

Análise Estatística Simplificada para Projeto de Túneis em Rochas Fraturadas

Paulo Ivo Braga de Queiroz

Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, Brasil, pi@ita.br

Marcus Guadagnin Moravia

Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, Brasil, mgmoravia@yahoo.com.br

Arsenio Negro Junior

TÜV SÜD Bureau de Projetos, São Paulo, Brasil, arsenio.negro@tuv-sud.com.br

RESUMO: Este trabalho apresenta uma proposta para análise estatística para estabilidade de blocos em túneis construídos em rochas fraturadas. O método apresentado dispensa o uso de distribuições direcionais sobre a esfera unitária, o que simplifica consideravelmente a teoria envolvida nos cálculos. O projeto do trecho do túnel Cuncas I em granito é apresentado como caso histórico e os resultados da análise são apresentados e comentados.

PALAVRAS-CHAVE: Túneis em meios descontínuos, Rochas Fraturadas, Estatística sobre a esfera, Estabilidade de blocos.

1 INTRODUÇÃO

A inclusão da erraticidade nos cálculos da geotecnia ainda é um problema que não possui respostas definitivas. Conceitualmente, deve-se ter em mente que as propriedades do solo não são erráticas, de fato. Entretanto, a dificuldade de se estabelecer com certeza as propriedades de um maciço está no fato de que realizam-se ensaios em um número limitado de amostras, que possuem ainda um tamanho muito menor do que o volume de um maciço de interesse ao problema geotécnico. Assim, admite-se que a atribuição das propriedades das amostras ensaiadas para o maciço de interesse é sujeita a erros que, por vezes, podem ser tratados por teorias estatísticas (Gelhar, 1993).

Ainda que o problema da erraticidade seja comum a toda a geotecnia, ele é exarcebado no fluxo subterrâneo e, em um grau ainda maior, na mecânica das rochas fraturadas. De fato, as

descontinuidades impõem normalmente um grau de incerteza muito grande para a engenharia de maciços rochosos. Dentro de uma mesma litologia, um mesmo projeto pode ser considerado conservador para um determinado trecho, ainda que sofra ruptura dezenas de metros à frente. Para estes casos, o tratamento estocástico das descontinuidades é considerado a melhor opção para projetos.

A estatística sobre a esfera é um assunto bastante desenvolvido nos dias de hoje e fornece as ferramentas mais rigorosa para o tratamento estocástico das direções das descontinuidades (Fisher, Lewis and Embleton, 1993). Porém, seu uso na prática da engenharia ainda está limitado pelas distribuições presentes nos programas comerciais. Além disso, ainda existe pouco conhecimento na prática para assegurar o uso mais adequado desta ferramenta. A exemplo disso, entende-se que o vetor normal a um plano de descontinuidade

representa a mesma feição geológica que o vetor simétrico a ele em relação à origem. Logo, as distribuições deveriam refletir esta característica; em outras palavras, elas deveriam ser “antipodais” (Fisher, Lewis and Embleton, 1993). No entanto, tais tipos de distribuições não são usadas nos dias de hoje na engenharia de rochas. Tais problemas desmotivam o aprendizado e o uso deste ferramental teórico na prática da engenharia.

O objetivo deste trabalho é apresentar uma abordagem direta da estatística das descontinuidades, em que não haja a necessidade de uso de distribuições pré-estabelecidas. O método foi desenvolvido para o projeto do túnel Cuncas I, que é descrito nesta artigo como caso histórico.

2 TÚNEIS CUNCAS

Como parte das obras de integração do Rio São Francisco, foram concebidos três túneis: os túneis Cuncas I e Cuncas II e o túnel de acesso à parte central do Cuncas I. Estes túneis estão localizados no nordeste brasileiro e fazem parte do sistema adutor do Trecho II.

O túnel Cuncas I possui 15,39 km de comprimento e seções cuja área varia entre 57 e 73 m² para os trechos em rocha e entre 71 m² e 80 m² para os trechos em solo. Ele emboca em Mauriti (CE) e desemboca em São José de Piranhas (PB), atravessando uma serra no município de Monte Horebe (PB). Aproximadamente na região central deste túnel, foi concebida a execução de outro túnel com a função de acesso, com 2,02 km de extensão e seções similares às do Cuncas I. Este túnel permitiu a abertura de duas frentes de serviço, além das duas previstas no emboque e desemboque do Túnel Cuncas I.

O túnel Cuncas II possui 4 km de comprimento e área de seção similar à do túnel Cuncas I. Ele emboca em São José de Piranhas (PB), e termina no Reservatório Caiçara, Cajazeiras (PB).

As seções dos túneis foram concebidas de modo a atender critérios hidráulicos: em operação, o túnel deve ter uma lâmina d'água inferior ou igual a 75% do diâmetro equivalente.

3 CONDICIONANTES GEOLÓGICO-GEOTÉCNICAS

3.1 Evolução Geológica

Ocorrem na região dos Túneis Cuncas I e II principalmente rochas metamórficas paleoproterozóicas (~2,5 bilhões de anos) do Grupo Cachoeirinha (Formação Santana dos Garrotes, composto por micaxistos e metassedimentos) e do Complexo Piancó (composto por gnaisses, anfibolitos por vezes migmatizados), além de rochas graníticas neoproterozóicas do Granito Serra do Braga (~650 milhões de anos). No emboque do túnel Cuncas I são ainda assinaladas rochas sedimentares representadas por arenitos arcoseanos da Formação Mauriti (250 milhões de anos) e siltitos e folhelhos esverdeados da Formação Brejo Santo (~145 milhões de anos).

Em termos estruturais, o maciço onde o túnel será implantado situa-se em região correspondente à Província Borborema, onde destacam-se os lineamentos pré-cambrianos de Pernambuco e de Patos, antigas falhas transcorrentes, cuja continuidade pode ser acompanhada também na África. O Lineamento de Patos é considerado como a maior expressão tectônica da orogênese Brasiliana, desta forma evidencia um grande evento tectônico de caráter transcorrente, cujas estruturas representam uma fase deformacional dúctil relacionada ao ciclo Basiliano, sincrônica à movimentação do cisalhamento com trend NE.

A deposição do pacote sedimentar encontrado no emboque do Cuncas I esteve vinculada aos dois estágios iniciais de rifteamento (fases sin-rifte I e II). Estima-se uma espessura total para o pacote sedimentar da Bacia do Araripe de cerca de 1500m. No local do túnel estima-se que a denudação regional chegue a 300m de espessura.

Toda a sequência de eventos geológicos da região forma um arcabouço por onde se desenvolve o túnel, que sugere a existência tensões residuais elevadas na direção NE-SW, aproximadamente.

3.2 Litologia e Estruturas Geológicas

As rochas presentes referem-se essencialmente a gnaisses (Complexo Piancó), xistos (Grupo Cachoeirinha) e intrusões graníticas (Granito Serra do Braga). No emboque do Túnel Cuncas I ocorrem arenitos e siltitos da Formação Mauriti e Brejo Santo, respectivamente.

As estruturas geológicas foram identificadas e distinguidas como descontinuidades do tipo foliação, fratura, diaclase e falha. Os dados destas estruturas (litologia, famílias de descontinuidades, atitudes, persistência, frequência, etc.) foram obtidos a partir do mapeamento geológico, das investigações de subsuperfície e dos ensaios de laboratório.

Limitações na amostragem mecânica do maciço em profundidade conduziram à adoção de hipótese conservadora de total persistência das descontinuidades mapeadas na superfície do terreno até o túnel.

A título de exemplo, as Figuras 1 e 2 apresentam as projeções estereográficas das descontinuidades do Granito incluso no Xisto da Serra do Braga.

Para cada família de descontinuidades, foi definida uma descontinuidade dita representativa. Esta foi caracterizada no estereograma por um pólo no centro da região de maior frequência de ocorrência dos pólos de cada família de descontinuidades. Neste caso, a frequência de ocorrência deste plano representativo será considerada igual à máxima frequência da sua respectiva família.

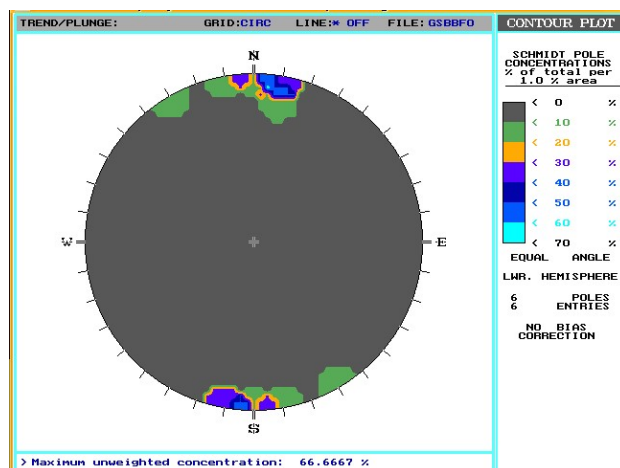


Figura 1. Projeção estereográfica polar de foliações no Granito (Serra do Braga).

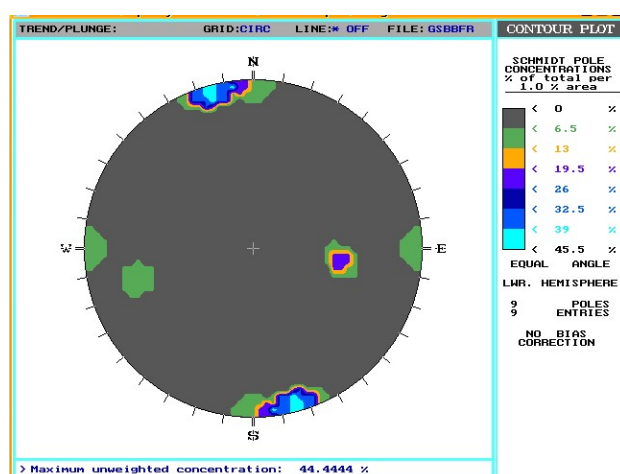


Figura 2. Projeção estereográfica polar de fraturas e diaclases no Granito (Serra do Braga).

A Tabela 1 apresenta as propriedades geométricas das descontinuidades representativas das famílias do Granito da Serra do Braga.

Tabela 1. Descontinuidades representativas das famílias de descontinuidades e suas respectivas frequências de ocorrência para o Granito (Serra do Braga).

Família	Tipo	Atitudes da descontinuidade		Frequência da descontinuidade representativa	ϕ (°)	c' (kPa)
		Mergulho (°)	Direção (°)			
1	foliação	86	185	65	50	342
2		89	4	55		
3		87	149	15		
4		87	330	15		
5	falha	90	65	100	47	170
6	fraturas e diáclases (principais e secundárias)	87	165	42,25	50	347
7		88	345	42,25		
8		55	278	22,75		
9		87	90	9,75		
10		87	270	9,75		
11		71	75	9,75		

4 PARÂMETROS GEOTÉCNICOS

O critério utilizado para definição da resistência ao cisalhamento das descontinuidades foi o proposto por Barton e Choubey (1977):

$$\tau = \sigma'_n \tan \left[\phi_r + JRC \log_{10} \left(\frac{JCS}{\sigma'_n} \right) \right] \quad (1)$$

onde:

τ = tensão cisalhante no plano da descontinuidade;

σ'_n = tensão normal efetiva;

ϕ_r = ângulo de atrito residual;

JRC = coeficiente de rugosidade da descontinuidade;

JCS = resistência à compressão da rocha na descontinuidade.

Estes parâmetros foram depois convertidos nos parâmetros de resistência tradicionais (Mohr-Coulomb). Os parâmetros resultantes estão apresentados na Tabela 1.

5 ANÁLISES DE ESTABILIDADE EM MEIO DESCONTÍNUO

A identificação de blocos de rocha potencialmente instáveis depende, além da orientação das descontinuidades presentes no maciço, do tamanho, da forma e orientação da seção de escavação. Embora os cálculos envolvendo a geometria tridimensional deste tipo de problema possam ser feitos à mão, é conveniente a utilização de programas de computador. As análises de estabilidade de blocos aqui apresentadas foram realizadas utilizando-se o programa UNWEDGE[®], da Rocscience, Canadá. Este programa determina, a partir da combinação de três descontinuidades e da geometria e orientação da seção de escavação, a localização e as dimensões dos maiores blocos que podem se formar junto ao arco superior, paredes e face da frente de escavação.

Conforme já esclarecido na seção 3.2, as famílias de descontinuidades, presentes nas diferentes litologias, foram caracterizadas por descontinuidades representativas. Em virtude

desto, apenas as descontinuidades representativas foram consideradas nas análises de estabilidade de blocos. Desta forma, como primeiro passo das análises de estabilidade, foram definidas, para cada litologia, todas as combinações possíveis das descontinuidades representativas, tomadas três a três. Como exemplo, na Tabela 1, as 11 descontinuidades representativas características do Granito (Serra do Braga), combinadas três a três, resultam em 165 combinações.

O segundo passo consiste em identificar e distinguir as litologias para análise dos túneis (no caso em questão, seriam as seções dos túneis Cuncas I, Cuncas II e Janela de Acesso ao Cuncas I). O terceiro passo resume-se em aplicar as combinações possíveis das descontinuidades representativas para cada seção de túnel, conforme definido no segundo passo. Assim, a partir da geometria e orientação de uma dada seção de túnel e das combinações das descontinuidades representativas presentes na litologia desta seção, foram calculados os blocos potencialmente instáveis. Os fatores de segurança para cada um destes blocos foram calculados em seguida, sem instalação do suporte.

As combinações entre as descontinuidades representativas foram ordenadas em ordem crescente de seus fatores de segurança. Posteriormente, suas incidências foram estimadas em função do produto das probabilidades de ocorrência de cada descontinuidade individual. Deste modo, pode-se calcular a incidência de fatores de segurança menores do que 1.5. No caso do túnel Cuncas I, observa-se na Figura 3 que 30.7% das combinações são inseguras sem suporte (fator de segurança nulo, que não aparece em escala logarítmica). Por outro lado, 69,3% dos blocos que podem se formar na seção de exemplo apresentam fatores de segurança superiores a 1,5 e, por isto, não necessitam de suporte.

Em seguida, foram calculados fatores de segurança de vários tipos de suporte, adotando-se o mesmo procedimento descrito no parágrafo anterior. Estes suportes foram determinados pela classificação de Bieniawski e algumas das alternativas de projeto para o túnel Cuncas I são mostradas na Figura 4.

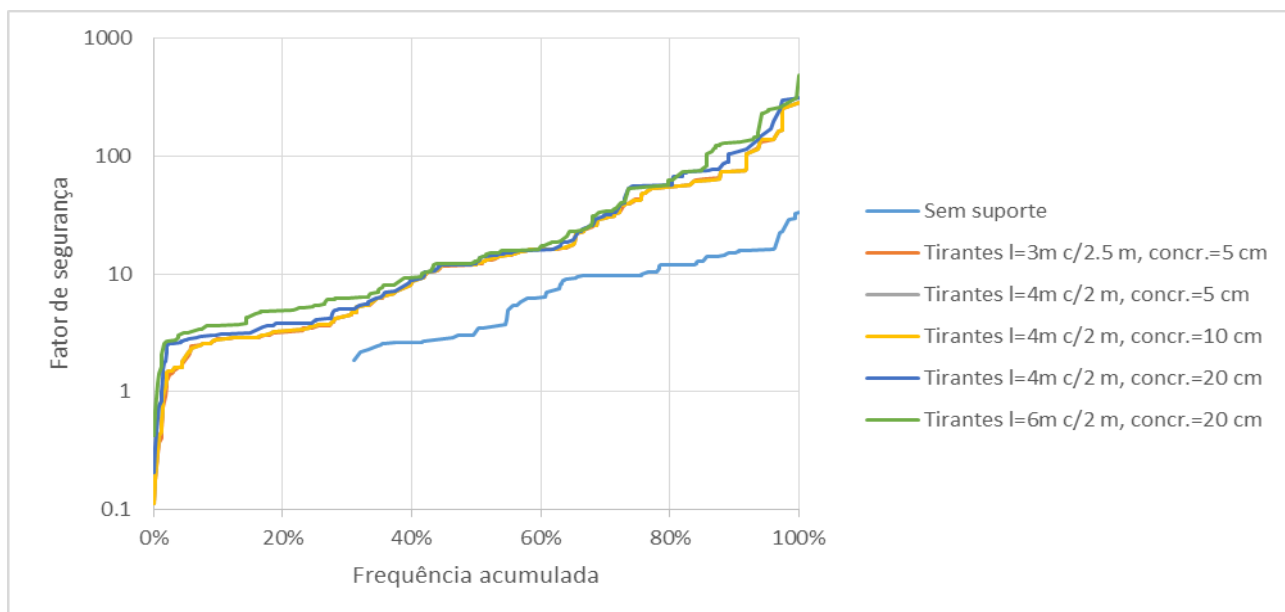


Figura 3. Fatores de segurança (em ordem crescente de distribuição acumulada) para os tipos de suporte do túnel Cuncas I.

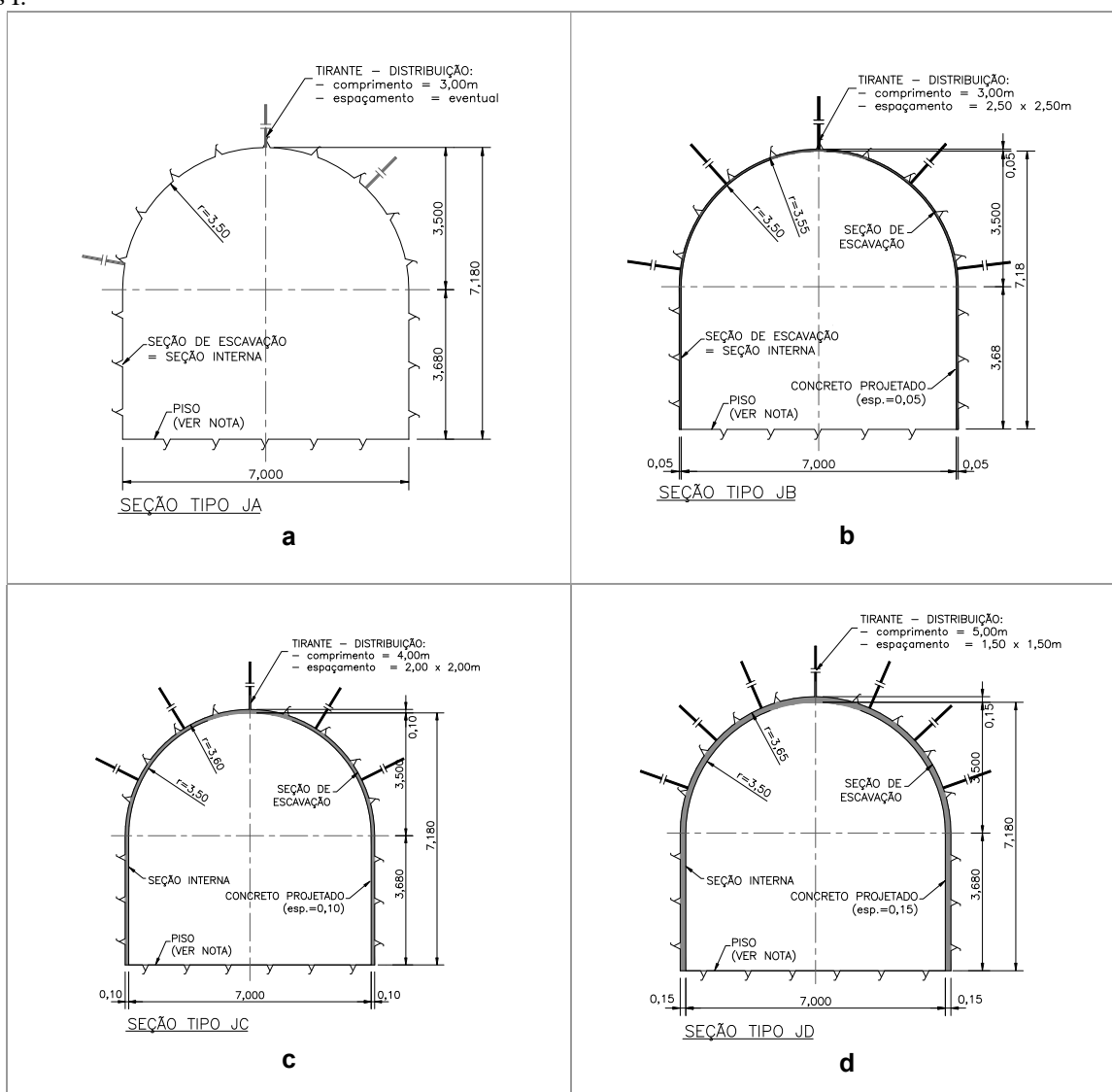


Figura 4. Alguns dos tipos de suporte do túnel Cuncas I.

5 DESDOBRAMENTOS DAS ANÁLISES DE ESTABILIDADE SOBRE O PROJETO

A Figura 3 mostra os fatores de segurança calculados para todas as combinações de descontinuidades representativas para os vários suportes de projeto do túnel Cuncas I.

As Figuras 5 e 6 ilustram blocos formados junto ao arco superior, paredes e face, para a combinação de uma descontinuidade do tipo foliação com duas do tipo fratura/diaclase (famílias de descontinuidades nº 3, 5 e 8).

Cumprir notar que o piso do túnel poderia ser revestido em concreto armado em função da integridade da rocha, de necessidade de tráfego de equipamentos e de exigências de desempenho hidráulico (risco de erosão e arraste hidráulico).

Não pode ser descartada, porém, durante a execução dos túneis, a ocorrência de descontinuidades com características (atitudes, persistência, frequência etc.) diferentes das previstas no projeto. Portanto, durante o período construtivo, são necessários serviços de mapeamento da frente de escavação dos túneis, além dos furos de sondagens mecânicas e da prospecção sísmica e aplicação do método observacional a partir do projeto.

O acompanhamento técnico da obra deveria incluir mapeamento da seção do túnel ao longo da sua escavação (“as you go”) com definição do tipo de suporte requerido conforme especificado pelo projeto ou necessidade verificada in loco.

Em escavações em meios descontínuos, existe sempre a possibilidade ínfima de ocorrência das combinações de descontinuidades que tinham fator de segurança menor que 1,5, mesmo para o suporte mais robusto concebido pelo projeto. Em muitos destes casos, pode não ser viável a adoção de quaisquer medidas de suporte. Para o túnel Cuncas I, a probabilidade de ocorrência deste tipo de situação foi estimada como sendo inferior a 0,79%. Este é o caso em que o acompanhamento de campo precisa atentar para a existência das descontinuidades críticas na frente de escavação e, eventualmente, desviar o túnel, com o objetivo de se evitarem rupturas.

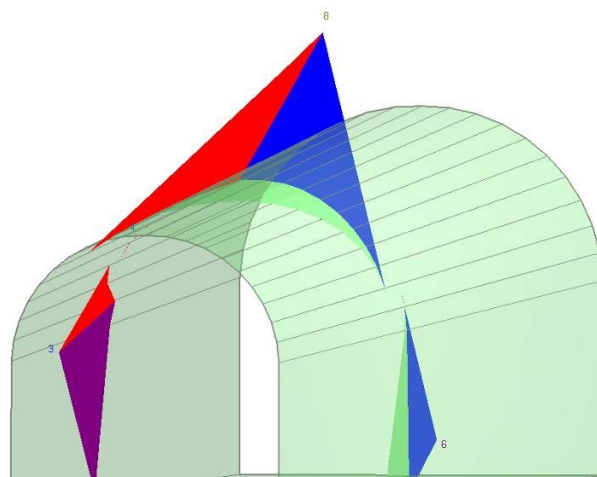


Figura 5. Blocos formados no arco superior e nas paredes para uma seção do Túnel Cuncas I no Granito (Serra do Braga).

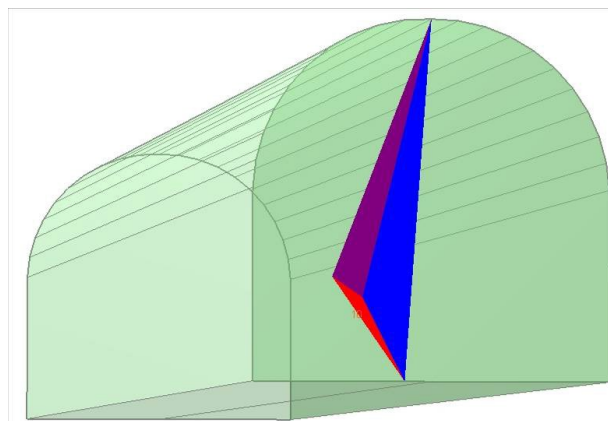


Figura 6. Bloco formado na face da frente de escavação para uma seção do Túnel Cuncas I no granito (Serra do Braga).

AGRADECIMENTOS

Os autores são gratos ao Consórcio Hydroconsult – MWH e ao Ministério da Integração Nacional pela autorização e oportunidade de desenvolvimento destes estudos.

REFERÊNCIAS

- Barton, N. and Choubey, V. (1977) “The Shear Strength of Rock Joints in Theory and Practice”. Rock Mechanics, vol 10, p1.
- Fisher, N. I., T. Lewis and B. J. J. Embleton (1993) Statistical analysis of spherical data. Cambridge University Press.
- Gelhar, Lynn W., Stochastic Subsurface Hydrology, Prentice Hall, 390 pp., 1993.