

Materiais de Escavação: Definições, Incertezas e Estudo de Caso.

Yan Lucas de Oliveira Pereira dos Santos

VOGBR Recursos Hídricos e Geotecnia, Belo Horizonte, Brasil, ysantos@vogbr.com.br

Glauber Rezende Freire

F&Z Consultoria e Projetos, Belo Horizonte, Brasil, grezendefreire@gmail.com

Alberto Ferreira Amaral Junior

VOGBR Recursos Hídricos e Geotecnia, Belo Horizonte, Brasil, aamaral@vogbr.com.br

Paulo Goulart Gontijo

VOGBR Recursos Hídricos e Geotecnia, Belo Horizonte, Brasil, pgontijo@vogbr.com.br

Fábio Soares Magalhães

VOGBR Recursos Hídricos e Geotecnia, Belo Horizonte, Brasil, fmagalhaes@vogbr.com.br

Ângelo Almeida Zenóbio

F&Z Consultoria e Projetos, Belo Horizonte, Brasil, azenobio@fzprojetos.com.br

RESUMO: Este trabalho tem por objetivo discutir os métodos, as classificações e as incertezas para a definição das categorias de escavação de materiais de 1ª, 2ª e 3ª, uma vez que a determinação destas categorias define os equipamentos a serem utilizados e, conseqüentemente, o custo da obra. No presente trabalho apresenta-se também um estudo de caso onde se realizou a definição dos volumes de material para cada categoria de escavação com a utilização de investigações geotécnicas em uma área de aproximadamente 170.000 m² para implantação de uma estrutura de contenção de rejeitos denominada *pond*. A partir da definição dos limites das categorias em cada furo foram geradas superfícies de interpolação pelo método estatístico da krigagem utilizando o *software* Surfer®. Como a região estudada está inserida em uma região de rochas metassedimentares com estratos subhorizontais, esperava-se um comportamento de topo rochoso mais regular subparalelo à estratificação. Contudo, após as escavações verificou-se que este comportamento não foi identificado, o que gerou divergências entre o modelo gerado pelo *software* e a realidade encontrada na obra.

PALAVRAS-CHAVE: Escavação, Categoria, Geofísica.

1 INTRODUÇÃO

Os métodos e as classificações para a definição das categorias de escavação de materiais de 1ª, 2ª e 3ª vêm sendo discutidos há muito tempo e carece na literatura uma definição amplamente aceita, principalmente por não haver nenhuma que se aplique a todo e a qualquer maciço. Durante o desenvolvimento de um projeto que

inclui escavações de maior porte é de grande importância um modelo de superfícies de categoria de escavação que seja o mais próximo possível da realidade, pois dele serão definidos os equipamentos necessários e conseqüentemente os custos para a escavação.

Ao longo dos anos e ainda hoje, as categoriais de escavação muita das vezes são definidas segundo a experiência do profissional,

o que confere à classificação, de certo modo, a aplicação de critérios subjetivos, por exemplo, o emprego de expressões como: “material escarificável situa-se no limite entre o impenetrável ao trépano e o impenetrável à lavagem no ensaio SPT” (Tammerik, 1994).

Segundo este autor, os sistemas de classificação utilizados para determinar o material como de 2ª categoria de escavação e, portanto, escarificável, não são aceitos universalmente, por não apresentarem bons resultados em todo o 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 execução da obra. Esse sistema deve permitir a escolha do método de escavação mais econômico e dos equipamentos mais adequados à obra em questão.

Ricardo e Catalani (2007), por exemplo, definem que para a determinação de materiais de 2ª categoria de escavação, sejam utilizados equipamentos com mais de 250 HP, ou seja, tratores pesados como D8, D9 e D10 (classe dos CAT). Essa variação na potência dos equipamentos mostra que mesmo dentro de uma mesma categoria existe certa variação de resistência.

Atualmente a aplicação de métodos indiretos, como os geofísicos, previamente a realização de sondagens diretas, tem apresentado bons resultados quanto ao limite vertical estimado para determinar as categorias de escavação. O método geofísico que vem sendo bastante utilizado em grandes obras, onde uma previsão inadequada acarretaria em prejuízos da ordem de milhões, é o da sísmica de refração onde se pode correlacionar à velocidade de onda em cada camada, de solo ou rocha, à categoria de escavação.

Alguns métodos e classificações para determinar as categorias de escavação serão abordados no item a seguir.

2 METODOLOGIAS EXISTENTES

Alguns autores, como Tammerik (1994) sugerem a utilização de tabelas de propagação

de ondas sísmicas para a classificação de maciços quanto à escarificabilidade, devido à facilidade de aplicação e de obtenção de resultados em campo.

A velocidade de ondas sísmicas é um método indireto de investigação para maciços rochosos. A velocidade com que a onda P se propaga no meio depende de algumas propriedades físicas, como por exemplo, rigidez, grau de saturação, densidade e do grau de homogeneidade das rochas. O método de refração sísmica mede o tempo que uma onda compressional (onda P) ou cisalhante (onda S), gerada por uma fonte sísmica (marreta, explosivo, queda de peso, etc.), leva para viajar através das camadas geológicas e retornar aos sensores (geofones) instalados ao longo de uma linha na superfície do terreno (Figura 1). Essa velocidade de propagação pode ser diretamente correlacionada com as características do maciço quanto à categoria de escavação.

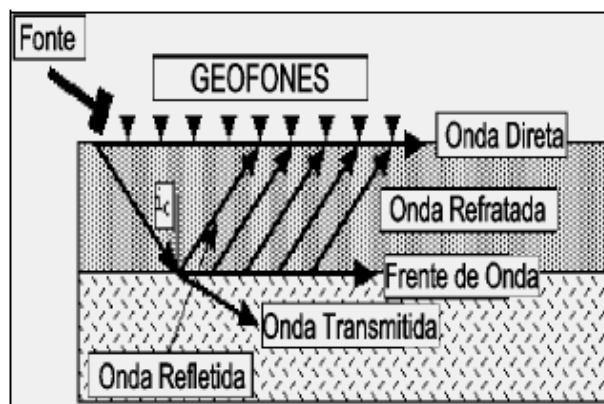


Figura 1. Esquema ilustrativo do princípio da refração sísmica.

Algumas empresas que fabricam os equipamentos para escarificação elaboraram tabelas com base na velocidade de propagação de ondas sísmicas correlacionando-a com a potência e os rendimentos dos tratores. Um bom exemplo dessas tabelas é a da empresa Caterpillar, citado pelo DER (1996), vide Figura 2.

Outros autores como Church (1965), Darcy (1970), e Chevassu (1978) apresentam trabalhos onde utilizam a velocidade de propagação de ondas sísmicas para determinação de materiais escarificáveis.

Tammerik (1994) afirma que 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 de propagação onde a escarificação é indeterminada. Ou seja, existe uma faixa onde é indeterminado se material é escarificável ou se será necessário à utilização de explosivos. As próprias empresas fabricantes de equipamentos apresentam tabelas (vide Figura 2) com faixas onde a escarificação é indeterminada.

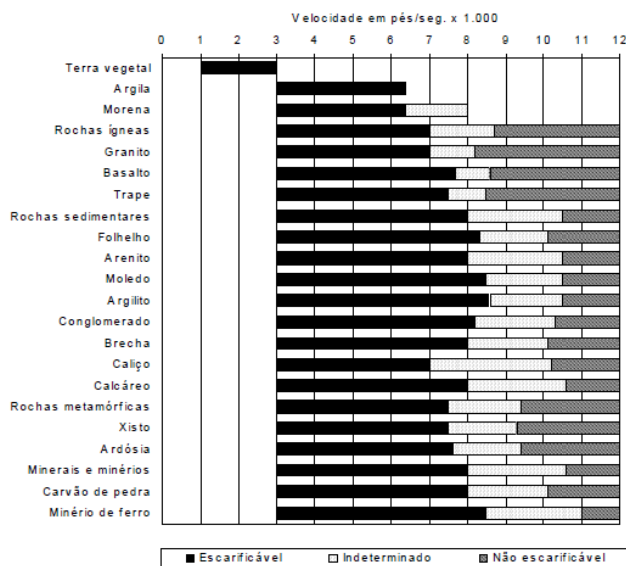


Figura 2. Exemplo de tabela do desempenho Caterpillar do escarificador DH9 segundo a velocidade de propagação sísmica (Departamento de Estradas e Rodagem – DER, 1996).

Esse fato fez com que outros métodos de classificação para determinar as categorias de escavação fossem criados, levando em consideração os parâmetros geomecânicos do maciço a ser escavado, tais como: resistência à compressão simples, resistência à tração, grau de alteração, espaçamento das discontinuidades, RQD e etc.

Dentre esses métodos destaca-se a classificação de Weaver (1975) que elaborou um sistema de escarificabilidade baseado na proposta de Bieniawski (1974). Weaver (*op.cit*) não considerou o RQD (*Rock Quality Designation*) e a rugosidade das discontinuidades como parâmetros de classificação. Ele acrescentou a velocidade de propagação de ondas sísmicas e o grau de

alteração da rocha como parâmetros de classificação, além de atribuir notas positivas ao contrário de Bieniawski (1974) que estabelece notas negativas no parâmetro de atitude das discontinuidades. A dureza da rocha é avaliada apenas de maneira descritiva não se adotando intervalos de valores de resistência à compressão simples (MPa), diferente do sistema de Bieniawski (1974).

A classificação de Weaver (1975) apresenta cinco classes sendo indicado o tipo de escavação e os equipamentos a serem utilizados para cada classe.

Kirsten (1982) elaborou um sistema de avaliação da escavabilidade dos maciços (desde solos até rocha dura) baseando-se no sistema de classificação Q proposto por Barton *et al.* (1974) para maciços rochosos. Kirsten (*op.cit*) elaborou a seguinte expressão:

$$N = Ms \left(\frac{RQD}{J_n} \right) Js \left(\frac{J_r}{J_a} \right) \quad (1)$$

Onde:

N = valor da nota atribuída ao maciço que indica a classe de escavação;

Ms = resistência ao maciço;

RQD = *Rock Quality Designation*;

Jn = índice do número de famílias de descontinuidade;

Js = índice da direção relativa das descontinuidades principais em relação à direção de escarificação;

Jr = índice de rugosidade das descontinuidades;

Ja = índice de alteração das paredes das descontinuidades.

Nota-se que Kirsten (1982) modificou a expressão de Barton adicionando os índices Ms e Js e eliminando os parâmetros de avaliação de água superficial (Jw) e de tensão do maciço (SRF). A partir da determinação do valor N define-se a classificação dos maciços quanto à escavabilidade. Essa classificação é composta por nove classes sendo indicados a categoria de escavação e os equipamentos a serem utilizados para classe.

Outro método que se destaca é a classificação de Smith (1986) que modificou o sistema de classificação de Weaver (1975) omitindo o parâmetro de velocidade de ondas

sísmicas e introduzindo intervalos de valores de resistência (MPa) no parâmetro de dureza da rocha. A somatória das notas de avaliação do maciço determina o índice denominado RR (“*rippability rating*”). Esse valor é transposto para um ábaco onde é correlacionado com as velocidades de ondas sísmicas e indicado os equipamentos mais adequados para realizar a escarificação (Figura 3).

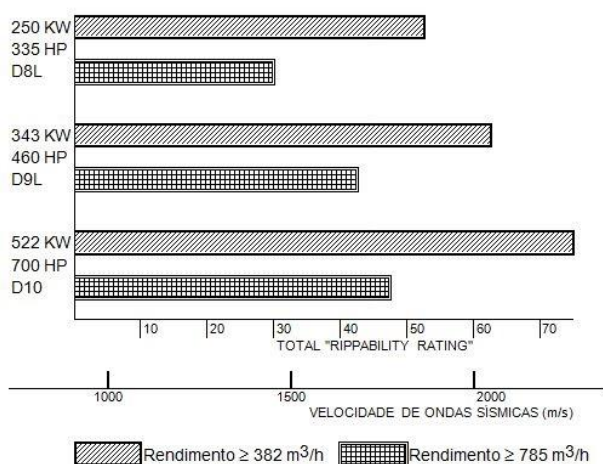


Figura 3. Correlação entre o RR (“*rippability rating*”), a velocidade de ondas sísmicas e o trator indicado para escarificação (Tammerik 1994, modificado de Smith 1996).

Independente se os métodos para a classificação de maciços quanto à escarificação utilizam somente velocidade de propagação de ondas sísmicas, ou se utilizam parâmetros geomecânicos, sempre haverá um grau de incerteza, sendo que todos os sistemas de classificação apresentados nesse item possuem vantagens e desvantagens.

3 ESTUDO DE CASO

3.1 Caracterização Geológica

Na região do estudo de caso apresentado neste artigo afloram as rochas do Grupo Bambuí, caracterizado como uma espessa sequência de rochas sedimentares e metassedimentares de baixo grau metamórfico (pelitos) que cobre uma grande área nos Estados de Minas Gerais, Goiás e Bahia. Constitui a principal unidade litoestratigráfica neoproterozóica de cobertura

do Cráton do São Francisco (Alkmim *et al.*, 1993).

A subdivisão litoestratigráfica mais comum para esse Grupo compreende, de acordo com Dardenne (1978), da base para o topo, a Formações Sete Lagoas, Serra de Santa Helena, Lagoa do Jacaré, Serra da Saudade e Três Marias, já tradicionais na literatura geológica sobre o Grupo Bambuí. A este conjunto acrescenta-se a unidade estratigráfica informal que aflora no setor ocidental do Grupo Bambuí: a unidade Samburá.

Como mencionado, anteriormente, as rochas do Grupo Bambuí compõem uma bacia sedimentar que é classificada como de baixo grau de deformação, tendo como estruturas principais o acamamento e as fraturas. Esse acamamento na região de estudo se apresenta com mergulhos subhorizontais, situação muito comum em bacias desse tipo.

3.2 Materiais e Métodos

O Estudo de caso consistiu na definição da estimativa dos volumes dos materiais de 1ª, 2ª e 3ª categoria de escavação para uma estrutura de contenção de rejeitos denominada *pond*. Essa estrutura abrange uma área de aproximadamente 170.000 m², na qual foram realizadas algumas investigações geológico-geotécnicas, sendo seis sondagens mistas e uma sondagem a percussão. A Figura 4 apresenta um mapa esquemático com a distribuição dessas investigações e a Tabela 1 apresenta as profundidades executadas.

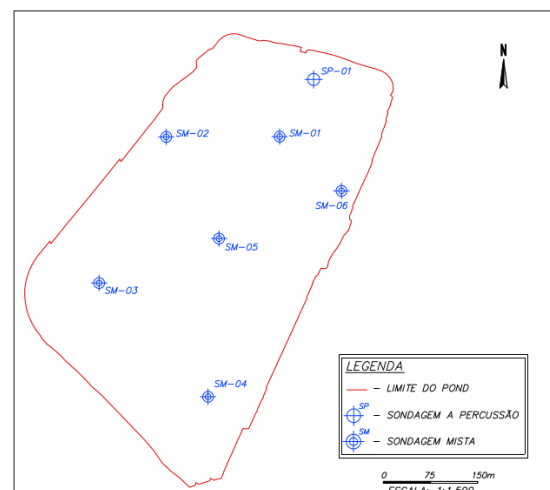


Figura 4. Localização das investigações geotécnicas.

Tabela 1. Resumo das Investigações Executadas.

Sondagem	Profundidade Executada (m)
SP-01	13,05
SM-01	19,50
SM-02	15,45
SM-03	23,04
SM-04	17,53
SM-05	16,72
SM-06	18,10

Para a definição das espessuras dos materiais, classificando-os por categoria de escavação, os autores elaboraram um critério com base nos valores de Nspt (referente ao número de golpes nos 30 cm finais) do ensaio SPT (*Standart Penetration Test*) para os solos e nos parâmetros de consistência (C), alteração (A) e fraturamento (F) para os testemunhos de sondagem (rocha). Para a definição dos parâmetros geotécnicos de rocha utilizou-se os critérios da Norma NBR 6502 (ABNT, 1995).

Os critérios para definição de 1ª, 2ª e 3ª categoria de escavação foram:

- **1ª Categoria:** Materiais com valores de Nspt até 40 golpes, incluindo solos transportados (coluviões, aluviões e etc.) e solo residuais maduros e jovens (saprolitos).
- **2ª Categoria:** Materiais com valores de Nspt acima de 40 até 50 golpes (impenetrável) para saprolitos e para rochas apresentando as seguintes características: extremamente alterada a medianamente alterada (A5/A3), sem consistência a medianamente consistente (C5/C3) e extremamente fraturada a medianamente fraturada (F5/F3).
- **3ª Categoria:** Rocha sã a medianamente alterada (A1/A3), medianamente consistente a muito consistente (C3/C1) e pouco fraturada a ocasionalmente fraturada (F2/F1).

Após a definição dos critérios, todas as investigações geológico-geotécnicas foram descritas com base nesses critérios e definidas as espessuras para cada uma das categorias de

escavação. A Tabela 2 apresenta as espessuras identificadas para cada uma das investigações.

Tabela 2 – Espessuras das diferentes categorias de materiais de escavação.

Sondagem	Espessura (m) material de 1ª Categoria	Espessura (m) material de 2ª Categoria	Profundidade (m) material de 3ª Categoria
SP-01	6,00	7,05	-
SM-01	5,00	7,00	12,00
SM-02	8,06	3,01	11,07
SM-03	7,12	7,26	13,50
SM-04	9,10	5,61	14,71
SM-05	8,00	1,35	9,35
SM-06	6,12	3,18	9,30

Com o objetivo de definir os volumes dos materiais de 1ª, 2ª e 3ª categoria de escavação foi utilizado o *software* Surfer 9.0 que possibilita gerar superfícies através da interpolação de pontos por meio de métodos estatísticos, sendo utilizado o método da “krigagem”.

Depois de geradas as superfícies no *software* foram possíveis definir os volumes de escavação para 1ª, 2ª e 3ª categorias, sendo, consequentemente, esses volumes utilizados para a previsão do custo da obra através das planilhas de quantidade elaboradas na fase do projeto detalhado.

3.2 Resultados

Após a definição dos volumes dos materiais, considerando suas respectivas categorias, a obra para a escavação do *pond* foi iniciada. Entretanto, após a etapa de escavação de fundação constatou-se uma divergência entre os volumes das categorias dos materiais encontrados na obra e os volumes estimados com base nas superfícies interpoladas a partir das investigações geológico-geotécnicas (definido em projeto).

Para os volumes dos materiais de 1ª categoria não houve diferenças entre o volume estimado e o encontrado. As diferenças ocorreram para os volumes dos materiais de 2ª e 3ª categoria. O volume do material de 3ª categoria encontrado foi bem superior ao definido em projeto, impactando assim no custo

da obra.

Durante a execução da escavação do *pond* foi cadastrada em campo a superfície topográfica do material de 3ª categoria. Com base nesse cadastro foi possível comparar a superfície encontrada em campo com a

superfície elaborada com base nas investigações geológico-geotécnicas. Na Figura 5 é apresentada uma seção onde é possível comparar as divergências mencionadas.

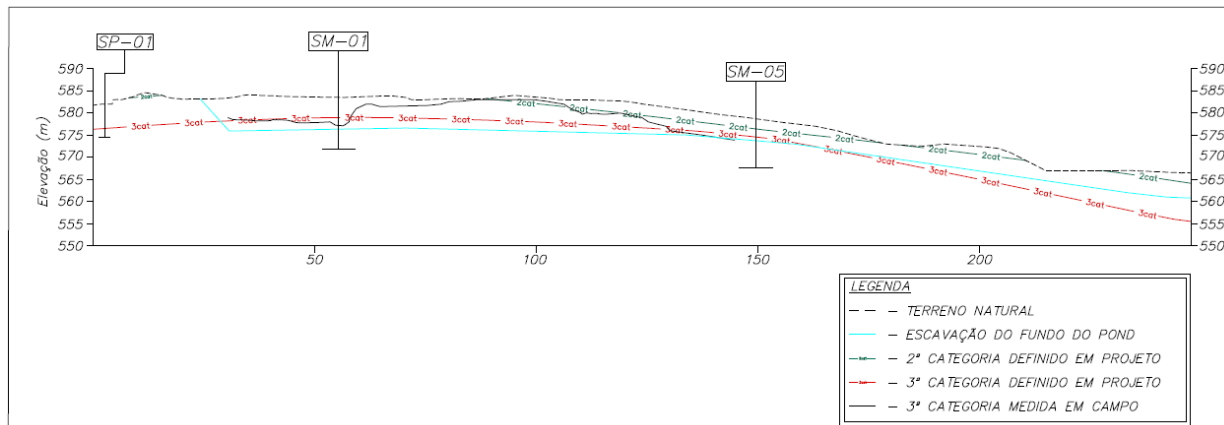


Figura 5. Seção longitudinal mostrando a superfície do topo do material de 3ª categoria definido em projeto (cor vermelha) comparando com o encontrado em campo (cor preta).

De uma maneira geral nos locais próximos às investigações geológico-geotécnicas, a superfície do material de 3ª categoria definida em projeto e a encontrada em campo (após a escavação) são muito próximas. Entretanto, há uma divergência considerável entre as superfícies na região entre as sondagens mistas SM-01 e SM-05. O perfil longitudinal apresentado na Figura 5 evidencia essa divergência, apresentando nessa região uma elevação da superfície do material de 3ª categoria encontrada em campo.

Como a área de estudo se encontra em uma bacia sedimentar sendo formada por rochas metassedimentares com a estratificação/acumulação de baixo ângulo de mergulho era esperado um topo do material de 3ª categoria regular e uniforme paralelizado à estratificação, não sendo provável, a princípio, supor a ocorrência de variações bruscas nas elevações desta superfície (vide Figura 5), sendo esta afirmativa, também baseada nas informações obtidas nas sondagens.

Em projetos de escavações geralmente se utiliza, para o reconhecimento do substrato, investigações diretas (poços, trincheiras, sondagens mecanizadas, etc.). Entretanto, as informações normalmente são pontuais e sempre haverá um grau de incerteza envolvido.

Sendo assim, necessita-se de se recorrer a um número considerável de sondagens para se obter uma melhor precisão das informações ao se trabalhar em área de grandes extensões.

Contudo, com o auxílio de métodos geofísicos (conforme apresentado no item 2) é possível avaliar de forma contínua e ao longo de linhas de estudos, as variações das condições geológica-geotécnicas locais através dos contrastes das propriedades físicas dos materiais em subsuperfície.

Sendo assim, uma maneira de diminuir esse grau de incerteza nos projetos de escavação é conciliar as informações obtidas com os métodos diretos (trincheiras, sondagens, etc.) com as informações dos métodos indiretos. Pode-se, por exemplo, realizar inicialmente uma campanha por métodos geofísicos na área a ser estudada e posteriormente realizar sondagens para confirmar os contrastes das propriedades físicas dos materiais em subsuperfície. Contudo, ressalta-se que as incertezas podem ser minimizadas, mas dificilmente serão totalmente anuladas.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os métodos e as classificações para a definição

das categorias de escavação carecem de definições amplamente aceitas, em literatura. As principais metodologias estão relacionadas à propagação de ondas sísmicas ou a consideração de parâmetros geomecânicos.

Para o estudo de caso, os autores elaboraram um critério de definição de categoria de escavação, com objetivo de estimar os volumes destas para uma obra de escavação de um *pond*. Para isso foram geradas superfícies através da interpolação das profundidades limítrofes de cada categoria por meio de métodos estatísticos, sendo utilizado o método da krigagem.

Após a execução das escavações verificou-se boa assertividade dos critérios de separação das categorias. Contudo, houve divergências entre volume do material de 3ª categoria encontrado em campo e definido em projeto. Essa divergência ocorreu em uma região entre as sondagens, onde houve uma elevação da superfície do material de 3ª categoria encontrada em campo. Tal comportamento não foi previsto uma vez que a área estudada está inserida em uma região de rochas metassedimentares com estratos subhorizontais, esperando um comportamento de topo rochoso regular subparalelo à estratificação.

Graus de incerteza sempre ocorrerão em projetos de escavação, uma vez que nos métodos diretos (poços, trincheiras e sondagens) as informações normalmente são pontuais. Sendo assim, necessita-se de recorrer a um número considerável de sondagens para se obter uma melhor precisão das informações ao se trabalhar em áreas de grandes extensões. Entretanto, com o auxílio de métodos geofísicos é possível avaliar, de forma contínua e ao longo de linhas de estudos, os contrastes das propriedades físicas dos materiais em subsuperfície, associando-os as informações obtidas de métodos diretos (sondagens) a fim de se elaborar superfícies de categorias de escavações mais próximas da realidade. Contudo, as incertezas podem ser diminuídas, porém dificilmente serão totalmente anuladas.

5 REFERÊNCIAS

Alkmim, F.F.; Brito Neves, B.B.; Castro Alves, J.A.

- (1993) *Arcabouço tectônico do Cráton do São Francisco - Uma Revisão*. In: Dominguez, J.M.L & Misi, A. (ed.) *O Cráton do São Francisco*. SBG/Núcleo BA/SE, Salvador, p.45-62.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. Norma NBR 6502 – Rochas e Solos – Terminologia (1995).
- Barton, N.; Lien, R.; Lunde, J. (1974) *Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support*. Rock Mech. Rock Eng., v.6, n.4, p.189-236.
- Bieniawski, Z.T. (1974) *Geomechanics classification of rock masses and its application in tunneling*. In: International Congress of Rock Mechanics, 3, Denver, Proceedings... Denver, ISRM, vol 2A, p. 27-32.
- Chevassu, G. (1978) *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. Proceedings ... Madrid, IAEG, v.1, sec. 4, p. 116-128.
- Church, H.K. (1965) *Seismic exploration yields data on excavation costs and methods*. Engineering News Record, 12 p.62-66, August 1965.
- Darcy, J. (1970) *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.
- Dardenne, M.A. (1978) *Síntese sobre a estratigrafia do Grupo Bambuí no Brasil Central*. In: Congr.Bras.Geol. 30, Recife. Anais... Recife, SBG, 2: 507-610.
- DER – Departamento de Estradas de Rodagem. (1996) *Boletim Informativo do Departamento de Estradas de Rodagem/SC Vol. 1, Nº 2*, Santa Catarina, Junho de 1996.
- Kirsten, H.A.D. (1982) *A classification system for excavation in natural material*. Civil Engineer in South Africa 24 (7): 293-308. July 1982.
- Ricardo, H.S. e Catalani, G (2007) *Manual Prático de Escavação: Terraplanagem e Escavação de Rocha*, 3ª ed, Pini, São Paulo, 655p.
- Smith, H. J. (1986) *Estimating rippability by rock mass classification*. In: Symposium on Rock Mechanics, Tusca Loosa, 1986. Proceedings...AIME, New York, A1, cap. 64, p. 443-448.
- Tammerik, G.R. (1994). *Escarificabilidade de Rochas Brandas*. Dissertação (Mestrado em Engenharia) Programa de Pós Graduação em Engenharia da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Weaver, J.M. (1975) *Geological factor significant in the assessment of rippability*. Civil Engineer in South Africa 17 (12):313-316. December 1975.