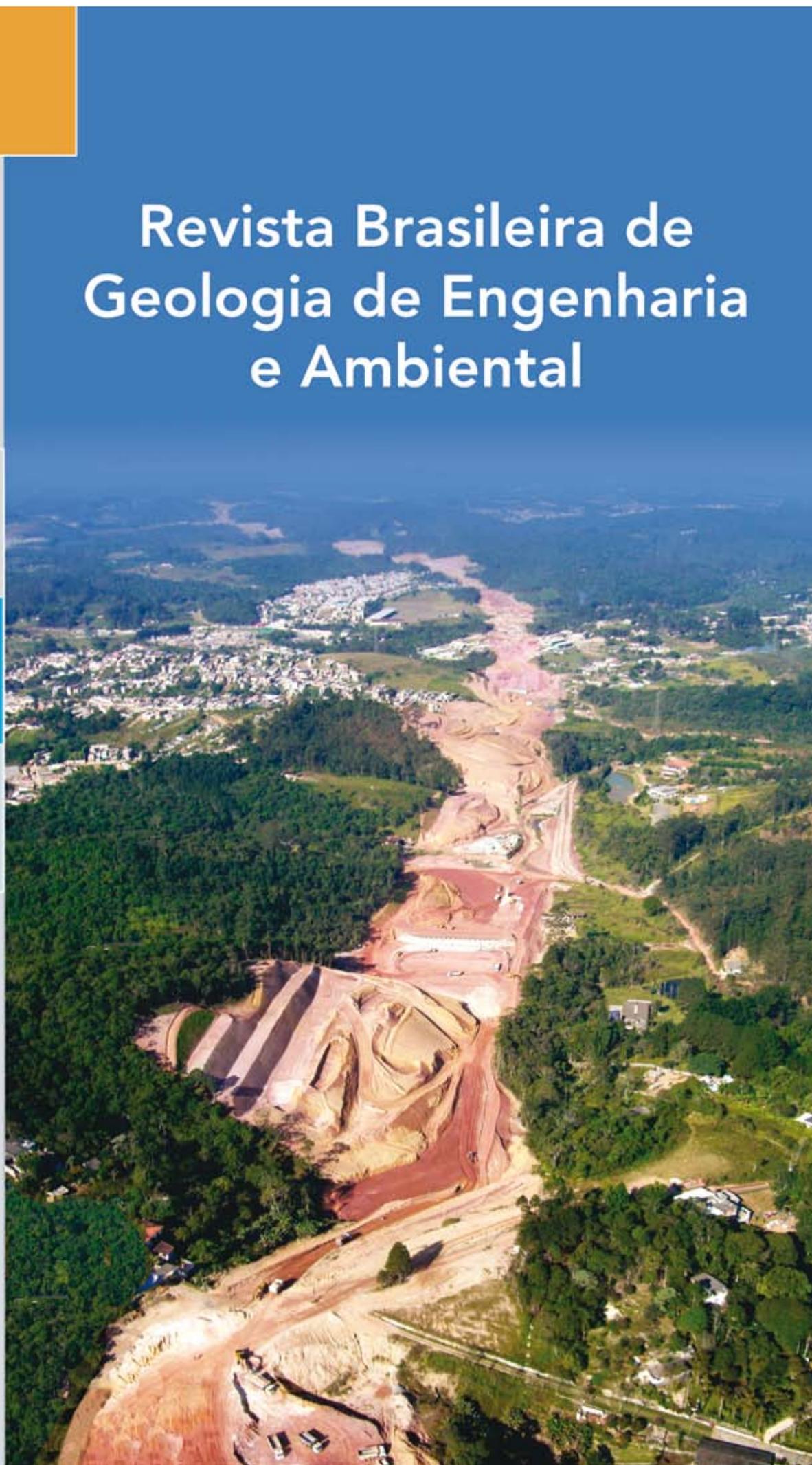




ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOLOGIA
DE ENGENHARIA E AMBIENTAL

Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental



ISSN 2237-4590

Volume 1
Número 1
Novembro 2011

Edição Especial



ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOLOGIA
DE ENGENHARIA E AMBIENTAL

RBGEA
REVISTA BRASILEIRA DE
GEOLOGIA DE ENGENHARIA
E AMBIENTAL



ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOLOGIA
DE ENGENHARIA E AMBIENTAL

REVISTA BRASILEIRA DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA E AMBIENTAL

Publicação Científica da Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental

EDITOR

Lázaro Valentim Zuquette - USP

CO EDITOR

Fernando F. Kertzman - GEOTEC

REVISORES

Antonio Cendrero - Univ. da Cantabria (Espanha)

Alberto Pio Fiori - UFPR

Candido Bordeaux Rego Neto - IPUF

Clovis Gonzatti - CIENTEC

Eduardo Goulart Collares - UEMG

Emilio Velloso Barroso - UFRJ

Fabio Soares Magalhães - BVP

Fabio Taioli - USP

Frederico Garcia Sobreira - UFOP

Guido Guidicini - Geoenergia

Helena Polivanov - UFRJ

Jose Alcino Rodrigues de Carvalho - Univ. Nova de Lisboa (Portugal)

José Augusto de Lollo - UNESP

Luis de Almeida Prado Bacellar - UFOP

Luiz Nishiyama - UFU

Marcilene Dantas Ferreira - UFSCar

Marta Luzia de Souza - UEM

Newton Moreira de Souza - UnB

Oswaldo Augusto Filho - USP

Reinaldo Lorandi - UFSCar

Ricardo Vedovello - IG/SMA

PROJETO GRÁFICO E DIAGRAMAÇÃO

Rita Motta - Editora Tribo da Ilha

FOTO DA CAPA

Obras do Rodoanel trecho sul, nas proximidades da represa Billings.,
tirada em 08 de julho de 2008 . Fabrício Araujo Mirandola - IPT

Edição Especial

Circulação: Novembro de 2011

Tiragem: 2.500

ISSN 2237-4590

São Paulo/SP

Novembro/2011



ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOLOGIA
DE ENGENHARIA E AMBIENTAL

Av. Prof. Almeida Prado, 532 - IPT (Prédio 11) 05508-901 - São Paulo - SP
Tel.: (11) 3767-4361 - Telefax: (11) 3719-0661 - E-mail: abge@ipt.br - Home Page: <http://www.abge.com.br>

DIRETORIA - GESTÃO 2009/2011

Presidente: Fernando Facciolla Kertzman
Vice-Presidente: Gerson Salviano de Almeida Filho
Diretora Secretária: Kátia Canil
Diretor Financeiro: Luiz Fernando D'Agostino
Diretor de Eventos: Elisabete Nascimento Rocha
Diretor de Comunicação: Marcelo Fischer Gramani

CONSELHO DELIBERATIVO

Elaine Cristina de Castro, Elisabete Nascimento Rocha, Fabio Canzian da Silva, Fabrício Araújo Mirandola, Fernando Facciolla Kertzman, Fernando Ximenes T. Salomão, Gerson Almeida Salviano Filho, Ivan José Delatim, Kátia Canil, Leonardo Andrade de Souza, Luiz Antonio P. de Souza, Luiz Fernando D'Agostino, Marcelo Fischer Gramani, Newton Moreira de Souza, Selma Simões de Castro.

NÚCLEO RIO DE JANEIRO

Presidente: Nelson Meirim Coutinho - **Vice-Presidente:** Antonio Queiroz
Diretor Secretário: Eusébio José Gil - **Diretor Financeiro:** Cláudio P. Amaral
End.: Av. Rio Branco, 124 / 16º andar - Centro - 20040-916 - Rio de Janeiro - RJ
Tel : (21) 3878-7878 **Presidente - Tel.:** (21) 2587-7598 **Diretor Financeiro**

NÚCLEO MINAS GERAIS

Presidente: Maria Giovana Parizzi - **Secretário:** Frederico Garcia Sobreira
Tesoureiro: Luís de Almeida P. Bacellar - **Diretor de Eventos:** Leonardo A. Souza
End.: Univ. Fed. de Ouro Preto - Depto. Geologia - 35400-000 - Ouro Preto/MG
Fone: (31) 3559.1600 r 237 **Fax:** (31) 3559.1606 -

REPRESENTANTES REGIONAIS	UF
ROBERTO FERES	AC
HELIENE FERREIRA DA SILVA	AL
JOSÉ DUARTE ALECRIM	AM
CARLOS HENRIQUE DE A.C. MEDEIROS	BA
FRANCISCO SAID GONÇALVES	CE
NORIS COSTA DINIZ	DF
JOÃO LUIZ ARMELIN	GO
MOACYR ADRIANO AUGUSTO JUNIOR	MA
ARNALDO YOSO SAKAMOTO	MS
KURT JOÃO ALBRECHT	MT
CLAUDIO FABIAN SZLAFSZTEIN	PA
MARTA LUZIA DE SOUZA	PR
LUIZ GILBERTO DALL'IGNA	RO
CEZAR AUGUSTO BURKERT BASTOS	RS
CANDIDO BORDEAUX REGO NETO	SC
JOCÉLIO CABRAL MENDONÇA	TO



A Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental (RBGEA) é uma proposta da Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental (ABGE) no sentido de suprir uma lacuna nacional para publicação de trabalhos científicos técnicos e de exemplos de aplicação da Geologia de Engenharia e Ambiental, que venham agregar conhecimentos aos profissionais, pesquisadores e comunidade em geral, tanto em nível nacional como internacional.

A frequência será de três números regulares por ano, e números especiais, no caso de seleção de trabalhos relacionados a um tema específico.

A RBGEA terá o primeiro número na forma impressa, e, logo que tiver uma sequência definida, será uma publicação eletrônica, impressa anualmente. Com este periódico espera-se que haja um avanço nas relações entre os profissionais que atuam na formação e pesquisa e aqueles que atuam nas outras esferas da profissão. Assim, será reforçada a relação que tornou a atividade de Geólogo de Engenharia e Ambiental relevante em diversos países, fazendo com que a profissão ocupe uma posição de destaque na sociedade, com questões relevantes relacionadas ao Planejamento Urbano e as Obras de Infraestrutura e tantos outros.

Espera-se que esta publicação atinja seus objetivos e venha subsidiar estudantes e profissionais da Geologia de Engenharia nas suas atividades, seja nas universidades, nos institutos, nas empresas de economia mista, públicas ou privadas.

A Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental (RBGEA) destina-se à divulgação

de investigações, estudos e soluções de problemas de engenharia e ambientais decorrentes da interação entre a Geologia e as atividades humanas - (incluindo aspectos relevantes da Geologia relacionados à Engenharia Civil, Mineração e Recursos Hídricos, assim como relacionados à previsão de eventos perigosos, às áreas contaminadas, aos processos geológicos, à prevenção e remediação de áreas degradadas) -, Planejamento Territorial e Ambiental, Banco de Dados e Casos Históricos; além destes estudos serão também contemplados os processos modernos, as novas técnicas de campo e laboratório e temas científicos de interesse amplo e caráter original, sempre relacionados com a Geologia de Engenharia e Ambiental e com as ciências da terra de uma forma geral, seja do Brasil seja de outros países, publicados na língua portuguesa e espanhola.

O primeiro número apresenta artigos históricos de três profissionais que dão nome aos Prêmios da ABGE para os destaques de nossa categoria: Ernesto Pichler, Lorenz Dobereiner e Fernando Luiz Prandini, bem como uma série inicial de artigos encomendados pelos Editores. A segunda edição continuará com autores convidados pelos Editores; e a terceira edição será um dos melhores trabalhos escolhidos no 13º CBGE. Na sequência, haverá publicações digitais reunindo os artigos submetidos por diversos autores.

Boa leitura à todos.

**Lazaro V. Zuquette e
Fernando F. Kertzman**



- 9** BOÇOROCAS
Ernesto Pichler (In memorian)
- 17** CARACTERIZAÇÃO GEOMECÂNICA DO MACIÇO ROCHOSO DE FUNDAÇÃO DA UHE CACHOEIRA PORTEIRA
Lorenz Dobereiner (In memorian)
Fernando Pires de Camargo
Alarico A. C. Jácomo
- 29** O BRASIL E A GEOLOGIA NO PLANEJAMENTO TERRITORIAL E URBANO
Fernando Luiz Prandini (In memorian)
- 41** UM BREVE RELATO SOBRE A GEOLOGIA DE ENGENHARIA
Lazaro Valentin Zuquette
- 57** INTEGRAÇÃO DE ESTUDOS GEOLÓGICO-GEOTÉCNICOS APLICADOS A PROJETOS DE ENGENHARIA E À AVALIAÇÃO DE IMPACTOS AMBIENTAIS: ESTAMOS AVANÇANDO?
Omar Yazbek Bitar
Amarilis Lucia Casteli Figueiredo Gallardo
Sofia Julia Alves Macedo Campos
Tânia de Oliveira Braga
Caio Pompeu Cavalhieri
- 73** GEOLOGIA APLICADA A BARRAGENS: UMA REVISÃO DE PROCEDIMENTOS
Luiz Ferreira Vaz
Magali Dubas Gurgueira
Talita de Oliveira Muzzi
- 93** CONTRIBUIÇÃO PARA A GEOLOGIA DE ENGENHARIA APLICADA ÀS CIDADES. EXPERIÊNCIA DE LONGA DURAÇÃO EM BELO HORIZONTE – MG
Edézio Teixeira de Carvalho - GEOLURB
- 109** GESTÃO DE RISCOS GEOLÓGICOS NO BRASIL
Margareth Mascarenhas Alheiros
- 123** IMPORTÂNCIA DA GEOLOGIA DE ENGENHARIA E GEOMECÂNICA NA MINERAÇÃO
Sérgio N. A. de Brito
Paulo R. C. Cella
Rodrigo P. Figueiredo

IMPORTÂNCIA DA GEOLOGIA DE ENGENHARIA E GEOMECÂNICA NA MINERAÇÃO

SÉRGIO N. A. DE BRITO
BVP Engenharia

PAULO R. C. CELLA
BVP Engenharia

RODRIGO P. FIGUEIREDO
UFOP, MG

RESUMO ABSTRACT

Discutem-se os requisitos mais importantes das várias etapas de estudo e projeto de empreendimentos em mineração. Em seguida, à luz de alguns comportamentos singulares de maciços de rocha branda ou competente evidenciados durante a lavra, examinam-se aspectos teóricos e práticos no campo da geologia de engenharia e projeto geomecânico que explicam tais comportamentos. Fica demonstrado que o envolvimento do projetista no acompanhamento da lavra, por vezes durante anos, apoiado no mapeamento geotécnico de detalhe e nos dados do monitoramento de maciços intemperizados ou são acarretam adaptações importantes no projeto inicial. O fruto disso é que soluções práticas e mais confiáveis podem ser alcançadas em casos de grande complexidade ou na ocorrência de feições geológicas adversas, não antecipadas.

Palavras-chaves: mineração, geomecânica, projeto, complexidade geológica.

No início do desenvolvimento da Geologia de Engenharia no Brasil, alavancado nas décadas de 60 a 80 pelo grande crescimento dos projetos hidrelétricos, a mineração ocupou lugar de pouco destaque em nossos congressos e na nossa própria atividade profissional.

Nos últimos anos temos assistido a um movimento inverso. O enorme desenvolvimento da

THE IMPORTANCE OF ENGINEERING GEOLOGY AND GEOMECHANICS IN MINING DESIGN

In the first part of this paper, the most important requirements to develop a sound mining project are shortly discussed accordingly to distinct phases of studies and design. In the second part, singular mechanical behavior of either weak or competent rock masses as established in real mines are closely analyzed upon theoretical and practical aspects of engineering geology and geotechnical design. It is shown that the mining process usually allows the designer to be closely involved in supervision of excavation over years in some cases, so that detailed geotechnical mapping of large volumes of weathered or fresh rock masses along with monitoring entail important adjustments to the initial design. As a result more reliable and practical solutions can be achieved as well the designer is allowed to tackle with unforeseen adverse conditions or complex behavior of geological materials.

Keywords: mining, geotechnical design, geological complexity.

indústria mineral brasileira, puxada pela grande demanda de nossos minérios, principalmente o minério de ferro, exigiu das empresas de engenharia a formação de equipes especializadas para suprirem a grande demanda de trabalhos solicitados. Podemos dizer hoje que a mineração não só utiliza o que existe de mais avançado nas tecnologias disponíveis dentro de geologia de engenharia e geotecnia

como precisou desenvolver tecnologias próprias. Isto se deve a algumas diferenças importantes que existem entre projetos de obras civis e de mineração, sendo características próprias dos projetos de mineração:

- Grande duração da lavra, que em geral se estende por dezenas de anos.
 - . Permite maior detalhamento dos estudos ao longo do tempo.
 - . Possibilidade de adaptação com o tempo.
 - . Possuem rigorosa avaliação de riscos (Sistema FEL/FMEA).
 - . Exigem considerações quanto ao abandono, em geral ocorrendo após décadas de seu início.
- Pode-se conviver com acidentes que não impliquem em perda de vidas, equipamento e reservas.
- Vários maciços podem e devem, devido às condições *in situ*, trabalhar no limite da funcionalidade, o que pode significar o ‘pós-ruptura’
- Grande impacto ambiental o que demanda projetos de conceitos integrados para redução de custos de restauração, com freqüente presença de contaminantes.

Como todo projeto de engenharia, várias áreas especializadas da engenharia participam dos estudos. Em mineração, esta associação tem que existir de maneira integrada desde o começo dos estudos. As principais áreas técnicas envolvidas são:

- Geologia mineral.
- Geologia de engenharia.
- Geotecnia/Geomecânica.
- Hidrologia/Hidráulica.
- Hidrogeologia.
- Geoquímica.
- Engenharia de minas.
- Engenharia estrutural.
- Engenharia ambiental.

As atividades da geologia de engenharia/geotecnia em mineração podem ser agrupadas em quatro grandes áreas, sendo que em cada uma delas, os interesses principais são os seguintes:

Mineração a céu aberto

- Dimensionamento de taludes.
- Controle da água superficial e subterrânea.
- Escavabilidade e controle de detonações.
- Trafegabilidade.
- Durabilidade dos materiais.
- Monitoramento.

Mineração subterrânea

- Dimensionamento de cavidades da lavra e do desenvolvimento.
- Dimensionamento de pilares.
- Dimensionamento de suportes.
- Controle de detonação.
- Previsão de efeitos na superfície.
- Monitoramento.

Estruturas auxiliares

- Barragens de rejeito.
- Barragens de água.
- Pilhas de estoque, estéril e de lixiviação.
- Fundação das usinas de processamento mineral.
- Vias de acesso e contenções de cortes e aterros.
- Monitoramento.

Impacto ambiental

- Recuperação de áreas escavadas e aterradas.
- Controle de contaminação.
- Previsão de comportamento no abandono.
- Monitoramento.

Todas essas atividades são desenvolvidas em várias fases de estudos da mineração: projeto, implantação, operação e abandono. Os Quadros 1, 2 e 3 sintetizam as demandas de projeto. A característica principal dessas fases é: grande rigor no controle de qualidade das fases de projeto e a grande extensão da fase operacional. Nesta fase, surge então a necessidade de prever comportamentos adversos e estabelecer os procedimentos que permitam minimizá-los ou remediá-los. Esta fase é extremamente dinâmica e exige uma participação permanente da geologia/geotecnia. A

única maneira de prevenir os problemas geomecânicos em uma mina é manter sempre uma equipe de geologia de engenharia e geotecnia na mina encarregada de:

- Mapear toda superfície escavada, mesmo provisória.
- Rever e atualizar permanentemente o modelo geomecânico da mina.

- Propor e supervisionar investigações complementares necessárias.
- Classificar os maciços rochosos encontrados.
- Setorizar as escavações em função do comportamento dos maciços.
- Antecipar o comportamento dos maciços na fase seguinte da lavra.
- Monitorar o comportamento das escavações.

Quadro 1 – Demanda de um projeto de mineração típico – Fase conceitual.

ESTRUTURA	DEMANDA BÁSICA	ESTUDOS E INVESTIGAÇÕES GEOTÉCNICAS REQUERIDOS
Lavra a Céu Aberto e Subterrânea	Unidades regionais;	Mapas regionais e Reconhecimento descontinuidades em afloramentos
	Contexto geológico no entorno da lavra;	Gênese dos solos e Perfil de intemperismo, Modelo geológico-estrutural preliminar Unidades hidrogeológicas e nível de água
	Sondagem geológica orientada	Litotipos, Anisotropias e Atitude de camadas
	Método de lavra	Descrição geotécnica dos testemunhos Inclinação global da cava Geometria geral da lavra, vãos máximos de realces por métodos empíricos
Pilha de Estéril	Estudo de volume de contenção	Reconhecimento superficial do local da disposição
	Arranjo Geométrico	Feições gerais da dinâmica da encosta e da várzea
	Distância de transporte	Tipo dos solos de cobertura
Diques de Sedimentação	Distância em relação à Pilha	Vale de fechamento em solo ou rocha,
	Dimensão da bacia de finos	Estabilidade de encostas
	Arranjo preliminar	Seção tipo da barragem, Plano do desvio construtivo, Posição preliminar do extravasor e canais, Materiais naturais de construção
Barragem de Rejeitos	Alternativas de fechamento e Dimensão da bacia de rejeito	Litotipos e estanqueidade no eixo e no perímetro da bacia, Diques de sela Vale de fechamento em solo ou rocha Estabilidade de encostas Materiais naturais de construção
	Posição do eixo no entorno da Usina	Reconhecimento da rota da tubulação e Método de disposição
	Físico-Química básica dos rejeitos	Granulometria e densidades, Necessidade de revestimento da bacia; Canal de captura do ingresso de águas pluviais

Quadro 2 – Demanda de um projeto de mineração típico – Fase viabilidade/básico.

ESTRUTURA	DEMANDA BÁSICA	ESTUDOS E INVESTIGAÇÕES GEOTÉCNICAS REQUERIDOS
Lavra a Céu Aberto e Subterrânea	Minério e Encaixantes;	Mapeamento e descrição sistemática de discontinuidades em afloramentos, Galerias de investigação e Sondagens com testemunhos orientados, Seções geológicas verticais e horizontais; Modelo geológico 3D
	Contexto geológico no entorno da lavra;	Ensaio geotécnicos dos solos e rochas, Seções geotécnicas com caracterização genética, textural e espessuras, Modelo hidrogeológico, Tensões gravitacionais
	Método de lavra	Setorização geomecânica, Definição de bancadas, taludes interrampas e globais Definição de realces por métodos empíricos e numéricos, pilares de realce e barreiras, Subsidência admissível, Medida de tensões naturais (eventual) Rebaixamento do lençol, Despressurização de taludes
Pilha de Estéril	Refinamento do arranjo geométrico	Definição da geometria de bancada e inclinação global, Drenagem periférica e de bancada
	Estabilidade geotécnica	Ensaio geotécnicos dos solos e Seções geotécnicas com caracterização genética, textural e espessuras, Modelo de percolação, Capacidade de carga e recalques admissíveis, Definição da remoção de solos inadequados
	Sistema de drenagem interna e Jazidas de materiais do drenantes	Modelo de fluxo da encosta, zona de recarga e desagendamento. Modelos de infiltração na pilha, Ensaio tecnológicos de materiais pétreos e transições
Diques de Sedimentação	Arranjo geométrico	Definição do reservatório de contenção, Modelo de sedimentação e taxas de erosão, Sondagens geotécnicas, Definição da seção típica Definição do extravasor e canais, Definição do desvio construtivo
	Jazidas de materiais de construção	Amostragem, Ensaio de caracterização, compactação e Cubagem
	Estabilidade geotécnica	Ensaio geotécnicos dos solos e Seções geotécnicas com caracterização genética, textural e espessuras, Modelo de percolação
	Medidas auxiliares	Definição de área de descarte dos sedimentos, Vias de acesso para descarte, Contenção e estabilidade dos sedimentos
Barragem de Rejeitos	Arranjo geométrico detalhado	Definição do eixo, Método de construção, Diques de sela, Definição do dique de partida e da seção típica, Posição do extravasor e emissários de etapa de operação, Projeto de escavação e aterros
	Plano de disposição de rejeitos	Método de disposição Projeto da rota da tubulação principal, Ângulo de praia, Fases de enchimento da bacia, Cálculo do volume, Etapas construtivas da barragem
	Caracterização geotécnica, física e química dos rejeitos	Ensaio geotécnicos básicos e especiais e de decantação, Método construtivo, Projeto do revestimento da bacia ¹ ; Dimensionamento de cortes e aterros de canais de captura do escoamento
	Estabilidade geotécnica	Ensaio geotécnicos dos solos e Seções geotécnicas com caracterização genética, textural e espessuras, Modelo de percolação, Sistema de drenagem interna, Definição da remoção de solos inadequados, Tratamentos de fundação, Potencial de liquefação estática, Plano de monitoramento da estrutura e da praia
	Manejo de rejeitos e controle da praia	Direções principais de lançamento, Ramais auxiliares, Distância entre pontos de descarga, Capacidade de suporte de tráfego e travessias,

Quadro 3 – Demanda de um projeto de mineração típico – Fase de operação.

ESTRUTURA	DEMANDA BÁSICA	ESTUDOS E INVESTIGAÇÕES GEOTÉCNICAS REQUERIDOS
Lavra a Céu Aberto e Subterrânea	Cava;	Mapeamento de detalhe dos taludes, Refinamento do modelo e geometria das unidades litológicas, Monitoramento hidrogeológico de detalhe e de deslocamentos em taludes importantes
	Lavra subterrânea;	Mapeamento de detalhe dos realces e desenvolvimentos, Refinamento do Modelo lito-estrutural, Medida do ingresso de água, Monitoramento de pilares, tetos, etc
	Cavas e Lavra subterrânea	Calibração dos modelos de análise (equilíbrio-limite, numérico, percolação), Revisão das dimensões de realces e pilares, Medida de tensões induzidas, Revisão dos setores geomecânicos da cava, definição de bermas de contenção e taludes interrampas e globais, Controle de detonações e danos aceitáveis
Pilha de Estéril	Controle do arranjo geométrico	Rebatimento de taludes, Controle de escoamento e erosões no topo e nos taludes, Recuperação dos 'greides' e revegetação, Integridade da drenagem periférica e encontro nas encostas
	Estabilidade geotécnica	Inspeção visual de bancadas, Monitoramento hidrogeotécnico na pilha e fundação, Revisão do modelo de percolação e pressões internas e na fundação, Calibração da análise de estabilidade, Monitoramento de deslocamentos superficiais e eventuais profundos
	Sistema de drenagem interna	Medidas de vazão no dreno de fundo, Controle de da velocidade do fluxo na saída e da turbidez
Diques de Sedimentação	Controle de desempenho	Verificação de taxa de assoreamento, Medidas de turbidez no extravasor, Limpeza periódica do lago, Controle da área de descarte e do sistema de contenção dos sedimentos removidos
	Estabilidade geotécnica	Inspeção visual, Monitoramento hidrogeotécnico e de deslocamentos
	Medidas Auxiliares	Controle de desmatamento e erosões no entorno do lago
Barragem de Rejeitos	Controle do arranjo geométrico da estrutura de contenção e do manejo do rejeito	Controle do método construtivo da estrutura de contenção, Controle da inclinação da praia e do escoamento do rejeito, dos pontos de lançamento e da distância de descargas adjacentes, Controle da drenagem e erosões dos taludes do maciço, Monitoramento dos cortes e do fluxo nos canais do extravasor, Controle do nível operacional e máximo do lago (borda livre)
	Caracterização geotécnica do rejeito na praia	Verificação da segregação no perfil da praia, Amostragem para ensaios laboratoriais convencionais e de resistência, Ensaios SPT e Piezocone
	Estabilidade geotécnica	Inspeção visual, Perfilagem piezométrica do maciço frontal de rejeitos, Monitoramento piezométrico e de deslocamentos da estrutura de contenção, Controle dos fluxos de saída do sistema de drenagem interna, Controles de risco de liquefação estática

Isto coloca a operação de mina em uma situação completamente diferente das outras atividades da engenharia, onde os proprietários têm desmantelado suas equipes e hoje dependem quase que integralmente de equipes terceirizadas. As empresas de mineração têm cada vez mais ampliado suas equipes de geologia de engenharia e geotecnia tanto para acompanhar seus projetos como para dar assistência permanente a suas operações.

A fase de engenharia detalhada consiste no refinamento das soluções da etapa de engenharia básica, na elaboração do projeto geométrico

de detalhe e das especificações técnicas finais. No descomissionamento, a carga de estudo é bastante variável dependendo muito das condições no final da lavra, do risco de contaminantes e no estado de conservação das estruturas auxiliares. Todas as intervenções na área deverão ser restauradas para a condição permanente com os respectivos planos de monitoramento. Não é intenção neste trabalho discorrer sobre todas estas atividades. Preferimos selecionar alguns casos históricos que ilustram de que maneira a geologia de engenharia e a geotecnia vêm sendo usadas em nossos projetos.

1.1 CASO 1 - ruptura de cunhas volumosas numa lavra subterrânea

A queda de grandes cunhas rochosas do teto de um nível de desenvolvimento em uma lavra subterrânea quando da escavação dos realces laterais, era algo inusitado. As cunhas eram altas e estreitas, e haviam sido ancoradas com cabos de aço. Até a abertura dos realces nenhuma instabilidade foi registrada. Na retroanálise das rupturas procurou-se avaliar a magnitude da redução das tensões laterais que atuavam nos planos das cunhas devido à abertura dos realces.

A mina já havia ultrapassado a profundidade de 500 m e o fenômeno ocorreu quase no fundo da lavra na El. -300 m, onde a tensão gravitacional podia atingir magnitudes acima de 15 MPa.

Essa mina sempre teve a conotação de ser uma lavra em maciço com elevado estado de tensões naturais. Ensaio de medida de tensões (dominantemente induzidas), retroanálises e deduções de geologia estrutural, feitos entre 1990 e 1995, em diversos estudos, apontaram coeficientes K (σ_h/σ_v) entre 2 e 4 e um estudo sugeriu uma tensão armazenada ('locked in') superior a 50 MPa. Apenas como referência, o menor coeficiente sugerido levaria facilmente a tensão horizontal para cerca de 30 MPa, o que tornaria a queda de cunhas com alturas de até 5-6 metros (Figura 1) uma grande surpresa. A Figura 1 mostra uma cunha rompida.



Figura 1 - Vazio deixado pela queda de uma cunha piramidal em desenvolvimento profundo da mina. Notar restos de cabos rompidos.

Para avaliação da tensão lateral atuante no teto da galeria na ruptura recorreu-se a um método

analítico de relaxação proposto por J. W. Bray (apud. Brady e Brown, 1985, 2004) que leva em conta a contribuição da tensão lateral na equação de equilíbrio.

O procedimento determina a força vertical P_I necessária para o equilíbrio-limite, a partir de uma condição inicial elástica, na qual a tensão lateral σ_{H_0} atuante impõe um esforço horizontal H_0 idêntico nos dois planos da cunha. Para simplificação do problema, foi admitido apenas o caso mais provável em que a rigidez normal nos planos da cunha é consideravelmente mais elevada que a rigidez tangencial - equação (1). A expressão reduz-se a:

$$P_I = \frac{2H_0 \operatorname{sen} \alpha \operatorname{sen}(\phi - \alpha)}{\operatorname{sen} \phi} \quad (1)$$

A Figura 2 ilustra a geometria da cunha típica de análise.

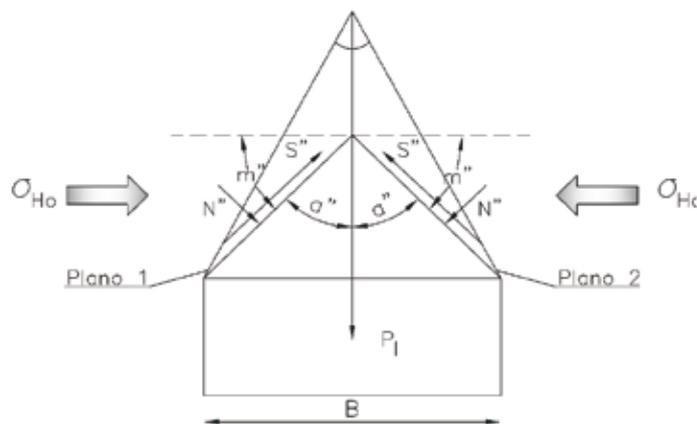


Fig. 2 - Cunha simétrica no teto de uma abertura subterrânea com vão B, parâmetros geométricos e forças atuantes (N, S) nos planos das discontinuidades que formam a cunha.

As combinações geométricas mais comuns das cunhas que desabaram do teto da galeria na El. -300 m foram determinadas com levantamento de detalhe a laser da "capela". Os parâmetros eram os seguintes:

- α : na faixa de 34° a 41°, predominante nas diversas seções levantadas, exceto junto das interseções com outra galeria;
- ϕ mais provável entre 35° e 42°, de acordo com o levantamento das discontinuidades efetuado em grande parte da mina

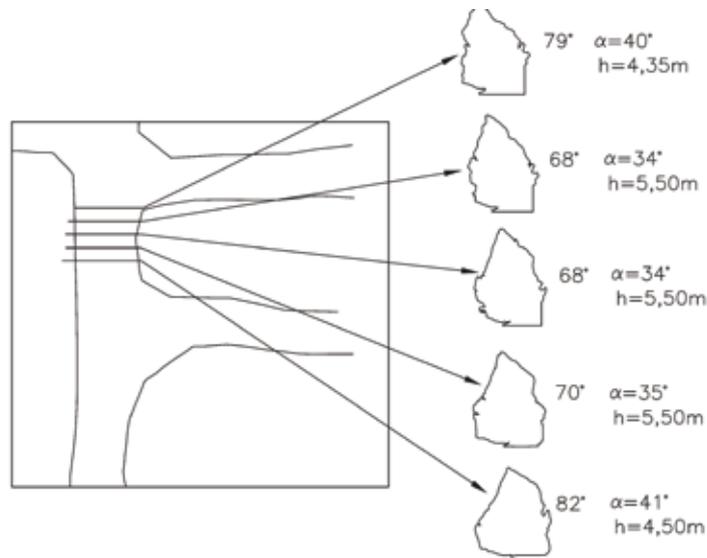


Figura 3 - Levantamento geométrico de detalhe das geometrias das cunhas de grandes dimensões colapsadas no El. -300 m.

A Tabela 4 mostra as combinações mais prováveis dos parâmetros geométricos e geomecânicos em jogo

O Coeficiente de Equilíbrio (CE) é expresso pela diferença entre a força virtual P_l e o peso da cunha. Quando P_l iguala o peso do bloco, tem-se o equilíbrio-limite e CE tende ao valor unitário. Valores de CE negativos ou muito baixos exigem a aplicação de suporte. A razão P_l/W pode ser adotada como próxima do conceito de Fator de Segurança (FS), sendo aceitáveis valores acima de $FS=1,3$. Na retroanálise, valores da razão P_l/W muito baixos (em módulo) indicam quais são as combinações mais prováveis dos ângulos de atrito mobilizados com os ângulos apicais e alturas medidos. A compatibilidade foi encontrada com adoção do σ_{Ho} de 0,4 MPa.

Cerca de quatro anos depois deste estudo, foram feitas determinações das tensões próximas aos realces a 700 m de profundidade e o resultado encontrado, conforme relatório interno da mina, foi de 0,8 MPa para a menor tensão principal. A tensão vertical era tão mais elevada que a horizontal que

as paredes da galeria chegaram a ceder por compressão e flambagem na queda de cunhas pouco mais largas que o vão (Figura 3).

1.1.1 AVALIAÇÃO DA PERDA DA CAPACIDADE DE ANCORAGEM DOS CABOS

O desempenho dos cabos é afetado pela variação da tensão de confinamento no maciço. A Figura 4 mostra a variação da tensão horizontal induzida na galeria da El. -240 m pela escavação dos realces laterais, calculada por elementos finitos. Para um campo gravitacional hidrostático a tensão horizontal *in situ* seria da ordem de 18 MPa. Assumindo uma concentração de tensões mínima no entorno da galeria de duas vezes, chega-se a tensões da ordem de 36 MPa previamente à abertura do realce vizinho. Observando a Figura 4, verifica-se um valor médio para as tensões atuantes no teto da referida galeria de -8,5 MPa (faixa em azul claro), o que indica um desconfinamento total de 44,5 MPa.

Tabela 4 - Combinações de ϕ , α e altura das cunhas e valores da razão de P_l /Peso da cunha (W) expressos como Coeficiente de Equilíbrio (CE).

RETROANÁLISE								
CE = P_l/W								
Altura da cunha (m)	α - Ângulo apical (graus)	ϕ - Ângulo de atrito (graus)						
		20	25	30	35	40	42	45
3,75	45	-17,6	-11,5	-7,4	-4,3	-1,9	-1,1	0
4,4	41	-10,7	-6,6	-3,8	-1,8	-0,2	0,4	1,1
5,4	35	-5,3	-2,9	-1,2	0	0,9	1,3	1,7
7,5	27	-1,2	-0,2	0,4	0,9	1,3	1,4	1,6

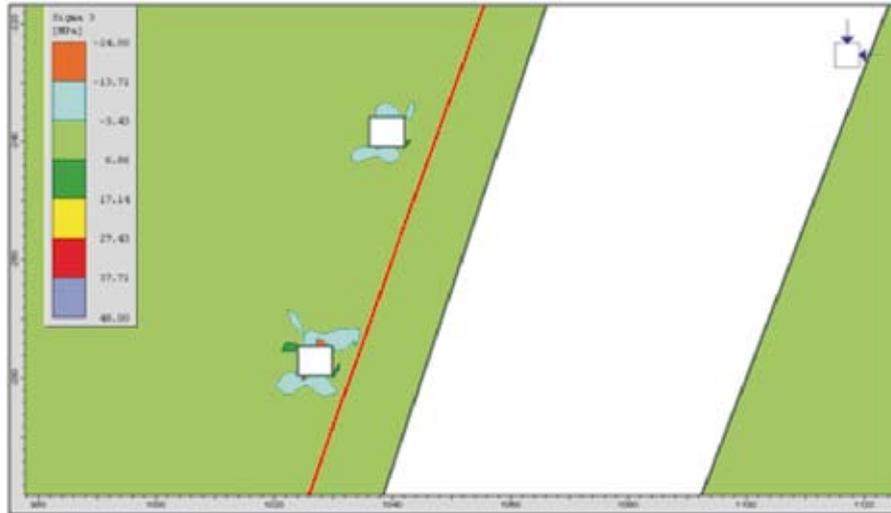


Figura 4 - Detalhe da relaxação de tensões horizontais nas galerias da El. -240 m após abertura do realce lateral.

Para avaliação da resistência ao cisalhamento disponível no cabo após a relaxação, foi realizado um estudo paramétrico com o programa computacional Cablebond-GRC, do Canadá, que permite análises de sensibilidade com variação do módulo de deformabilidade do maciço. O programa estima o efeito da variação das tensões normais atuantes na ancoragem após a instalação do elemento de suporte.

A faixa de variação do módulo do maciço foi de 20 GPa a 40 GPa e a amplitude do decréscimo da tensão lateral foi de 40 MPa (descompressão), após a abertura do realce vizinho.

A Figura 5 apresenta os resultados da análise paramétrica mostrando a redução da resistência ao cisalhamento (MPa) ao longo do cabo como

consequência de diferentes intensidades de relaxação das tensões no teto das galerias, para diversas condições (módulos) do maciço rochoso.

Nota-se que, para o maciço com módulo de deformabilidade médio de 30 GPa, a relaxação alcançada em certas regiões nas galerias adjacentes aos realces provoca a redução da resistência ao cisalhamento na interface de mais de 4 MPa para 1,6 MPa, em um cabo com embutimento de 2,5 m na cunha e injetado com calda com relação Água:Cimento de 0,4:1. Isto levou a estreitar a malha inicial do sistema de ancoragem para 1,5 m x 1,5 m, compatível com a demanda de aderência máxima de 1,8 MPa requerida para estabilização das cunhas de maior dimensão que haviam sofrido ruptura.

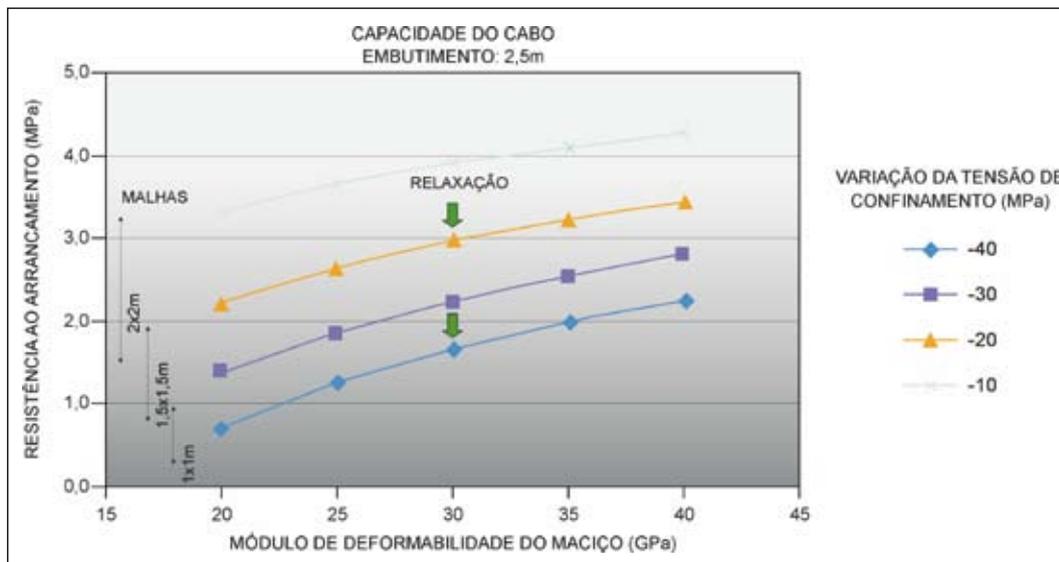


Figura 5 - Perda da capacidade do cabo em função da relaxação das tensões no teto das galerias, para diversas condições do maciço rochoso. Foram lançadas faixas da demanda de aderência nas malhas de 2 x 2 m, 1,5 x 1,5 m e 1 x 1 m, para várias cunhas com altura maior que 4 m.

A tensão de aderência requerida é atingida mediante a instalação de um comprimento suficiente do cabo no interior do bloco instável (embutimento).

Este caso coloca em evidência uma característica peculiar da lavra subterrânea em que diferentes trajetórias de carregamento levam maciços similares a exibir comportamentos muito diferenciados, dependendo do posicionamento em zonas de concentração ou relaxação de tensões induzidas pelas aberturas. Em geral, tais condições coexistem numa lavra em função da geometria dos realces e da sequência da escavação.

1.2 CASO 2 - metodologia de dimensionamento de bancadas e taludes interrampas em cavas rochosas

A sequência de dimensionamento dos taludes em rocha deve sempre ser iniciada pelo dimensionamento das bancadas, seguindo para o dimensionamento inter-rampa e finalmente a definição do talude global. Na escala das bancadas é onde ocorre a maior influência das descontinuidades rochosas. Os dois problemas envolvidos são: a definição da inclinação da face do talude e da largura da bancada de modo a acomodar eventuais rupturas localizadas.

O método mencionado em seguida busca, além de definir a setorização da cava em função do padrão estrutural e dos modos de rupturas similares, que já é prática consagrada, os seguintes alvos:

- Definir as cunhas e as rupturas planares críticas, diferindo de outros programas por operar, vetorialmente, grande número de planos e blocos, podendo-se combinar entre si todos os planos medidos no mapeamento ou optar por combinações de planos dentro de margens de dispersão em torno do vetor médio. O resultado é a determinação dos blocos potencialmente instáveis de maior frequência definidos sem adoção de orientações médias de famílias ou de planos selecionados

arbitrariamente nos estereogramas das descontinuidades.

- Calcular os volumes dos blocos potencialmente instáveis no corte, o volume aproximado do material rompido e a distância de alcance na bancada, com base nos ângulos de repouso das massas maiores.
- Dimensionar o ponto ótimo de conjugação geomecânica e operacional para largura de berma de contenção e ângulo de face de bancada.

O ponto ótimo deve ser encontrado entre a geometria da bancada que praticamente elimina os riscos de deslizamentos estruturalmente controlados e a configuração com a qual se associa um número reduzido de instabilidades que possam ser contidas nas bermas, evitando que os blocos desprendidos atinjam o fundo da cava.

O fluxograma da Figura 6 sintetiza os passos principais do método (Cella et al, 2008).

O ponto central da metodologia é estimar qual será a perda sistemática da crista da bancada, isto é o 'backbreak' típico a ser adicionado à largura requerida para contenção dos blocos potencialmente instáveis da berma superior. Por sua vez, a largura da contenção é definida com base no volume dos blocos críticos mais frequentes, determinados de acordo com uma função de distribuição de frequência das persistências das descontinuidades mapeadas no setor. Se a berma resultante da adição do 'backbreak' à largura da contenção for inferior à berma operacional, adota-se a berma operacional para definição do talude interrampa, caso contrário avalia-se qual o ponto ótimo entre o aumento requerido da largura de contenção e a inclinação da face da bancada, segundo critérios operacionais e econômicos. Importante ressaltar que não se adota valores médios nem de orientação espacial, nem de persistência das descontinuidades, o que permite a aproximação de uma condição de operar a cava com percentual aceitável de rupturas factíveis de serem contidas na própria bancada.

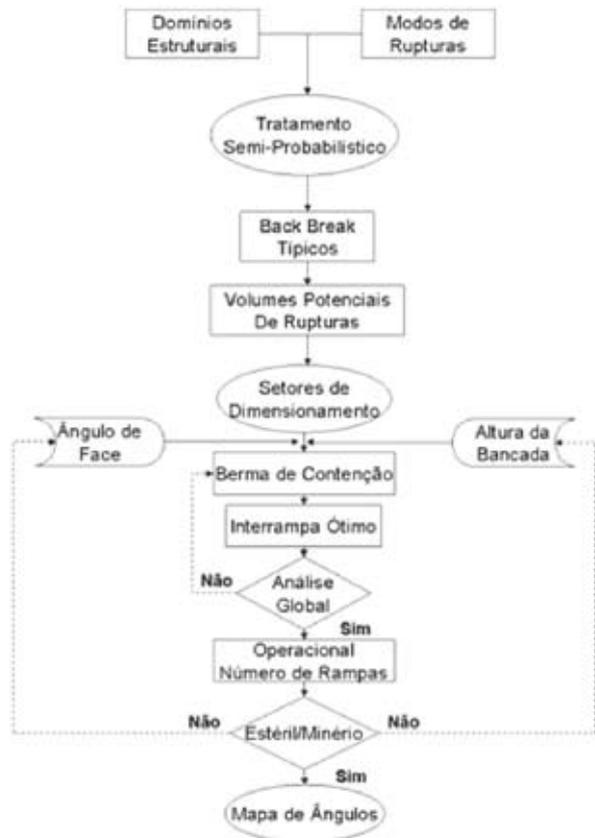


Figura 6 - Fluxograma da metodologia de dimensionamento de cavas rochosas (Cella et al., 2008)

A Figura 7 apresenta exemplo da planilha de cálculo do volume no corte e na bancada, após a ruptura, de uma cunha crítica com tamanho significativo em relação á altura da bancada. As cunhas nessa condição são definidas a partir de um critério de corte na distribuição de freqüências das persistências dos planos que formam a cunha o mesmo valendo para as superfícies planares potenciais.

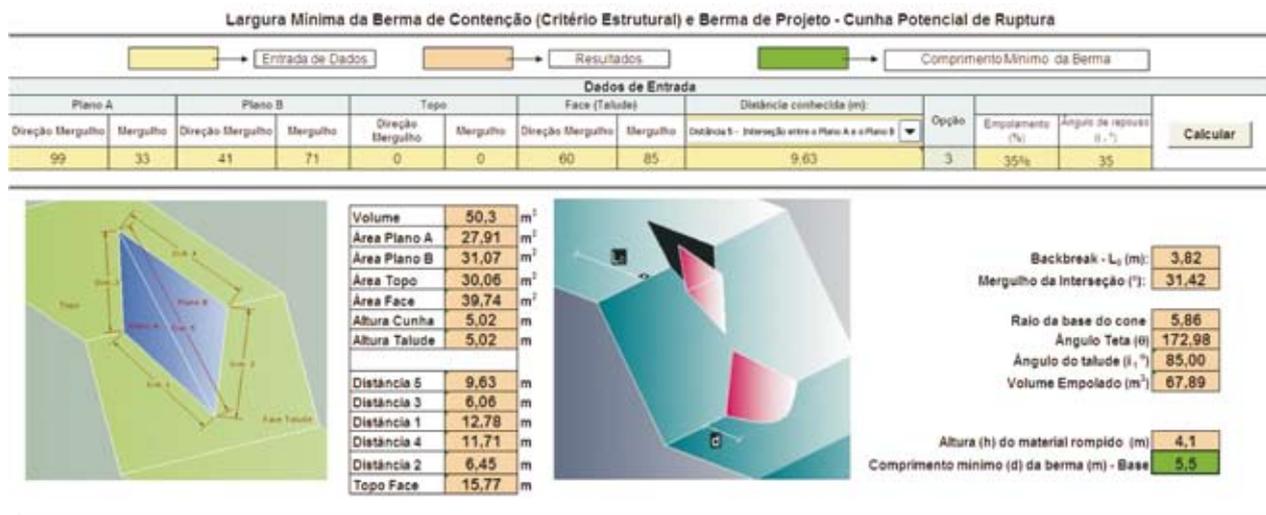


Figura 7 - Exemplo de cálculo para definição da largura mínima da berma necessária para conter na bancada o alcance (d) da cunha instável, de alta freqüência, e o 'backbreak' na berma superior (L).

A Figura 8 ilustra o passo seguinte onde se avalia a correlação entre o ângulo inter-rampa (pé-pé) e a inclinação do talude de face da bancada. Nesse caso, indica que 65° corresponde ao ponto ótimo.



Figura 8 - Ponto ótimo na correlação dos ângulos de face de bancada (°) versus inter-rampa (°).

A adoção de um ângulo de face mais íngreme que 65° na bancada conduziria à necessidade de aumentar a largura da berma de contenção, que eventualmente pode superar a largura operacional, e levar ao abatimento desnecessário do talude interrampa. Se adotada uma inclinação da face inferior a 65°, o talude interrampa acaba suavizado sem qualquer benefício pois a berma de contenção tem largura menor que a requerida operacionalmente.

O produto final é o mapa de setorização da cava com a definição dos níveis de risco associados à freqüência dos blocos críticos.

A Figura 9 mostra um mapa de risco gerado nos diversos setores de uma cava rochosa.

O risco indicado em três categorias cromáticas corresponde às faixas de probabilidade estimadas de que rupturas potenciais possam gerar escombros que excedem a largura da berma praticada na cava. Esse nível de risco é mais importante porque os escombros cuja distância de lançamento ultrapassa a largura da berma de contenção podem atingir níveis inferiores da cava com grande impacto destrutivo, mesmo de blocos de dimensões reduzidas.

Em um segundo nível, considerando o universo complementar de rupturas que seriam contidas nas bermas existirá blocos potencialmente instáveis no talude cuja ruptura mesmo que contida inteiramente na largura da berma representa risco operacional para o tráfego local de pessoas e equipamentos.

No primeiro caso, o risco pode ser reduzido com o aumento da largura da berma de contenção

ou também com uso de técnica de desmonte ajustada ao padrão de compartimentação estrutural do setor específico.

No segundo caso, o risco deverá ser identificado no mapeamento depois do desmonte e da remoção dos blocos soltos. A solução ideal deverá ser definida caso a caso.

É importante discutir qual faixa de probabilidade pode ser considerada satisfatória para a condição de operação. Em tese, qualquer ruptura cujo lançamento excede a largura da berma é indesejável e deveria ser evitada. Porém, como se sabe, se o talude for dimensionado para 'risco zero', adotando-se largura de berma capaz de conter o espalhamento de qualquer ruptura potencial, a lavra certamente se tornaria inviável economicamente.

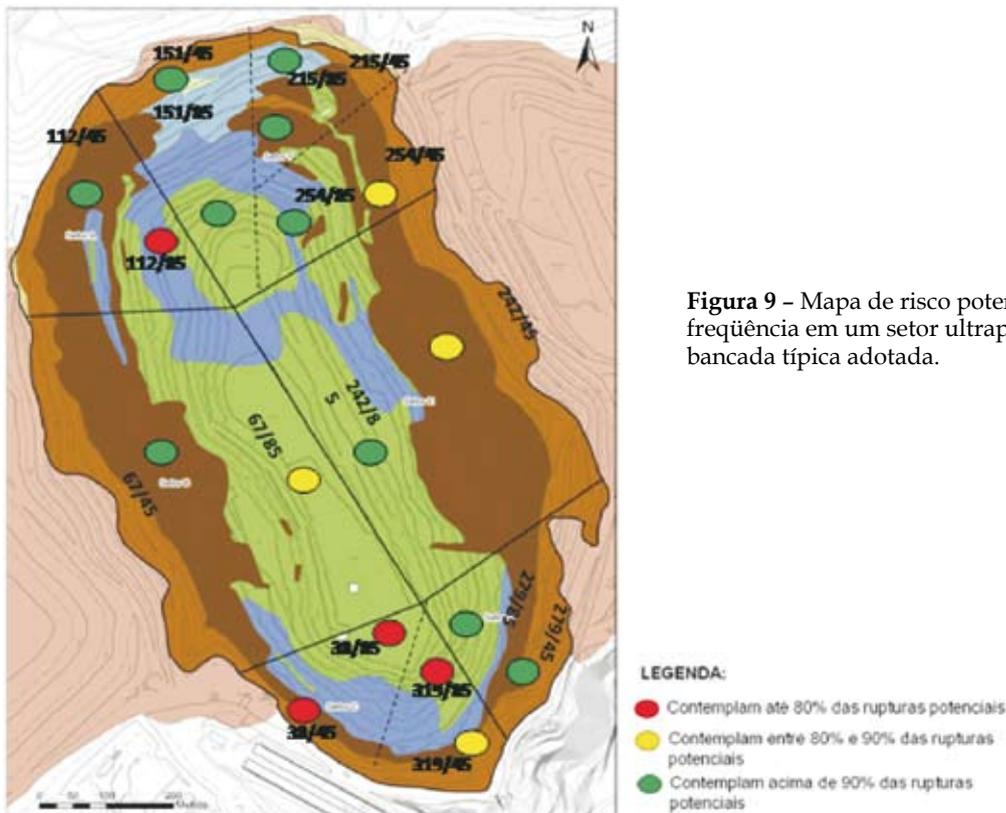


Figura 9 – Mapa de risco potencial de uma ruptura de alta frequência em um setor ultrapassar o limite da berma da bancada típica adotada.

O que resta então é reconhecer nos setores de maior risco quais são os tipos de ruptura potencial que estão associados com os maiores volumes de instabilidade e adotar condições operacionais mais adequadas à situação local. As medidas possíveis são:

- Ajustar a geometria do plano de fogo de modo a reduzir o dano para uma compartimentação específica do maciço;

- Minimizar a penetração da onda de choque no maciço da bancada, já que as instabilidades de grande volume são mais profundas e, por isso, mais confinadas, com maior chance de preservarem o encaixe original das paredes das discontinuidades e o coeficiente de atrito natural. Com isso apenas os blocos mais superficiais, de menor volume, sofrem maior abalo;

- Reduzir a dimensão de um bloco de grande dimensão em situação comprovadamente de risco definida no mapeamento e por análise de estabilidade da geometria específica do bloco;
- Isolamento temporário de áreas abaixo do local em situação crítica;
- Operar com maior nível de risco em áreas selecionadas;

A aplicação de reforço do maciço é rara em taludes de mineração e só se mostra aceitável em casos específicos para estabilizações localizadas.

Este caso demonstra como taludes rochosos de mais de 500 m de altura podem operar com segurança e razão estéril-minério aceitáveis maximizando as probabilidades de retenção de blocos instáveis na bancada. A metodologia foi desenvolvida para projeto em conjunto com a dissertação de mestrado (UFOP, em fase final) de Felipe N. dos Santos e inclui um programa de automatização das planilhas.

1.3 CASO 3 - mina de ferro a céu aberto no quadrilátero ferrífero, MG

A apresentação deste caso privilegia o registro histórico de mais de 10 anos de acompanhamento do talude. Expõe toda a evolução do conhecimento geológico à medida que o comportamento observado do talude impunha a reinterpretação do modelo inicial, baseado em sondagens geológicas com penetração de apenas poucos metros no filito do talude da lapa e no mapeamento das bancadas iniciais da cava, portanto, em informações muito superficiais.

Em julho de 2001 identificou-se uma trinca com mais de 400m de extensão e uma dezena de centímetros de abertura no alto do talude oeste, quase todo escavado em filito alterado (A4), à época com cerca de 160 m de altura e inclinação média de 35°. Iniciou-se o monitoramento através de réguas em superfície e de marcos superficiais. Duas hipóteses foram levantadas para a origem da trinca. A primeira, na época considerada a mais provável, seria um processo de alívio de tensões no filito cuja foliação mergulha em direção da cava, levando à formação da trinca de tração na crista do talude. A outra hipótese seria um processo de ruptura bi-planar ao longo de uma zona de fraqueza paralela à xistosidade, na porção superior

do talude, e cortando a foliação na base da cava. Foram construídas 5 trincheiras profundas no alto do talude para verificar a continuidade da trinca, indicada com profundidade de 25 m no modelo de elementos finitos elaborado para avaliação da hipótese de desconfinamento lateral do talude. Entretanto, observou-se que a fenda de tração morria a pequena profundidade numa zona de fraqueza paralela à foliação, com mergulho de 40-50°, que mostrava que o movimento no topo do talude era condicionado pela foliação. Pares de pinos de leitura foram instalados no interior da trincheira para se acompanhar os deslocamentos tangenciais num plano em que o deslocamento era evidente.

Análises de verificação de uma possível ruptura bi-planar reforçaram inicialmente essa hipótese e executaram-se 5 sondagens na porção mais alta do talude oeste na tentativa de interceptar a zona de fraqueza em maior profundidade, entretanto de difícil identificação nos testemunhos de filito muito intemperizado.

Durante todo o restante do ano de 2001 a trinca continuou se abrindo na superfície do terreno e a zona de fraqueza coincidente com a foliação acumulava deslocamentos tangenciais de alguns milímetros.

Em janeiro de 2002, aconteceram instabilidades de pequena monta, uma delas causada por flambagem (“*buckling*”) da foliação que localmente tinha a direção e o mergulho da face da bancada, onde a coluna de rocha, numa altura de 15m, rompeu-se sob peso próprio no pé da bancada. Apesar do pequeno alcance, essa ruptura levou à desconfiança de um fenômeno similar na grande escala na base do talude. Em abril de 2002, suspeitou-se que o modelo poderia envolver então movimentos de cisalhamento ao longo de planos da foliação no topo do talude transferindo carga para as regiões inferiores do filito, que se deformava mais acentuadamente levando a rupturas localizadas.

Em junho de 2002, foi observada uma movimentação importante da trinca. Em nova inspeção do talude, verificou-se, dentro de uma das trincheiras, um deslocamento de 20 mm em 13 dias, ao longo da foliação, denotando aceleração do movimento. Percebeu-se também que a trinca agora se estendia para bancadas inferiores na porção mais a sul, o que indicava encurvamento na direção da face do talude. Nessa época, decidiu-se pelo retaludamento parcial

de cerca de 30 m no topo do talude, com volume aproximado de 360.000 m³ a serem removidos no prazo aproximado de 3 meses, com o objetivo de desacelerar o movimento, o que surtiu efeito.

As análises de estabilidade realizadas desde 1996, incluindo as de suporte ao retaludamento, examinaram diversas configurações possíveis do talude bem como vários parâmetros de resistência para o filito decomposto (A4), que incorporavam resultados de ensaios de 1998 e resultados de várias retroanálises de rupturas de bancadas. Ocorreu sistematicamente uma tendência ao abatimento do ângulo médio de inclinação do talude global de 38°, com FS mais baixo, até 31°, desde 1996 até 2002. Durante a fase operacional, FS=1,2 foram aceitos e se mostraram adequados, pois as rupturas puderam ser controladas antes de se tornarem graves.

Essa tendência está associada à evolução do Modelo Geológico, calcado inicialmente em algumas sondagens e depois em observações do comportamento real do talude. As feições que induziram a avaliação inicial da resistência mais alta foram intercalações de filito moderadamente alterado e ferruginizações nos planos de foliação por percolação. As primeiras não se mostraram contínuas exceto por dois corpos e as ferruginizações não penetravam mais que 30-40 m no maciço.

Neste período a trinca aumentou de 400 para 500 m de extensão, mas adquiriu-se um conhecimento bem mais abalizado sobre a origem dos movimenros e o modelo geológico foi substancialmente alterado.

O aparecimento de deslizamentos afetando duas bancadas (h=30 m) condicionados por superfícies espelhadas assinala pela primeira vez a possibilidade de resistências bem mais baixas na escala das dezenas de metros, com o ângulo de atrito avaliado

em torno de 25-26° e reforçou a suspeita da existência de uma superfície de fraqueza pré-existente mais profunda, afetando a porção superior do talude e já submetida a movimentações prévias.

A deformação global do talude foi, portanto, explicada por cisalhamento conjugado em planos de foliação com mergulho de 40-50° no topo da cava e transferência de carga para o bloco inferior do filito alterado, que se deformava ou sofria ruptura localizada. Inúmeras retroanálises de rupturas na escala de duas e até três bancadas levaram à adoção de valores de resistência para a superfície global paralela à foliação, com $c=15$ kPa e $\phi=26,5^\circ$.

O talude de filito foi sempre considerado seco devido ao efeito drenante que o rebaixamento da cava exercia sobre ele. A partir de certa profundidade começou a surgir água na face do talude. Furos horizontais profundos foram feitos e pôde-se rever o modelo hidrogeológico com a descoberta de camadas permeáveis de metachert dentro do filito e que podiam reter a água. Este modelo foi então incorporado nas análises.

Nessa etapa da lavra, a parede inferior da cava já avançava praticamente em filito com foliação subvertical. A interpretação do processo global de deformação envolveu cisalhamento na foliação com mergulho médio na zona superior do talude e flexão da foliação na zona inferior de altos ângulos de mergulho. O cisalhamento na foliação parecia empurrar o maciço na zona de inflexão do ângulo médio para o ângulo mais íngreme de mergulho. Por ser esta zona de inflexão conformada em filito brando, ela não se rompeu subitamente e evoluiu por ruptura progressiva da massa na zona inferior do talude.

A Figura 10 mostra as principais características geológicas da cava.

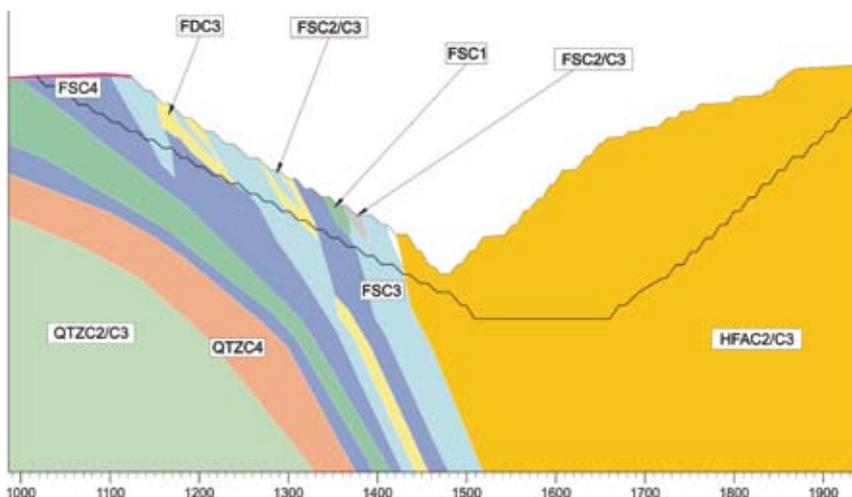


Figura 10 – Síntese da geologia da cava atual e final com a presença no talude oeste de filito dolomítico (FD) e sericítico (FS), consistências dominantes C4 e C3, e formação ferrífera (HFA) no talude leste.



Figura 12 – Cisalhamento reverso na zona inferior do talude com foliação com alto ângulo devido a mecanismo de cisalhamento superior e deformação horizontal na base.

1.4 CASO 4 – mina subterrânea no Peru

A mina R, poli-metálica, foi lavrada inicialmente a céu aberto, até os anos sessenta, nos Andes peruanos. O fundo da cava final variava entre as El. 4200 e 4250 m. A encosta original acima da cava prossegue até a El. 5000 m, com uma inclinação média de 32° , localmente variando de 34° a 37° . Um grande escorregamento se formou na encosta durante a lavra a céu aberto atingindo a El. 4400 m aproximadamente (Figura 13 em 2007, já afetada pela mina subterrânea).

A mina foi retomada em 2002 como uma lavra subterrânea, usando o método de abatimento por sub-nível. O material abatido imediatamente atingiu o fundo da cava formando buracos arredondados e quando a lavra atingiu a El. 4190 m alguma instabilização foi notada no talude. Quando a lavra alcançou a El. 4150 m, uma grande cicatriz foi observada contornando o antigo escorregamento e se estendendo até a El. 4600 m.



Figura 13 – Vista frontal do talude da cava.

O minério está desenvolvido em uma grande zona de cisalhamento sub-vertical. A qualidade geomecânica do minério e da rocha encaixante é muito ruim. O programa ROCLAB (www.rocs-science.com) foi usado para avaliar os parâmetros geomecânicos do maciço. Três materiais foram identificados:

- Tufos – Dominam ao longo do talude e são constituídos principalmente de rocha dura acamadada com mergulho em geral em torno de 20° para dentro da encosta.
- Zona fraturada no entorno do minério – É uma rocha muito fraturada e cisalhada e localmente intemperizada com cerca de 20m de espessura de cada lado do minério.
- Minério – Altamente fraturado e cisalhado e muito intemperizado.

O mecanismo ligando o método de lavra por abatimento à reativação da instabilidade do talude é muito claro e não despertava dúvidas. A grande dúvida que surgiu era se seria possível que o escorregamento viesse a se estender em profundidade e fechar a mina subterrânea.

A primeira análise realizada envolveu o padrão da subsidência que seria causada pela lavra. Para isso usou-se os estudos desenvolvidos por Evert Hoek e que constam de Brady e Brown (2004). Pôde-se perceber que as trincas formadas na encosta não se encaixavam no padrão que seria de se esperar para uma subsidência típica. Elas não se desenvolviam paralelas ao corpo mineral. A superfície de ruptura se desenvolvia quase que paralelamente à superfície do talude e era muito suave quando comparada com a que seria previsível para este tipo de abatimento.

A primeira conclusão foi que o mecanismo de subsidência não era convencional neste caso e que atuava da seguinte maneira:

- Devido à má qualidade do maciço na lavra subterrânea, o abatimento ocorria muito rapidamente, “sugando” o material do fundo da cava.
- A retirada de material do fundo da cava descalçava o antigo escorregamento reativando seu movimento.
- Por outro lado, o material escorregado da encosta voltava a encher o fundo da cava e alimentava automaticamente o enchimento impedindo que um mecanismo clássico de abatimento com ruptura do “hanging wall” se estabelecesse.

Tabela 5 - Parâmetros geomecânicos dos maciços da mina.

MATERIAL	LITOLOGIA	RMR	Q	GSI	Rc (MPa)	mi	c (MPa)	ϕ	E (MPa)
HW afastado	Tufo	30-40	0,21-0,64	55	60	16	0,6	49°	3.540
HW imediato	Andesito	20-30	0,07-0,21	30	30	25	0,32	39,6°	528
Minério	Andesito Sulfetado	<20	<0,07	15	30	25	0,19	31°	315

Análises numéricas usando o programa de elementos finitos elasto-plástico PHASE 2 (www.rocsience.com) modelaram toda a encosta até sua

altura máxima e a lavra subterrânea em 8 estágios (subníveis), o que permitiu comprovar o mecanismo interpretado (Figura 14).

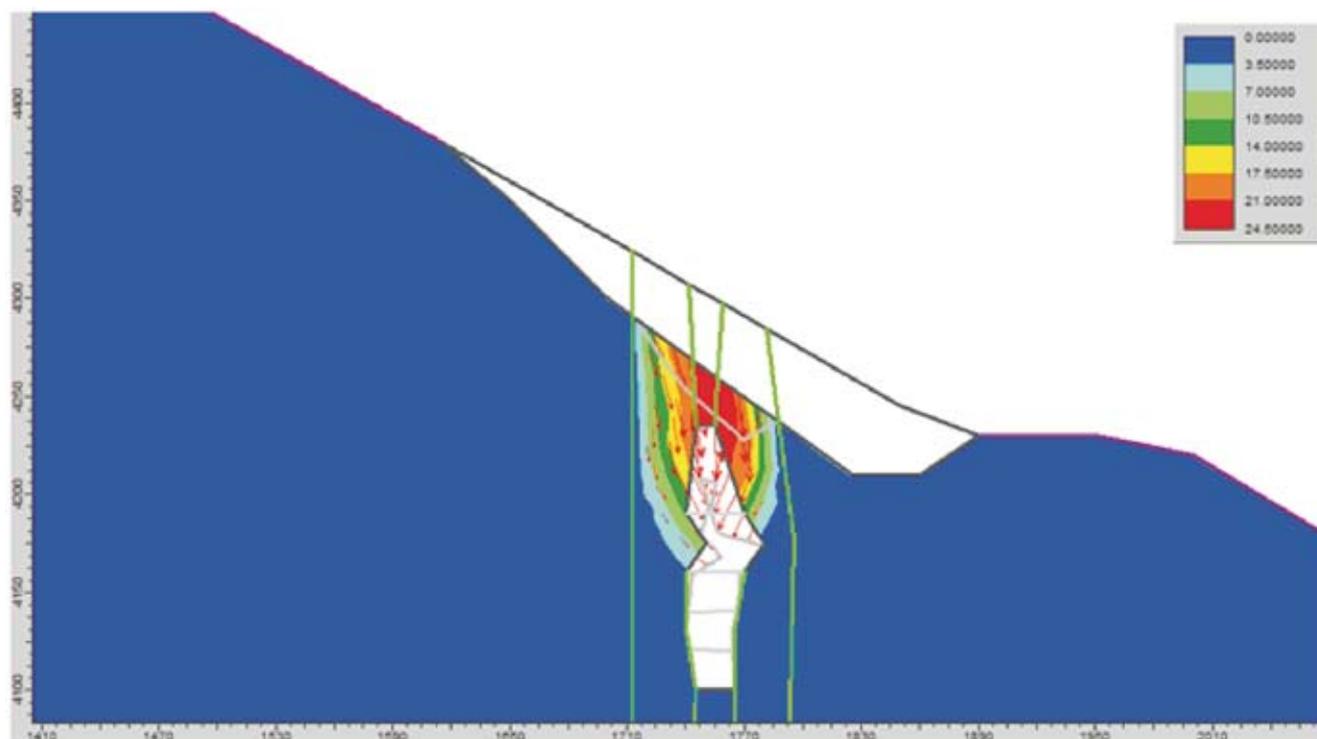


Figura 14 - Cone de deslocamentos (m) no entorno da cavidade.

- Os deslocamentos ocorrem muito perto da zona de minério e estão claramente relacionados ao abatimento.
- Instabilizações localizadas são observadas ao longo do talude devido ao abatimento, mas não causam grandes deslocamentos.

O maciço no entorno da lavra apresenta um comportamento pastoso (“squeezing”) que é responsável pelas grandes deformações no entorno das escavações. Se isto apresenta vantagens por minimizar o efeito do abatimento clássico, criou deformações excessivas no suporte selecionado, que era constituído de cambotas rígidas soldadas com perfil “I” de 4” e 6” (Figura 15).



Figura 15 - Cambotas rígidas deformadas.

Isto levou à utilização de suportes cedentes (“yielding”). Foram selecionadas as cambotas com perfil TH com três elementos e duas juntas de deslizamento, que permitem absorver deformações tanto verticais como horizontais, com um fechamento de até 0,5m, aliviando desta maneira as cargas atuantes (Figura 16).

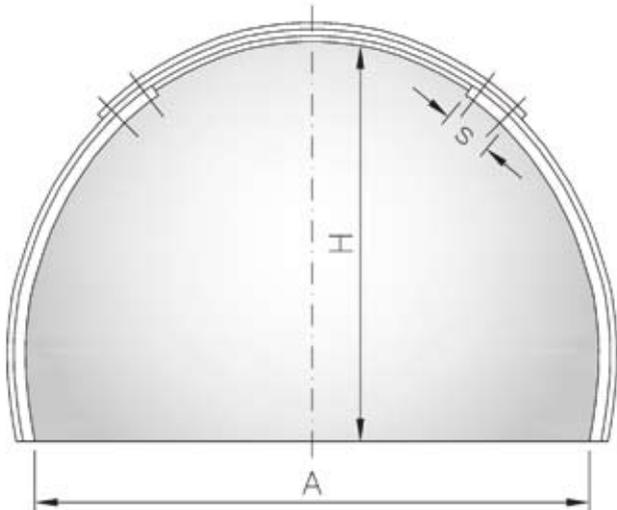


Figura 16 - Seção típica com cambota cedente.

A seção de escavação foi aumentada de modo a permitir manter o vão necessário, após as deformações de cedência. As análises consideraram a seção sem “invert” e com ele, rígido ou cedente.

As análises que permitiram dimensionar este suporte foram também feitas usando o PHASE 2 (www.rocscience.com).

O modelo computacional foi desenvolvido em 4 estágios: (1) aplicação da carga devida ao estado de tensão natural (gravitacional e hidrostático); (2) simulação de uma condição equivalente à escavação da frente; (3) simulação da condição do momento de instalação das cambotas cedentes, 1m atrás da frente; (4) situação final depois de uma convergência total da seção escavada e mobilização da reação completa do suporte.

Para representar os estágios (3) e (4), pressões internas foram aplicadas à superfície de escavação, com valores equivalentes a uma restrição existente à convergência do túnel, imposta pela proximidade da frente de escavação. Os valores aproximados dessas pressões foram obtidas pelo método de convergência-rocha-suporte implementado no programa RocSupport (versão 3.0 (www.rocscience.com)).

A Figura 17 mostra os resultados da análise, de uma galeria de 3,3m, que com um deslocamento radial de ~15cm levou a uma seção final de ~3m, como desejado, sem ruptura das cambotas (cor azul).

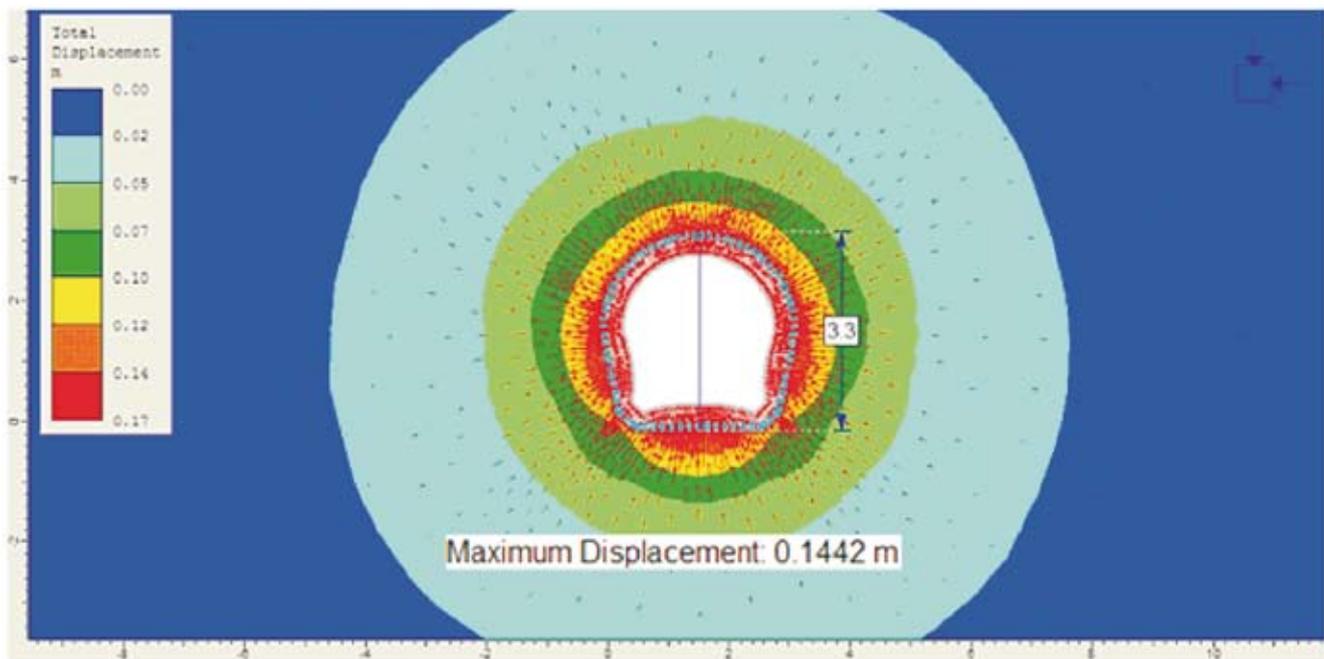


Figura 17 - Convergência de 9% no entorno da escavação com cambotas cedentes.

O caso da mina no Peru, com a intensa deformação induzida pela lavra subterrânea no maciço de baixa qualidade sobreposto aos realces, ilustra o desencadeamento do fenômeno de “squeezing” em nível pouco profundo, uma situação oposta ao maciço competente e elástico em ambiente de relaxação de tensões apresentado no Caso 1.

2 COMENTÁRIO FINAL

Os casos apresentados realçam uma característica peculiar dos projetos de mineração: a de possibilitar o envolvimento contínuo do projetista com a gama de fenômenos que rege o comportamento dos maciços durante a lavra. O acompanhamento sistemático e criterioso das escavações propicia ganho gradual de informações que vão sendo incorporadas no Modelo Geológico e Geotécnico durante a operação das minas. Isso permite que se façam adaptações do projeto e, quando necessário, correções de rota. Essas particularidades da mineração a diferem substancialmente dos projetos de obras civis, que devem ser completamente definidos na fase de engenharia detalhada, e explicam a maior flexibilidade em trabalhar com margens de segurança aparentemente mais estreitas nas lavras.

Nas obras auxiliares como barragens de rejeitos ou de água e diques de contenção de finos a semelhança com obras civis é maior, embora a

seção de alteamento de uma barragem de rejeitos possa ser modificada ou não, a depender do comportamento observado da estrutura inicial.

Agradecimentos

Aos colaboradores da BVP Engenharia, geól. Maria Teresa Pazzini, eng. Laura Ferrari e aos ex-colaboradores eng. Felipe N. dos Santos, geól. Fábio Magalhães, geól. João E. Tosetti e geól. Dominique Daman, que tiveram importante participação no desenvolvimento desses projetos.

BIBLIOGRAFIA

Baczynski, N.R.P., 2000. *STEPSIM4 Step-path method for slope risks*, Geo Eng, Proc. Intern. Conference on Geotech. & Geol. Engin., Melbourne, 6.

Brady, B.H.G. & E.T. Brown, 1985 e 2004. *Rock mechanics for underground mining*, Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 628 p.

Cella, P.R.C. et al., 2008. *Dimensionamento de bancadas em rocha na mina de cobre do Sossego, Vale, no Estado do Pará*, 12 Congr. Bras. Geol. Eng., ABGE, Porto de Galinhas, 13p..

Santos, F. Neiva dos - *Dissertação de Mestrado, em preparação, UFOP, 2011*

DIRETRIZES PARA AUTORES

PREPARAÇÃO PARA SUBMISSÃO

Tipo e Tamanho de Arquivo: O texto do manuscrito deverá ser enviado em **arquivo Word (.doc)**, **em separado**, com os locais de inserção das figuras assinalados, seguido das respectivas legendas. As **ilustrações** deverão ser enviadas em **arquivo .tif**, também **em separado** (uma ilustração por arquivo). O mesmo procedimento deverá ser adotado para as **tabelas**, em arquivo. doc.

O artigo não poderá ultrapassar a **10.000** palavras ou **20 páginas**, incluindo título, autores, instituições e e-mail, resumo e palavras-chave, abstract e keywords, texto, figuras, tabelas, mapas, referências e legendas.

Nenhum **arquivo** poderá ultrapassar a **10Mb** de tamanho.

Forma de envio: O texto deverá ser enviado junto com as **ilustrações** (inclusive tabelas) no Sistema Eletrônico de submissão (ver passos práticos para envio de manuscritos na página da RBGEA, no ítem “Instruções para envio de artigos”).

ARTIGOS

Organização de artigos: deverá constar em sequência, o título, nome completo do(s) autor(es), instituição e e-mail (nome da instituição, cidade, estado, país e e-mail. Para alunos de mestrado ou doutorado, indicar “Programa de Pós-graduação”, instituição, e demais informações acima), resumo e palavras-chave, abstract e keywords, texto completo, referências, ilustrações e tabelas. O texto deve conter, preferencialmente: introdução, materiais e métodos, resultados, discussão, conclusões e agradecimentos.

Hierarquização dos títulos e subtítulos: Deve seguir o padrão:

Nível 1 - EM **NEGRITO**, TODAS AS LETRAS MAIÚSCULAS.

Nível 2 - Em **negrito**; a primeira letra da primeira palavra em maiúscula e as demais minúsculas.

Nível 3 - **ITÁLICO**, NÃO NEGRITO, TODAS AS LETRAS MAIÚSCULAS.

Nível 4 - **Itálico**, não negrito; a primeira letra da primeira palavra em maiúscula e as demais minúsculas.

Agradecimentos - **Negrito e itálico** (apenas o subtítulo). **Referências - Negritas e minúsculas** (apenas o subtítulo).

Manter um espaço simples entre itens e subitens do texto. Utilizar fonte Times New Roman, tamanho 11.

A indicação da inserção das ilustrações (figuras, tabelas, etc) no texto deverá ser em posição o mais próximo possível de sua primeira citação.

Formato do Resumo, Resúmen e o Abstract: Não poderão exceder 300 palavras cada, em parágrafo único, fonte Times New Roman, corpo 10, espaço simples (1,0) e serem seguidos de palavras-chaves, palabras claves e keywords (no mínimo 3 e máximo 5), respectivamente. Artigos em português, espanhol ou francês deverão ter o título vertido para o idioma inglês, em **MAIÚSCULO E ITÁLICO**, colocado após a palavra Abstract.

Formato do texto: Editar o texto em Word, fonte Times New Roman, corpo 11, espaço simples, papel A4, orientação em retrato e editado em apenas uma coluna. As margens deverão ter as seguintes medidas: superior: 2,0; inferior 2,0; esquerda 3,0 e direita 2,0. Digitar as tabelas em documentos word.

Abreviações: Devem ser evitadas ou mantidas ao mínimo. Se usadas, devem ser definidas na primeira vez que forem mencionadas e não devem ser utilizadas no título, resumo e abstract.

Ilustrações: A versão impressa da RBG publica ilustrações em preto e branco e tons de cinza. A versão “on line” publicações coloridas. As fontes usadas para textos sobre fotografias deve ser uma da família da Helvética.

As ilustrações gráficas, fotográficas e fotomicrográficas serão numeradas seqüencialmente, na ordem de sua citação no texto e consideradas, mesmo pranchas, indiscriminadamente como Figuras. Deverão ser separadas do texto por uma linha. Não serão aceitos encartes. Fotografias de afloramentos deverão apresentar barra de escala e indicação do norte.

Letreiros e símbolos das ilustrações devem ter dimensões adequadas para permitir legibilidade. **As ilustrações** deverão ter **larguras** mínimas de **9** ou **18** centímetros (permitir diagramação em uma ou duas colunas). Explicar todos os símbolos. Escalas gráficas, se necessárias, devem ser colocadas dentro da área das ilustrações.

As **Tabelas** devem ser auto-explicativas, com as laterais abertas, concisas e numeradas sequencialmente. Devem ser elaboradas em Times New Roman, corpo 9. As legendas das ilustrações deverão ser redigidas com a mesma fonte do texto e corpo.

Formato das Figuras: Só serão aceitas figuras .tif, devendo ter **resolução mínima de 300dpi**, com tamanhos largura de 8,7 cm ou de 17,7, com comprimento máximo de 21 cm.

Fórmulas e Equações: Numerar as fórmulas e equações sequencialmente à direita, com números arábicos entre parênteses e, no texto, referir como "equação (1)", etc.

Citações no corpo do texto: Deve-se seguir os formatos do seguinte exemplo: ..."Cunha (1985) interpreta a feição como uma estrutura de resfriamento magmático precoce, mas outros (Lima 1986, Fonseca **et al.** 1989, Ferreira & Araújo 1994) como uma feição tardia".

Referências: Relatórios internos são serão aceitos nas referências, com exceção daqueles que são amplamente difundidos na comunidade científica e autorizados pelos consultores **ad hoc**. As referências deverão ser feitas em Times New Roman, corpo 10. Ao final do texto, ordenar as referências em ordem alfabética do sobrenome do primeiro autor, empregando os seguintes formatos:

Livros:

Arndt N.T. & Nisbet E.G. (Eds.) 1982. **Komatiites**. George Allen & Unwin, London, 526 pp.

Capítulos de Livros:

Pollack H.N. 1997. Thermal characteristics of the Archean. **In:** M. de Wit & L.D. Ashwal (eds.) **Greenstone belts**. Oxford Monographs on Geology and Geophysics, 25, Oxford University Press, p.: 223-232.

Artigos de Periódicos:

Resende M.G. & Jost H. 1995. Petrogênese de formações ferríferas e metahidrotermalitos da Formação Aimbé, Grupo Guarinos (Arqueano), Goiás. **Rev. Bras. Geoc.**, 25:41-50.

Resende M.G., Jost H., Osborne G.A., Mol A. 1998. The stratigraphy of the Goiás and Faina greenstone belts, Central Brazil: a new proposal. **Rev. Bras. Geoc.**, 28:1-15.

Sabóia L. A. 1979. Os **greenstone belts** de Crixás e Goiás, Go. **In:** SBG, Núcleo Centro-Oeste, **Boletim Informativo**, 9:44-72.

Artigos em Publicações Seriadas:

Barbosa O., Braun O.P.G., Dyer R.C., Cunha C.A.B.R. 1970. **Geologia da região do Triângulo Mineiro**. Rio de Janeiro, DNPM/DFPM, Boletim 136, 140 p.

Teses e Dissertações:

Resende L. 1995. Estratigrafia, petrografia e geoquímica da seqüência sedimentar do greenstone Belt de Pilar de Goiás, GO. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, 124 p.

Artigos publicados em eventos:

Tassinari C.C.G., Siga Jr. O, Teixeira W. 1981. Panorama geocronológico do centro-oeste brasileiro: solução, problemática e sugestões. **In:** SBG, Simp. Geol. Centro-Oeste, 1, **Atas**, p. 175.

Artigos em jornal:

Coutinho W.O. 1985. O Paço da cidade retorna ao seu brilho barroco. *Jornal do Brasil*, Rio de Janeiro, 6 mar. Caderno B, p.6.

Artigos ainda não publicados:

Silva R.C. (em preparação). Tectônica na região do Alto Iguaçu-PR. Pereira E.W. (submetido). Evolução geológica da faixa de dobramentos Açungui. *Revista Brasileira de Geociências*. Silva R.C. (no prelo). Tectônica na região do Alto Iguaçu-PR. *Revista Brasileira de Geociências* (Aceito ainda sem data de publicação).

Fotografias aéreas:

IGC - INSTITUTO GEOGRÁFICO E CARTOGRÁFICO 1986. (São Paulo). Projeto Lins Tupã. Foto aérea. Escala 1:25.000, São Paulo, Fx28, n. 15.

Folhas e mapas impressos:

INPE - INSTITUTO DE PESQUISAS ESPACIAIS 1987. São José dos Campos (SP): atualização do uso da terra. SF-23-Y-D-II-1 MI-2769/1. São José dos Campos, Mapa Topográfico, escala 1:100.000. Silva A.J. 1999. Mapa geológico da Bacia de Campos. Rio de Janeiro, Petrobrás, 1 mapa geológico, escala 1:50.000.

Programas e conjuntos de softwares:

MICROSOFT 1995. Project for Windows 95, version 4.1: project planning software. Redmond, Wa, Microsoft Corporation. Conjunto de programas 1 CD-ROM.

Páginas e documentos consultados via internet:

Moura G.A.C. de M. 1996. Citação de referências e documentos eletrônicos. Disponível em:

<http://www.elogica.com.br/users/gmoura/refere.html>. Acessado em 9 out 1996.

INPE - INSTITUTO DE PESQUISAS ESPACIAIS 2000. El Ninho. Disponível em <http://www.inpe.dpi/elrinho.html>. Acessado em 14 jun 2000.

Agradecimentos. Devem constar de um parágrafo à parte, colocado antes das referências.

COPYRIGHT

A apresentação de um manuscrito requer que o trabalho apresentado não tenha sido publicado antes (exceto na forma de um resumo ou como parte de uma palestra publicada, revisão ou tese); que não esteja sob consideração para publicação em outro periódico, que sua publicação tenha sido aprovada por todos os co-autores, bem como pelas autoridades competentes no âmbito da instituição onde o trabalho foi realizado. O autor garante que sua contribuição é original e que ele / ela tem plenos poderes para fazer esta concessão. O autor aceita a responsabilidade de liberar os direitos deste material em nome de todos co-autores.

A Transferência dos direitos autorais para ABGE torna-se efetiva se e quando o artigo for aceito para publicação. Após a apresentação da Declaração de Transferência de Direitos Autorais assinada pelo autor correspondente, mudanças de autoria ou na ordem dos autores listados não serão aceitas pela ABGE. Os direitos autorais implicam no direito exclusivo e na licença para reproduzir, publicar, distribuir e arquivar o artigo em todas as formas e meios de comunicação conhecidos ou que possam ser desenvolvidos no futuro, incluindo reimpressões, traduções, reproduções fotográficas, forma eletrônica (offline, online) ou quaisquer outras reproduções de natureza similar.

Todos os artigos publicados nesta revista são protegidos por direitos autorais, que abrangem o direito exclusivo de reproduzir e distribuir o artigo, bem como todos os direitos de tradução. Nenhum material publicado nesta revista poderá ser reproduzido fotograficamente ou armazenados em micro-filme, em bases de dados eletrônicos, etc, sem que primeiro tenha sido dada a permissão por escrito do editor. O uso de nomes descritivos gerais, nomes comerciais, marcas, etc, nesta publicação, mesmo que não especificamente identificados, não implica que estes nomes não sejam protegidos pelas leis e regulamentos pertinentes.

Um autor pode arquivar uma versão de seu artigo em seu próprio site. Ele também pode arquivar esta versão em sua instituição incluindo a versão final, desde que o material não seja disponibilizado ao público até após 12 meses de publicação oficial.

Quanto ao aconselhamento e informação dados a esta revista, acredita-se que sejam verdadeiros e precisos na data de sua publicação; nem os autores, os editores, ou o editor podem aceitar qualquer responsabilidade legal por quaisquer erros ou omissões que possam ser feitas. O editor não oferece nenhuma garantia, expressa ou implícita, em relação ao material aqui contido.

SÓCIOS PATROCINADORES DA ABGE



bolsacreto



Fileie sua
empresa à ABGE
www.abge.com.br

