação das características geomecânicas. Em alguns locais, a espessura do manto de intemperismo pode estar em torno de dezenas de

metros, muitas vezes com matacões. O estabelecimento do método de escavação para os maciços mais profundos só pode ser feito através da análise de testemunhos de sondagens rotativas e de levantamento geofísico. Esse aspecto é particularmente importante uma vez que a classificação geomecânica será feita a partir de dados pontuais do maciço.

3.2 - Descontinuidades

As descontinuidades presentes no maciço rochoso desempenham importante papel no seu comportamento geotécnico, influenciando a resposta às solicitações impostas. As descontinuidades que mais influenciam esse comportamento são aquelas onde a resistência à tração é baixa, favorecendo a separação de porções do maciço rochoso pelo plano da descontinuidade. Interessa, portanto, a caracterização das fraturas, falhas, dobras, xistosidades, contatos litológicos, estratificações, foliações.

A caracterização dos maciços rochosos tem como premissa o estabelecimento de um modelo estrutural que envolve o conhecimento das descontinuidades quanto à sua origem e evolução, distribuição espacial, número de famílias, persistência, abertura, espaçamento, preenchimento e alteração e rugosidade das paredes.

O ISRM (1978), sugere o levantamento das seguintes propriedades para caracterização das descontinuidades.

a) Atitude

A orientação espacial das descontinuidades é designada através de sua direção em relação ao norte magnético e mergulho em relação à superfície do terreno (N30E/60SE; N45W/30NE ou N210/30NW, por exemplo).

Normalmente são determinadas centenas de atitudes procedendo-se a uma avaliação estatística do conjunto das descontinuidades e sua influência em relação à obra.

Esse levantamento, entretanto, deve ser feito de maneira planejada, levando-se em conta a formulação de um modelo estrutural hipotético do maciço rochoso. As medidas coletadas em campo devem confirmar o modelo elaborado ou fornecer subsídios para um novo modelo estrutural. As informações vão nortear o projeto no local, considerando-se as características e frequência das descontinuidades mais relevantes para a obra.

Atualmente, alguns programas de computador fazem a análise estatística das atitudes, determinando os polos de concentração a porcentagem das medidas levantadas e os círculos principais das descontinuidades. Cita-se como exemplo o programa DIPS, elaborado pela Universidade de Toronto, Canadá.

A orientação das descontinuidades determinarão a forma dos blocos individuais, acamamento ou mosaico que formam o maciço rochoso (ISRM, 1978).

Para a escarificação, a atitude das descontinuidades permite avaliar a maior ou menor dificuldade de penetração dos dentes no maciço - visto que a resistência mecânica das descontinuidades é menor - e a facilidade de deslocamento dos blocos do maciço em relação ao sentido do escarificador.

b) Espaçamento

O espaçamento das descontinuidades é definido como a distância média entre fraturas sucessivas, medidas ao longo de uma reta perpendicular que as intercepta (IPT, 1987).

O espaçamento apresenta influência muito grande nas características mecânicas e hidrogeológicas do maciço, além de controlar o tamanho dos

blocos de rocha que poderão formar-se a partir da divisão do material rochoso pelas descontinuidades presentes.

Um fraturamento muito intenso, caracterizado por pequeno espaçamento, confere ao maciço um comportamento mais próximo de materiais granulares (ISRM, 1981). No caso de maciços a serem escarificados, quanto menor o espaçamento das descontinuidades, menor será o tamanho do bloco a ser escavado pelo trator e, portanto, maior o rendimento.

"Assim como no caso da orientação, a importância do espaçamento aumenta quando outras condições para deformação estão presentes, isto é, baixas resistências ao cisalhamento e um número suficiente de descontinuidades ou sistemas de juntas por onde possa ocorrer o deslizamento". (ISRM, 1978)

O valor do espaçamento é, portanto, de interesse na avaliação dos maciços, podendo ser adotada a terminologia da ISRM (1978):

- espaçamento muito pequeno < 0,06 m
- espaçamento pequeno 0.06-0.2 m
- espaçamento moderado 0.2-0,6 m
- espaçamento elevado 0.6-2 m
- espaçamento muito elevado > 2 m

c) Persistência

"A persistência pode ser definida como a extensão ou tamanho exposto do plano de descontinuidades". (ISRM, 1981)

Essa característica é difícil de determinar-se, devido à pequena extensão de afloramentos expostos implicando na sua estimativa através de testemunhos de sondagens.

No caso da escarificabilidade, é muito importante a determinação da persistência das descontinuidades, principalmente daquelas com posição relativa que favorecem o trabalho do escarificador. Descontinuidades pouco

persistentes, podem originar "ilhas" de rocha com estrutura maciça, que interferem na escarificação.

d) Rugosidade

A rugosidade das paredes das discontinuidades determinam sua resistência ao cisalhamento, tendo maior importância em juntas de pequena abertura e sem preenchimento, onde existe contato entre as paredes.

Os materiais de alta resistência, onde o escarificador não consegue romper a rocha intacta, apresentam o deslocamento relativo entre os blocos como a forma de desalojá-los na escarificação. Nesses materiais, a determinação da rugosidade das paredes das juntas, juntamente com sua resistência apresentam importância relativamente maior que em materiais de menor resistência.

e) Resistência das paredes

A resistência à compressão simples do material que constitui as paredes de uma discontinuidade são importantes no estudo da resistência ao cisalhamento e deformabilidade, principalmente em juntas com contato parede-parede, sem apresentar ou com pequena abertura. (ISRM, 1978)

A avaliação dessa característica é muito importante, principalmente para as condições intempéricas brasileiras, onde a percolação das águas de subsuperfície através das discontinuidades pode aprofundar a alteração do maciço, diminuindo a resistência.

f) Abertura

A abertura é a distância entre as paredes das discontinuidades, apresentando importância para a escarificação dos maciços por poder constituir-se no ponto de penetração do dente do escarificador no maciço rochoso.

g) Preenchimento

O preenchimento é o material que pode estar situado entre as paredes de uma descontinuidade. Ele interfere no comportamento do maciço quanto à resistência ao cisalhamento, deformabilidade e permeabilidade.

A natureza do preenchimento da descontinuidade pode facilitar a penetração do dente do escarificador, além de funcionar como "lubrificante" no desalojamento de blocos de rocha.

De forma geral, a presença de preenchimento mole e argiloso, facilita a escarificabilidade do maciço.

h) Percolação

A percolação d'água através de maciços rochosos tem importância secundária na determinação de sua escarificabilidade. Geralmente os trabalhos de escavação são realizados a pequena profundidade permitindo a alteração do nível freático com o aprofundamento da escavação. A água que surge nas praças podem ser disciplinadas de modo a não interferir no trabalho.

A percolação passa a ter importância à medida que, com o aprofundamento da escavação, a água interfere no rendimento e pode exigir sistemas de drenagem mais elaborados na praça de trabalho.

i) Número de famílias

O número de famílias de descontinuidades constitui a "aparência" do maciço e influencia seu comportamento mecânico. O número de famílias determina quanto o maciço pode deformar-se sem ocorrer fraturamento da rocha intacta (ISRM, 1981).

Constitui um aspecto importante na determinação da escarificabilidade, principalmente em maciços rochosos duros, por indicar a facilidade de ocorrência de descontinuidades e, portanto, de pontos de fraqueza do maciço.

j) Tamanho do bloco

Determinado pelo espaçamento, número de famílias e persistência das descontinuidades, o tamanho do bloco é um fator bastante importante na avaliação da escarificabilidade, por embutir na sua avaliação o esforço requerido do equipamento para remoção do maciço.

Maciços rochosos fragmentados ou em blocos de tamanhos pequenos, tendem a apresentar maior facilidade de escarificação que maciços compactos ou tabulares constituídos pela mesma litologia.

4 CLASSIFICAÇÃO DOS MACIÇOS QUANTO À ESCARIFICAÇÃO

A determinação da categoria de escavação de um maciço tem importância muito grande à medida que define o método e os equipamentos a serem empregados na escavação e, conseqüentemente, seu custo.

As normas existentes em serviços de terraplenagem, indicam as características dos materiais em cada uma das tres categoria de escavação, não definindo, entretanto, os critérios a serem utilizados para situar os maciços em cada uma dessas categorias.

Durante algum tempo, os materiais eram classificados segundo a experiência do profissional, implicando em critérios subjetivos de classificação, sendo comum o emprego de expressões como: "maciço semelhante"; "material escarificável situa-se no limite entre o impenetrável ao trépano e o impenetrável à lavagem no ensaio SPT".

A análise dos fatores condicionantes da escavação de materiais, discutidos no Capítulo 3, permite afirmar que a classificação deve levar em conta todas as características do maciço e os mecanismos de esforços a que são submetidos durante a escarificação.

Atualmente, os sistemas de classificação utilizados para situar um determinado material como de 2ª categoria de escavação e, portanto, escarificável, não são aceitos universalmente, por não apresentarem bons resultados em todo tipo de maciço. A classificação de maciços quanto à escarificabilidade, necessita de um sistema simples e eficaz, que permita tomada de decisões rápidas, muitas vezes durante a própria obra. Esse sistema deve permitir a escolha do método de escavação mais econômico e dos equipamentos mais adequados à obra em questão. Cordeiro et al (1983), alertam para a falta de critérios e normas para

classificação de um material rochoso como mecanicamente escarificável ou desmontável com explosivos.

A seguir são apresentados alguns sistemas de classificação de maciços quanto à escarificabilidade.

4.1 Classificação baseada em velocidade de ondas sísmicas

As tabelas de velocidades de propagação de ondas sísmicas é a classificação de maciços quanto à escarificação mais utilizada e recomendada por diversos autores, principalmente pelos fabricantes de equipamentos, devido à facilidade de aplicação e de obtenção de resultados no campo.

Em termos de classificação de maciços rochosos quanto à escarificação, a utilização de tabelas de velocidades de ondas sísmicas é o método mais antigo e que apresenta maior difusão no meio técnico. Merecem destaque as tabelas da Caterpillar (Figura 4.1), baseadas na velocidade de propagação de ondas sísmicas comparadas com a potência dos tratores.

A velocidade de ondas sísmicas é um método indireto de investigação de maciços rochosos, através da emissão de ondas por uma fonte e sua captação, após passagem pelo maciço, através de geofones (Figura 4.2). A velocidade de propagação das ondas sísmicas pode ser, portanto, diretamente relacionada com as características do maciço, onde as discontinuidades funcionam como atenuadores de velocidade. O resultado, portanto, indica um comportamento médio do maciço quanto à escavação.

Entretanto, existem dúvidas quanto á representatividade do método, visto que os maciços que foram utilizados na elaboração das tabelas, direrem daqueles de regiões tropicais que apresentam feições de intemperismo que determinam um comportamento geomecânico diferente daqueles localizados em zonas temperadas. A execução de sondagens geofísicas não caracterizam essas

feições, determinando um comportamento médio, que muitas vezes pode ser diferente do real.

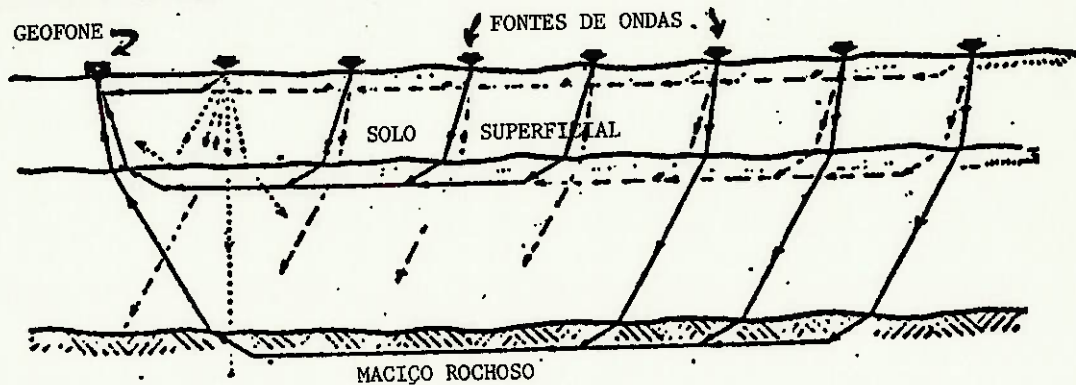


Figura 4.2 - Sondagem geofísica para determinação da velocidade de propagação de ondas sísmicas

Darcy (1970), apresenta um trabalho onde são analisados vários tipos de rocha, escavadas por método convencional, através de escarificadores ou com uso de explosivos, demonstrando existirem boas correlações entre a velocidade de propagação de ondas sísmicas dos maciços e aquelas propostas pelas tabelas da Caterpillar para granitos, gnaisses e micaxistos, basaltos, xistos, arenitos, gipso e calcários.

Além da Caterpillar, que utiliza a velocidade de ondas sísmicas como método de determinação da escarificabilidade (Smith, 1986), outros autores indicam-na como a principal ferramenta na avaliação dos maciços.

Church (1965), discute métodos de levantamento de campo a partir do uso de sondagens sísmicas, como instrumento na elaboração de planilhas de custos de escavação de maciços.

Chevassu (1978), apresenta um trabalho que indica a alteração "in situ" de maciços graníticos, através da utilização da velocidade de propagação de ondas sísmicas, indicando que esse método pode servir de técnica na determinação de materiais escarificáveis.

Desempenho do ripper do trator D10 da Caterpillar calculado por velocidades de propagação de ondas sísmicas (Caterpillar, 1989-modificado)

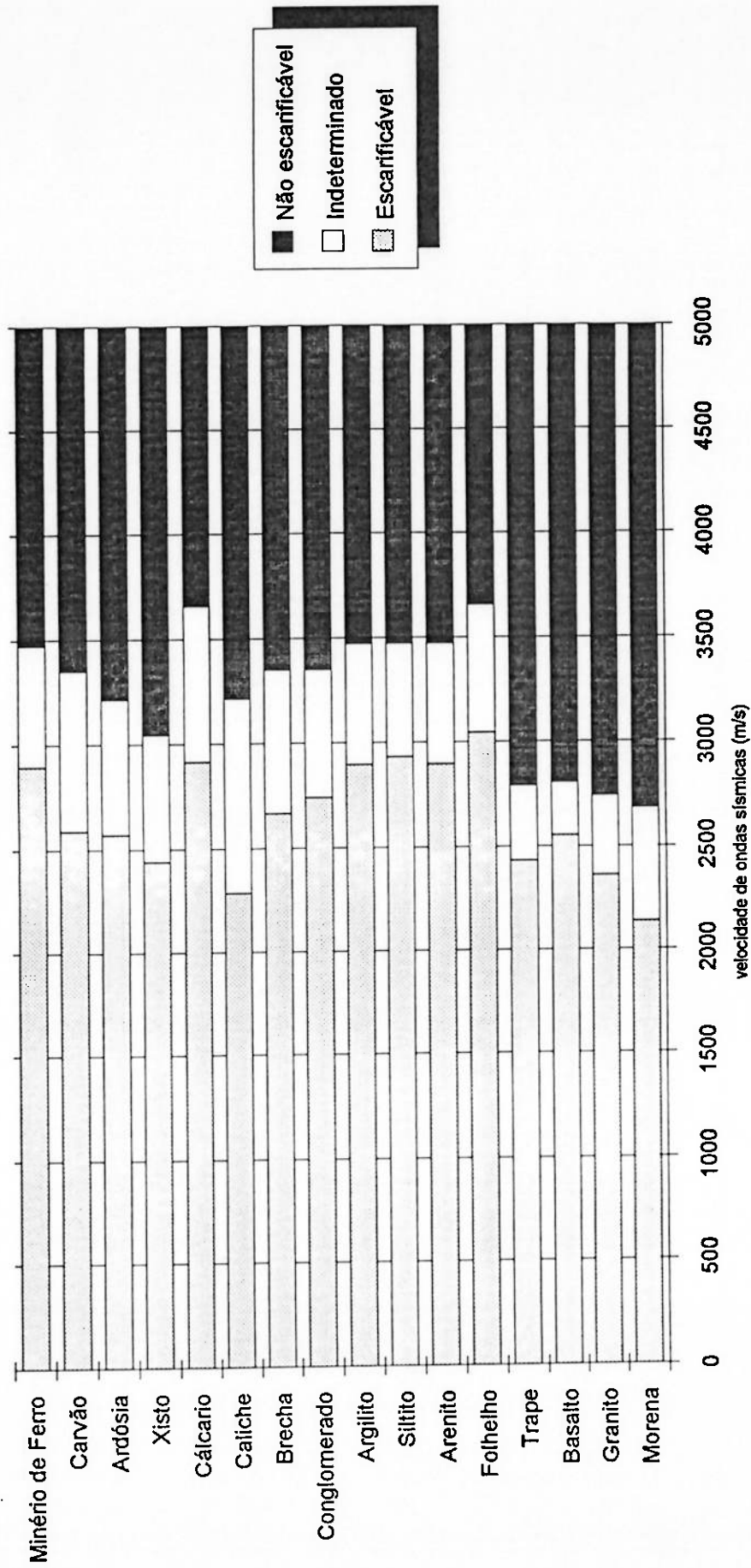


Figura 4.1 - Exemplo de tabela de velocidade de ondas sísmicas para determinação da escarificabilidade de maciços

Na literatura nacional, são escassos os trabalhos sobre o tema (ABMS, ABGE & CBMR, 1986). A única publicação encontrada é de Meyer e Lessa (1978) que desenvolveram trabalho mostrando a viabilidade da aplicação métodos geofísicos para determinar o grau de escarificação de maciços rochosos.

McCann et al. (1986) utilizam o método "cross-hole" em levantamentos geológicos de campo, para obterem parâmetros de maciços rochosos. Essa metodologia tem a vantagem de eliminar grande parte das interferência externas nas ondas sísmicas em sondagens geofísicas, permitindo a obtenção mais precisa da velocidade de propagação, resultando em um parâmetro mais representativo do maciço.

O Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (1990), desenvolveu estudos de campo comparando as velocidades de ondas sísmicas utilizadas no sistema de classificação proposto por Smith (1986), visando a determinação da escarificação de rochas sedimentares da Bacia do Paraná, no Estado de São Paulo. Foi utilizada a metodologia "cross hole" e os resultados encontrados foram bastante satisfatórios e compatíveis com aqueles apresentados por Smith (op.cit).

A utilização de métodos sísmicos na determinação da escarificabilidade de maciços rochosos, principalmente sem um levantamento criterioso das características dos maciços onde estão sendo aplicadas, é muito criticada por alguns autores por apresentar uma faixa de velocidades onde a escarificação é indeterminada. Apesar disso, a velocidade de ondas sísmicas é um parâmetro importante a ser avaliado, devido à existência de um levantamento bastante extenso e prático de comparação com a potência dos tratores utilizados em escarificação de maciços.

A utilização de métodos geofísicos para determinação das características geomecânicas dos maciços, particularmente em termos de resistência à escavação, ainda é bastante controversa. Além da possibilidade de erros de

execução e/ou avaliação dos resultados e, ainda, das discrepâncias inerentes ao método empregado, deve-se destacar que os métodos geofísicos indicam parâmetros médios dos maciços rochosos, sem evidenciar as peculiaridades do maciço, que muitas vezes influenciam o método de escavação. Os métodos geofísicos, portanto, devem ser considerados mais como um parâmetro de entrada para classificação do maciço rochoso, do que um sistema de classificação.

4.2 Classificações geomecânicas de maciços

A existência de uma faixa de velocidade de ondas sísmicas onde a escarificação é indeterminada (Figura 4.1), levou ao desenvolvimento de outros métodos de classificação dos maciços rochosos a serem escavados.

A necessidade de agrupar, diferenciar e hierarquizar os maciços rochosos de acordo com seus comportamentos geomecânicos, particularmente para a execução de obras subterrâneas, resultou na implementação de sistemas de classificação geomecânica de maciços. Esses sistemas envolvem a quantificação dos parâmetros dos maciços por métodos empíricos (atribuição relativa de pesos), mas que fornecem estimativas do comportamento, pois são baseados em dados reais de obras já executadas.

Esses sistemas de classificação avaliam os parâmetros das rochas e das discontinuidades, dividindo o maciço rochoso em zonas de comportamento semelhante.

A esse respeito, Bieniawski (1989), desenvolveu um trabalho onde apresenta as principais classificações geomecânicas de maciços e suas aplicações, utilizadas atualmente (Tabela 4.1). Nota-se que em termos de classificações aplicadas à escarificação, somente são indicadas as classificações de Weaver

(1975), derivada do "rock mass rating"-RMR (Bieniawski, 1974) e de Kirsten (1982), derivada do sistema Q (Barton et al, 1974).

Tabela 4.1 - Principais sistemas de classificação de maciços atualmente em uso.

NOME DA CLASSIFICAÇÃO	AUTOR E DATA	PAÍS DE ORIGEM	APLICAÇÃO
1.ROCK LOAD	Terzaghi 1946	USA	túneis com suportes metálicos
2.STAND-UP TIME	Lauffer 1958	Austria	túneis
3.NATM	Pacher et al 1958	Austria	túneis
4.RQD	Deere et al 1967	USA	testemunhos sondagem túneis
5.RSR	Wickham et al 1972	USA	túneis
6.RMR	Bieniawski 1973 (última modificação 1979 USA)	Africa do Sul	túneis, mineração, fundações, escorregamentos
	Weaver 1975	Africa do Sul	escarificabilidade
	Laubscher 1977	Africa do Sul	mineração
	Olivier 1979	Africa do Sul	alterabilidade
	Ghose & Raju 1981	Índia	mineração de carvão
	Moreno Tallon 1982	Espanha	túneis
	Kendorki et al 1983	USA	mineração em rocha dura
	Nakao et al 1983	Japão	túneis
	Serafim e Pereira 1983	Portugal	fundações
	Gonzalez de Vallejo 1983	Espanha	túneis
	Unal 1983	USA	parafusamento de teto em minas de carvão
	Romana 1985	Espanha	estabilidade de taludes
	Newman 1985	USA	mineração de carvão
	Sandbak 1985	USA	perfurabilidade
	Smith 1986	USA	dragabilidade
Venkateswarlu 1986	Índia	mineração de carvão	
Robertson 1988	Canadá	estabilidade de taludes	
7.Q-SYSTEM	Barton et al 1974	Noruega	túneis galerias
	Kirsten 1982	Africa do Sul	escavabilidade
	Kirsten 1983	Africa do Sul	túneis
8.STRENGTH-SIZE	Franklin 1975	Canada	túneis
9.DESCRICÃO BÁSICA GEOTÉCNICA	International Society for Rock Mechanics 1981		geral
10.CLASSIFICAÇÃO UNIFICADA	Williamson 1984	USA	geral

(Bieniawski, 1989)

Vários sistemas de classificação de maciços foram desenvolvidos, principalmente para projetos de escavações subterrâneas, entre eles, os propostos por Franklin (1972), Bieniawski (1976) e Barton (1977).

Abdullatif & Cruden (1983) utilizaram esses sistemas para determinar a escarificabilidade de maciços, sem fazer nenhuma modificação dos parâmetros de entrada. Foi feita a retroanálise de maciços rochosos já escavados, de minas de carvão a céu aberto na Inglaterra.

Os resultados obtidos indicam que o RMR de Bieniawski (1974), foi o sistema que deu maior correlação com o método de escavação empregado. O trabalho observa, também, que o parâmetro J_w/SRF utilizado no sistema de Barton (1974), relativos à condição de água e ao estado de tensão do maciço, não são correlacionáveis ao processo de escavação e podem ter influenciado os resultados.

A análise feita pelo autor, entretanto, pode gerar polêmica, uma vez que o trabalho desenvolvido fundamentou-se em escavações já realizadas, com os equipamentos então disponíveis na mina e não com equipamentos indicados pela avaliação do maciço. Por outro lado, os autores apresentam um gráfico (Figura 4.3) onde indicam a existência de uma faixa indeterminada entre os valores obtidos pelo sistema de Barton (op.cit). Esses valores podem estar representando maciços de transição entre os escarificáveis e aqueles somente escavados a fogo e não deficiência do sistema de classificação.

Alem dos sistemas de classificação propostos por Weaver (1975) e Kirsten (1982), voltados para a determinação da escarificabilidade de maciços, outros autores propuseram sistemas de avaliação com essa finalidade. Esses sistemas de classificação são apresentados resumidamente a seguir.

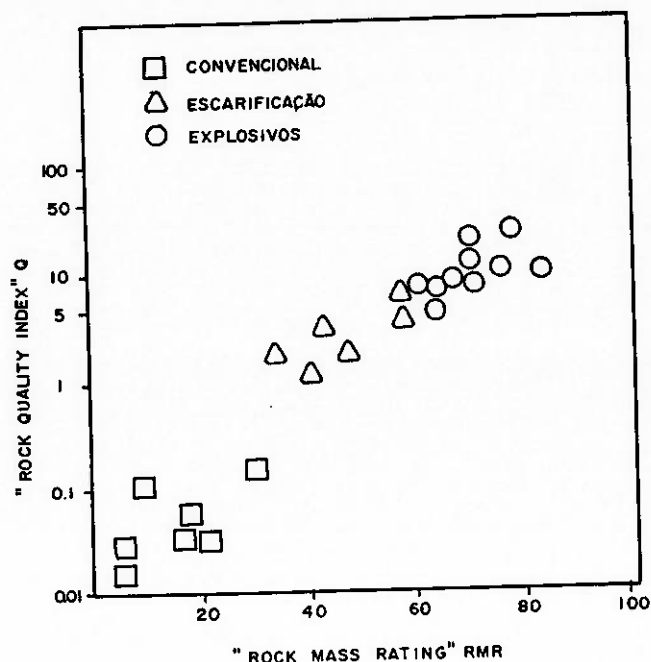


Figura 4.3 - Resultados da avaliação da escarificabilidade de maciços segundo o RMR(Bieniawski, 1974) e o sistema Q (Barton et al, 1974).

4.2.1 Classificação de Franklin

O sistema de classificação proposto por Franklin (1970), utiliza a resistência à compressão simples do material rochoso definido como I_r e o fraturamento do maciço definido como I_f para avaliação da possibilidade da escavação de um maciço rochoso com equipamentos convencionais, com uso de escarificadores ou de explosivos.

Franklin (1970) recomenda a realização de ensaios de cargas pontuais aplicadas diametralmente, para testemunhos longos; segundo o eixo longitudinal, para testemunhos curtos (discos); e segundo o menor eixo, em fragmentos de forma irregular.

O índice de resistência (I_r), comum para todos os ensaios propostos é definido como:

$lr = \text{carga aplicada} / \text{quadrado da distância entre os pontos de aplicação de carga}$

O resultado desse ensaio, segundo o autor, pode ser considerado como proporcional à resistência à tração do material rochoso.

Para determinação do índice de fraturamento do maciço (lf), Franklin (op. cit.) propõe a adoção do comprimento linear médio dos blocos que constituem a massa rochosa, sem preocupar-se com atitude, número de famílias, grau de alteração, preenchimento, etc das descontinuidades presentes. O índice de fraturamento pode ser determinado pela observação de fraturas ao longo de um afloramento, através do espaçamento médio de fraturas em um testemunho de sondagem ou até com o cálculo do tamanho médio dos fragmentos de uma pilha de rocha desmontada.

A partir dos valores de lr e lf , determinados a partir de ensaios e observação de testemunhos de sondagem, o autor propõe a elaboração de um diagrama de classificação para a escarificabilidade do maciço, dividindo-o em regiões escarificáveis e não escarificáveis.

O método de Franklin (op.cit), apesar de sua facilidade de aplicação, apresenta problemas por não avaliar as descontinuidades do maciço com maior precisão; não leva em conta, por exemplo, a posição espacial das descontinuidades em relação à direção de operação do riper, a abertura e o grau de alteração das paredes, etc, que facilitariam a penetração do dente do escarificador. Atenção especial deve ser dada para a escolha dos testemunhos a serem ensaiados que devem ser representativos do maciço.

4.2.2 Classificação de Weaver

Weaver (1975), baseou seu sistema de classificação de maciços quanto à escarificabilidade na proposta de Bieniawski (1974), desenvolvida, originalmente, para escavações subterrâneas.

Dentre as modificações propostas por Weaver (op.cit) foi acrescentada a velocidade de propagação de ondas sísmicas e o grau de alteração da rocha como parâmetros para classificação do maciço.

A dureza da rocha é avaliada de maneira descritiva, enquanto que Bieniawski (op.cit), no seu sistema de classificação original, propunha a adoção de intervalos de valores de resistência à compressão simples.

O RQD não é considerado como parâmetro de classificação devido, provavelmente, à pequena profundidade de escavação do maciço.

A atitude das descontinuidades é avaliada de forma qualitativa, atribuindo-se peso positivo (ao contrário de Bieniawski (1974), que estabelece notas negativas), indicando a íntima relação desse parâmetro com a facilidade de escarificação de maciços.

O sistema de classificação de Weaver (1975) também é diferente do proposto por Bieniawski (op.cit) por não levar em conta a rugosidade da descontinuidade, que pode ser considerada um parâmetro importante na penetrabilidade do dente do escarificador.

O sistema de Weaver (1975) é de fácil aplicação, existindo, entretanto, a tendência de avaliação do mesmo parâmetro mais de uma vez. Isso ocorre, por exemplo com a resistência que é avaliada no grau de alteração, na dureza da rocha e, indiretamente, na velocidade de propagação de ondas sísmicas. Entretanto, como a avaliação é qualitativa, esse procedimento de classificação não interfere na estimativa do comportamento do maciço.

A Tabela 4.2 sintetiza os parâmetro de entrada para classificação de maciços quanto à escarificabilidade propostos por Weaver (op.cit). Esse sistema foi aplicado em maciços na África do Sul, apresentando boas correlações com os resultados obtidos em obras. Alguns exemplos são apresentados a seguir.

a. Arenito silicificado "Hartebeestpoort"

rocha mole, bastante alterada, maciça, acamamento horizontal de quartzito.

Velocidade de propagação de ondas sísmicas no material igual a 1300 m/s

- segundo a tabela Caterpillar, trata-se de um maciço difícil de ser escarificado por um trator D8.

Avaliando sua escarificabilidade segundo o sistema de Weaver, obteu-se:

Parâmetro	valor	nota
Velocidade de ondas sísmicas	1300 m/s	12
Dureza	mole	1
Grau de alteração	bastante alterada	3
Espaçamento entre fraturas	> 3 m	30
Persistência das descontinuidades	nenhuma	5
Abertura das paredes das descontinuidades	sem abertura	5
Atitude das descontinuidades	muito desfavorável	15
	somatória	71

ou seja: extremamente difícil de escarificar

Utilizando-se um trator D9G, a rocha não pode ser escarificada e o escarificador somente conseguiu, com facilidade, abrir sulcos na superfície, com cerca de 30 cm de profundidade e 10 cm de largura. Entre outros dados, deve-se ressaltar que nesse material não ocorria nenhum sistema de fissuramento.

Tabela 4.2 - Classificação de rocha quanto à escarificabilidade.

CLASSE DA ROCHA	I	II	III	IV	V
DESCRIÇÃO DA ROCHA	rocha muito boa	rocha boa	rocha regular	rocha ruim	rocha muito ruim
Velocidade de ondas sísmicas (m/s)	> 2150	2150-1850	1850-1500	1500-1200	1200-450
Nota	26	24	20	12	06
Dureza da rocha	rocha extremamente dura	rocha muito dura	rocha dura	rocha mole	rocha muito mole
Nota	10	05	02	01	00
Grau de alteração da rocha	sã	ligeramente alterada	alterada	muito alterada	completamente alterada
Nota	09	07	05	03	01
Espaçamento de descontinuidades (cm)	> 300	300-100	100-30	30-5	< 5
Nota	30	25	20	10	05
Extensão das descontinuidades	não contínua	pouco contínua	contínua sem abertura	contínua com alguma abertura	contínua com abertura
Nota	05	05	03	00	00
Abertura de descontinuidades	sem abertura	pequena abertura	abertura < 1mm	abertura 1-5 mm	abertura >5 mm
Nota	05	05	04	03	01
*Atitude de descontinuidades	muito desfavorável	desfavorável	pouco desfavorável	favorável	muito favorável
Nota	15	13	10	05	03
NOTA TOTAL	100 a 90	90 a 70**	70 a 50	50 a 25	<25
Avaliação da escarificabilidade	escavação à fogo	extremamente difícil de escarificar ou escavação à fogo	muito difícil de escarificar	difícil de escarificar	fácil de escarificar
Escolha do trator	-	DD9G/D9G	D9/D8	D8/D7	D7
Potência (HP)	-	770/385	385/270	270/180	180
Kilowatts	-	575/290	290/200	200/135	135

(Weaver, 1975)

*Essa atitude de descontinuidade foi revisada para avaliação da escarificabilidade

**Material apresentando nota maior que 75, pode ser considerado como não-escarificável sem pré-fraturamento com fogacho

b. Camadas de carvão "Witbank":

rocha mole, sã, fraturada, acamamento horizontal de carvão, velocidade de ondas sísmicas do material igual a 1520 m/s.

- segundo a tabela Caterpillar, trata-se de um maciço difícil de ser escarificado por um trator D8.

Avaliando sua escarificabilidade segundo o sistema de Weaver obteu-se:

Parâmetro	valor	nota
Velocidade de ondas sísmicas	1520 m/s	20
Dureza	mole	1
Grau de alteração	não alterada	9
Espaçamento entre fraturas	0,3 m	10
Persistência das descontinuidades	nenhuma	5
Abertura das paredes das descontinuidades	sem abertura	5
Atitude das descontinuidades	muito desfavorável	15
	somatória	65

ou seja: muito difícil de escarificar

Utilizando-se um trator D8H, o carvão não pode ser escarificado. As garras da esteira do trator deslizavam, produzindo carvão fino, indesejável.

4.2.3 Classificação de Kirsten

Kirsten (1982), faz uma avaliação crítica do trabalho de Weaver (1975), posicionando-se contra a adoção de um sistema que utiliza a somatória de parâmetros e a velocidade de ondas sísmicas na avaliação do maciço.

Baseando-se no sistema de classificação de maciços rochosos proposto por Barton et al. (1974), Kirsten (op.cit) elaborou um sistema de avaliação da

escavabilidade de maciços, desde solos e detritos até rochas muito duras, baseando-se na expressão:

$$N = Ms (RQD/Jn) Js (Jr/Ja)$$

- N: valor da nota atribuída ao maciço que indica a classe de escavação;
- Ms: resistência do maciço;
- RQD: "rock quality designation"-índice de qualidade de rocha (definido por Deere em 1963)
- Jn: Índice do número de famílias de descontinuidades;
- Js: Índice da direção relativa das descontinuidades principais do maciço em relação à direção da escarificação;
- Jr: Índice da rugosidade das descontinuidades;
- Ja: Índice de alteração das paredes das descontinuidades.

Percebe-se que Kirsten (1982), modificou a expressão proposta por Barton et al. (op. cit.), acrescentando os Índices Ms, referente à resistência do material e Js, que avalia a direção de operação do escarificador em relação à atitude das descontinuidades. Por outro lado, o autor eliminou os parâmetros de avaliação de água subsuperficial e de tensão do maciço, que teriam pouca representatividade na avaliação da escavação superficial dos maciços.

Antes da atribuição de pesos para os parâmetros dos maciços, o sistema de Kirsten (op.cit) define os materiais-tipo a serem analisados e o tamanho das partículas, indicando os ensaios mais adequados para obtenção dos valores de resistência, conforme indicado na Tabela 4.3.

O parâmetro Ms é relacionado ao SPT do material (Tabela 4.4), à resistência ao cisalhamento para solos (Tabela 4.5), à resistência à compressão simples para rocha (Tabela 4.6) e ao módulo de deformação "in situ" para os detritos (Tabela 4.7).

O parâmetro RQD a ser adotado para a avaliação de maciços, é considerado até valores de 5%, enquanto que no sistema de classificação proposto por

Tabela 4.3 - Definição do tamanho das partículas e materiais-tipo

Tamanho das partículas

Tamanho da Partícula (mm)	Nomenclatura	Identificação
menor que 0.005	argila	sensação de gordura;brilhante quando molhado
0.005-0.074	silt	sensação de areia nos dentes;descasca com as mãos quando molhado;dilata
0.075-0.424	areia fina	sensação de areia nos dentes
0.425-1.99	areia grossa	visível a olho nú
2.0-13.19	pedregulho fino	visível a olho nú
13.2-52.99	pedregulho médio	visível a olho nú
53.0-200.0	pedregulho grosseiro	visível a olho nú
maior que 200.0	matacão	visível a olho nú

(Kirsten, 1982)

Definição do material-tipo

Tipo de material tamanho da partícula (mm)	Porcentagem por massa ou volume - origem					
	residual - P			transportado - O		
	solo coesivo	solo granular	rocha	solo coesivo	solo granular	detrito
0.005	CS > 20	GS < 20	R	CS > 20	GS < 20	D
0.005-0.074						
0.075-0.424						
0.425-1.99						
2.0-13.19						
13.2-52.99	< 20	< 20	> 20	< 20	< 20	< 20
53.0-200.0						> 20
200-750						
750-1750	< 10	< 10	> 10	< 10	< 10	< 25
1750						> 25

Notas: 1. As porcentagens estimadas para partículas menores que 200 mm foram feitas por massa enquanto que as maiores que 200 mm, por volume

2. Tamanho de partículas estimados em termos de diâmetro equivalente, assumiu as partículas como esféricas.

Barton et al (1976), o menor valor adotado é de 10%. Isso deve-se, provavelmente, à necessidade de maior sensibilidade do método para materiais bastante fragmentados, que indicariam maciços escarificáveis. Kirsten (op.cit), sugere que o menor valor de RQD, inclusive para solos, seja tomado como igual a 5.

Na tabela 4.8 é indicado o valor do Índice Jc, que indica o número de descontinuidades por metro cúbico do maciço considerado. Esse índice pode ser utilizado como forma indireta para determinar-se o RQD do maciço considerado.

A apresentação da Tabela 4.8 justifica-se uma vez que Barton et al (1974) considera que o índice de qualidade do material (RQD) indica a medida de descontinuidades por metro cúbico, segundo a seguinte expressão:

$$RQD = 115 - 3,3 Jc$$

Essa tabela mostra um RQD equivalente, no caso de não dispor-se de sondagens para sua determinação.

O número de famílias de juntas proposto por Kirsten (1982) é inferior que ao do sistema original de Barton et al (op.cit), levando em conta, também, as fissuras do material (Tabela 4.9). Essa tabela define o número de famílias de descontinuidades Jn.

O índice Js, indica a direção relativa do escarificador e das descontinuidades do maciço e a facilidade de arrancamento do bloco formado por essas descontinuidades pelo trator que está realizando o trabalho (Tabela 4.10). Esse Índice não existe na classificação de Barton et al (op.cit) e pode ser interessante, à medida que considera a facilidade de desalojamento de blocos do maciço ou o melhor sentido de operação do escarificador.

A Tabela 4.10 proposta por Kirsten (1982) é bastante complexa, apresentando dificuldade na determinação do valor do Índice de direção relativa da escarificação. A direção das famílias consideradas são sempre paralelas à

direção do escarificador (0° e 180°) por considerar o autor um plano ortogonal à direção da escarificação (Figura 4.4). Nota-se, porém, que na maior parte dos exemplos apresentados por Kirsten (op.cit), esse Índice é tomado como sendo igual a 1, portanto sem influência na escarificação.

Os valores de rugosidade da junta (J_r) são iguais aos adotados por Barton et al. (op.cit), levando em conta também a operação do escarificador (Tabela 4.11).

Kirsten (1982) avalia, também, a separação da junta para estimar a alteração (J_a) e o tipo de material do preenchimento (Tabela 4.12).

Tabela 4.4 - Resistência do maciço constituído por solos granulares baseado no ensaio SPT (Ms)

Consistência	identificação	SPT	resistência do maciço (Ms)
muito baixa	desagrega muito fácil quando raspado com o martelo de geólogo	0-4	0.02
baixa	baixa resistência à penetração da ponta do martelo de geólogo	4-10	0.04
medianamente compacta	resistência considerável à penetração da ponta do martelo de geólogo	10-20	0.09
compacta	resistência muito alta à penetração da ponta do martelo de geólogo - requer vários golpes de picareta para ser escavado	30-50	0.19
muito compacta	resistência alta à golpes seguidos de martelo - requer equipamentos para escavação	50-80	0.41

(Kirsten, 1982-modificado)

Nota: Material granular cujo SPT for maior que 80, pode ser tomado como rocha, cuja dureza pode ser obtida na Tabela 4.6.

Tabela 4.5 - Resistência do maciço constituído por solos granulares com base no ensaio de palheta (Ms)

Compacidade	identificação	resistência Vane Shear (KPa)	resistência do maciço (Ms)
muito mole	picareta pode facilmente penetrar na amostra de mão; facilmente moldado com os dedos.	0-80	0.02
mole	facilmente penetrável pelo polegar; picareta pode penetrar 30-40 mm; moldado com os dedos a partir de alguma pressão	80-140	0.04
duro	indentado pelo polegar com esforço; picareta pode penetrar 10 mm; muito difícil moldá-lo com os dedos; pode ser penetrado com uma pá	140-210	0.09
rijo	penetrado pela unha do polegar; pequena ranhura produzido por picareta; não pode ser moldado com os dedos; requer picareta para escavação	210-350	0.19
muito rijo	penetrado pela unha do polegar com dificuldade; pequena ranhura produzida por golpe de picareta; requer equipamentos mecânicos para escavação	350-750	0.41

(Kirsten, 1982-modificado)

Nota: Material coesivo cujo valor de resistência for maior que 750 KPa, pode ser considerado como rocha, e a dureza pode ser obtida na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 - Resistência do maciço constituído por rocha (Ms)

Dureza	Identificação	resistência à compressão simples (MPa)	Resistência do Maciço (Ms)
muito branda	desagrega com golpes firmes (moderados) da ponta do martelo de geólogo e pode ser retirado com um canivete; é muito difícil tirar um bloco indeformado	1.7 1.7-3.3	0.87 1.86
branda	pode ser raspada e retirada com um canivete; ranhuras de 1 a 3 mm aparecem na amostra com golpes firmes (moderados) de martelo	3.3-6.6 6.6-13.2	3.95 8.39
dura	não pode ser raspada ou retirada com um canivete de mão; amostras de mão podem ser quebradas com martelo de geólogo com um golpe firme (moderado)	13.2-26.4	17.7
muito dura	amostras de mão quebram com mais de um golpe de martelo de geólogo	26.4-53.0 53.0-106.0	35 70
extremamente dura	amostras requerem vários golpes de martelo de geólogo para quebrar	106.0-212.0 212	140 280

(Kirsten, 1982-modificado)

Tabela 4.7 - Resistência do maciço constituído por detritos (Ms)

Consistência	Identificação	Módulo de deformação "in situ" (MPa) ¹	Resistência do maciço (Ms)
muito fofo	Baixa compactação. Alta porcentagem de vazios e muito facilmente desalojados pelos dedos. Matriz desagrega muito facilmente quando raspada com martelo geológico. Frequentemente ocorre desprendimento de partículas nas faces escavadas	0-4	0.02
fofo	Baixa compactação. Alguma resistência para remover partículas com os dedos. Grande número de vazios. Matriz mostra pequena resistência à penetração da ponta do martelo de geólogo	4-10	0.05
medianamente compacto	Compactado. Dificuldade de desalojar partículas com a mão. Vazios menos aparentes. Matriz tem considerável resistência à penetração da ponta do martelo de geólogo	10-30	0.1
compacto	Bastante compactado e ocasionalmente fracamente cimentado. Partículas não podem ser desalojadas com as mãos. Resistência muito alta à penetração da ponta do martelo de geólogo - requer muitos golpes para desalojar partículas	30-80	0.21
muito compacto	Bastante compactado e frequentemente bastante cimentado. Tem grande resistência a golpes de martelo de geólogo - requer escavação mecânica	80-200	0.44

(Kirsten, 1982-modificado)

- Notas: 1. Determinado pelo ensaio "plate bearing" com diâmetro de 760 mm
 2. O maciço constituído por detritos cujo módulo de deformação "in situ" exceder a 200 MPa pode ser considerado como formação de matacões.

Tabela 4.8 - Índice de número de descontinuidades por metro cúbico para determinação do RQD (Jc)

Número de descontinuidades por metro cúbico (Jc)	Índice de qualidade do material (RQD)	Número de descontinuidades por metro cúbico (Jc)	Índice de qualidade do material (RQD)
33	5	18	55
32	10	17	60
30	15	15	65
29	20	14	70
27	25	12	75
26	30	11	80
24	35	9	85
23	40	8	90
21	45	6	95
20	50	5	100

(Kirsten, 1982-modificado)

Tabela 4.9 - Índice do número de famílias de descontinuidades (Jn)

Número de famílias de descontinuidades	aleatórias	Jn
	algumas	1.00
uma		1.22
uma	sim	1.50
duas		1.83
duas	sim	2.24
tres		2.73
tres	sim	3.34
quatro		4.09
múltiplas		5.00

(Kirsten, 1982-modificado)

Nota: Para material granular intacto, tomar Jn= 5.00

Tabela 4.10 - Índice da direção das estruturas do maciço em relação à direção do escarificador (J_s)

Atitude da família de descontinuidades mais fechada (graus)		Razão de espaçamento das descontinuidades r			
direção	mergulho	1:1	1:2	1:4	1:8
180/0	90	1.00	1.00	1.00	1.00
0	85	0.72	0.67	0.62	0.56
0	80	0.63	0.57	0.50	0.45
0	70	0.52	0.45	0.41	0.38
0	60	0.49	0.44	0.41	0.37
0	50	0.49	0.46	0.43	0.40
0	40	0.53	0.49	0.46	0.44
0	30	0.63	0.59	0.55	0.53
0	20	0.84	0.77	0.71	0.68
0	10	1.22	1.10	0.99	0.93
0	5	1.20	1.33	1.09	1.03
0/180	0	1.00	1.00	1.00	1.00
180	5	0.72	0.81	0.86	0.90
180	10	0.63	0.70	0.76	0.81
180	20	0.52	0.57	0.63	0.67
180	30	0.49	0.53	0.57	0.59
180	40	0.49	0.52	0.54	0.56
180	50	0.53	0.56	0.58	0.60
180	60	0.63	0.67	0.71	0.73
180	70	0.84	0.91	0.97	1.01
180	80	1.22	1.32	1.40	1.46
180	85	1.33	1.39	1.45	1.50
180/0	90	1.00	1.00	1.00	1.00

(Kirsten, 1982-modificado)

Notas: 1. Direção das família de descontinuidades mais fechadas com relação à direção de operação do escarificador

2. ângulo do mergulho aparente da família de descontinuidades mais fechada no plano vertical que contem a direção de operação do escarificador

3. Para material intacto, tomar $J_s=1.0$

4. Para valores de r menores que 0.125, tomar J_s igual a $r=0.125$

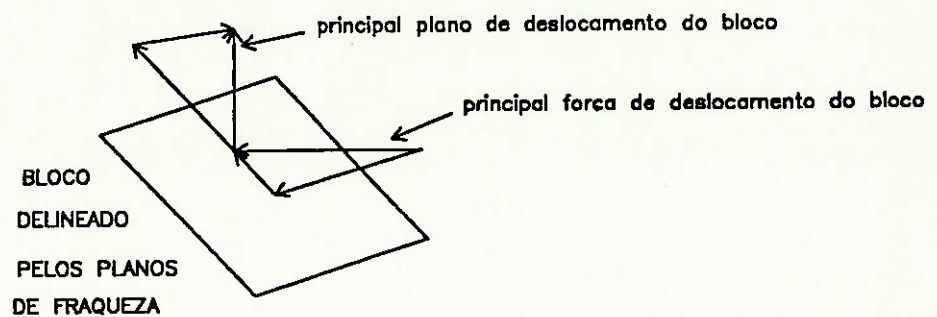
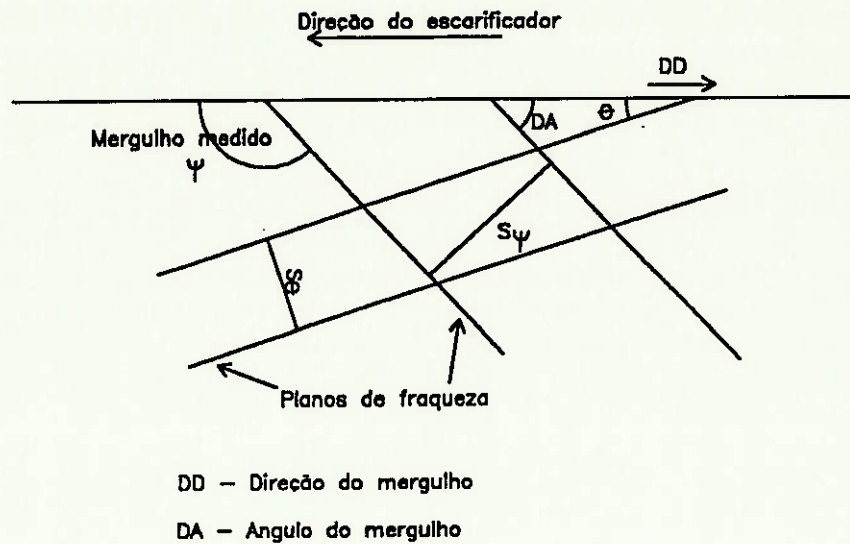


Figura 4.4 - Representação vetorial das forças de desalojamento de blocos de rocha durante a escarificação

Tabela 4.11 - Índice de rugosidade das descontinuidades (Jr)

Abertura	condição	Índice de rugosidade da descontinuidade (Jr)
sem abertura ou fechadas durante a escavação	descontínuas	4.0
	rugosa ou irregular; ondulada	3.0
	levemente ondulada	2.0
	ondulada "slickenside"	1.5
	rugosa ou irregular; planar	1.5
	levemente planar	1.0
	planar "slickenside"	0.5
abertas e mantidas abertas durante a escavação	abertas ou contendo preenchimento relativamente pouco espesso para impedir contato entre as paredes na escavação	1.0
	argila fragmentada ou micro-fragmentada	1.0

(Kirsten, 1982-modificado)

Nota: Para material intacto, tomar Jr=3.0

Tabela 4.12 - Índice de alteração das descontinuidades (Ja)

Preenchimento	Índice de alteração da descontinuidade (Ja) - separação em mm		
	< 1.0 ⁽¹⁾	1.0-5.0 ⁽²⁾	> 5.0 ⁽³⁾
firmemente compactado; duro; impermeável	0.75	-	-
paredes sem alteração ; superfícies apenas manchadas	1.0	-	-
pouco alteradas; mineral não-coesivo ou rocha esmagada	2.0	4.0	6.0
fino de película de argila pouco não-coesiva	3.0	6.0	10.0
argila consolidado; com ou sem presença de rocha esmagada	3.0*	6.0*	10.0*
poucos minerais de argila com baixo ângulo de atrito	4.0	8.0	13.0
minerais de argila com baixo ângulo de atrito moderadamente consolidados com ou sem presença de rocha esmagada	4.0*	8.0*	13.0*
argila fragmentada ou microfragmentada com ou sem presença de rocha esmagada	5.0	10.0	18.0

(Kirsten, 1982-modificado)

- Notas: 1. Paredes das descontinuidades efetivamente em contato
 2. Pontos de contato entre as paredes das descontinuidades distanciados de aproximadamente 100 mm
 3. Paredes das descontinuidades nunca estarão em contato efetivo
 * Dados de Barton

A partir da definição dos Índices do maciço analisado, utilizando as tabelas apresentadas e a posterior determinação de N, Kirsten (1982) define a classificação dos maciços quanto à escavabilidade para levantamentos de campo (Tabela 4.13) e para bases de contrato (Tabela 4.14).

A análise desse sistema de classificação, indica que o número de famílias de juntas e a alteração das paredes são índices que influenciam positivamente a escavação. O ângulo relativo das juntas em relação à direção da escavação e a resistência da rocha, são parâmetros intrínsecos do maciço, influenciando a facilidade de escavação. A rugosidade e o RQD influenciam negativamente a escavação, dificultando-a.

O sistema de Kirsten (op. cit.), leva em conta também os equipamentos a serem utilizados na escavação, sendo as classes 4, 5, 6 e 7, da Tabela 4.13, de interesse para esse trabalho (materiais escarificáveis). Percebe-se uma relação entre o valor do índice de escavação e a potência do trator. Kirsten (op.cit) afirma que, como a potência dos tratores e o índice de escavação (N) variam em progressão logarítmicas, as várias classes de escavação podem ser assumidas como correspondentes à um acréscimo de esforço para escavar, representado pela potência dos tratores. Esse aspecto é indicado na Figura 4.5 (Kirsten, op.cit - modificada), onde é apresentada a curva de eficiência de escarificação relacionada com a potência dos tratores e comparada com as classificações de Weaver (1975), TPA e SABS. As duas últimas classificações são de órgãos norte-americanos de serviços de terraplenagem e não foram abordadas neste trabalho.

Kirsten (1988) apresenta alguns exemplos de aplicação de seu sistema de classificação de maciços quanto à escavabilidade, em um congresso realizado nos EUA. Segundo Kirsten (op.cit), o sistema tem sido testado para os mais variados tipos de maciços, apresentando sempre boas correlações.

Tabela 4.13 - Classificação do maciço quanto á escavabilidade para levantamento de campo

TIPO DE MATERIAL	AVALIAÇÃO DO MACIÇO			CARACTERÍSTICAS DO BULLDOZER				CARACTERÍSTICAS DO ESCARIFICADOR				
	CLASSE	LIMITES DAS CLASSES DE ESCAVAÇÃO (N)	TIPO DE ESCAVAÇÃO	TIPO	PESO DE OPERAÇÃO (Kg)	POTÊNCIA VOLANTE (Kw)	POT. BARRA VELOCIDADE INICIAL	DE TRACÇÃO 1.6 Km/h	TIPO	PESO DE OPERAÇÃO (Kg)	POTÊNCIA NO VOLANTE	MÁXIMA BARRA DE TRACÇÃO(Kn)
Solo/	1	< 0.01	pá	D3	6340	46	151	65				
	2	0.01-0.0999	pá e picareta	D4E/ D5B	8820/11700	56/78	165/202	77/110	Cat 215	17282	63	132
Detrito	3	0.1-0.999	equipamentos convencionais	D6D	14270	104	250	147	Cat 225	23405	101	163
	4	1.0-9.99	escarificação leve	D7G	20230	149	376	220	Cat 235	38297	145	263
Rocha	5	10.0-99.9	escarificação difícil	D8K	31980	224	500	323	Cat 245	59330	242	472
	6	100.0-999	escarificação muito difícil	D9H	42780	306	667	445	RH40	83200	360	-
	7	1000.0-9999	escarificação extremamente difícil/escavação a fogo	D10	77870	522	1230	778	-	-	-	-
	8	> 10000	escavação a fogo	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Notas: 1. Cotado no Manual de Produção da Caterpillar, ou equivalente

2. Todas as máquinas montadas sobre esteiras

(Kirsten, 1982)

Tabela 4.14 - Classificação do maciço quanto á escavabilidade para bases contratuais

TIPO DE MATERIAL	AVALIAÇÃO DO MACIÇO		CARACTERÍSTICAS DO BULLDOZER				CARACTERÍSTICAS DO ESCARIFICADOR					
	CLASSE	LIMITES DAS CLASSES DE ESCAVAÇÃO (N)	TIPO DE ESCAVAÇÃO	TIPO	PESO DE OPERAÇÃO (Kg)	POTÊNCIA VOLANTE (Kw)	POT. BARRA VELOCIDADE INICIAL	DE TRACÇÃO 1.6 Km/h	TIPO	PESO DE OPERAÇÃO (Kg)	POTÊNCIA MÁXIMA NO VOLANTE	MÁXIMO BARRA DE TRACÇÃO(Kg)
Solo/ Detrito	1	< 0.1	pá e picareta	D3/ D4E/ D5B	6340/ 11700	46/78	151/202	65/110	Cat 215	17282	63	132
Rocha Branda	2	0.1-9.99	escavação convencional/es-carificação leve	D6 / D7G	14270/ 20230	104/149	250/376	147/220	Cat 225/ 235	23405/ 38297	101/145	163/263
Rocha Intermed iária	3	10-999	escarificação difícil a muito difícil	D8K/ D9H	31960/ 42780	224/306	500/667	323/445	Cat 245/ RH 40	59330/ 83200	242/360	472
Rocha Dura	4	> 1000	escarificação extremamente difícil/escavação a fogo	D10	77870	522	1230	778	-	-	-	-

(Kirsten, 1982)

NOTA - Para cálculo de N, utilizar apêndices.

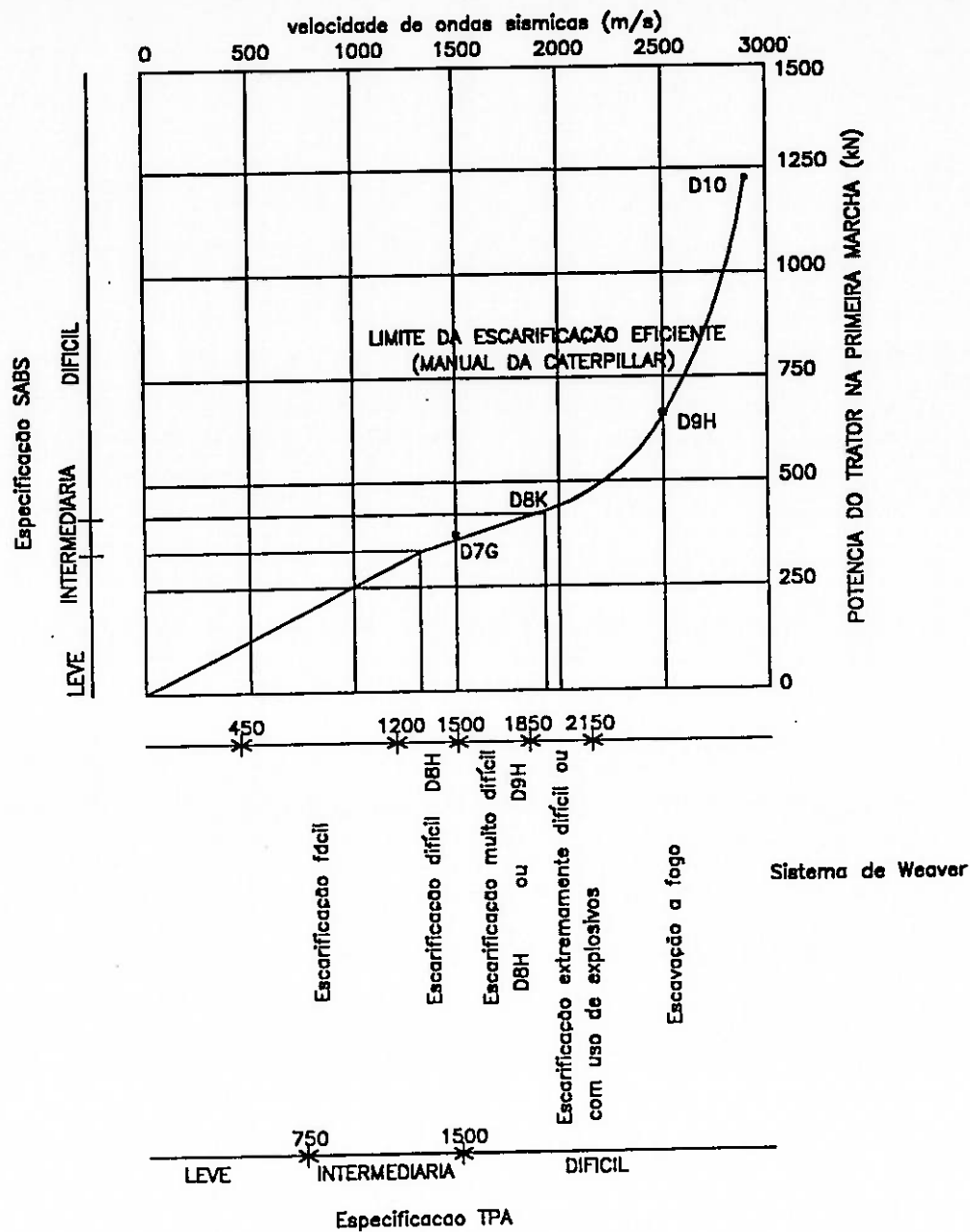


Figura 4.5 – Gráfico de eficiência da escarificação comparada com as classificações de maciços

Exemplo : Adutora Nooitgedacht-Vereeniging (Southern Transvaal, África do Sul)

Estaca 0 a 300 silte argiloso (solo residual de diabásio), pouco molhado, firme, muito descontínuo (30 a 100 mm)

$$Ms = 0.09; RQD = 35\%; J_n = 2.73; J_s = 1; J_r = J_a = 3$$

$$N = 0.38 \Rightarrow \text{classe 3}$$

Estaca 300 - 700 folhelho (rocha branda), seco, muito alterado, extremamente fraturado (0 a 30 mm)

$$Ms = 8.39; RQD = 30\%; J_n = 2.73; J_s = 1; J_r = 1; J_a = 3$$

$$N = 30.4 \Rightarrow \text{classe 4}$$

Estaca 700 - 850 quartzito medianamente alterado, fraturado

$$N = 1000(\text{estimado}) \Rightarrow \text{classe 7}$$

Estaca 850 - 1260 idem 300 - 700

Estaca 1260 - 1410 quartzito muito duro, pouco alterado, fraturado

$$Ms = 17.7; RQD = 80\%; J_n = 2.73; J_s = 0.53; J_r = 3; J_a = 1$$

$$N = 4668 \Rightarrow \text{classe 7}$$

Estaca 1410 - 2800 idem 300 - 700

Estaca 2800 - 4000 chert alterado em matriz areno-siltosa muito densa

$$Ms = 0.21; RQD = 80\%; J_n = 5; J_s = 1; J_r = 3; J_a = 6$$

$$N = 1.68 \Rightarrow \text{classe 4}$$

Estaca 4000 - 6700 folhelho ferruginoso (rocha branda), seco, muito alterado, extremamente fraturado

$$Ms = 8.39; RQD = 30\%; J_n = 1.83; J_s = 1; J_r = 1; J_a = 2$$

$$N = 69 \Rightarrow \text{classe 5}$$

Estaca 6700 - 7000 chert duro, alterado, seco, moderadamente fraturado

$$N = 900 (\text{estimado}) \Rightarrow \text{classe 6}$$

Tabela 4.15 - Comparação entre o método de escavação recomendado e o método utilizado para as obras da adutora Nooitgedacht-Vereeniging (Southern Transvaal, África do Sul)

estaca	previsões	condições encontradas		comentários
	equipamento/método recomendado	trecho (m)	equipamento/método utilizado	
0 a 300	CAT 225	0 - 800	RH 12 (=CAT 235)	menor equipamento utilizado no trabalho foi um RH 12
300 - 700	CAT 2245	0 - 800	RH 12 (=CAT 235)	folhelho escavado mais facilmente que o previsto
700 - 850	CAT 245	0 - 800	RH 12 (=CAT 235)	condições inferidas através de mapeamento de superfície; blocos de rocha aparentemente de fácil escavação
850 - 1260	CAT 245	800 - 1200	Komatsu PC 400 (=CAT 245)	boa correlação
1260 - 1410	escavação a fogo	1200 - 1300	escavação a fogo	boa correlação
1410 - 2800	CAT 245	1300 - 2800	Komatsu PC 400 (=CAT 245)	boa correlação
2800 - 4000	CAT 235	2800 - 4000	RH 12 (=CAT 235)	boa correlação
4000 - 6700	CAT 245	4000 - 7000	RH 30 (=CAT 245)	boa correlação

4.2.4 Classificação de Smith

Smith (1986) modificou a proposta de Weaver (1975) para a avaliação do maciço, omitindo o parâmetro "velocidade de ondas sísmicas". Além disso, Smith (op.cit) introduziu intervalos de valores de resistência mecânica da rocha, obtidos de ensaios de compressão, segundo critérios do IAEG (1978). A Tabela 4.16, apresentada a seguir, indica as notas a serem atribuídas aos parâmetros do maciço para a determinação de sua escarificabilidade. A somatória das notas de avaliação do maciço determina o índice denominado de RR ("rippability rating"). O autor compara o valor de RR com a velocidade de ondas sísmicas, indicada nas tabelas da Caterpillar, eliminando dúvidas

Tabela 4.16 - Classificação quanto à escarificabilidade

Classificação descritiva	rocha muito boa	rocha boa	rocha regular	rocha ruim	rocha muito ruim
Dureza da rocha*	muito dura > 70 MPa	dura 25-70 MPa	média 10-25 MPa	branda 3-10 MPa	muito branda < 3 MPa
Nota	≥ 10	5	2	1	0
Alteração da rocha	sem alteração	pouco alterada	alterada	muito alterada	completamente alterada
Nota	10	7	5	3	1
Espaçamento de descontinuidades (mm)	> 3000	3000-1000	1000-300	300-50	< 50
Nota	30	25	20	10	5
Persistência de descontinuidades	não contínuas	pouco contínuas	contínua sem preenchimento	contínua com algum preenchimento	contínua com preenchimento
Nota	5	5	3	0	0
Preenchimento de descontinuidades	sem separação	separação pequena	separação < 1mm	preenchimento < 5mm	preenchimento > 5mm
Nota	5	5	4	3	1
Direção e mergulho de descontinuidades	muito desfavorável	desfavorável	pouco desfavorável	favorável	muito favorável
Nota	15	13	10	5	3

*corresponde à resistência à compressão simples

(Smith, 1986 apud Weaver, 1975)

quanto a escarificabilidade do maciço. A Figura 4.6 mostra um exemplo desse procedimento.

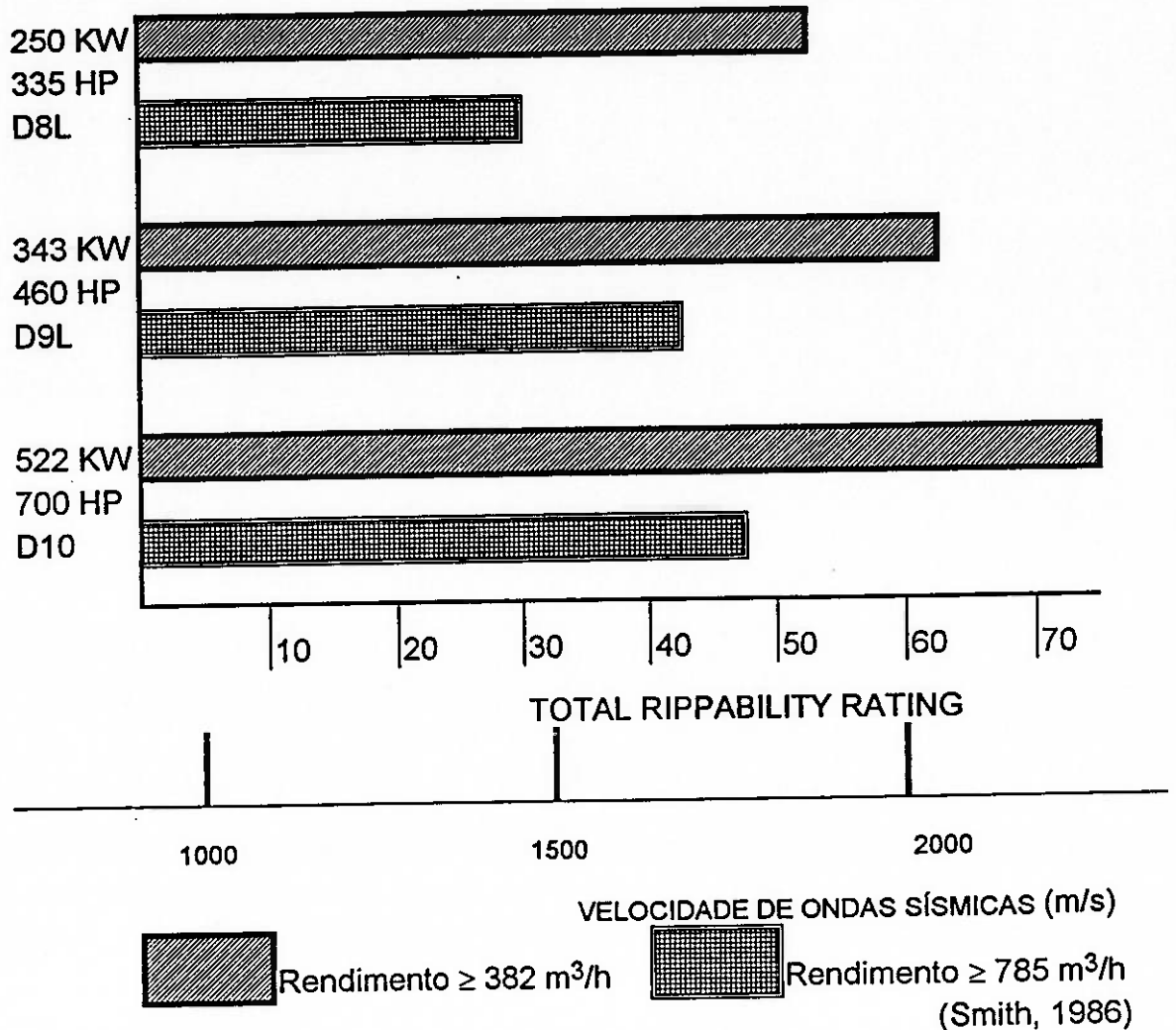


Figura 4.6 - Correlação entre o "rippability rating (RR)", a velocidade de ondas sísmicas e o trator indicado para escarificar o maciço

4.2.5 - Classificação de Singh, Denby & Egreti

Singh, Denby & Egreti (1986) desenvolveram um sistema de classificação de maciços quanto à escarificação, proposto originalmente para minas a céu aberto. Os autores avaliam cuidadosamente as informações geológicas e

topográficas, a proximidade com áreas para deposição de resíduos, restrições ambientais e recuperação ambiental.

Além desses fatores, Singh et al (op.cit), basearam sua classificação em teorias sobre escavação desenvolvidas por outros autores, afirmando que poucos estudos foram realizados sobre o mecanismo de escarificação. Os autores citam em seu trabalho que Dubbe (1974) questionou a previsão da escarificabilidade unicamente com base na velocidade de ondas sísmicas. Dubbe in Singh et al (op.cit) conclui que um critério de resistência à tração poderia ser utilizado, principalmente em zonas marginais de avaliação sísmica (Figura 4.1), onde não é determinado o uso de escarificação ou escavação a fogo.

Singh et al (1986) descrevem o mecanismo de escarificação e os esforços causados no maciço: o primeiro passo é a penetração do dente do escarificador na rocha, através do seu peso, causando ruptura por compressão. Segundo os autores, a compressão permanece durante a penetração inicial do dente e também quando este é puxado pelo trator. A partir de uma pequena distância de onde a escarificação foi iniciada, forças de tração passam a atuar na rocha, desenvolvendo superfícies de fraturas como resultado das tensões impostas à rocha. Essas fraturas causam a fragmentação da rocha, em forma de blocos, cunhas, etc. A partir dessa constatação, Singh et al (op.cit), consideram o parâmetro resistência à tração para a classificação dos maciços quanto a escarificabilidade.

Outro índice considerado nesse sistema de classificação é a abrasividade da rocha. A medida da abrasividade resulta da conjugação de uma série de características do material, entre eles:

- composição e proporção mineralógica, incluindo dureza da matriz e dos minerais constituintes, tamanho e forma dos grãos;
- propriedades físicas da rocha, incluindo resistência e dureza.

Esses autores propõem a determinação da abrasividade, segundo a Tabela 3.2 , definida no índice de abrasividade cherchar.

Singh et al (1986) afirmam que os sistemas de classificação mais recentes de maciços baseiam-se em:

- divisão do maciço em regiões estruturais, nas quais feições características são quase uniformes. Exemplos dessas feições são a litologia, estado de alteração e o espaçamento de descontinuidades;
- nenhum parâmetro ou índice representa isoladamente essas regiões, de forma suficiente e qualitativa;
- a combinação de parâmetros relevantes pode descrever de forma clara uma região estrutural do maciço, visando uma determinada finalidade.

Baseados nessas premissas, os autores propõem um sistema de classificação que utiliza os seguintes parâmetros:

- resistência à tração
- grau de alteração;
- abrasividade; e
- espaçamento de descontinuidades.

Além desses parâmetros, Singh et al (op.cit), incluem na avaliação dos maciços a serem escarificados a velocidade de ondas sísmicas.

A seleção e emprego desses parâmetros é resultado de um estudo intensivo de sistemas de classificação existentes para escarificação e da experiência obtida em um grande número de minerações a céu aberto na Turquia e Grã-Bretanha. Os autores testaram o sistema de classificação proposto, apresentando como exemplo, a escarificação de arenitos em uma mina de carvão na Grã-Bretanha.

A Tabela 4.17 apresenta o sistema de classificação proposto pelos autores.

Exemplos:

Tabela 4.17 - Determinação da escarificabilidade de maciços

Parâmetros	Classe de Rocha				
	1	2	3	4	5
1. Resistência à tração (MPa)	< 2	2 - 6	6 - 10	10 - 15	> 15
Nota	0 - 3	3 - 7	7 - 11	11 - 13	13 - 15
2. Alteração do material	completamente	muito	moderada	pequena	não alterada
Nota	0 - 2	2 - 6	6 - 10	10 - 13	13 - 15
3. Velocidade de ondas sísmicas (m/s)	400-1100	1100-1600	1600-1900	1900-2500	> 2500
Nota	0 - 6	6 - 10	10 - 14	14 - 18	18 - 20
4. Abrasividade da rocha	muito baixa	baixa	moderada	alta	muito alta
Nota	0 - 7	7 - 9	9 - 13	13 - 18	18 - 20
5. Espaçamento de descontinuidades (m)	< 0.06	0.06 - 0.3	0.3 - 1	1 - 2	> 2
Nota	0 - 7	7 - 15	15 - 22	22 - 28	28 - 30
Nota total	< 25	25 - 50	50 - 70	70 - 90	> 90
Escarificabilidade	fácil	moderada	difícil	marginal	escavação a fogo
Trator recomendado	sem escarificador ou D7	D7 - D8	D8 - D9	D10 ou escavação a fogo	-
H.P.	200	200 - 300	300 - 410	700	-
Peso Aproximado (Kg)	23000	23000 - 38000	38000 - 50000	97000	-

(Singh, Denby & Egreti, 1986)

1) Arenito muito alterado, muito fraturado, de baixa resistência. O valor da velocidade de ondas sísmicas é de 649 m/s. As medidas de espaçamento das descontinuidades foram feitas em direções ortogonais, utilizando-se a técnica "scanline". As medidas revelaram 8 a 10 descontinuidades por metro, com espaçamento médio de 0.12 m.

As propriedades índices foram determinadas através de ensaios de laboratório e são apresentadas na tabela a seguir.

Tabela 4.18 - Índices de campo e de laboratório do arenito castanho com vistas à escarificabilidade

Propriedade	Unidade	Média	Desvio Padrão	Número de Ensaios
Res. compressão simples	MPa	37.54	2.59	12
Res. tração normal ao acamamento	MPa	2.39	0.31	8 8
Res. tração paralelo ao acamamento		1.87	0.26	
Carga pontual normal ao acamamento	MPa	2.56	0.34	10
Carga pontual paralelo ao acamamento		1.92	0.36	8
Entalhe do cone NCB	-	2.72	0.51	20
Índice de rigidez	-	30	-	-
Esclerômetro	-	27.2	3.3	20
Índice cherchar	0.1 mm	0.6	-	5
Densidade do corpo	Kg/m ³	2156	0.025	8
Saturação umidade natural	%	8.17	0.39	8
Porosidade	%	17.54	0.65	6
Veloc. ondas de compressão	m/s	2411	75.50	20
Veloc. ondas de cisalhamento		1588	44.80	20
Veloc. ondas de compressão (método de ressonância)		2563	104	14
Ângulo de atrito	0	60	-	-
Coesão	MPa	2.75	-	-
Módulo de elasticidade estático	GPa	2.75	4	5
Veloc. ondas sísmicas	m/s	649	-	-
Martelo Schmidt	-	38	14	26
Espaçamento de descontinuidades	m	0.12	-	-
Intensidade de descontinuidades	-	8 - 10	-	-
RQD	%	32	-	-
Índice de fraturamento	%	0.24	-	-
Razão de velocidade	%	0.06	-	-

A avaliação da escarificabilidade do maciço, apresenta a seguinte classificação:

parâmetro	resistência à tração (MPa)	grau de alteração	velocidade de ondas sísmicas (m/s)	abrasividade	espaçamento das descontinuidades (m)
valor	1.87	alto	649	muito baixa	0.12
nota	3	4	4	4	9

Nota total = 24 ⇒ facilmente escarificável

Trator recomendado: D7 da Caterpillar

2) Arenito medianamente alterado, muito fraturado, de resistência mais elevada que o anterior. A velocidade de ondas sísmicas é de 1075 m/s. Em geral, foram observadas 7 a 9 descontinuidades por metro, resultando em um espaçamento médio de 0.14 m.

As propriedades índices foram determinadas através de ensaios de laboratório e são apresentadas na tabela a seguir.

Tabela 4.19 - Índices de campo e de laboratório do arenito cinza com vistas à escarificabilidade

Propriedade	Unidade	Média	Desvio Padrão	Número de Ensaios
Res. compressão simples	MPa	10.38	4.43	15
Res. tração normal ao acamamento	MPa	4.89	0.50	8
Res. tração paralelo ao acamamento		2.83	0.18	7
Carga pontual normal ao acamamento	MPa	4.14	0.58	10
Carga pontual paralelo ao acamamento		2.96	0.27	10
Entalhe do cone NCB	-	4.08	0.47	19
Índice de rigidez	-	26.2	-	-
Esclerômetro	-	40.8	2.93	20
Índice cherchar	0.1 mm	0.65	-	5
Densidade do corpo	Kg/m ³	2448	0.039	6
Saturação umidade natural	%	3.403	0.07	6
Porosidade	%	8.29	0.143	6
Veloc. ondas de compressão	m/s	2701	81.05	18
Veloc. ondas de cisalhamento		1605	50.71	18
Veloc. ondas de compressão (método de ressonância)		3171	46.50	14
Ângulo de atrito	0	55	-	-
Coesão	MPa	7.65	-	-
Módulo de elasticidade estático	GPa	3.11	-	5
Veloc. ondas sísmicas	m/s	1075	-	-
Martelo Schmidt	-	44	10	30
Espaçamento de descontinuidades	m	0.14	-	-
Intensidade de descontinuidades	-	7 - 9	-	-
RQD	%	38	-	-
Índice de fraturamento	%	0.34	-	-
Razão de velocidade	%	0.12	-	-

A avaliação da escarificabilidade do maciço, apresenta a seguinte classificação:

parâmetro	resistência à tração (MPa)	grau de alteração	velocidade de ondas sísmicas (m/s)	abrasividade	espaçamento das descontinuidades (m)
valor	2.83	moderado	1075	muito baixa	0.14
nota	4	8	6	5	9

Nota total = 32 ⇒ moderadamente escarificável

Trator recomendado: D8 da Caterpillar

Os dois exemplos são de uma mesma mina de carvão na Grã Bretanha, onde foi utilizado um trator D8L da Caterpillar para execução das escavações.

No primeiro caso, o trator foi pouco exigido, devido à sua elevada potência em relação ao maciço. Um trator menor, como o D7 recomendado pelo sistema de classificação, poderia ter sido mais eficiente.

No segundo caso, o trator apresentou rendimento muito bom, com apenas uma passagem para remoção do material.

4.3 - Avaliação das classificações de maciços

As classificações de maciços quanto à escarificabilidade apresentadas neste capítulo constituem-se compilação, com ou sem adaptações de métodos de classificação já existentes desenvolvidos por diversos autores. Foi feita uma análise prévia e seleção dos sistemas que poderiam apresentar melhor correlação com os processos de escarificação.

Nesta avaliação foram selecionados os parâmetros mais frequentemente utilizados pelos autores na avaliação de maciços, apresentados sinteticamente na Tabela 4.20.

Tabela 4.20 - Parâmetros dos maciços rochosos empregados na avaliação da escarificabilidade, segundo os diversos autores estudados

Autor / Propriedade do maciço	Caterpillar	Franklin (1970)	Weaver (1975)	Kirsten (1982)	Smith (1986)	Singh et al (1986)
velocidade de ondas sísmicas	X		X		X (1)	X
resistência à compressão simples		X(2)	X (3)	X (4)	X (5)	
resistência à tração						X
espaçamento das descontinuidades		X	X	X	X	X
número de famílias de descontinuidades				X		
persistência das descontinuidades			X		X	
atitude das descontinuidades (6)			X	X	X	
abertura das descontinuidades			X		X	
rugosidade das descontinuidades				X		
RQD				X		
grau de alteração			X	X (7)	X	X
abrasividade						X (8)

NOTAS:

- (1) utilizada indiretamente, após o levantamento do peso do maciço;
- (2) utiliza o ensaio de carga puntual;
- (3) utiliza o parâmetro de forma qualitativa;
- (4) parâmetro determinado a partir da relação com o SPT, resistência ao cisalhamento (solo granular) ou módulo de deformação "in situ" (detrito). Para rochas é utilizada uma faixa de valor de resistência à compressão simples;
- (5) faixas de valores propostas pela ISRM (1981);
- (6) relativa à direção de escarificação;
- (7) alteração da parede da descontinuidade;
- (8) relacionável com a resistência à compressão simples e o módulo de elasticidade do material, em um parâmetro denominado índice de rigidez.

A velocidade de ondas sísmicas é fornecida na forma de tabelas por empresas fabricantes de equipamentos, com indicação da potência do trator a ser utilizado para escarificação de um dado maciço.

Essas tabelas, entretanto, apresentam faixas marginais, onde a escarificação é indeterminada. A Figura 4.7 (modificada de Singh et al, 1986), apresenta as faixas marginais segundo diversos fabricantes de equipamentos.

O exame da Figura 4.7 indica que a utilização dessas tabelas não é um método determinante, podendo ocorrer dúvidas onde a velocidade de propagação de ondas sísmicas é maior, entre a utilização de escarificadores ou de explosivos. Esse fato deve-se ao princípio de que os levantamentos de campo através de ondas sísmicas desconsideram a heterogeneidade do meio, obtendo parâmetros médios dos maciços.

Alguns autores ou mesmo entidades, como IPT (1990), recomendam a realização de ensaios nos materiais presentes nessas faixas marginais, que permitam a determinação de um limite confiável entre a utilização de escarificadores e de explosivos. A resistência à tração do material parece ser o parâmetro que melhor reflete os esforços produzidos pela escarificação. Entretanto, é necessário a realização de grande quantidade de ensaios e uma comparação dos resultados com experiências anteriores em maciços já escavados, para que se possam avaliar os resultados obtidos.

Outra observação a ser feita diz respeito à origem dessas tabelas. Como a maior parte das empresas que fabricam equipamentos para escarificação estão sediadas nos Estados Unidos e Europa, são indicados valores da velocidade de ondas sísmicas de levantamentos realizados nesses locais. As condições climáticas são diferentes daquelas reinantes no território brasileiro e, portanto, implicam em outras condições de alteração dos maciços. Esse fato pode deixar dúvidas quanto à aplicação direta dessas tabelas. Além disso, as dúvidas quanto à representatividade da geofísica na caracterização de alguns

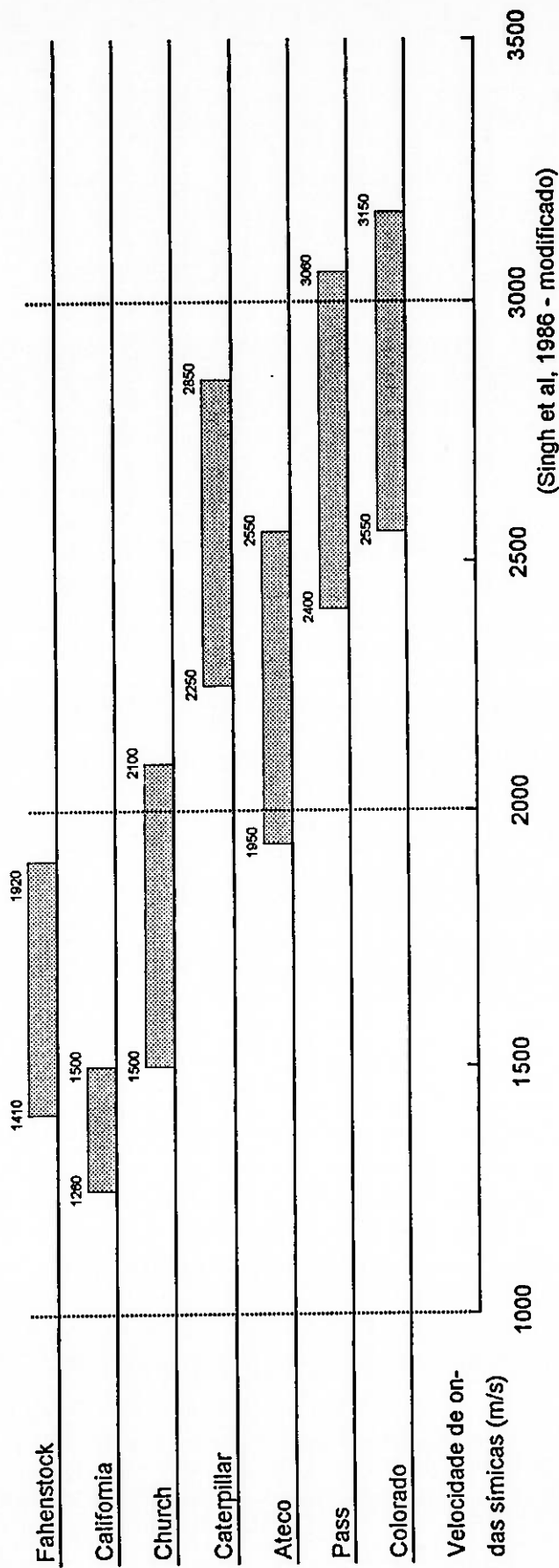


Figura 4.7 - Intervalos de valores de velocidades de ondas sísmicas para materiais de transição

maciços, levou ao desenvolvimento de outros sistemas de classificação quanto a escarificação.

Kirsten (1982) critica o uso da velocidade de ondas sísmicas como método de classificação devido à influência de pequenas feições geológicas na sua determinação e que não teriam efeito significativo na escarificação. Por outro lado, algumas outras características que influenciam a escarificabilidade de um maciço não são bem representadas pela sísmica.

Singh et al (1986) afirmam que a velocidade de ondas sísmicas têm se mostrado como um parâmetro desencaminhante e que a determinação da escarificabilidade do maciço, passa pela compreensão das propriedades físicas e mecânicas dos materiais. A velocidade de ondas sísmicas apresentam valores diferentes, quando definidas para os maiores tratores de diversas companhias, como o D10 da Caterpillar (Figura 4.7).

Os sistemas de classificação abordados neste capítulo são os que mais correlacionam-se com as características do maciços a serem consideradas visando sua escarificação.

A análise das classificações geomecânicas permite afirmar-se que elas consideram basicamente tres características principais dos maciços para análise do comportamento:

- a) Resistência da rocha;
- b) Características e atitude das descontinuidades; e
- c) Presença de água.

Percebe-se que nenhum autor considera a água existente no maciço como um fator relevante. A presença de água, entretanto, pode influir no rendimento do trabalho, à medida que as lagartas do trator perdem aderência ao terreno. Pensando nisso, a Caterpillar desenvolveu tratores com roda motriz elevada, que mantem os dentes e o comando final longe de materiais abrasivos, umidade e carga de impacto, melhorando sensivelmente o rendimento, além

de aumentar a vida útil do equipamento. Além disso, as obras de escavação com uso de escarificador, por localizarem-se na superfície do terreno, permitem o direcionamento da água para fora da praça, melhorando as condições de trabalho.

A análise das características do material rochoso e das descontinuidades, é considerada em todos os sistemas abordados nesse trabalho. A resistência da rocha muitas vezes é referida de forma indireta (através da abrasividade, por Singh et al (1986), p. ex.) ou de forma qualitativa (Weaver, 1975; Smith, 1986). A utilização da resistência à tração como parâmetro para auxiliar na determinação da escarificabilidade, foi sugerida por IPT (1990) como forma de obter-se maior precisão na composição do "Rippability Rating (RR)" de Smith (1986), obtendo-se maior correlação com os esforços mecânicos causados no maciço pela escarificação.

Da mesma forma, as características das descontinuidades do maciço são consideradas de diversas maneiras por todos os autores. Franklin (1970) leva em conta apenas o grau de fraturamento do maciço, ou o comprimento linear médio dos blocos que constituem a massa rochosa. Weaver (op.cit), além do espaçamento, continuidade e abertura, examina a atitude das descontinuidades em relação à direção da escarificação (de forma qualitativa). A classificação de Smith (op.cit), considera os mesmos parâmetros, visto ter sido derivada da proposta de Weaver (op. cit.).

Kirsten (1982) utiliza diversas características das descontinuidades (número de famílias, espaçamento, atitude relativa e rugosidade das paredes), enquanto que Singh et al (op.cit) utiliza somente o espaçamento das descontinuidades na análise do maciço para determinar sua escarificabilidade. Os sistemas de classificação adotam os parâmetros dos maciços considerados, abordando-os de diferentes maneiras. O sistema proposto por Franklin (op.cit) considera o grau de fraturamento do maciço e a resistência à

compressão da rocha, determinada pelo ensaio de carga puntual. Esse sistema, apesar de simples, deve apresentar bons resultados em avaliações expeditas de campo, principalmente em maciços pouco heterogêneos. Maciços com várias famílias de descontinuidades, entretanto, podem levar a avaliações menos confiáveis, através desse sistema.

O sistema de Weaver (1975) recebeu algumas adaptações de Smith (1986), adequando-o a uma análise mais confiável do maciço, com a adoção de valores da resistência da rocha (podendo ser feita a correlação com ensaios de resistência à compressão simples) e análise da velocidade de propagação de ondas sísmicas após a classificação do maciço. Por esse motivo, deve-se dar preferência ao sistema proposto por Smith (op.cit).

A necessidade de utilização de várias tabelas no sistema proposto por Kirsten (1982) e a correlação dos dados obtidos com valores de parâmetros é confusa. Além disso, esse autor sugere a utilização de um parâmetro que relaciona a direção da escarificação com a direção das descontinuidades, mas os exemplos apresentados em seus artigos geralmente consideram o valor 1, portanto sem influência. A análise da Tabela 4.10 mostra que Kirsten (op.cit) só relaciona valores 0° e 180° , considerando um plano ortogonal à direção da escarificação.

Os sistemas de Smith (1986) e Singh et al (1986) são de fácil aplicação, com a vantagem de considerar um número menor de parâmetros a serem analisados. A proposta de Smith (op.cit) tem a vantagem de fazer a comparação da nota atribuída ao maciço, obtido através da análise de seus parâmetros, com a velocidade de ondas sísmicas, o que contribui para diminuir as dúvidas eventualmente existentes. A utilização da velocidade de ondas sísmicas como parâmetro na análise geomecânica de maciços, apesar de controversa, é bastante utilizada, principalmente por empresas fabricantes de equipamentos.

Singh et al (1986) apresentam um estudo extenso da teoria dos esforços mecânicos que o maciço sofre durante a escarificação. Entretanto, o sistema dos autores inclui a realização de ensaios dispendiosos como o índice de abrasividade e a resistência à tração, muitas vezes não realizados nas etapas iniciais de projeto. Pode-se trabalhar com valores estimados, visto tratar-se de faixas de valores, adequando o resultado posteriormente com a realização desses ensaios.

5 CLASSIFICAÇÃO DAS ROCHAS BRANDAS QUANTO À ESCARIFICAÇÃO

Maçiços rochosos de baixa resistência mecânica, constituídos por rochas brandas constituem, atualmente, um campo promissor de estudos para avaliação da escarificabilidade de maciços.

Maçiços com essas características têm sido considerados como um dos novos campos de atuação de geólogos de engenharia e engenheiros. Deere & Vardê (1986) fazem uma síntese dos estudos realizados sobre rochas e maciços brandos, afirmando que o tema tem sido discutido desde 1975, durante a V Conferência Panamericana de Mecânica de Solos e Engenharia de Fundação. Em 1981, foi realizado em Tóquio, o "International Symposium on Weak Rock", oportunidade em que foram apresentados estudos e pesquisas relativas ao conhecimento de rochas e maciços brandos. Durante o "I Congreso Sudamericano de Mecânica de Rocas", realizado em Bogotá (1982) foi dado ênfase ao estudo de rochas brandas, mostrando a preocupação do meio técnico com o comportamento desses materiais. No 5º Congresso Internacional da IAEG (Buenos Aires, 1985), foram apresentados diversos trabalhos relativos ao tema, incluindo o relato de Deere & Vardê (op.cit), sintetizando o conhecimento sobre esses maciços até então.

Mais recentemente (1993), foi realizado o "International Symposium on Hard Soils-Soft Rocks", em Atenas, Grécia, onde foram discutidas a aplicação do conhecimento de rochas e maciços rochosos brandos em taludes, obras subterrâneas, sistemas de classificação, entre outros.

No Brasil, poucos estudos foram realizados até o momento, para melhor conhecimento do comportamento geotécnico de rochas brandas, em comparação com o conhecimento adquirido sobre maciços de rochas de alta

resistência (Soares, 1991). Esse fato deve-se à instalação de obras civis de grande porte em maciços rochosos pré-cambrianos ou efusivas básica, em número maior que em outros maciços. Entretanto abre-se a possibilidade de progressos no conhecimento de rochas brandas, à medida em que as obras sejam contruídas nesses maciços, presentes em boa parte do território brasileiro.

Voltado a esse campo, deve-se ressaltar que a ABGE (Associação Brasileira de Geologia de Engenharia) mantém permanente preocupação na atualização do conhecimento geotécnico sobre o tema, incluindo a instalação de comitê nacional para o estudo de rochas e maciços brandos.

O conhecimento desses materiais assume caráter de grande importância no Brasil, devido à sua ampla distribuição geográfica. Durante a execução de obras nesses maciços, principalmente lineares como ferrovias, rodovias, etc, que implicam em grandes volumes de escavação, a determinação de suas características, pode indicar a escarificação como método mais adequado, implicando em economia substancial no custo.

5.1 - Distribuição e ocorrência de maciços rochosos brandos no Brasil

No Brasil, adquire particular importância o conhecimento das características dos maciços rochosos brandos, devido sua distribuição geográfica bastante extensa.

A Figura 5.1 (Dobereiner, 1990), mostra a distribuição de bacias sedimentares brasileiras, onde são encontrados diversos maciços rochosos brandos. A essas ocorrências devem ser acrescentados como materiais brandos as rochas metamórficas de baixo grau, os maciços presentes em regiões de fraquezas estruturais e os produtos de alteração de rochas duras.

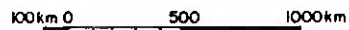
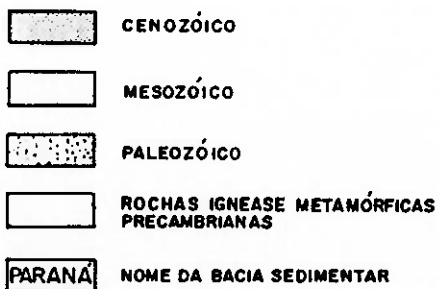
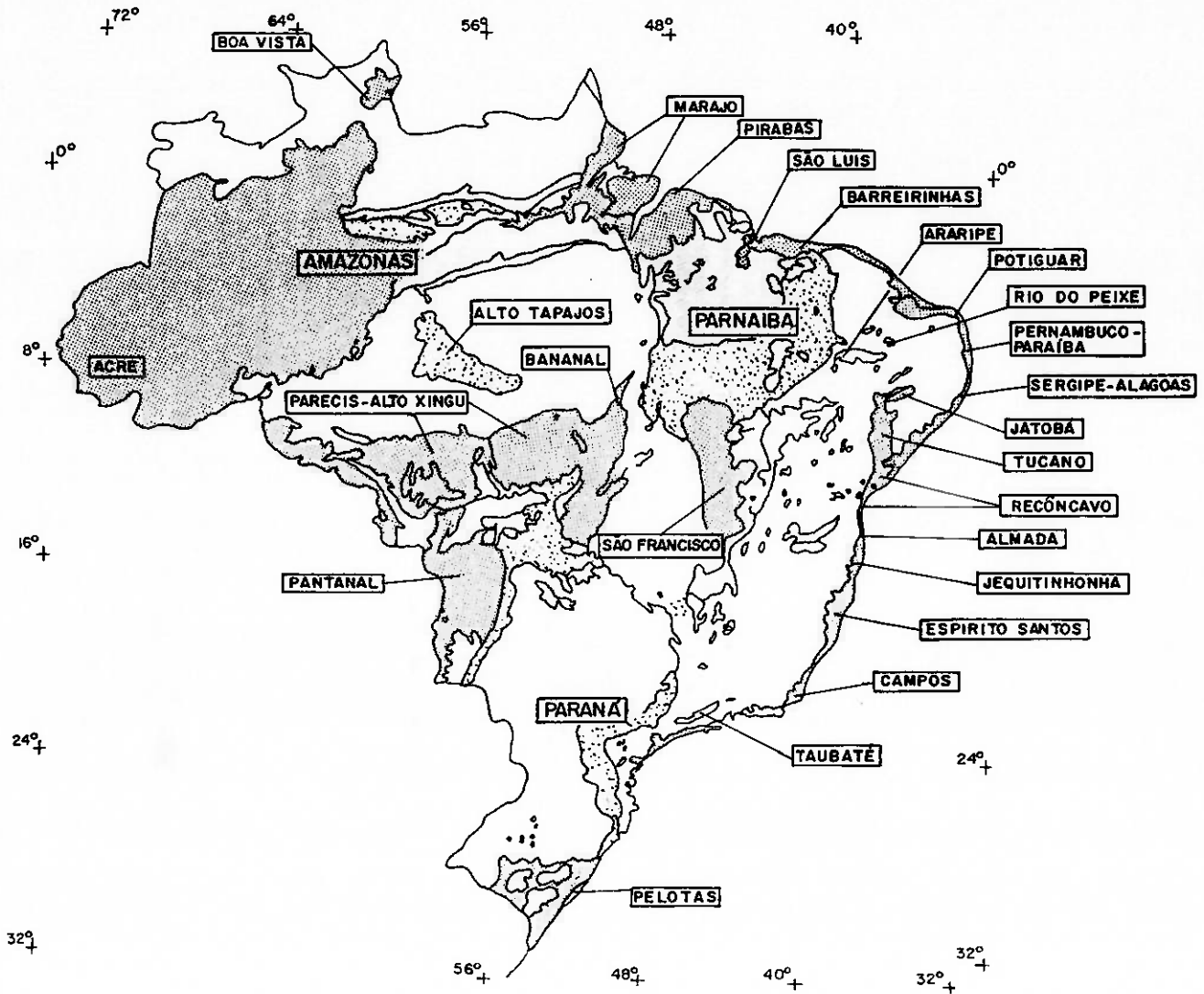


FIGURA 5.1 - DISTRIBUIÇÃO DAS BACIAS SEDIMENTARES BRASILEIRAS

Diversos estudos foram realizados nesses materiais, notadamente em sedimentos da bacia do Paraná, com a implantação de usinas hidroelétricas na região do Pontal do Paranapanema e a partir da construção do canal de Pereira Barreto, em São Paulo. Nos estados do sul - Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul - diversos trechos ferroviários atravessam rochas sedimentares brandas e metamórficas de baixo grau, implicando em estudos para conhecimento de suas características geotécnicas aplicadas à engenharia.

Dobereiner (1990) apresenta as rochas brandas divididas segundo sua ocorrência na bacia sedimentar do Paraná, do Amazonas, do Parnaíba, do Recôncavo (Bahia) e cita, também, as rochas alteradas de maciços ígneos ou metamórficos.

Oliveira & Caruso (1983) fizeram estudos relativos a algumas rochas sedimentares brandas das regiões de Manaus (AM), São Luiz (MA), laterita do Pará e arenito Botucatu.

Estudo bastante completo sobre rochas brandas foi desenvolvido por Campos (1988) que relata estudos geotécnicos sobre rochas sedimentares, principalmente aquelas ocorrentes na Bacia do Paraná.

Soares (1991), desenvolveu um trabalho relacionando a coerência com resistência à compressão simples de rochas brandas, dando ênfase aos estudos realizados por diversos autores sobre rochas brandas.

Mais recentemente, Campos et al (1993) apresentam um resumo de características de rochas brandas estudadas no Brasil.

Com o desenvolvimento do país, haverá necessidade da implantação de obras de grande porte, tornando-se fundamental o conhecimento e a caracterização de maciços brandos, tanto para a realização de obras de terraplenagem, como para emprego desses maciços como materiais de construção. Particularmente, obras ligadas à execução de terraplenagem, como rodovias ferrovias, canais

de navegação, entre outras, implicam em movimentos de grandes volumes de materiais. Os maciços onde serão implantadas essas obras deverão ser bem conhecidos de forma à determinação do método de escavação mais adequado.

5.2 - Critérios de Classificação

Um maciço rochoso é denominado brando quando apresenta uma matriz branda ou devido a fraquezas estruturais (feições, falhamentos, etc) que lhe confere baixa resistência mecânica.

Nóbrega (1985), aborda o conceito de rocha de baixa resistência, considerando que o termo rocha fraca ("weak rock") inclui tanto as que intrinsicamente apresentam baixa resistência, quanto aquelas que perderam ou tiveram diminuída sua resistência original pelo intemperismo ou fraturamento intenso, como, por exemplo, granitos e migmatitos muito fraturados e/ou alterados. Portanto, o termo engloba os materiais de baixa resistência, independentemente da gênese.

Rocha mole ou branda ("soft rock") é designação dada àquelas de baixa resistência, devido aos processos geológicos que lhes deram origem.

Uma grande variedade de tipos de rocha é associada ao termo. As sedimentares, por exemplo, podem incluir argilitos, folhelhos, arenitos friáveis, margas e carvão. Rochas vulcânicas porosas ou porosas e clásticas (tufos, aglomerados, brechas), representam as rochas ígneas. Rochas metamórficas de baixo grau (xistos e filitos, p.ex.), normalmente contendo minerais de baixa resistência (clorita, sericita, grafita, talco) podem ser consideradas brandas.

Embora exista uma diferenciação de termos para designar maciços de baixa resistência, o meio geotécnico brasileiro emprega o termo "brando", independentemente da origem do material.

Existe controvérsia em relação ao estabelecimento dos intervalos de resistência das rochas brandas, uma vez que as propriedades dos materiais naturais variam de forma contínua. Nesse sentido é forçoso reconhecer que a consideração isolada de um único parâmetro, qualquer que seja, será quase sempre insuficiente para definir-se uma rocha branda. Essa tarefa exige a caracterização de um conjunto de propriedades relacionadas ao comportamento mecânico da rocha e do maciço rochoso. Porém, vem prevalecendo no meio geotécnico a prática de utilizar-se a resistência à compressão simples para a inclusão ou não de um material na categoria de rocha de baixa resistência (Nóbrega, 1985).

Os valores de resistência à compressão simples, contudo, não apresentam consenso, entre os diversos autores e entidades que utilizam esse parâmetro, quanto aos limites que indicam sua classificação como rocha branda. A Figura 5.2 (Nobrega, op.cit-modificado), apresenta valores de resistência à compressão simples, propostas por diversos autores e entidades que atuam no campo de mecânica de rochas e da geotecnia. A análise dessa figura indica que as rochas brandas apresentam como limite superior de resistência o intervalo de 15 a 25 MPa, coincidentemente correspondendo à resistência do concreto de qualidade pobre (Deere & Vardé, 1986).

Já o limite inferior é adotado como 1,5 MPa pela IAEG, correspondendo a uma argila de consistência rija, enquanto que a ISRM adota esse limite entre 5 e 6 MPa, correspondente a uma argila de consistência extremamente rija (Deere & Vardé, op. cit.).

A análise desses intervalos de valores de resistência à compressão simples, associados às propostas de vários outros autores (entre eles, ABGE, 1989; Dobereiner, 1990; Soares, 1991) permite a adoção de uma faixa de resistência variando entre 0,5 e 20 MPa.

Obs: cada autor tem denominação própria para os materiais de elevada e de baixa resistência

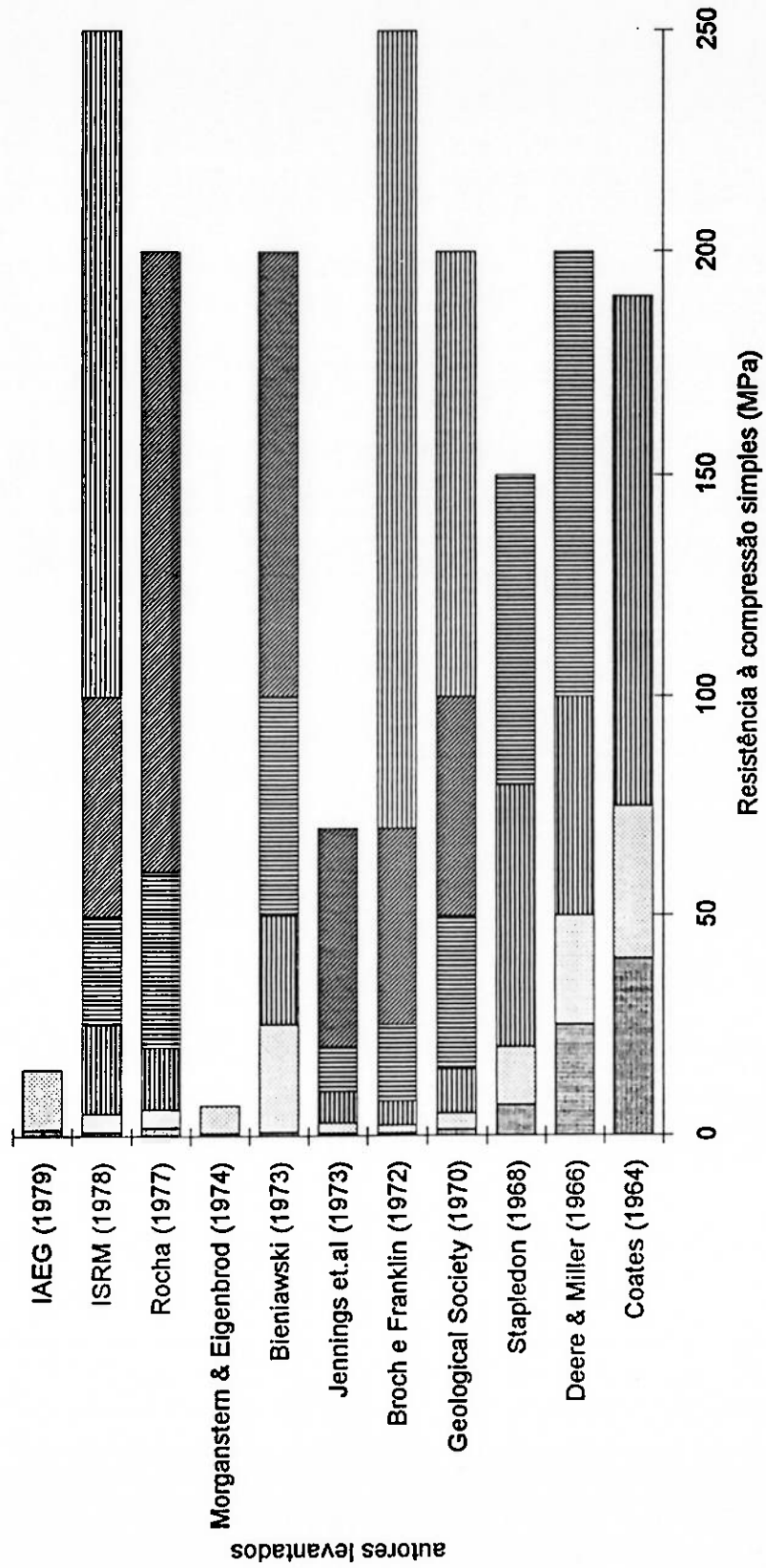


Figura 5.2 - Intervalos de resistência à compressão simples para definição de rochas brandas

O comportamento dos maciços rochosos brandos, entretanto, não depende somente da resistência do material. Dobereiner (1987) discute a influência da textura, mineralogia e umidade no comportamento geotécnico de arenitos brandos. Segundo o autor, a dificuldade de definição das propriedades geotécnicas de maciços brandos, é um dos fatores que influenciam a dificuldade de previsão de seu comportamento em obras de engenharia.

Segundo Deere & Vardé (1986) os problemas de engenharia devem ser entendidos a partir da determinação das propriedades mecânicas do maciço. As propriedades do maciço devem ser determinadas a partir da associação de ensaios "in situ" e de laboratório, combinados com um levantamento geológico-geotécnico detalhado.

No caso específico da escavação em maciços rochosos brandos, o conhecimento da resistência mecânica à penetração do dente do escarificador e à escarificação propriamente dita são determinantes na sua avaliação.

5.3 - Caracterização de maciços brandos

A caracterização de maciços brandos voltada à execução de projetos e obras de engenharia, além das propriedades intrínsecas à rocha, como a resistência mecânica, textura e mineralogia, entre outras, necessita do levantamento das ocorrências e características das discontinuidades, grau de alteração, dentre outros parâmetros.

Os parâmetros de resistência, a despeito da dificuldade de obter-se amostras representativas para execução de ensaios, podem ser estimados a partir de correlação com a coerência, por exemplo (Soares, 1991).

Os ensaios de resistência podem ser realizados com amostragem cuidadosa e bastante extensa de modo a obter-se um valor aproximado, tanto para a resistência à compressão simples, como para a resistência à tração. Podem

ser utilizadas faixas de valores de resistência para parametrizar as características dos maciços.

A determinação das características das discontinuidades, depende basicamente da existência de afloramentos representativos, visto que o espaçamento e as atitudes são mais facilmente determinadas em grandes exposições dos maciços. Pode ser utilizada, também, a técnica de análise da evolução geológico-estrutural da área (Hasui & Mito, 1992), determinando-se as tensões principais de formação do maciço, indicando as principais famílias de discontinuidades e o espaçamento médio estimado entre elas. Por outro lado, as características das discontinuidades em maciços com grande cobertura de solo dependem da utilização de sondagens mecânicas. Neste caso, a caracterização é prejudicada devido à inexistência de técnicas de perfuração adequadas a maciços rochosos brandos. O uso de sondagens com amostragem integral ou do obturador de impressão (Correa F^o & Quadros, 1987) pode levar a resultados mais satisfatórios.

Sugere-se para a caracterização das discontinuidades a adoção dos critérios estabelecidos pela ISRM, já comentados no capítulo 3.

O intemperismo, bastante atuante devido as condições climáticas brasileiras, produz intensa alteração física e química sobre os maciços rochosos, possibilitando o aparecimento de materiais brandos, mesmo originados de rochas de alta resistência.

A determinação do grau de alteração dos maciços rochosos brandos é dificultada pela impossibilidade de acesso ao maciço, em função de espesso manto de intemperismo. Tais informações são geralmente obtidas através de investigações de subsuperfície, de caráter pontual.

Existe dificuldade em discretizar-se os diferentes graus de alteração, principalmente dos termos intermediários, devido sua avaliação qualitativa. A definição de um maciço são ou totalmente alterado, é feita com relativa

facilidade, residindo nos estágios intermediários de alteração (material pouco ou medianamente alterado) as maiores dificuldades de uma classificação criteriosa.

Dearman (1974 e 1976) e Irfan & Dearman (1978) estudaram o comportamento de maciços rochosos alterados, procurando correlacionar a resistência à compressão e o grau de alteração.

Martin (1986) fez uma ampla revisão dos estudos relativos a maciços rochosos alterados. A maioria destes estudos, referem-se a maciços de origem ígnea onde os ensaios para determinação de propriedades geotécnicas para projetos de engenharia apresentam boa correlação para rochas com menor grau de alteração.

Os trabalhos de caracterização criteriosa dos maciços rochosos brandos fundamentam-se na conjugação de informações obtidas em investigações de campo e ensaios de laboratório.

5.3.1 - Investigações de campo

As investigações de campo em maciços brandos, devem ser iniciadas com a interpretação de fotos aéreas, compilação de mapas geológicos, topográficos, geomorfológicos e pedológicos referentes à área de interesse. É fundamental, também, o conhecimento das características de obras similares já realizadas em maciços semelhantes. Essa documentação vai fornecer dados gerais sobre os materiais ocorrentes na região de modo a conhecer-se, de maneira geral, as unidades geológicas e sua distribuição ao longo da área. A análise dos resultados desse levantamento fornece subsídios para um trabalho de mapeamento geológico-geotécnico da área em escala adequada à etapa de projeto. Nesse mapeamento deverão ser levantados dados sobre as litologias, grau de alteração, sua distribuição na área, estruturas regionais e locais,

presença de descontinuidades no maciço e suas características, estratigrafia, ocorrência do nível d'água, etc.

O resultado desses levantamentos, permite a programação de investigações de subsuperfície, indicando os métodos mais adequados e as regiões onde será necessário detalhamento, com maior quantidade de sondagens e ensaios. A finalidade desses trabalhos é obter informações que permitam agrupar os maciços com mesmas características geológico-geotécnicas, onde espera-se comportamento semelhante frente às solicitações da obra a ser executada. Esse agrupamento vai depender do grau de acuidade com que foram determinadas as características do maciço através do levantamento geológico-geotécnico nas diferentes escalas de trabalho, definidas pelas etapas de projeto.

Como dito anteriormente, a dificuldade de acesso às informações do maciço implica na realização de investigações de subsuperfície, através de métodos diretos e indiretos. Os métodos de prospecção de subsuperfície mais comumente empregados são métodos geofísicos e sondagens mecânicas.

Sondagens geofísicas são métodos de investigação indiretos que utilizam a velocidade de propagação e atenuação de ondas sísmicas no maciço. O método compreende a emissão de ondas a partir de uma fonte, posteriormente captadas em geofones. Os dados obtidos são interpretados com base em elementos físicos. A interpretação final dos resultados é auxiliada a partir dos elementos de superfície e/ou sondagens mecânicas.

Constituem-se métodos de investigação bastante rápidos e versáteis, tendo grande aplicação na determinação de características dos maciços, notadamente em investigações de barragens. Necessitam, entretanto, de equipamentos sofisticados para captação de ondas e de técnicos especializados para interpretação dos resultados.

Deve-se alertar, porém, que sondagens geofísicas não tiveram sucesso na compartimentação de maciços rochosos brandos, como comprova a execução do canal de Pereira Barreto, no interior do estado de São Paulo (Pimenta et al, 1981) e as citações de Dobereiner (1987) relativo à usina nuclear do Ferrel e o túnel Castanheira do Ribatejo, ambos em Portugal.

Sondagens a percussão constituem métodos de investigação bastante versáteis, obtendo bons resultados em solos. Sua utilização em maciços brandos, entretanto, não é considerada satisfatória para amostragem e ensaios "in situ" devido à limitação do método em materiais de maior resistência. Tem-se observado que esse método muitas vezes é empregado na definição do limite entre solo e rocha branda. Muitas vezes, para fins de projeto, uma penetração de 50 golpes/30 cm no ensaio SPT pode ser considerado um limite entre solo e rocha branda (Dobereiner, op.cit).

As sondagens a percussão apresentam a vantagem de serem realizadas com equipamentos simples e de fácil manuseio, que podem ser instalados em praticamente qualquer lugar. Apresentam, por isso baixo custo de execução, além de não exigir mão de obra muito especializada. Fornecem amostras semi-deformadas, devido ao sistema de amostragem através de golpes em hastes que contêm o amostrador, sendo pouco recomendadas para ensaios de laboratório.

Métodos de investigações com sondagens rotativasque possibilitam atravessar o maciço rochoso, recuperando testemunhos do material perfurado, através de barriletes amostradores. São executadas com equipamentos de maior porte que os de sondagem a percussão e exigem mão de obra especializada, implicando em custos de execução mais elevados. Por outro lado, quando bem executadas, permitem a observação das condições do maciço, através dos testemunhos recuperados que constituem, também, amostras adequadas à execução de ensaios de laboratório.

Deve-se salientar que a amostragem satisfatória em rochas brandas com o emprego de sondagens rotativas é bastante prejudicada, devido à baixa coerência desses materiais e à presença da água de circulação no processo de perfuração.

Mesmo com utilização de barriletes duplos ou duplos-livres, as sondagens rotativas induzem o aparecimento de fraturas mecânicas acarretando baixa recuperação de testemunhos. Em certos tipos de maciços, os testemunhos recuperados são parte do material de melhor qualidade, nem sempre representativo do maciço. Essas condições prejudicam a descrição do material rochoso e das descontinuidades presentes.

Objetivando aumentar a recuperação desses materiais, o LNEC (Laboratório Nacional de Engenharia Civil) preconiza a utilização da técnica de amostragem integral (Dobereiner, 1987 apud Rocha, 1976). Esse tipo de investigação possui a desvantagem do custo elevado, maior tempo de execução, impregnação das amostras com material que agrega o testemunho, além da necessidade de mão de obra especializada.

Pelo exposto, observa-se que, em princípio, a aplicação de apenas um método de investigação não é suficiente para a caracterização do maciço. O ideal, é a conjugação de dois ou mais métodos que possibilitem a representação, o mais fiel possível, das características geotécnicas presentes.

5.3.2 - Investigações de laboratório

Uma das dificuldades na obtenção de propriedades índices dos maciços rochosos brandos, deve-se à baixa qualidade e pequena representatividade das amostras do maciço.

Outra dificuldade refere-se à inexistência de técnicas e métodos de ensaios voltados especificamente para as rochas brandas sendo utilizados, como

alternativa, os procedimentos usuais de ensaios da mecânica de solos e da mecânica das rochas.

Durante a mesa redonda "Aspectos Geotécnicos de Rochas Sedimentares" (ABGE, 1983), Frazão mostrou a importância de serem adotadas metodologias específicas para a caracterização das propriedades de rochas sedimentares. Os valores de resistência dessas rochas, constituem-nas material intermediário entre a mecânica dos solos e a mecânica das rochas.

Campos (1988), recomenda que sejam analisadas as taxas de carregamento em ensaios de compressão simples (muito altas, para materiais brandos); a abrasão e o desgaste em níveis de sollicitação menos rigorosos; ensaios de desagregabilidade que reflitam as condições ambientais e uma maior atenção aos fatores petrográficos que influenciam as propriedades geotécnicas (imbricamento, relação matriz/grãos minerais, grau de cimentação, natureza do cimento, etc).

Campos (op.cit) comenta, ainda, as dificuldades de obtenção de corpos de prova com dimensões ideais, perfeitamente regulares e isentos de rugosidade em materiais brandos, como são preconizadas nas normas de ensaios de compressão uniaxial, triaxial e diametral.

Dobereiner (1987) discute os resultados de ensaios de compressão puntiforme realizados sobre amostra de arenitos brandos, concluindo tratar-se de um método pouco eficiente devido a grande dispersão de resultados. Com relação ao ensaio "slake durability", salienta o autor não ter obtido boas correlações entre os resultados e o comportamento geotécnico previsto dos maciços para arenitos brandos. O autor salienta que a determinação da umidade de saturação é interessante, de modo a proceder-se a ensaios de amostras de rocha em condições semelhantes, homogeneizando os corpos de prova em termos de umidade.

O grau de coerência, parâmetro determinado manualmente por profissionais do meio geotécnico brasileiro, é amplamente empregado sobre rochas brandas. Este índice reflete a dificuldade de quebra da adesão recíproca entre os grãos constituintes de uma rocha ou entre grãos e o material cimentante (Soares, 1991). O autor propõe que esse parâmetro seja determinado, através do emprego de um equipamento para padronização de ensaio. O grau de coerência obtido nesse ensaio foi correlacionado com índices físicos, dureza esclerométrica "shore", velocidade de propagação de ondas sísmicas, resistência à compressão simples, "slake durability" e com a coerência determinada visualmente. O autor propõe quatro classes de coerência (C1 a C4), correlacionáveis com a resistência à compressão simples, como indicado na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Valores dos níveis de coerência e de resistência à compressão simples

Símbolo	valor de C (g) ⁽¹⁾	σ_c (MPa)
C1	< 0.1	> 20
C2	0.1 - 0.4	20 - 10
C3	0.4 - 1.4	10 - 5
C4	> 1.4	< 5

(Soares, 1991)

(1) C = valor da coerência obtido em ensaio de laboratório

Observa-se que não existem procedimentos de ensaios aceitos universalmente no meio técnico para determinação das características dos maciços brandos, utilizando-se, atualmente, vários tipos de ensaio.

Deve-se ter em mente que em trabalhos de caracterização geomecânica de rochas de baixa resistência é necessário prudência quanto à escolha e interpretação dos ensaios a serem realizados, visto que eles baseiam-se no pressuposto de corpos homogêneos, contínuos, isotrópicos e elásticos, distinto do que observa-se na natureza (Nóbrega, 1985).

5.4 - Parâmetros a serem utilizados

Conforme discutido anteriormente, observa-se que a classificação de maciços rochosos brandos resente-se de resultados de ensaios confiáveis e de uma caracterização bem feita, devido ao pequeno desenvolvimento de técnicas específicas para investigação nesse tipo de maciço. Por outro lado, vários parâmetros são definidos somente de forma descritiva, sem quantificação.

Analisando-se os parâmetros geotécnicos requeridos para a classificação dos maciços quanto à escarificabilidade (Tabela 4.20), percebe-se que não existe um consenso sobre os parâmetros mais adequados a serem utilizados em maciços rochosos brandos, principalmente em rochas sedimentares. A tabela permite observar que são empregados diferentes parâmetros pelos diversos autores abordados neste trabalho.

A Tabela 5.2 sumariza os parâmetros requeridos por esses sistemas de classificação, indicando a dificuldade de obtenção desses dados, devido às peculiaridades dos maciços brandos. São feitas algumas observações sobre esses parâmetros, sua representatividade na caracterização dos maciços brandos, bem como uma estimativa de frequência de utilização nos sistemas de classificação abordados.

Tabela 5.2 - Parâmetros a serem empregados na avaliação da escarificabilidade de rochas brandas

Parâmetro	obtenção	observações	representatividade	utilização
velocidade de ondas sísmicas	fácil	não determina heterogeneidades do maciço	média	alta
resistência à compressão simples	fácil	depende da representatividade da amostra	alta	alta
resistência à tração	fácil		alta	baixa
espaçamento das descontinuidades	média	depende de afloramentos representativos do maciço; difícil determinação em investigações de subsuperfície	alta	alta
número de famílias de descontinuidades	fácil		alta	média
persistência das descontinuidades	difícil		média	baixa
atitude das descontinuidades	fácil		alta	média
abertura das descontinuidades	média		média	baixa
rugosidade das descontinuidades	média		média	baixa
RQD	fácil	não definido para rocha alterada	baixa	baixa
grau de alteração	difícil	parâmetro qualitativo	média	média
abrasividade	fácil	utilizado principalmente na avaliação do desgaste dos equipamentos	alta	baixa

A análise da Tabela 5.2, indica que os parâmetros que são facilmente obtidos, geralmente possuem bastante representatividade na caracterização dos maciços brandos. Observa-se, contudo, que esses parâmetros nem sempre apresentam alta frequência de utilização nos sistemas de classificação quanto à escarificabilidade.

A velocidade de ondas sísmicas é um parâmetro facilmente obtido, sendo largamente empregado na avaliação de maciços quanto à escarificabilidade. A representatividade desse parâmetro, entretanto, é média uma vez que não indica as heterogeneidades do maciço que podem influenciar a escavação em termos do método empregado e do rendimento. Além disso, o meio técnico não

aceita a aplicação de métodos geofísicos como parâmetro único na classificação geomecânica dos maciços, associando essa informação com outros parâmetros geotécnicos.

A resistência à compressão simples do material é um parâmetro de fácil obtenção, necessitando cuidados somente com a representatividade das amostras ensaiadas em cada compartimento do maciço. É um parâmetro bastante utilizado na avaliação dos maciços, algumas vezes de forma indireta, como no sistema de Singh et al (1986), onde é correlacionado com a abrasividade. Mostra representatividade elevada e sua utilização está relacionada principalmente com os esforços de penetração do dente do escarificador no maciço e resistência do material a romper pela rocha ao invés de pelas descontinuidades.

A resistência à tração, apesar de sua pequena utilização nos sistemas abordados, apresenta uma relação muito grande com os esforços causados pelo escarificador no maciço. O IPT (1990) considera que a determinação da resistência à tração da rocha poderia auxiliar a determinação da escarificabilidade, principalmente em faixas marginais de velocidades de ondas sísmicas (entre a utilização de escarificação ou escavação à fogo como método de escavação). Portanto, a representatividade desse parâmetro na avaliação do maciço quanto à escarificabilidade é alta.

As descontinuidades diminuem a resistência do maciço e aumentam sua deformabilidade, conferindo uma geometria por onde blocos de rocha seriam mais facilmente desalojados durante a escarificação. Suas características são melhor determinadas em afloramentos de rocha, havendo dificuldade em sondagens rotativas.

A avaliação das descontinuidades é fundamental devido à ocorrência de ruptura do maciço, preferencialmente por esses planos. A menor ou maior facilidade com que essa ruptura ocorrerá e o tamanho dos blocos originados

no processo de escarificação, irá depender da associação de várias características das descontinuidades ocorrentes. A obtenção dessas informações, geralmente é média a fácil, dependendo da ocorrência de afloramentos representativos e/ou da qualidade de amostragem em sondagens rotativas.

O espaçamento das descontinuidades define a distância média entre fraturas sucessivas, indicando a facilidade de ocorrência de planos de fraqueza por onde o maciço irá romper-se durante a escarificação e o tamanho dos blocos formados a serem removidos.

O número de famílias de descontinuidades vai indicar a "aparência" do maciço rochoso, à medida que fornece um padrão de ocorrência dos planos no material rochoso. Essa característica é muito importante, à medida que indica se a ruptura através da escarificação do maciço ocorrerá pelo material rochoso ou pelas descontinuidades. Maciços com somente uma família, como é o caso de vários tipos de rochas sedimentares que apresentam somente uma descontinuidade indicando a interrupção de um ciclo da sedimentação, vai apresentar escarificação difícil. A penetração do dente no maciço e os blocos de rocha a serem removidos deverão romper o material rochoso.

O espaçamento e número de famílias determinam o tamanho médio dos blocos e, conseqüentemente a facilidade de desagregação do maciço e sua remoção através da escarificação. Têm, portanto, representatividade elevada, sendo bastante utilizadas nas classificações abordadas.

A persistência é uma característica que avalia a extensão do plano da descontinuidade, informando sua extensão no maciço. Essa característica indica a facilidade de ocorrência de um determinado plano no maciço, por onde pode se dar a ruptura durante a escarificação. Entretanto, é difícil de ser determinada, mesmo em afloramentos do maciço, apresentando, portanto, representatividade média, sendo pouco utilizada.

Atitude indica a posição de ocorrência das discontinuidades em relação à superfície do terreno e, portanto, do plano de escarificação. Atitudes localizadas em posição favorável à penetração do dente do escarificador e dos esforços causados para ruptura do maciço indicarão a facilidade de escarificação do maciço. Esse parâmetro é de fácil determinação, bastando o levantamento em afloramentos do maciço com bússola de geólogo ou a avaliação estrutural da área. Em investigações de subsuperfície, necessitam de orientação dos testemunhos a serem amostrados. Sua representatividade é elevada.

A abertura indica o afastamento das paredes das discontinuidades, indicando a facilidade de penetração do dente do escarificador em maciços muito resistentes. Em rochas de baixa resistência, esse parâmetro é menos representativo, visto que o dente do escarificador geralmente rompe o maciço durante a penetração. A obtenção do parâmetro depende da existência de afloramentos representativos, podendo ocorrer enganos em região de alívio de tensões, onde as discontinuidades geralmente encontram-se abertas

A rugosidade das paredes das discontinuidades representa a facilidade que o bloco de rocha tem de deslizar sobre o plano de ruptura. A obtenção desse parâmetro pode ser enganosa em materiais de baixa resistência, visto que o parâmetro é avaliado de forma qualitativa através do tato.

Do mesmo modo que a abertura, parece ter maior importância na avaliação de maciços constituídos por material rochoso de elevada resistência. A representatividade desses parâmetros, portanto é média.

O RQD (índice de qualidade de rocha) é um parâmetro determinado somente a partir da realização de sondagens rotativas, definindo-se a porcentagem de testemunhos maiores que 10 cm recuperados em cada manobra. Esse índice foi definido para sondagens com diâmetro Nx e não é definido para materiais alterados, o que pode dificultar sua obtenção. A determinação desse

parâmetro depende muito da qualidade da sondagem realizada, tendo média representatividade na determinação da escarificabilidade de maciços. A avaliação das descontinuidades parece dispensar a avaliação do RQD de um maciço.

O grau de alteração de maciços brandos é de difícil determinação em maciços brandos, principalmente rochas sedimentares, visto ser determinado de forma qualitativa. No caso de obter-se um afloramento onde ocorram os diversos graus de alteração do maciço, essa avaliação fica facilitada pela possibilidade de comparação. Esse parâmetro, portanto, é de difícil obtenção e sua representatividade é média na avaliação dos maciços brandos.

A abrasividade é um parâmetro que está ligado mais a avaliação de desgaste dos equipamentos durante a escarificação que propriamente à determinação da possibilidade do uso de escarificadores no maciço. Desta maneira, tem representatividade alta, visto ser um parâmetro importante na avaliação da economicidade do método a ser empregado. Esse parâmetro, entretanto, é pouco utilizado nos sistemas de classificação abordados.

A classificação proposta pela Caterpillar, através da comparação de velocidades de ondas sísmicas na forma de tabelas com a potência dos tratores, apesar da facilidade de obtenção dos dados, apresenta certa resistência do meio técnico, devido à existência de faixas de velocidades onde o método de escavação é indeterminado. Além disso, a utilização de velocidades de ondas sísmicas para classificação geotécnica de maciços para uso em projetos de engenharia, ainda é controversa.

A utilização da rugosidade das descontinuidades e do RQD no sistema de classificação proposto por Kirsten (1982), parâmetros difíceis de serem determinados em maciços rochosos brandos, parece indicá-lo como o sistema menos adequado à análise desse tipo de maciço quanto à escarificação.

A avaliação dos parâmetros das descontinuidades, parece indicá-lo para análise de maciços rochosos de alta resistência mecânica, onde o escarificador faz esforços para desalojar os blocos do maciço, definidos pelas descontinuidades. Além disso, a avaliação da direção relativa da descontinuidade em relação à escarificação não é muito clara.

A classificação proposta por Weaver (1975) é bastante interessante, a medida que leva em conta características dos maciços obtidas com certa facilidade em maciços brandos e que têm relação com os esforços causados na rocha durante a escarificação. Esse sistema, entretanto, foi reavaliado por Smith (1986), que utiliza a análise dos parâmetros do maciço, comparando-a, posteriormente, com a velocidade de ondas sísmicas. Esse procedimento, elimina a velocidade de ondas sísmicas como parâmetro de entrada na classificação, diminuindo dúvidas quanto a sua aplicabilidade. Além disso, Smith (op.cit) apresenta valores de resistência à compressão simples, avaliada de maneira qualitativa no sistema de Weaver (op.cit).

O IPT (1990) aplicou o sistema de classificação proposto por Smith (op.cit) em rochas brandas da Bacia do Paraná, durante a duplicação da Rodovia Sorocaba-Campinas (SP-79 e SP-101). Foram ensaiados arenitos, argilitos e siltitos, obtendo-se bons resultados com a utilização de análise estatística dos resultados de ensaios de laboratório de mecânica das rochas e aplicação de sondagem sísmica de alta resolução ("cross hole").

O sistema de classificação utilizado (Smith, op.cit) apresentou-se bastante adequado a esse tipo de maciço, mostrando boa correlação com os resultados dos serviços de terraplenagem executados.

O sistema proposto por Singh et al (1986) utiliza critérios de avaliação dos maciços utilizando resultados de ensaios de resistência à tração, não utilizados por nenhum dos outros autores estudados, por considerarem essa característica ligada aos esforços feitos pelo escarificador na rocha. A

avaliação desse parâmetro implica na realização de ensaios em número suficiente que diminua dúvidas quanto ao seu valor, da mesma forma que em ensaios de resistência à compressão simples.

Nesse sentido, a classificação proposta por Singh et al (1986) parece ser interessante, por levar em conta esse parâmetro. A abrasividade da rocha é outro parâmetro considerado pelos autores, bastante ligado à caracterização de maciços rochosos brandos. Esse parâmetro pode ser obtido a partir da correlação com os resultados de resistência à compressão simples ou de forma descritiva, através da avaliação da porcentagem de minerais duros presentes na rocha. Não foram encontradas na bibliografia, entretanto, citações sobre a aplicação desse sistema de classificação em obras realizadas no território nacional, necessitando-se de dados práticos para verificação de sua validade.

6 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

A escarificação é um método que apresenta menor custo e menores restrições ambientais que explosivos, devido à utilização de equipamentos mecânicos para escavação de maciços. O progresso no desenvolvimento desses equipamentos implicou na ampliação da possibilidade de seu uso, ressaltando a importância de determinar-se os maciços onde podem apresentar bom rendimento. O fator econômico, nesse caso, vai determinar o método de escavação mais adequado.

As normas ou especificações de escavação existentes dividem os materiais em tres categorias de escavação, conforme o método utilizado. Entretanto, não fornecem subsídios para a determinação do método de escavação mais adequado. Os maciços a serem escavados com métodos e equipamentos convencionais (1ª categoria) ou com explosivos (3ª categoria), são mais fáceis de determinar-se do que aqueles cujo uso de escarificadores é mais adequado, intermediário entre os outros dois.

O método de escavação mais adequado depende do custo da operação e das características geológico-geotécnicas do maciço.

Existe uma dificuldade muito grande para composição dos custos, visto que cada obra tem condições peculiares a serem avaliadas durante a fase do projeto e que cada órgão tem seu caderno de encargos e o preço final é dado segundo essa composição.

A análise dos condicionantes geológico-geotécnicos do maciço depende dos esforços causados pelo escarificador: penetração do dente e arraste do escarificador pelo trator. Esse mecanismo causa esforços de compressão durante a penetração do dente no maciço e compressão aliada à tração, durante sua escarificação, fazendo com que a análise das características da

litologia e das discontinuidades sejam bastante importantes. A avaliação das condições hidrogeológicas é menos importante, visto tratar-se de escavação próxima ao terreno, propiciando o disciplinamento das águas presentes.

As características litológicas mais importantes são aquelas que influenciam a resistência mecânica do maciço, desde a origem (ígnea, sedimentar ou metamórfica), constituição mineralógica, textura, estrutura, entre outras. Nesse sentido, torna-se importante a determinação do grau de alteração da rocha, por implicar em variação da resistência das litologias.

As discontinuidades presentes no material rochoso vão influenciar seu comportamento geomecânico, à medida que constituem-se planos de fraqueza, preferenciais ao rompimento do maciço. Devem ser consideradas segundo sua gênese (falhas, fraturas, xistosidade, p.ex.) e determinadas suas características, sugerindo-se para tanto o uso de diretrizes preconizadas pela ISRM (1978).

A classificação deve ser feita segundo as características dos maciços levantadas em investigações de campo e laboratório, avaliadas em um sistema que permita sua avaliação segundo os esforços causados pelo escarificador.

A velocidade de propagação de ondas sísmicas constitui-se uma das ferramentas mais utilizadas para determinação do método de escavação mais adequado. Amplamente utilizadas pelas empresas fabricantes de equipamentos, são relacionadas, na forma de tabelas, com a potência dos tratores e a litologia presente. Apresentam, entretanto, uma faixa de velocidades onde o método de escavação é indeterminado, entre o uso de escarificadores ou de explosivos. Além disso, sua utilização na determinação do comportamento geomecânico de maciços é bastante controversa, por não indicar características peculiares de certas regiões do maciço.

A necessidade de agrupar, diferenciar e hierarquizar os maciços rochosos de acordo com seu comportamento geomecânico, definindo suas regiões peculiares, resultou na implementação de sistemas de classificação. Os sistemas mais utilizados e divulgados foram desenvolvidos por Bieniawski

(1974) e Barton et al (1974). Sua aplicação direta na avaliação do uso de escarificação em maciços (Abdulatif & Cruden, 1983) não apresentou resultados satisfatórios, por terem sido desenvolvidos para escavações subterrâneas.

Outros autores fizeram modificações nesses sistemas, desprezando a avaliação de fatores ligados diretamente a obras subterrâneas, como a água de subsuperfície e estado de tensões, e acrescentando a análise do grau de alteração, velocidade de ondas sísmicas e atitude de descontinuidades em relação à direção de operação do escarificador. Esses sistemas de classificação começaram a ser aplicados com sucesso na determinação do método de escavação a ser utilizado.

Os materiais presentes, de transição entre os solos de alteração e o maciço rochoso e os maciços constituídos por litologias de baixa resistência mecânica, constituem em campo promissor para aplicação desses sistemas. Esses materiais apresentam tendência de rompimento através do material rochoso, além de pelas descontinuidades, o que facilitaria sua escarificação, diminuindo, por outro lado, o rendimento no uso de explosivos.

No Brasil, possuem ampla distribuição geográfica, estando associados aos maciços rochosos sedimentares, metamórficos de baixo grau e vulcânicos porosos, além dos materiais de alteração de rochas de elevada resistência mecânica. Esses maciços são designados pelo meio geotécnico brasileiro como rocha branda, classificados, atualmente, com base na sua resistência mecânica, entre 0,5 e 20 MPa.

A aplicação das classificações nesses maciços, entretanto, apresenta dificuldades devido à inexistência de normas de execução de sondagens e ensaios, adequadas às suas características. Por outro lado, certos parâmetros de entrada para classificação, como o RQD ou o grau de alteração, são de difícil determinação em maciços brandos.

Apesar de todas as classificações analisarem as características das litologias e das descontinuidades, algumas delas apresentam-se mais relacionadas com os

parâmetros representativos de maciços brandos e com o mecanismo de escarificação.

O sistema proposto por Smith (1986) levanta características bastante relacionadas com os esforços de escarificação, comparadas, após sua avaliação paramétrica, com a velocidade de ondas sísmicas. Esse procedimento elimina as dúvidas quanto à utilização das ondas sísmicas como parâmetro de classificação, além de poder balizar o resultado da análise com tabelas frequentemente utilizadas por fabricantes de equipamentos.

Singh et al (1986) avaliam a abrasividade, bastante relacionada com o desgaste de equipamentos e a resistência à tração do material, parâmetro bastante ligado aos esforços causados pelo escarificador no maciço. Essas duas características não são avaliadas em outras classificações consultadas tendo, entretanto, alta representatividade na avaliação dos maciços.

Sugere-se que a análise de um maciço para determinação de sua escarificabilidade seja feita por pelo menos dois sistemas de classificação. A vantagem da aplicação de mais de uma classificação é a possibilidade de comparação dos resultados obtidos, dirimindo dúvidas. No caso específico de maciços constituídos por rochas brandas, as classificações de Smith (op.cit) e Singh et al (op.cit) parecem ser as mais adequadas.

As discussões feitas nesse trabalho carecem, entretanto, de comprovação prática, a partir da aplicação dos sistemas de classificação aqui apresentados. Todos os sistemas abordados foram levantados a partir de literatura internacional, inclusive os exemplos de aplicação. Com exceção da classificação de Smith (op.cit), aplicada por IPT (1990), o autor não tem conhecimento de nenhum outro trabalho com aplicação desses sistemas em maciços ocorrentes no território nacional.

As peculiaridades dos maciços rochosos brasileiros precisam ser devidamente levantadas, confirmando ou adaptando os sistemas de classificação para determinação da escarificabilidade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABDULLATIF, O.M. & CRUDEN, D.M. "The relationship between rock mass quality and ease of excavation". **Bulletin of the International Association of Engineering Geology IAEG/AIGI**. 28:183-187. December 1983.
- ADAM, B.O. "To rip or not to rip?" **Coal Mining and Processing**, 20(2): 22-25. February 1983.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE MECÂNICA DOS SOLOS, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA, COMITÊ BRASILEIRO DE MECÂNICA DE ROCHAS Bibliografia da Geotecnia no Brasil (1976-1985). São Paulo, ABMS/ABGE/CBMR, 1986.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA Resultado da mesa redonda sobre rochas brandas e/ou sedimentares. **Jornal da ABGE**. São Paulo. p. 3-7, abril/junho 1989.
- ATKINSON, T. "Ground preparation by ripping in open pit mining". **Mining Magazine** 122 (6): 458-469, June/1970.
- AZEM, J.; BOTELHO Jr., A.A. & CARDOSO Jr., J.F. "Classificação de materiais de escavação". **Boletim do DER**, São Paulo 17(62):29-32, jan-mar 1951.
- BAILLOT, R.T.; SOARES, J.C.; LUCAS, M. & COUTO E.A. "Classificação geomecânica tentativa de maciços rochosos". In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA, 1, Rio de Janeiro, 1976. **Anais**. Rio de Janeiro, ABGE, v.2, p. 295-301.
- BAQUELIN, F. "Discussion: design parameters in geotechnical engineering". In: European Conference on Soil Mechanics 7, Brighton, 1980. **Proceedings ...**, Brighton, v.4, p.63-94.
- BARTON, N.; LIEN, R. & LUNDE, J. "Engineering Classification of Rock Masses for the Design of Tunnel Support". **Rock Mechanics**, vol. 6(4): 189-236, 1974.
- BIENIAWSKI, Z.T. "Estimating the strength of rock materials". **Mining and Metallurgy** 74 (8): 312-320. 1974.

- BIENIAWSKI, Z.T. "Geomechanics classification of rock masses and its application in tunneling". In: INTERNATIONAL CONGRESS OF ROCK MECHANICS, 3, Denver, 1974. **Proceedings...** Denver, ISRM, vol 2A, p. 27-32.
- BIENIAWSKI, Z. T. **Engineering Rock Mass Classifications. A complete manual for engineers and geologists in mining, civil and petroleum engineering.** New York, John Wiley and Sons ed. 251 p. 1989.
- BURITY, F.D. "Classificação dos materiais de escavação" **Construção**, Rio de Janeiro, 6 (67): 24-25. Novembro 1962.
- CAMPOS, J.O. (coord.) **Primeiro Relato do Comitê de Estudos Geotécnicos de Rochas Sedimentares.** São Paulo, Associação Brasileira de Geologia de Engenharia. Artigo Técnico 15. São Paulo, 1988.
- CAMPOS, J.O.; PARAGUASSU, A.B.; DOBEREINER, L.; SOARES, L. & FRAZÃO, E.B. "The geotechnical behaviour of brazilian sedimentary rocks". Trabalho a ser apresentado no "International Symposium on Hard Soils-Soft Rocks", Atenas, Grécia. Setembro/1993 (no prelo).
- CARVALHO, W.S. "Escarificações". **Revista Minérios e Metais** 2 (4): 16-25. 1972.
- CATERPILLAR BRASIL S.A. **Técnicas de operação-técnicas de escarificação.** São Paulo 13 p. 1984.
- CATERPILLAR BRASIL S.A. **Manual de produção Caterpillar.** São Paulo 252 p. 1987.
- CHEVASSU, G. - "Prevision par sismique-refraction de la distribution de l'alteration et du mode de terrassement en site granitique". In: INTERNATIONAL CONGRESS OF THE INTERNATIONAL ASSOCIATION OF ENGINEERING GEOLOGY, 3, Madrid, 1978. **Proceedings ...** Madrid, IAEG, v.1, sec. 4, p. 116-128.
- CHUNG, K.Y.C. "A case history study of engineering properties of soft rocks". In: U.S. SYMPOSIUM ON ROCK MECHANICS, 28th, Tucson, 1987. **Proceedings...** Tucson, p.291-303.
- CHURCH, H.K. "Seismic exploration yields data on excavation costs and methods". **Engineering News Record**, 12 p.62-66, august 1965.
- CHURCH, H.K. Fragmentation of rock. Chapter 11, p. 11.1 - 11.22. In: "Excavation Handbook". Mc Graw Hill Book Company. 1024 p. 1981.

COOK, N.G.W. Analysis of hard rock cuttability for machines . Chapt. 5, p. 38-54. In: "Rapid Excavation, Problems and Progress". Ed D.H. Yardley. AIME (New York). 409 p. 1970.

CORRÊA F^o., D. & QUADROS, E.F. de "Instrumento auxiliar de interpretação do comportamento hidrogeotécnico de maciços rochosos - obturador de impressão". In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA, 5, São Paulo, 1987. Anais... São Paulo, ABGE, v.1, p. 283-294.

COTTIS, G.I., DOWELL, R.W. & FRANKLIN, J.A. "A rock classification system applied in civil engineering". *Civil Engineering and Public Works Review*. June 1971 p. 611-614 e July 1971 p. 737-743.

DARCY, J. "Applications de la mécanique des roches aux terrassements rocheux". *Bulletin de Liaison Laboratoire de Pont et Chaussée* (50): 81-103, janv-fév 1971 - Journées du comité français de mécanique des roches. Mai 1970.

DEARMAN, W.R. "Weathering classification in the characterization of rock for engineering purposes in British practice". *Bulletin of the International Association of Engineering Geology* 9: 33-42. 1974.

DEARMAN, W.R. "Weathering classification in the characterization of rock: a revision". *Bulletin of the International Association of Engineering Geology* 13: 123-127. 1976.

DEERE, D.U. & DEERE, D.W. - "The rock quality designation (RQD) index in practice" In: SYMPOSIUM ON ROCK CLASSIFICATION SYSTEMS FOR ENGINEERING PURPOSES, 1987. ASTM Special Technical Publication 984. Kirkaldie, Ed. Philadelphia. p. 91-101. 1988.

DEERE, D.U. & VARDÉ, D. "Engineering geological problems related to foundations and excavations in weak rocks". In: INTERNATIONAL CONGRESS OF THE INTERNATIONAL ASSOCIATION OF ENGINEERING GEOLOGY, 5, Buenos Aires, 1986. *Proceedings ...Rotterdam, IAEG*, v. 8 p. 2503-2518. General Report.

DOBEREINER, L. "Geotecnia de arenitos brandos". Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, São Paulo. Síntese de Tese n.8. 52p. 1987.

DOBEREINER, L. "Weak rocks in Brazil". *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*. 42:21-30. 1990.

FISHER, S. "Drills, rippers carve solid rock channel". *C M & Engineer*. p.92-95, march 1972.

- FRANKLIN, J.A. "Observations and tests for engineering descriptions and map rocks". In: INTERNATIONAL CONGRESS OF ROCK MECHANICS, 2, Belgrado, 1970. *Proceedings...*, Belgrado. Vol 1, paper 1-3.
- GAUD, P. "A propos de rippabilité". *Bulletin de Liaison Laboratoire de Pont et Chaussée*, 19: D-8, mai-jun. 1966.
- GOMES, R.C. "Classificações geomecânicas de maciços rochosos". Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos. Publicação 060/91. 37 p. 1991.
- GRIPP, M.F.A. "Fatores geomecânicos na seleção de equipamentos". In: CONGRESSO ÍTALO-BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE MINAS, 2, São Paulo, 1993. *Anais...* São Paulo, vol 1, p.315-329.
- GUIDICINI, G.; NIEBLE, C.M. & CORNIDES, A.T. "Análise do método de compressão puntiforme em fragmentos irregulares na caracterização geotécnica preliminar de rochas". In: SEMANA PAULISTA DE GEOLOGIA APLICADA, 4, São Paulo, 1972. *Anais...* São Paulo, APGA, tema 3, p. 237-274.
- GUIDICINI, G.; OLIVEIRA, S.; CAMARGO, F.P. & KAJI, N. - "Um método de classificação geotécnica preliminar de meios rochosos". In: SEMANA PAULISTA DE GEOLOGIA APLICADA, 4, São Paulo, 1972. *Anais...* São Paulo, APGA, tema 3, p. 275-283.
- GUIDICINI, G. "Levantamento bibliográfico da geotecnia e engenharia geotécnica no Brasil (1920-1975)". São Paulo, ABGE, 1976.
- HASUI, Y. & MIOTO, J.A. *Geologia estrutural aplicada*. São Paulo, Associação Brasileira de Geologia de Engenharia: Votorantim, 1992.
- HOEK, E. "Quando um projeto de engenharia da rocha é aceitável?" Trabalho apresentado no 7º Congresso Internacional de Mecânica das Rochas, Aachen, 1991. Tradução de Marcelo Pucci. *Publicação Interna da Figueiredo Ferraz - Consultoria e Engenharia de Projeto Ltda*. 1992.
- HUGHES, H.M. "Some aspects of rock machining". *International Journal Rock Mechanics and Mining Science* vol. 9, p. 205-211, 1972.
- HUSSON, B. & DOUARD, J.Y. "Rippabilité des gres vosgiens". *Bulletin de Liaison Laboratoire de Pont et Chaussée* (28): 3.15-3.20, nov-dec. 1967.
- INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO - IPT S/A Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo. Vol. I Série Monografias, 6. 1981.

- INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO
- IPT S/A Escarificabilidade. In: Levantamento de sísmica (refração e reflexão), batimetria e topografia na região dos reservatórios Edgard de Souza e Pirapora, em áreas de interesse à implantação do canal de retificação do rio Tietê e zonas de influência - Santana de Parnaíba - SP. São Paulo, IPT. Relatório N. 20949. Vol 1, p. 87-91. 1988.
- INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO
- IPT S/A "Utilização de ensaios geofísicos e de mecânica de rochas na definição de metodologia de estudo para a previsão de escarificabilidade de materiais". São Paulo, IPT. Relatório N. 28723. 51p. 1990.
- IRFAN, T.Y. & DEARMAN, W.R. "Engineering classification and index properties of a weathered granite". *Bulletin of the International Association of Engineering Geology* 17:79-90. June 1978.
- ISMAIL, M.A.; GOZON, J.S. & ZHANG, W.H. "Investigation of the cutting force with different face configuration in quarries". In: U.S. SYMPOSIUM ON ROCK MECHANICS, 28th, Tucson, 1987. *Proceedings...* Tucson, p. 981-988.
- JACKSON, D. "Rip Instead of drilling and blasting". *Coal Age* 84 (8): 64-70. August 1979.
- KIRSTEN, H.A.D. "A classification system for excavation in natural material". *Civil Engineer in South Africa* 24 (7): 293-308. July 1982.
- KIRSTEN, H.A.D. "Cases histories of groundmass characterization for excavatability". In: SYMPOSIUM ON ROCK CLASSIFICATION SYSTEMS FOR ENGINEERING PURPOSES, 1987. *ASTM Special Technical Publication* 984. Kirkaldie, Ed. Philadelphia. p. 102-120. 1988.
- KOSHIMA, A. **Estudos geotécnicos em materiais brandos - caso de um arenito do Grupo Bauru cortado por um canal.** São Paulo, 1982. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- MARTIN, R.P. "Use of index test for engineering assessment of weathered rocks". In: INTERNATIONAL CONGRESS OF THE INTERNATIONAL ASSOCIATION OF ENGINEERING GEOLOGY, 5, Buenos Aires, 1986. *Proceedings...* Rotterdam, IAEG, v.2 p. 433-450.
- MEYER, V.F.B. & LESSA, G. "A utilização de métodos geofísicos para a determinação do grau de escarificação de maciços rochosos". In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA, 2, São Paulo, 1978. *Anais...* São Paulo, ABGE, v.2, p. 31-46.

- MONTICELI, J.J. "Influência de compartimentação geológico-geotécnica de maciços rochosos no projeto de fundações de barragens - fase de viabilidade". Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, São Paulo. Síntese de Tese n. 6 .114 p. 1986.
- NAKAMURA, J.; NAKAJIMA, M. & AKANUMA, S. "Hydrofracturing techniques applicable to rock excavation". In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON WEAK ROCK. Tokio, 1981. *Proceedings...* Tokio, vol. 2, th. 4, p. 1087-1092.
- NIEBLE, C.M. & FRANCIS, F.O. "Classificação de maciços rochosos". In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA, 1, Rio de Janeiro, 1976. *Anais...* Rio de Janeiro, ABGE, v.2, p. 379-411.
- NÓBREGA, C.A. Considerações sobre a caracterização da resistência e deformabilidade em rochas de baixa resistência através de ensaios de laboratório e "in situ". São Carlos. 106 p. Dissertação de Mestrado apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Geotecnia. 1985.
- OJIMA, L.M. Metodologia de classificação de maciços aplicável a túneis. Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, São Paulo. Síntese de Tese n. 1. 103 p. 1982.
- OLIVEIRA, J.E. & CARUSO, L.G. "Contribuição ao conhecimento atual de características tecnológicas de rochas sedimentares em alguns estados brasileiros". In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA, 3, Itapema. *Anais...* São Paulo, ABGE, 1981. V.3 p.221-223.
- PIMENTA, C.; BERTOLUCCI, J.C.F. & LOZANO, M.H. "Escavação experimental em arenito Bauru". In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA, 3, Itapema, 1981. *Anais...* São Paulo, ABGE, v.3, p. 255-266.
- PRIEST, S.D. & HUDSON, J.A. "Discontinuity spacing in rock". *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, 13, p.135-148. 1976.
- ROCHA, M. da Alguns problemas relativos à mecânica das rochas dos materiais de baixa resistência. Lisboa LNEC. *Geotecnia* (18): 3-27, nov/dez 1976.
- ROUSSIN, M. - "A new tool for rock excavation - The Caterpillar D9L impact ripper". In: U.S. SYMPOSIUM ON ROCK MECHANICS, 28th, Tucson, 1987. *Proceedings...* Tucson, p. 989-997.

- SAKAI, S.; NAGASAKA, Y. & FUJITA, H. "Relationship between some characteristics of soft rocks and non-blast cutting method". In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON WEAK ROCK. Tokio, 1981. **Proceedings...** Tokio, vol. 2, th. 4, p. 1081-1086.
- SAVELY, J.P. "A comparison of rippability with shear strength of a boulder conglomerate". In: U.S. SYMPOSIUM ON ROCK MECHANICS, 28th, Tucson, 1987. **Proceedings...** Tucson, p. 927-934.
- SCHMIDT, R.L.; ENGELMANN, W.H. & FUMANTI, R.R. "A comparison of borer, ripper and conventional mining products". USBM Report Investigation, 7687. 1972.
- SCHMIDT, R.L. "Can giant rippers replace blasting?". **New Civil Engineer**, p.16- . March 1978.
- SCHMIDT, R.L. "Ripping: tools, techniques and applications". **New Civil Engineer** (35): 1, 13-16, January, 1983.
- SIDRER, P. "Engineering problems in estimating quantity of bedrock to be removed in estimating cost of highway construction jobs". The Geological Society of America - Engineering Geology Cases Histories. v.1, n.1, p. 39-41. Parker Trask and George A. Kiersch, Editors. 1964.
- SILVA, R.F. "Ensaio de escarificabilidade em arenito Bauru de alta resistência". In: SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS, 7, Rio de Janeiro, 1971. **Anais...** Rio de Janeiro, CBGB, v.2, tema 1, p. 11.
- SINGH, R.N.; DENBY, B. & EGRETLI, E. "Assessment of ground rippability in opencast mining operations". University of Nottingham. **Mining Magazine**, 38, p. 21-34, 1986.
- SINGH, R.N.; DENBY, B. & EGRETLI, E. "Development of a new rippability index for coal measures excavations". In: U.S. SYMPOSIUM ON ROCK MECHANICS, 28th, Tucson, 1987. **Proceedings...** Tucson, p. 935-943.
- SMITH, H. J. "Estimating rippability by rock mass classification". In: SYMPOSIUM ON ROCK MECHANICS, Tusca Loosa, 1986. **Proceedings...**AIME, New York, A1, cap. 64, p. 443-448.
- SMITH, H.J. - "Estimating the mechanical dredgeability of rock". In: U.S. SYMPOSIUM ON ROCK MECHANICS, 28th, Tucson, 1987. **Proceedings...** Tucson, p. 945-952.
- SOARES, L. **Determinação do grau de coerência de rochas brandas.** São Carlos, 1991. Tese (doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Geotecnia, Universidade de São Paulo.

- TAMMERIK, G.R. "Escarificação e mecânica das rochas". São Paulo 17 p. Seminário apresentado na disciplina PMI-723 - Mecânica das Rochas Aplicada à Mineração I, na obtenção do título de mestre pela EPUSP. 1989.
- TAMMERIK, G.R. "Escarificação". São Carlos 18 p. Seminário apresentado na disciplina SGS813 - Mecânica das Rochas, na obtenção do título de mestre pela EPUSP. 1991.
- WEAVER, J.M. "Geological factor significant in the assessment of rippability". *Civil Engineer in South Africa* 17 (12):313-316. Dec 1975.
- WEST, T.R. & LUDWIG, N.G. "Estudo quantitativo de texturas relacionado à resistência das rochas". In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA, 1, Rio de Janeiro, 1976. *Anais...* Rio de Janeiro, ABGE, v.2, p. 231-244.
- YOSHIDA, R. *Contribuição ao estudo de materiais rochosos*. São Paulo, 1972. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo.

BIBLIOGRAFIA RECOMENDADA

- ABDULATIF, O.M. Correlation between strength and fracture spacing of rocks and ease of excavation. Msc. Thesis, Queen Mary College, University of London. p. 61-53, 103-114. 1982.**
- ABRAHÃO, R. A. "Metodologia para interpretação de testemunhos orientados". São Paulo, Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, 1985. Artigo Técnico n 9.**
- ANON "The description of rock masses for engineering purposes". *Quaterly Journal of Engineering Geology* 10(4):355-388.1977.**
- ATKINSON, T.; CASSAPI, V.B. & SINGH, R.N. Assesment of abrasive wear resistance potential in rock excavating machinery. *Internacional Journal of Mining Engineering*, 3, 151-163, July 1986.**
- ATKINSON, T.; DENBY, B. & CASSAPI, V.B. Problems associated with rock material properties in surface mining equipment selection. In: *MINING EQUIPMENT SELECTION SYMPOSIUM*. Nov 1985. The University of Calgary, Canada. *Proceedings*. p 8.1-30.**
- DEERE, D.U. & MULLER, R.P. "Engineering classification and index properties for intact rocks". *Air Force Weagons Laboratory Technical Report N. AFWL-TR-65116*. Kirtland, New Mexico. 1966.**
- DUBBE, R.E. A fundamental study of prediction of rock rippability. M.Sc. Thesis, Duke University. 75 p. 1974.**
- EVANS, I & POMEROY, C.D. "Strength, fracture and workability of coal". Pergamon Press, Chapter 13, p236-258. 1966.**
- FITES, D.V. "Application of rippers in mining". *Society of Mining Engineers. Transactions*. June, 1968: p. 170-173.**
- HIGNETT, H.J. "The current state-of-art of rock cutting and dredging". *Miscellaneous Paper GL-84-17*, U.S. Army Engineer Waterways Experimation Station Corps of Engineers, Vidksburg, MS. 1984.**
- HORACE, K. & CHURCH, C.E. Soft rock versus hard rock: new look at ripping cost. *Roads and Streets*, oct, p. 58-61. 1970.**

- HORACE, K. & CHURCH, C.E. Ripping costs: a new look. **Roads and Streets**, nov, p. 74-78. 1974.
- McCANN, D.M.; BARIA, R.; JACKSON, P.D. & GREEN, A.S.P. "Application of cross-hole seismic measurements in site investigation surveys". **Geophysics**, 51 (4): 1986.
- ONODERA, T.F. "Dynamic Investigation of foundation rock in situ". In: SYMPOSIUM OF ROCK MECHANICS, 5, Minnesota, 1963. **Proceedings... Minesota**, v. p.
- READ, J.R.L.; THORNTON, P.N. & REGAN, W.M. A rational approach to point load test. In: AUSTRALIA NEW ZEALAND CONFERENCE ON GEOTECHNICS, 3rd, Wellington, 1980. **Proceedings**, part 2 p 35-39.
- SINGH, R.N.; DENBY, B.; EGRETTI, I. & PATHON, A.G. "Assessment of ground rippability in opencast mining operations". **Min. Dept. Mag. Univ. Nottingham** 38, p.21-34, 1986.
- SJOGREN, B.; OFSTHUS, A. & SANDBERG, J. "Seismic classification of rock mass qualities". **Geophysical Prospecting** 27: 409-440.
- U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS "Rock mass classification data requirements for rippability". **Engineering Technical Letter ETL 1110-2-282**. 30 June 1983.