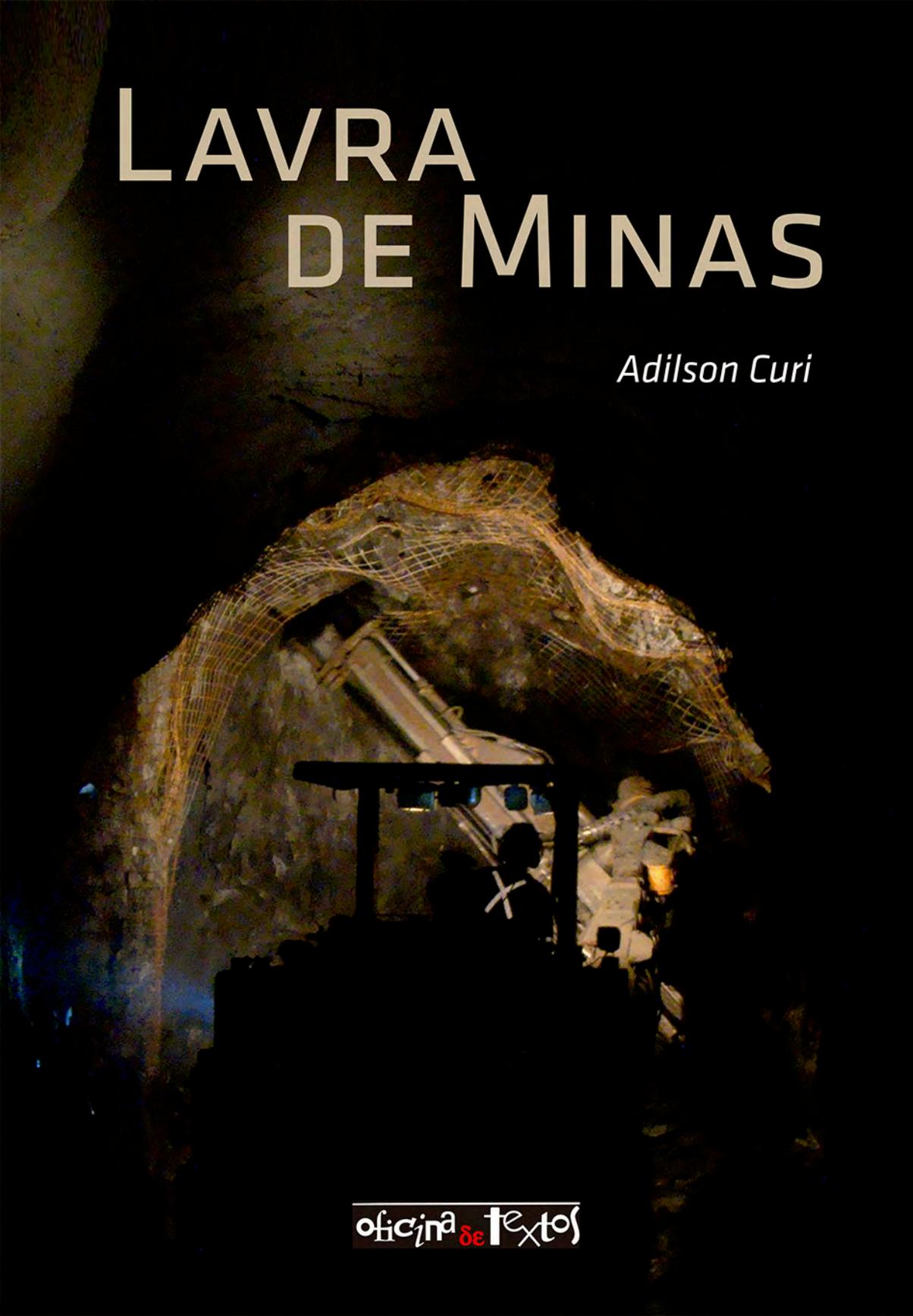


LAVRA DE MINAS

Adilson Curi



LAVRA DE MINAS

Adilson Curi

Copyright © 2017 Oficina de Textos

Grafia atualizada conforme o Acordo Ortográfico da Língua Portuguesa de 1990, em vigor no Brasil desde 2009.

CONSELHO EDITORIAL Arthur Pinto Chaves; Cylon Gonçalves da Silva;
Doris C. C. K. Kowaltowski; José Galizia Tundisi;
Luis Enrique Sánchez; Paulo Helene; Rozely Ferreira
dos Santos; Teresa Gallotti Florenzano

CAPA E PROJETO GRÁFICO Malu Vallim

DIAGRAMAÇÃO Alexandre Babadobulos

FOTO CAPA Equipamento de perfuração em galeria de mina subterrânea de níquel em Fortaleza de Minas (MG)

FOTOS José Fernando Miranda (Arquivo pessoal)

PREPARAÇÃO DE FIGURAS Letícia Schneiater

PREPARAÇÃO DE TEXTOS Hélio Hideki Iraha

REVISÃO DE TEXTOS Pâmela de Moura Falarara

IMPRESSÃO E ACABAMENTO Rettec artes gráficas

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil)

Curi, Adilson
Lavra de minas / Adilson Curi. -- São Paulo :
Oficina de Textos, 2017.

Bibliografia.
ISBN 978-85-7975-250-6

1. Controle de produção 2. Engenharia de minas
3. Mineração - Planejamento 4. Mineração a céu
aberto - Planejamento 5. Planejamento da produção
I. Título.

16-08318

CDD-622.292

Índices para catálogo sistemático:

1. Lavra de minas : Planejamento : Engenharia
de minas 622.292

Todos os direitos reservados à Oficina de Textos
Rua Cubatão, 798 CEP 04013-003 São Paulo-SP – Brasil
tel. (11) 3085 7933
site: www.ofitexto.com.br
e-mail: atend@ofitexto.com.br

A Jussara e Janaina.

Agradeço ao pessoal do Damin da Escola de Minas da Ufop.
Agradeço à Atlas Copco a permissão de uso de suas ilustrações segundo normas estabelecidas pelas suas publicações, devidamente referenciadas nesta obra.

Apesar de todo o cuidado ter sido tomado para assegurar a qualidade e a integridade desta publicação e da informação aqui contida, o autor e o editor explicitam que não assumem nenhuma responsabilidade pelos danos eventualmente causados a pessoas ou bens materiais como resultado do uso desta publicação ou das informações nela contidas. A menção eventual a nomes ou produtos comerciais não implica sua aprovação ou recomendação pelo autor ou pelo editor.

apresentação

Conheci o professor Adilson em um dia festivo do ano de 2010 em minha cidade natal, Ayacucho. Ayacucho é uma linda cidade histórica encravada nos Andes peruanos e derivada da colonização espanhola e da consequente exploração das minas subterrâneas de ouro e prata. Naquele dia, acontecia na cidade a tradicional parada anual dos estudantes de mineração. Nessa teatral parada, é representado o cotidiano da vida dos mineiros peruanos, e cada grupo de estudantes, representando uma escola ou classe, faz uma *performance*. Trata-se de um interessante e único evento cultural regional que faz com que a mineração e a comunidade local interajam, do qual também participei enquanto estudante de Engenharia de Minas na tricentenária Universidade Nacional de San Cristóbal de Huamanga. Ainda naquele dia, paralelamente a essa parada, como representante de Portugal, pois era professor do Instituto Superior Técnico (IST) da Universidade Técnica de Lisboa, eu dirigia a Rede Ibero-Americana Meio Ambiente Subterrâneo e Sustentabilidade (rede Masys), que se instalara naquele ano. Tal rede perdurou por quatro anos e possibilitou o intercâmbio e a troca de experiência entre diversos técnicos, professores e engenheiros de minas dos países ibero-americanos no setor da lavra de minas.

O Prof. Adilson coordenava a equipe brasileira na rede Masys e naquele dia, como disse, nos conhecemos. Por coincidência, eu e o Prof. Adilson concluímos o curso de doutoramento em Engenharia de Minas na mesma instituição, o IST de Lisboa, ambos sob orientação do ilustre Prof. Dr. Carlos Dinis da Gama. A partir daí e durante os quatro anos seguintes, a rede Masys prosperou e foram desenvolvidos vários trabalhos relativos à lavra de minas, culminando com minha ida

definitiva para o Brasil, em 2011, para lecionar Lavra de Minas, inicialmente na Universidade Federal de Goiás (UFG) e depois na Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Em 2015, fui finalmente contratado como pesquisador do Instituto Tecnológico Vale (ITV-Vale) para liderar a área de Lavra de Minas. No ITV-Vale, em Ouro Preto, temos desenvolvido diversos trabalhos de pesquisa relativos à lavra de minas, e nesse ínterim estreitou-se a parceria com a Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto (Ufop), onde o Prof. Adilson atua há vários anos.

Assim sendo, quanto à obra que ora se apresenta, posso atestar que será muito útil a todos aqueles interessados na arte de minerar, pois resalta os elementos essenciais da lavra de minas tanto a céu aberto quanto subterrânea. O livro do Prof. Adilson aborda as metodologias de lavra e os critérios de seleção, a análise do ciclo de operações unitárias, a estabilidade de maciços rochosos, e ainda inclui a resolução de exercícios práticos, constituindo uma brilhante contribuição para os técnicos, engenheiros e estudantes do fascinante campo da Lavra de Minas.

Prof. Dr. Eng. de Minas Vidal Navarro Torres
Pesquisador Titular do ITV-Vale
Ouro Preto, julho de 2016

prefácio

Sempre houve uma carência relacionada à oferta de livros técnicos em português na área de Lavra de Minas. A recente expansão dos ensinos universitário e técnico profissionalizante no Brasil agravou ainda mais essa situação. Sabe-se que os professores e alunos das diversas disciplinas técnicas dos cursos relacionados às Geociências necessitam conhecer, no mínimo, os fundamentos da lavra de minas. A proposta deste livro é preencher essa lacuna, facilitando, assim, o trabalho do professor e a vida do aluno. Procurou-se reunir os elementos essenciais referentes à lavra de minas a céu aberto e subterrânea, portanto o aluno e o professor não terão mais a necessidade de procurar informações em fontes diversas, sendo a maioria delas em língua estrangeira. Ademais, este livro também pode ser útil ao profissional experiente que necessite revisar ou talvez aprimorar seus conceitos.

Este trabalho foi desenvolvido com o propósito inicial de ser um livro-texto e, alternativamente, um livro de referência que descrevesse os fundamentos das lavras de minas a céu aberto e subterrânea. Como livro-texto, é mais adequado ao uso nas classes de Lavra de Minas a Céu Aberto e Subterrânea e disciplinas relacionadas, que são oferecidas nos últimos anos dos cursos de Engenharia de Minas, Engenharia Geológica, Engenharia Ambiental e Civil, e Engenharia Geotécnica, entre outras Engenharias relacionadas à escavação e ao desmonte de rochas. Com os devidos ajustes, a cargo do professor da disciplina, poderá também ser perfeitamente adotado como livro-texto e/ou material de consulta nos cursos técnicos profissionalizantes e nos cursos de especialização em Mineração, Geologia e áreas afins.

Além disso, esta obra pode ser de interesse e valia para auxiliar no estudo de vários assuntos inter-relacionados, abrangendo,

assim, um amplo espectro de profissionais, como geólogos, engenheiros em geral, ambientalistas, agentes governamentais responsáveis pelo planejamento e pela gestão dos recursos naturais, administradores, advogados e economistas. Também é possível englobar aí as instituições financeiras envolvidas no financiamento de projetos de mineração, bem como as agências oficiais de planejamento em nível federal, estadual e local. Com as informações contidas neste trabalho, os projetos de lavra de minas a céu aberto e subterrânea poderão ser, de algum modo, mais bem executados e avaliados.

Este livro está didaticamente dividido em nove capítulos. O Cap. 1 aborda os conceitos fundamentais relacionados à lavra de minas, exibindo um pequeno histórico sobre as origens da indústria extrativa mineral e sua evolução tecnológica e os principais conceitos referentes à mineração. O Cap. 2 apresenta e classifica os métodos de lavra de minas a céu aberto e destaca a importância da relação estéril/minério e de seu cálculo. Entre os métodos de lavra a céu aberto, os que mais se sobressaem são aqueles de extração a seco, descritos no Cap. 3. Os métodos de lavra via úmida são discutidos no Cap. 4.

Uma introdução aos métodos de lavra subterrânea é apresentada no Cap. 5. Em função do princípio de abandono de pilares, do princípio do enchimento e do princípio de abatimento, os métodos de lavra subterrânea são classificados em autossuportados, com suporte artificial ou por abatimento. A descrição desses métodos é feita respectivamente nos Caps. 6, 7 e 8. Para concluir a obra, no Cap. 9 propõe-se uma metodologia para a seleção do método de lavra mais apropriado para uma dada jazida considerando os diversos aspectos abordados. Neste capítulo também se comenta a aplicação das tecnologias mais modernas nas operações de lavra, incluindo a automação, a simulação e a robótica e a realidade virtual.

O estudo da lavra de minas contempla diversas especialidades sob a denominação geral de Geociências e todas as Ciências Exatas básicas. Também são imprescindíveis os conhecimentos de Economia Mineral, desmonte de rochas, seleção e dimensionamento de equipamentos na lavra, ventilação das minas e Engenharia de Meio Ambiente, entre tantas outras especialidades. Seria, pois, impossível abordar todos esses assuntos num único livro. Particularmente nas minas, ao contrário do que é praxe na Engenharia Civil, em que as obras são permanentes, pode até ser permitida a rotura dos

terrenos. Importa escavar com custos reduzidos, o que implica geralmente elevadas velocidades de arranque. A estabilidade das escavações interessa apenas enquanto elas são necessárias. A respectiva progressão através dos maciços rochosos é uma consequência direta da exploração mineira que se pretende efetuar e do método de lavra empregado. Em comparação com a Geomecânica Aplicada à Engenharia Civil, que se apresenta como estática e servindo uma engenharia de construção, a Geomecânica Aplicada à Engenharia de Minas tem caráter mais dinâmico, ao serviço, essencialmente, de uma engenharia de demolição (Mendes, 1985), fato esse inevitável ante a necessidade de recuperação do minério na lavra.

Tem-se escrito sobre os diversos sistemas de mineração nas últimas décadas, mas muito pouco sobre a análise dos diversos sistemas e sua interação. Além disso, os textos tradicionais tratam do assunto sem fazer referência a casos práticos e sem apresentar exercícios de aplicação que relacionem a lavra de minas aos conhecimentos teóricos adquiridos durante os cursos de graduação em Engenharia. Assim, neste livro, na tentativa de preencher parcialmente essa lacuna e tornar a exposição mais prática, foram incluídos alguns tópicos especialmente selecionados, relativos sobretudo ao manuseio de materiais e à estabilidade das escavações. Certos comentários e exercícios propostos por ex-professores da Escola de Minas de Ouro Preto e outras escolas de Engenharia do País foram incluídos para destacar a contribuição valorosa daqueles mestres à Engenharia de Minas nacional nas últimas décadas. Como a cotação dos metais e o dimensionamento dos equipamentos de mineração são com frequência feitos usando o sistema imperial inglês de unidades de medida, ele foi utilizado em alguns exercícios e exemplos apresentados ao longo deste livro.

sumário

1	FUNDAMENTOS DA LAVRA DE MINAS	19
1.1	Evolução histórica da tecnologia mineral.....	19
1.2	Terminologias e conhecimentos gerais aplicados à mineração.....	28
1.3	Projeto de lavra de minas.....	33
1.4	Tópico especial: fundamentos essenciais de Física aplicados à Engenharia de Minas	37
	Exercícios resolvidos	53
2	MÉTODOS DE LAVRA DE MINAS A CÉU ABERTO	61
2.1	A relação estéril/minério (REM).....	69
2.2	Classificação dos métodos de lavra a céu aberto	73
	Exercícios resolvidos	76
	Exercício proposto	88
3	MÉTODOS DE LAVRA A SECO.....	89
3.1	Lavra por bancadas	90
3.2	Pedreiras	98
3.3	Lavra por tiras	113
3.4	Tópico especial: propriedades físicas das rochas.....	123
3.5	Introdução aos métodos de cálculo da estabilidade de taludes.....	136
	Exercícios resolvidos	144
	Exercícios propostos.....	154
4	MÉTODOS DE LAVRA VIA ÚMIDA	161
4.1	Lavra hidráulica	162
4.2	Lavra de pláceres – dragagem.....	182
4.3	Lavra química.....	198

4.4	Extração por poço	205
4.5	Tópico especial: introdução à Mecânica dos Fluidos Aplicada.....	212
	Exercícios resolvidos	219
	Exercícios propostos.....	225
5	MÉTODOS DE LAVRA DE MINAS SUBTERRÂNEAS	227
5.1	Caracterização dos depósitos minerais subterrâneos.....	231
5.2	Definição das terminologias específicas da lavra subterrânea.....	240
5.3	Operações e equipamentos da lavra subterrânea	243
5.4	Classificação dos métodos de lavra subterrânea.....	247
5.5	Desenvolvimento de minas subterrâneas	255
5.6	Tópico especial: estabilidade de escavações mineiras subterrâneas.....	260
	Exercícios resolvidos.....	281
	Exercício proposto	284
6	ALARGAMENTOS AUTOSSUPORTANTES	285
6.1	Câmaras e pilares	285
6.2	Realces ou alargamentos abertos	296
6.3	Lavra por recalque.....	304
6.4	Lavra por subníveis	315
6.5	Tópico especial: dimensionamento dos pilares nas minas	329
	Exercício resolvido.....	337
	Exercícios propostos.....	339
7	ALARGAMENTOS SUPORTADOS	343
7.1	Alargamentos esteados	344
7.2	Alargamentos com estruturas retangulares.....	348
7.3	Corte e enchimento.....	354
7.4	Tópico especial: estabilização de escavações subterrâneas.....	376
	Exercícios propostos.....	389
8	ALARGAMENTOS ABATIDOS	393
8.1	Lavra por frentes amplas.....	394
8.2	Abatimento em subníveis	398

8.3	Abatimento de blocos.....	407
8.4	Tópico especial: subsidência mineira	416
	Exercícios resolvidos.....	420
9	SELEÇÃO DO MÉTODO DE LAVRA E NOVAS TECNOLOGIAS.....	425
9.1	Seleção do método de lavra	425
9.2	Novas tecnologias.....	432
	Exercício resolvido.....	446
	Exercícios propostos de múltipla escolha.....	448
	Estudo dirigido	451
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	453



FUNDAMENTOS DA LAVRA DE MINAS

1.1 EVOLUÇÃO HISTÓRICA DA TECNOLOGIA MINERAL

As rochas são os principais testemunhos da história do planeta Terra com seus 4,6 bilhões de anos. O material lítico define, inclusive, um período da evolução da humanidade denominado Idade da Pedra, iniciado há cerca de 2 milhões de anos, segundo dados arqueológicos (Liccardo, 2010). A prática das artes minerais é tão antiga quanto a própria civilização humana. Desde o surgimento do *Homo sapiens*, na Pré-História, a mineração tem sido fundamental para ajudar o homem em sua luta pela sobrevivência e consequente evolução. Desde a Idade da Pedra ela tem auxiliado o homem a fabricar ferramentas, produzir e estocar alimentos, armas de caça e de guerra e utensílios em geral, incluindo adornos e peças religiosas. A evolução tecnológica na mineração acompanhou o desenvolvimento humano. De acordo com Hartman e Mutmansky (2002), a mineração em sua forma mais simples surgiu há aproximadamente 450 mil anos, na Velha Idade da Pedra.

Artefatos de pedra têm sido utilizados frequentemente pelos humanos desde sua origem. Por serem resistentes e úteis, as pedras predominavam como material para a confecção de ferramentas rudimentares usadas nas mais variadas tarefas do dia a dia do homem pré-histó-

Egito e no Oriente Próximo. Em 1.600 a.C., várias minas de metais estavam em operação na Europa, como as minas de estanho de Cornwall (Atlas Copco, 1976). Em 400 a.C., os egípcios recuperavam ouro de aluvião por meio de processos gravimétricos (Luz; Lins, 2002). No século I e nos seguintes, ocorreu a expansão vigorosa da mineração no Império Romano, que dominou vastas extensões territoriais valendo-se dos então amplos recursos minerais da península Ibérica. Os antigos romanos foram os primeiros a fabricar o cimento, combinando o carvão e o calcário impuro em um forno a altas temperaturas (Schofield, 1980). No século XIII, acontecem as viagens de Marco Polo ao Oriente. Ao descrever suas viagens, ele enaltece o poder do Império Mongol, liderado pelo temido e lendário Genghis Khan, e sua riqueza em ouro e pedras preciosas (Lester, 2012).

A partir do século XVI surgiram, na literatura europeia, alguns importantes trabalhos sobre mineração. O livro de Georgius Agricola (1490-1555), médico e naturalista da Boêmia, é a melhor fonte de informação sobre essas antigas técnicas de mineração, da Antiguidade a meados do século XVI. Desde o seu lançamento e pelos dois séculos seguintes, ele permaneceu praticamente como a única referência na área de Mineração e Metalurgia, sendo até hoje muito respeitado no meio clássico científico. Nessas antigas técnicas, usavam-se instrumentos rudimentares, como picaretas, marretas e carrinhos de mão, e já se adotavam sistemas de bombeamento das águas, içamento das rochas e ventilação das aberturas subterrâneas por meio de poços de ventilação. Na Fig. 1.2, de autoria de Agricola (1950), são representados três poços verticais. O primeiro poço (A) não alcança a galeria (D), ao contrário do segundo poço (B), que a atinge. O terceiro poço (C) ainda não foi alcançado pela galeria (D).



FIG. 1.2 Ilustração representando o sistema de acesso ao subsolo nos primórdios da mineração subterrânea. (A), (B) e (C) são os poços verticais, e (D), a galeria
Fonte: Agricola (1950).

Quando a jazida passa a ser aproveitada, ela se transforma em mina, podendo ser a céu aberto ou subterrânea. As minas a céu aberto podem ser desenvolvidas em cava ou meia encosta. Contrapondo-se ao minério, que pode ser aproveitado economicamente, o *estéril* é a rocha ou solo sem valor econômico extraído na operação de lavra e que ocorre dentro ou fora do corpo de minério. Também nesse caso, o que é estéril numa época pode se tornar minério em outra em função da conjuntura econômica. Já os *rejeitos* são materiais sem valor econômico oriundos do processo de tratamento de minérios. Em geral, exibem granulometria arenosa ou argilosa como resultado dos processos de britagem e moagem para a liberação das partículas de minério. Em muitas minas, os rejeitos são dispostos em barramentos de contenção de rejeitos, sendo transportados das usinas de tratamento de minério na forma de polpas (uma mistura de sólidos + água). Essas *usinas de tratamento de minério* são instalações industriais onde os minérios provenientes das minas são britados, cominuídos e concentrados. Nas usinas, os minérios podem ser concentrados por processos gravimétricos, que se valem das diferenças de densidade entre os minerais; químicos, em que os minérios são solubilizados por lixiviação ácida e depois precipitados; ou físico-químicos, tais como os processos de flotação de certos minérios de ferro (Curi, 1991).

1.3 PROJETO DE LAVRA DE MINAS

Planejar é prever o futuro e, especificamente no caso de um projeto de lavra de minas, o projeto de lavra e seus estudos pertinentes são desenvolvidos simultaneamente, em uma sequência de processos administrativos para a obtenção dos documentos legais junto às agências de fiscalização e controle da atividade. A Fig. 1.5 mostra uma metodologia proposta para a obtenção dos documentos legais e a correlação entre os estudos pertinentes imprescindíveis para a confecção e a aprovação de um projeto de lavra de minas no Brasil. De acordo com a sequência estabelecida nessa figura, para a obtenção dos documentos legais (PROCESSOS) são necessários diversos estudos relacionados à Geologia e Engenharia de Minas (PROJETOS), estudos econômico-financeiros (AVALIAÇÕES) e estudos ambientais, além de outros referentes à tecnologia em geral e a outras engenharias.

Vale destacar, inicialmente, a necessidade de comprovação da reserva mineral, por ser essa a base de sustentação de todo o empreendimento mineiro. Considerando a experiência prática, os engenheiros de minas costumam dizer que o

segundo a quantidade e a qualidade requeridas, sendo a atividade fim do processo de lavra. O sistema de controle de estabilidade das escavações se responsabiliza pela manutenção da integridade das aberturas em solo ou rocha, taludes, estradas, pilhas de estéril, barramentos de rejeitos e escavações subterrâneas em geral. Já o sistema de apoio é responsável pelas operações auxiliares à produção, tais como drenagem, geração de energia, ventilação, controle dos impactos ambientais e manutenção eletromecânica de equipamentos. Finalmente, o sistema administrativo geral coordena os vários sistemas como um todo, gerenciando-os para atingir a melhor eficiência possível.



FIG. 1.6 Diagrama típico da lavra de minas com seus sistemas inter-relacionados

1.4 TÓPICO ESPECIAL: FUNDAMENTOS ESSENCIAIS DE FÍSICA APLICADOS À ENGENHARIA DE MINAS

Neste tópico, são revisados os movimentos dos corpos. Para simplificar, tratam-se os corpos como partículas. Partícula é uma das idealizações de Galileu (1564-1642) e consiste em um corpo de dimensões tão diminutas que pode ser considerado pontual. A velocidade (v) expressa, no cotidiano, a rapidez com que um corpo se desloca. O deslocamento corresponde à distância x percorrida por esse corpo a partir de um ponto de referência. A velocidade de um corpo é determinada pela razão entre o deslocamento x do corpo e o tempo t gasto para efetuá-lo. Assim, a velocidade média é dada por:

$$v_m = \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad (1.1)$$

em que:

v_m = velocidade média;

Δx = intervalo de deslocamento [posição final – posição inicial ($x_{final} - x_{inicial}$)];

Δt = intervalo de tempo [tempo final – tempo inicial ($t_{final} - t_{inicial}$)].

Salienta-se que no cálculo da velocidade média não importa o trajeto feito pelo corpo, mas sim a sua posição final e inicial. A grandeza relacionada com a distância total percorrida é a velocidade escalar, que mede a rapidez com que

dois

MÉTODOS DE LAVRA DE MINAS A CÉU ABERTO

A lavra engloba todo o conjunto de operações unitárias de aproveitamento da jazida. Corresponde à quarta fase da mineração (as anteriores são a prospecção, a exploração e o desenvolvimento) e é alternativamente chamada de exploração. Denomina-se método de lavra a sistematização e coordenação das várias operações unitárias visando ao aproveitamento de uma jazida mineral.

O método de lavra deve definir os diversos ciclos de trabalho e a sequência espacial da evolução da lavra para, em função do tempo, viabilizar o melhor aproveitamento possível da jazida em causa. Nesses termos, o método estará sempre correlacionado à configuração geométrica da jazida e também à sequência de avanço que se estabelecerá visando à obtenção dos volumes requeridos. A definição da geometria de cada jazida em particular é passo decisivo para a escolha da metodologia de lavra mais adequada. A primeira operação é identificar os volumes para, em seguida, determinar a sequência de extração. A definição das tecnologias, dos equipamentos, materiais e energia a usar, bem como das modalidades alternativas de uso, representa uma informação adicional e não substitutiva do método de lavra.

O método ideal seria aquele que proporcionasse a lavra mais econômica, completa e segura e menos poluente. Por princípio, esse método ideal estará sempre ligado aos

média em torno de 2,5. Com base nessa média global, a quantidade de rocha estéril produzida somente na lavra de metais pode ser estimada em cerca de 12,5 bilhões de toneladas por ano, uma vez que são produzidos aproximadamente 5 bilhões de toneladas de minérios metálicos anualmente. No total, a quantidade de rocha movimentada globalmente apenas na lavra de metais seria da ordem de 17,5 bilhões de toneladas por ano. Constata-se, assim, que a dominância das operações a céu aberto em termos de quantidade de rocha manuseada em larga extensão se deve à necessidade de remoção do capeamento.

2.2 CLASSIFICAÇÃO DOS MÉTODOS DE LAVRA A CÉU ABERTO

Em princípio, a classificação dos métodos provém da opção escolhida para se processar a lavra, ou seja, a *céu aberto* ou *subterrânea*. Para tal definição, leva-se em conta a situação dos operadores, e não a da jazida. A lavra é considerada a céu aberto se não há necessidade de acesso humano ao meio subterrâneo para realizá-la. A ocorrência de certas operações subterrâneas, tais como o transporte por poços de extração, não descaracteriza uma lavra a céu aberto, da mesma forma que uma lavra subterrânea sempre envolve vários serviços auxiliares executados a céu aberto.

Os principais métodos de lavra a céu aberto (com as correspondentes denominações em língua inglesa, internacionalmente consagradas) são aqueles de exploração a seco, ou seja, a lavra por bancadas (*open pit mining*), a lavra em tiras ou fatias (*strip mining* ou *open cast mining*) e a lavra de pedreiras (*quarry mining* ou *dimensioned stones mining*).

O método de *lavra por bancadas* é mais usado em minas onde o corpo de minério esteja recoberto por um capeamento espesso. As bancadas são desenvolvidas consecutivamente, de cima para baixo, até se atingirem os limites finais dos corpos mineralizados mais profundos. O minério é recuperado e o estéril é removido e disposto em pilhas nas imediações da cava. Quando possível, o estéril poderá ser depositado na própria cava, facilitando a recuperação ambiental da área. A lavra por bancadas é utilizada principalmente em depósitos de minérios metálicos.

O método de *lavra em tiras* é mais aplicado em depósitos tabulares ou com camadas horizontais com pouca espessura de capeamento. Como característica, propicia grande escala de produção, proporcionando até menor custo operacional e maior produtividade do que a lavra por bancadas em certas circunstâncias.

EXERCÍCIOS RESOLVIDOS

1. Admitindo que se tenha optado pela lavra a céu aberto (caso das jazidas mais rasas, com o minério próximo à superfície), antes de serem apresentados os métodos de lavra, discutem-se aqui os aspectos teóricos como apresentado na Fig. 2.4A, em que se mostra um perfil simplificado de um corpo de minério tabular (isto é, camada ou veio dotado de forte mergulho (δ) a ser desmontado).

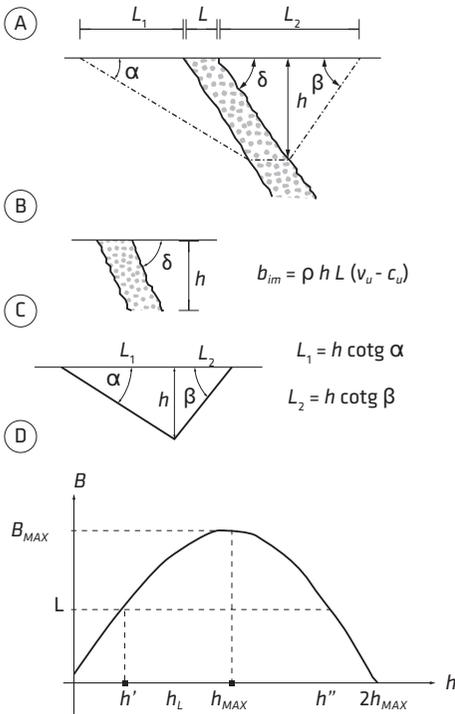


FIG. 2.4 Perfil simplificado de um corpo de minério tabular e elementos para a traçagem teórica da cava ótima final
Fonte: Girodo (2006).

Na Fig. 2.4, considerar:

- * A espessura aparente igual a L do corpo de minério.
- * Os ângulos α e β (overall slope angle) das encostas oeste e leste da cava.
- * A jazida é supostamente lavrável a céu aberto até uma altura h . A densidade tanto do minério quanto do estéril é constante e igual a ρ .
- * $b_{um} = v_u - c_u$ é a função benefício unitária correspondente ao minério. Isso significa que, ao se extrair uma massa unitária, auferem-se o lucro b_{um} , correspondente ao valor da venda do metal contido (v_u) subtraído do custo de desmonte, transporte e beneficiamento (c_u).
- * $b_{ue} = -C_e$ é a função benefício unitária do estéril. Como é óbvio, ela é sempre negativa, pois representa os gastos de desmonte, transporte e deposição do estéril lavrado.

Solução

A Fig. 2.4 embora reflita um problema teórico, encontra-se bastante próxima a diversas situações mineiras reais. A questão pode ser equacionada da maneira apresentada a seguir, por meio da função benefício. Assim, o benefício (lucro) b_{um} associado à lavra do minério é expresso por (Fig. 2.4B):

três

MÉTODOS DE LAVRA A SECO

Entre os métodos de lavra a céu aberto, os que mais se sobressaem são os de extração a seco. Denominam-se métodos de lavra a céu aberto a seco aqueles cujas operações unitárias de lavra são realizadas por equipamentos convencionais e em que o uso da água não é fundamental. Nesse aspecto, os métodos mecânicos distinguem-se dos de lavra via úmida, cuja essência é a força da ação hidráulica ou do ataque de uma solução aquosa com reagentes químicos. Neste capítulo serão discutidos os três métodos de lavra a céu aberto que compreendem a classe de exploração a seco:

- * lavra por bancadas;
- * pedreiras;
- * lavra por tiras.

Estima-se que esses métodos sejam responsáveis por mais de 90% do volume de produção das lavras a céu aberto em todo o mundo, englobando a grande maioria da produção mineral de carvão, rochas industriais e minérios metálicos em geral. Em termos da tonelagem produzida e da aplicação, os métodos de lavra por bancadas e por tiras ocupam, juntos, o primeiro lugar entre os mais importantes métodos de lavra a céu aberto e estão entre os sete mais importantes métodos de lavra de toda a mineração, incluindo os subterrâneos. De modo geral, os métodos de lavra por bancadas e por tiras empregam um ciclo convencional de operações (perfuração,

3.3 LAVRA POR TIRAS

A mineração a céu aberto em sua forma mais simples foi o primeiro método de lavra de carvão. Utilizando picaretas e pás, os mineiros mais antigos escavavam o carvão exposto à superfície ou em afloramentos. Entretanto, até o início do século XX quase toda a produção de grande escala desse minério valia-se de métodos de lavra subterrânea. Desde então, as práticas de lavra a céu aberto com o uso de grandes equipamentos cresceram enormemente. Nos Estados Unidos, a mineração a céu aberto lavra carvão a mais de 70 m de profundidade e é responsável por mais de 60% da produção desse minério no país (Pietrobono, 1985). A lavra por tiras (*open cast*, em inglês) é o principal método de exploração a céu aberto empregado em jazidas de carvão na Europa, nos Estados Unidos e em outros países mineradores desse material. A metodologia de lavra é similar à da lavra por bancos, exceto por um único e crucial aspecto: o estéril não é transportado para ser depositado em pilhas, mas sim lançado diretamente em áreas adjacentes já lavradas.

O manuseio do material é efetuado em uma operação conjugada de escavação e transporte denominada *casting* em inglês. O capeamento de cobertura da jazida pode ser transportado para fora da mina por correias transportadoras e então depositado fora das áreas lavradas, ou, alternativamente, ser feito por meio de dois estágios: um por *casting* e outro por caminhões, sendo o solo superficial estocado e preservado para reabilitações posteriores. A operação conjugada de escavação e transporte é o que distingue esse método, tornando-o o de mais alta produtividade e o de mais baixo custo entre aqueles mais utilizados. Tal qual aquela por bancadas, a lavra por tiras é classificada como um método de lavra de grande escala e de produção em massa, e, juntamente com a primeira, é o mais popular método de lavra a céu aberto. Mais da metade da produção de carvão nos Estados Unidos é realizada por esse método (Hartman; Mutmansky, 2002).

Entretanto, não é somente a troca dos caminhões pela operação conjugada que torna o método tão atrativo. O depósito do estéril nas áreas recém-lavradas reduz ao mínimo as distâncias médias de transporte desse material, além de a concentração das atividades em uma área restrita favorecer o processo de reabilitação, que poderá iniciar-se imediatamente após a lavra. Assim, o fator-chave que sustenta a alta produtividade do método é a produção do equipamento que escava as tiras, ou seja, que faz o decapeamento. Ao utilizar os maiores equi-

transportador de correia 2, situado à retaguarda, onde o capeamento é retomado e disposto em pilhas, como indicado na parte esquerda da figura. Por sua vez, na Fig. 3.8, tem-se um esquema mais ousado que representa uma operação típica de lavra por tiras em uma camada múltipla de carvão com o uso de mineradores contínuos e transportadores de correia. O capeamento é então retomado e disposto em pilhas, como esquematizado na Fig. 3.9.



FIG. 3.7 Lavra por tiras de uma camada de carvão (em negro) com pré-decapeamento utilizando mineradores contínuos combinado com dragline (à direita) e disposição do estéril em pilhas (à esquerda)

Fonte: adaptado de Rheinbraun Engineering (1992).

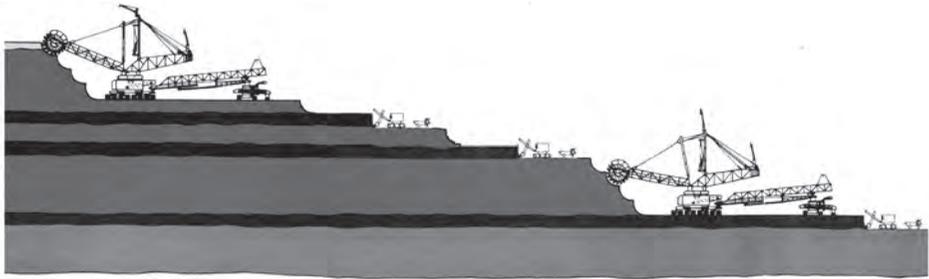


FIG. 3.8 Operação típica de lavra por tiras em camadas múltiplas de carvão (em negro) com o uso de mineradores contínuos e transportadores de correia

Fonte: adaptado de Rheinbraun Engineering (1992).

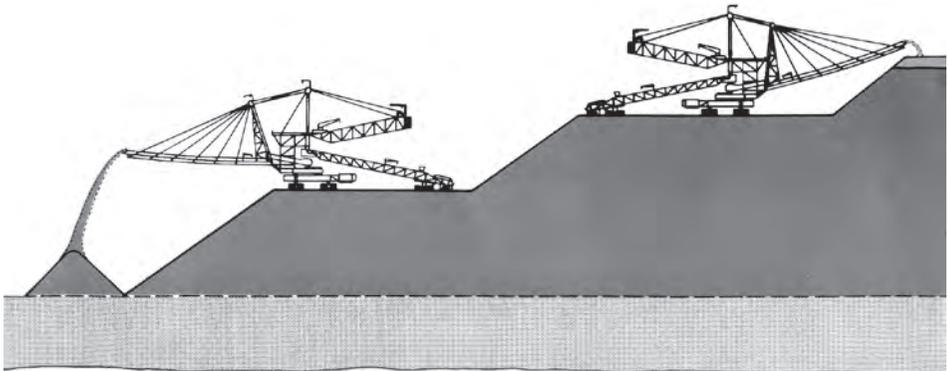


FIG. 3.9 Nas áreas já lavradas, o capeamento é retomado e disposto em pilhas

Fonte: adaptado de Rheinbraun Engineering (1992).

Tab. 3.2 VALORES CARACTERÍSTICOS DE PESO ESPECÍFICO, ÂNGULO DE ATRITO E COESÃO DE SOLOS E ROCHAS (continuação)

Propriedades típicas de solos e rochas						
Tipo	Material	Peso específico (g/cm ³)	Material	Ângulo de atrito (°)	Material	Coesão (kg/cm ²)
Cobertura	Solo superficial	1,36				
	Solo seco	1,44				
	Solo úmido	1,60	Solo de cobertura	30-35	Solo de cobertura	0,05
	Solo molhado	1,68				0,50
Coesivo	Maciço rochoso	Granito	Granito	30-50	Maciço rochoso de rochas duras (granito, pórfiro etc.)	1,00
		Quartzito	Quartzito	30-45		3,00
		Arenito	Arenito	30-45	Maciço de arenito ou calcário	0,50
		Calcário	Calcário	30-50		1,50
		Pórfiro	Pórfiro	30-40	Maciço de folhelho ou rochas brandas	0,25
		Folhelho	Folhelho	27-45		1,00
		Giz	Giz	30-40		

Fonte: Hoek e Bray (1974).

A coesão de uma amostra de rocha intacta é cerca de duas vezes superior à resistência à tração dessa mesma rocha (Hoek; Bray, 1974). Essa resistência deve ser atribuída às ligações intergranulares e à cimentação dos grãos de origens variadas, podendo-se admitir, em cálculos de estabilidade de taludes, que dificilmente essa resistência será superada (Guidicini; Nieble, 1976). Em massas rochosas, os mais baixos valores de coesão são encontrados ao longo dos planos de descontinuidades, e estes devem ser mais analisados em termos da manutenção da estabilidade. Em casos extremos, o valor de coesão poderá chegar a zero e a resistência ao cisalhamento ao longo de descontinuidades dependerá somente do atrito. Nessas condições, o deslizamento de uma massa rochosa poderá acontecer assim que o ângulo de inclinação do plano de apoio θ superar o ângulo de atrito interno ϕ . Para rochas, deve-se destacar a existência de diferenças expressivas no ângulo de atrito conforme se esteja trabalhando com rocha intacta em zona de junta ou ainda em zonas já cisalhadas.

3.5 INTRODUÇÃO AOS MÉTODOS DE CÁLCULO DA ESTABILIDADE DE TALUDES

Estabilidade é a propriedade das rochas de se manterem em equilíbrio sob esforços e tempos de exposição variáveis. Essa propriedade pode ser decisiva na seleção de um determinado método de lavra. Considerando a estabilidade, os maciços rochosos podem ser classificados como:

- * *Muito estáveis*: quando não há necessidade de aplicar nenhum tipo de escoramento nas aberturas praticadas na rocha.
- * *Estáveis*: quando há necessidade de escoramento em apenas alguns pontos ou setores esporádicos.
- * *Medianamente estáveis*: quando permitem aberturas sem escoramento imediato. O escoramento se fará após um tempo relativamente longo de exposição.
- * *Instáveis*: quando requerem escoramentos imediatos e reforçados. A estabilidade nem sempre está ligada à resistência. O sal-gema, por exemplo, é pouco resistente e estável. Observações locais, tais como planos de estratificação, xistosidade, fraturas etc., sempre auxiliam o técnico ou engenheiro na escolha do método para estabilizar o maciço rochoso.

A análise pelos métodos de equilíbrio-limite considera que as forças que tendem a induzir a ruptura são equilibradas pelas forças resistentes. Para comparar a estabilidade de taludes em condições diversas de equilíbrio-limite, define-se o fator de segurança (FS) como a relação entre a resultante das forças solicitantes e resistentes ao deslizamento. A condição de equilíbrio-limite corresponde ao fator de segurança unitário.

Para explicar o conceito, considere-se um bloco de rocha apoiado sobre um plano de inclinação θ (Fig. 3.14). Sobre o bloco atua seu peso próprio (P), e a componente $P \cdot \sin \theta$ tende a causar o deslizamento dele. O esforço normal atuante na base do bloco (superfície de deslizamento) é $P \cdot \cos \theta$.

O esforço resistente é representado por:

$$R = \tau \cdot A$$

em que τ é a resistência ao cisalhamento do contato bloco-plano inclinado, e A , a área da base do bloco.

rochoso e sobretudo nos resultados dos testemunhos de sondagem, avaliações geotécnicas pormenorizadas de cada banco, ou nível de lavra, devem ser efetuadas, e a área de lavra pode ser subdividida em domínios estruturais de acordo com o padrão geotécnico vigente. Dependendo da escala de observação, as descontinuidades e anisotropias podem ser desconsideradas e as heterogeneidades podem estar distribuídas aleatoriamente. Nessas escalas em particular, é possível assumir, para simplificação e estudos, hipóteses de continuidade, homogeneidade e isotropia. Entretanto, nas demais escalas, será preciso sempre reavaliar as hipóteses simplificadoras usadas. A definição da geometria em cada domínio, essencialmente homogêneo, será feita considerando a orientação das faces dos taludes de lavra em cada setor geotécnico no qual a lavra foi dividida (Curi, 2014).

EXERCÍCIOS RESOLVIDOS

1. De uma rocha já desmontada e empolada de 60%, construiu-se um dique de contenção de resíduos sólidos de eixo retilíneo de seção de $1\text{ m} \times 2\text{ m}$ e 500 m de extensão, com 25% de vazios. Parte da rocha desmontada foi britada, obtendo-se 1.500 m^3 de britas. O empolamento do material britado foi de 25% em relação ao material desmontado e verificaram-se as perdas apresentadas na Tab. 3.4. Restaram ainda 300 m^3 de rocha desmontada (Reis, 1982).

Tab. 3.4 PERDAS PROVENIENTES DO DESMONTE DA ROCHA

Perdas	Porcentagem
No desmonte	4%
Na construção da muralha	5%
Na britagem	2%

Determinar:

- a] O volume desmontado no corte para a construção do dique ou da muralha.
- b] O volume que seria desmontado no corte somente para a muralha, supondo que não há perdas a considerar.
- c] O volume que seria desmontado no corte para a muralha, supondo que existam somente as perdas no desmonte.
- d] O volume que seria desmontado no corte para a muralha, supondo que ocorram perdas apenas na construção.
- e] O empolamento da muralha em relação ao corte.
- f] O empolamento, ou adensamento, da muralha em relação à rocha desmontada.

quatro

MÉTODOS DE LAVRA VIA ÚMIDA

Além dos métodos de lavra a seco, a exploração de minas a céu aberto apresenta também uma série de métodos de lavra por via úmida. Nesses métodos, o uso da água (ou de um líquido solvente) é imprescindível para recuperar os minerais, seja pela ação da força hidráulica, seja pelo ataque químico de uma solução solvente. Muito menos utilizada do que os métodos a seco (menos de 10% da produção mineral a céu aberto – Hartman; Mutmansky, 2002), a classe de métodos aquosos engloba os métodos historicamente mais tradicionais e antigos, mas também os mais recentes. Restritos em suas aplicações, os métodos via úmida são ainda atrativos devido ao seu custo relativo muito baixo. O Quadro 2.1 indica os custos relativos médios desses métodos em 5% ou menos. A classe de exploração via úmida é composta de duas subclasses, cada uma contendo dois métodos:

- * A lavra de plácetes, dirigida para a recuperação de metais pesados oriundos principalmente de depósitos de aluvião, usando-se água para escavar, transportar e/ou concentrar o mineral valioso. Os métodos utilizados são a lavra hidráulica e a dragagem.
- * A lavra por dissolução, aplicada para a extração de minerais solúveis ou fundidos, ou que podem ser transformados em polpa, usando-se água ou um solvente líquido. Os métodos utilizados são a lavra química e a extração por poço.

Os quatro métodos têm aplicação limitada e empregam sequência bem característica de desenvolvimento e operação. Este capítulo discute as principais características desses métodos.

4.1 LAVRA HIDRÁULICA

A lavra hidráulica é adequada sobretudo para a recuperação de minérios e minerais presentes em depósitos de pláceres. Entre os minérios e metais ocorrentes em pláceres, incluem-se ouro, diamante, platina, cassiterita, titânio, rutilo, tungstênio, scheelita, cromita, magnetita e certos tipos de fosfato. Além disso, frequentemente são encontrados neles depósitos importantes de areias, argilas e cascalhos, que podem ser aproveitados para uso na construção civil e na indústria. Geologicamente, os depósitos de pláceres são formados pelo transporte de sedimentos por meio de um agente natural e pela concentração anômala dos minerais mais pesados oriundos de rocha matriz. Segundo o tipo de agente natural que lhes deu origem, os pláceres são classificados como aluvionares (detritos continentais), eólicos (vento), marinhos ou glaciais. E, de acordo com a sua localização, são denominados residuais (elúvio), de bancos (colúvio), de fluxo (fluvial), de praia ou de deserto. Os mais importantes comercialmente são aqueles classificados como aluvião, no que se refere ao agente, e como fluvial, no que diz respeito à localização.

Nos pláceres, os solos são materiais não consolidados que encobrem a rocha matriz, podendo atingir várias espessuras em função do estágio de formação e do intemperismo a que são submetidos. Os rios são os principais agentes de transporte dos sedimentos formados pelo intemperismo atuante nas rochas matrizes das áreas continentais. Cada rio possui sua bacia de drenagem, que coleta a água e os sedimentos provenientes de seus diversos cursos de água tributários para o rio principal. O leito dos cursos d'água é constituído por materiais arenosos e/ou argilosos, naturalmente mutáveis, que adquirem várias formas e tamanhos em função das características do fluxo fluvial. Assim, o tamanho, a forma e a constituição mineralógica dos depósitos de areias, cascalhos e argilas dependem da estrutura da rocha matriz, do local da extração, do modo de transporte e do ambiente de sedimentação. Por convenção, a diferenciação dá-se por tamanho/diâmetro do grão, como discriminado na Tab. 4.1.

A areia e o cascalho empregados como materiais de construção civil são normalmente extraídos de depósitos fluviais recentes ou de terraços por meio

desmonte, são alimentados com água da linha de recalque (Fig. 4.2). O tapume *r*, de madeira e com altura entre 0,8 m a 1,0 m, serve de guia para orientar a polpa para a calha *t*. Entretanto, se econômico, podem ser abertas calhas radiais adicionais que também orientem a polpa para a calha *t*. À medida que as frentes avançam, podem ser escavados novos poços coletores, e para lá se transporta a bomba de areia.

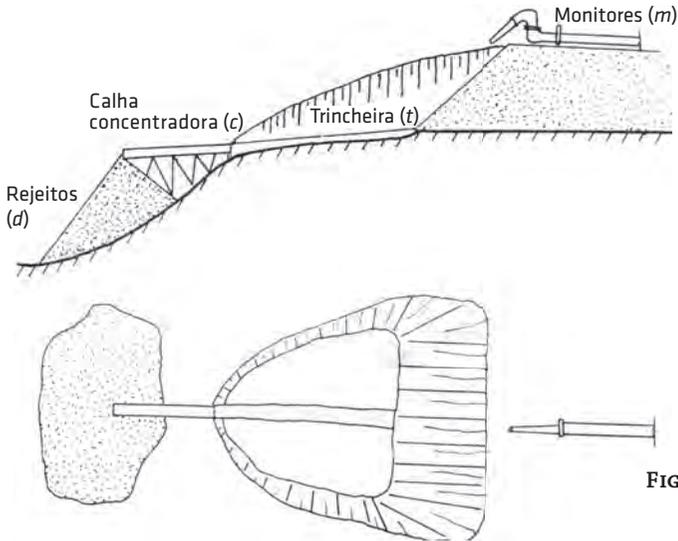


FIG. 4.1 Desmonte hidráulico com o monitor situado sobre a frente

Quando o plácer estiver situado em um terreno plano, será necessário elevar a polpa para uma cota conveniente, para obter-se um declive adequado às calhas concentradoras. Essa elevação pode ser obtida com bombas de areia ou com elevadores hidráulicos. Os elevadores são usados em locais onde há falta de energia elétrica, dispõe-se de boa altura estática de água e, além disso, a altura a que a polpa deva ser elevada não seja muito alta.

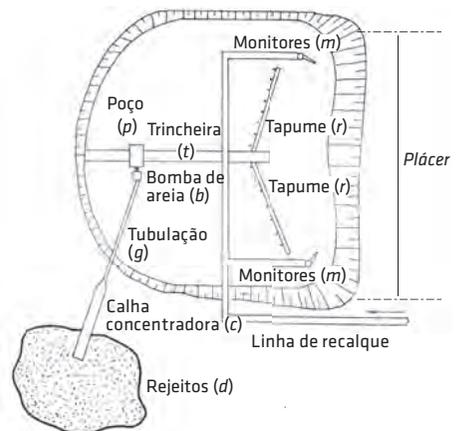


FIG. 4.2 Desmonte hidráulico com o monitor instalado sobre a rocha leito e escavando em oposição à frente

4.1.3 LAVRA

Segundo Hennies et al. (2004), a utilização da água como ferramenta em lavra

lizando o(s) método(s) de extração às peculiaridades do local e considerando possíveis restrições definidas no zoneamento ambiental municipal, em planos diretores, leis orgânicas, códigos de posturas, leis de uso e ocupação do solo, leis ambientais municipais etc.

O desmonte hidráulico é pouco utilizado hoje para a lavra de plácetes nos países mais desenvolvidos, como os Estados Unidos (exceto o Alasca), e naqueles da Europa, principalmente por restrições ambientais, mas continua em uso em outros países, sobretudo a Austrália (para ouro), os do sudoeste da Ásia, o Brasil (para estanho, ouro e diamante) e diversos países africanos. Ocasionalmente, o método encontra aplicações para outros propósitos, especialmente decapeamento. Aplicações específicas para decapeamento seriam a remoção de decapeamentos siltosos em uma mina de minério de ferro em Ontário (Canadá), de gelo sobre os depósitos de plácer de ouro no Alasca e de depósitos de cinzas vulcânicas e tufo que se formam como camadas superficiais nos depósitos de cobre de Bougainville (Papua-Nova Guiné). Numa aplicação incomum, o método é usado nas minas de fosfato da Flórida (EUA) para formar polpas com a matriz do minério, um conglomerado (Hartman; Mutmansky, 2002).

4.2 LAVRA DE PLÁCETES – DRAGAGEM

A dragagem corresponde a uma obra ou serviço de engenharia com a finalidade de escavação de materiais do fundo de rios, lagos, mares, baías ou canais para sua remoção, limpeza, desobstrução ou derrocamento. Os principais materiais escavados são solos, sedimentos e rochas do fundo de corpos de água. As dragas operam segundo sistemas adequados ao material a ser dragado e à sua forma de disposição. Para Aguiar (s.d.), têm-se fundamentalmente duas classes de dragas: as mecânicas e as hidráulicas. As mecânicas se subdividem em três tipos: de alcatruzes (AL), de mandíbulas articuladas (MA) e escavadeiras (ES). As hidráulicas, por sua vez, também se subdividem em três tipos: de aspiração (AS), de sucção e recalque (SR) e autotransportadoras (AT).

É provável que a dragagem tenha sido o primeiro método mecânico de lavra contínua inventado. Um equipamento primitivo esteve em uso nos países nórdicos em 1565, segundo MacDonald (1983). Na mineração, o lago formado pode ser natural ou artificial, dependendo do tamanho do depósito e da draga. Como se pode observar na Fig. 4.5, a draga corresponde a uma embarcação que pode até realizar todas as operações principais de exploração e enriquecimento de

de decantação. O processo de concentração dos minerais pode também ser realizado na própria plataforma flutuante, desde que ela contenha os equipamentos necessários.

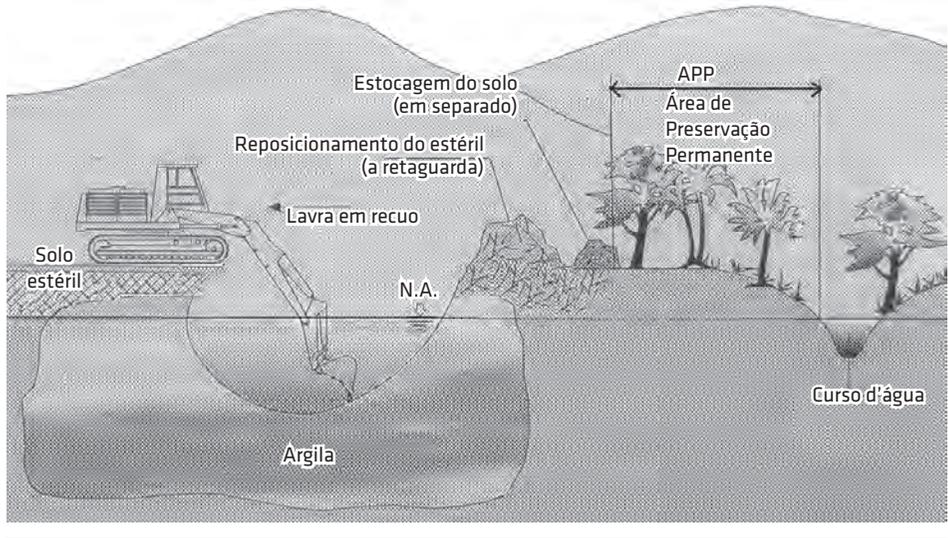


FIG. 4.12 Extração de argila por ciclo em cava fechada em várzeas por retroescavadeira
Fonte: modificado de Bruschi e Peixoto (1997).

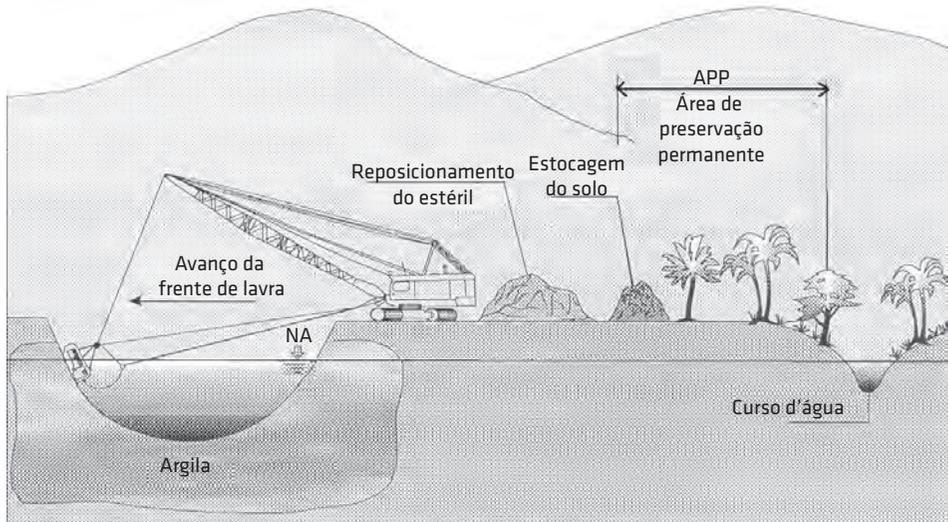


FIG. 4.13 Extração de argila por ciclo em cava fechada em várzeas por retroescavadeira dragline
Fonte: modificado de Bruschi e Peixoto (1997).

palmente aqueles gerados pela contaminação com produtos químicos durante as fases de estimulação, lavra, transporte e estocagem.

4.5 TÓPICO ESPECIAL: INTRODUÇÃO À MECÂNICA DOS FLUIDOS APLICADA

A matéria apresenta-se no estado sólido ou no estado fluido, este englobando os estados líquido e gasoso. O espaçamento e a atividade intermolecular são maiores nos gases, menores nos líquidos e relativamente muito reduzidos nos sólidos. Entretanto, nos problemas práticos da Mecânica dos Fluidos adota-se a hipótese da continuidade, ou seja, considera-se o meio fluido como contínuo, sendo que ele pode ser dividido, infinitas vezes, em partículas fluidas entre as quais se supõe não haver vazios. Define-se assim a partícula fluida como a quantidade de fluido contida em um volume infinitesimal, a qual conserva, por princípio, todas as propriedades do fluido original (Bastos, 1980).

Chama-se Hidrostática a ciência que estuda os fluidos em equilíbrio estático. Particularmente, ao falar em fluidos líquidos, deve-se falar em sua viscosidade, que é o atrito existente entre suas moléculas durante um movimento. Quanto menor a viscosidade, mais fácil o escoamento do fluido.

Assim como os sólidos, os fluidos exercem pressão sobre outros corpos devido ao seu peso. Pode-se obter a pressão exercida por um líquido de densidade ρ que ocupe um recipiente até uma altura h por meio das Eqs. 4.1 a 4.4.

A força exercida sobre a área de contato corresponde ao peso do líquido.

$$p = \frac{F}{A} \quad (4.1)$$

em que:

p = peso de líquido;

A = área de contato.

Mas, pela Eq. 1.24, tem-se que $F = m \cdot g$, e assim:

$$p = \frac{m \cdot g}{A} \quad (4.2)$$

A massa do líquido pode ser expressa por $m = \rho \cdot V$, que, substituído na Eq. 4.2, resulta em:

Verifica-se, pois, que a energia do jato (E) é proporcional ao cubo da velocidade dele, o que põe em evidência a importância dessa energia na desintegração das rochas, pelo jato hidráulico. Em vista disso, a seção do bocal deve ser aumentada de tal modo que, para uma determinada vazão, forneça a velocidade mais próxima possível daquela decorrente da aceleração da gravidade. A distância entre o bocal e a frente de trabalho influi ponderavelmente na eficiência do jato. Aumentando a distância entre o monitor e a frente de desmorte, a eficiência do monitor declina rapidamente, ao mesmo tempo que o consumo de água cresce rapidamente.

EXERCÍCIOS RESOLVIDOS

1. Em uma prensa hidráulica, o raio do êmbolo maior é o sêxtuplo do raio do êmbolo menor (Fig. 4.21). Aplicando uma força de 50 kgf ao êmbolo menor, determinar a força transmitida ao êmbolo maior (Bastos, 1980).

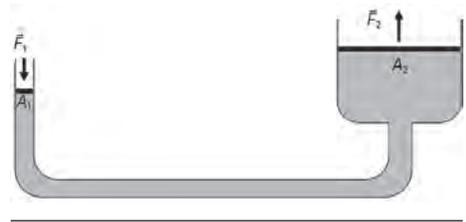


FIG. 4.21 Esquema de uma prensa hidráulica com êmbolo

Solução

Desprezando o atrito e os efeitos da inércia (em relação à força hidrostática), tem-se, pela lei de Stevin (equação fundamental da fluidostática), para os êmbolos 1 e 2:

$$P_1 = P_2 + \gamma \cdot h$$

Em geral, é muito pequeno o desnível dos pistões em relação à grandeza das forças e das áreas, o que permite escrever, com boa aproximação, $h = 0$. Logo, na expressão de P_1 :

$$P_1 = P_2$$

As pressões unitárias nas áreas A_1 e A_2 dos êmbolos serão, respectivamente, P_1 e P_2 . Como $P_1 = F_1/A_1$ e $P_2 = F_2/A_2$, tem-se:

$$F_1/A_1 = F_2/A_2$$

Pelo enunciado, $F_1 = 50$ kgf.

$$A_1 = \pi \cdot R^2 \text{ e } A_2 = \pi(6R)^2 = 36\pi \cdot R^2$$

cinco

MÉTODOS DE LAVRA DE MINAS SUBTERRÂNEAS

Conforme visto anteriormente, a lavra pode ser a céu aberto; a céu aberto, seguindo-se um estágio de transição à lavra subterrânea; subterrânea; ou simultânea, por combinações de métodos de lavra a céu aberto e subterrânea.

O progresso e o desenvolvimento tecnológico na mineração têm por objetivo o aproveitamento máximo das reservas minerais. Entretanto, se por um lado o aumento da eficiência decorrente da mecanização e o consequente ganho de produtividade têm impulsionado a lavra a céu aberto, por outro, até como implicação das altas taxas de produção, há a exaustão das minas a céu aberto com minério de alto teor aflorantes ou próximas à superfície. Desse ponto de vista, verifica-se uma tendência de substituição progressiva, embora lenta, das lavras conduzidas a céu aberto pelas subterrâneas por razões econômicas, geológicas e de morfologia das jazidas. A crescente competição pelo uso da terra principalmente nas regiões mais povoadas e desenvolvidas pode tornar a lavra subterrânea a única opção plausível. Assim, o desafio tecnológico a ser enfrentado pela área de lavra de minas e pelos respectivos profissionais é crescente. Constantemente novas metodologias têm sido desenvolvidas para a lavra de jazidas cada vez mais profundas. Como consequência, o número de minas subterrâneas, tanto no mundo como no Brasil, tem crescido.

mesmo na ausência de madeira os minérios sulfetados podem incendiar-se após sua fragmentação e armazenagem ou estocagem prolongada. Isso ocorre devido à auto-oxidação da pirita. Além dos minérios sulfetados, qualquer minério não oxidado, após sua fragmentação e principalmente moagem, se estocado, pode oxidar-se e causar problemas durante o processo de beneficiamento ou concentração.

5.2 DEFINIÇÃO DAS TERMINOLOGIAS ESPECÍFICAS DA LAVRA SUBTERRÂNEA

Para a lavra de minas subterrânea, as classificações dos depósitos minerais mais utilizadas são aquelas relacionadas à forma dos corpos de minério. Considerando a morfologia dos corpos de minério, os depósitos podem ser classificados como maciços, em camadas com corpos tabulares, lenticulares e veios. Os contatos dos corpos mineralizados com as encaixantes podem ser bem nítidos ou graduais. A capa (*hangingwall*) e a lapa (*footwall*) correspondem, respectivamente, às encaixantes que se sobrepõem ou se sotopõem aos corpos de minério, sobretudo aqueles com maior extensão em duas dimensões (veios, lentes e camadas) (ver Fig. 5.2 e 5.5A). Especificamente em jazidas de carvão, os termos capa e lapa são substituídos respectivamente por teto e muro.

Direção (*strike*), mergulho (*dip*) e *plunge* referem-se às principais características geoestruturais do corpo de minério (ver Fig. 5.4). A direção de um corpo de minério (por exemplo, camada) é a direção da reta horizontal que acompanha a maior

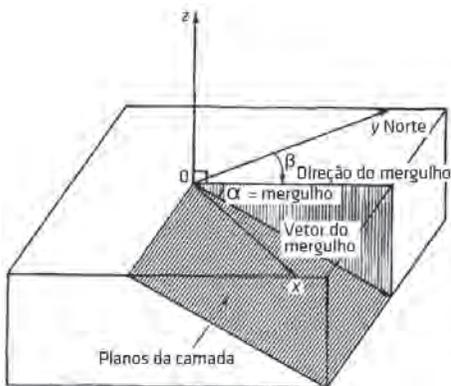


FIG. 5.4 Definição da direção e do ângulo de mergulho para um plano de uma camada

extensão da estratificação. Já o mergulho é a reta de maior declive dessa estratificação. O *plunge*, por sua vez, tem a ver com estiramentos ocorridos durante o tectonismo que deu gênese à jazida, sendo que muitas vezes zonas mineralizadas (*ore shoots* ou *bonanzas*) seguem esses estiramentos. De acordo com a disposição espacial, distinguem-se as escavações ou galerias subterrâneas verticais, horizontais ou inclinadas. Um esquema geral de disposição das aberturas subterrâneas está representado na Fig. 5.5.

Na sequência dessa obra, será feita a abordagem da sistemática que leva à definição do melhor método de lavra para cada caso, seu projeto e detalhamento, bem como a sua descrição pormenorizada. O Quadro 5.1 exibe uma comparação entre os métodos de lavra subterrânea baseada em parâmetros operacionais históricos. Uma documentação fotográfica sobre os métodos e operações de lavra é apresentada em um caderno especial (entre as páginas 264 e 275).

5.4.1 DECÁLOGO DAS CARACTERÍSTICAS DESEJÁVEIS PARA SELECIONAR UM MÉTODO DE LAVRA SUBTERRÂNEA

1. *Facilidade no processo de fragmentação da rocha*

Corresponde à facilidade com que a rocha a ser trabalhada é desmontada, atingindo a granulometria suficiente para ser transportada, por abatimento, desmonte mecânico ou desmonte convencional com o uso de explosivos. A perfuração se torna mais fácil quando os operadores trabalham em uma plataforma e frente de perfuração estáveis e firmes, sem obstáculos para a instalação, a operação, a realização de manobras e a troca de turno das perfuratrizes ou jumbos. A detonação é mais eficiente se a força da gravidade puder ser usada a favor do confinamento dos explosivos nos furos, isto é, favorecendo os furos verticais.

2. *Produção máxima*

A concentração dos serviços em poucas frentes de produção, com a aplicação dos recursos adequados em termos de homens, máquinas, equipamentos, serviços e supervisão, normalmente tende a elevar a produtividade, ou seja, a produção/homem/turno. A seleção dos equipamentos mais apropriados para executar as várias operações unitárias na lavra reduz os tempos de ciclo nessas operações e é outro ponto vital para atingir melhores taxas de produção. Idealmente, a produção deve iniciar-se já na fase de desenvolvimento da lavra, sendo que os métodos de grande produção têm menores custos operacionais do que os métodos mais seletivos.

3. *Lavra rápida*

A velocidade de avanço das frentes de lavra não é importante somente do ponto de vista da produção, mas também para a manutenção da estabilidade das aberturas. A lavra rápida reduz os custos de suporte e de desenvolvimento. Alguns métodos de lavra subterrânea, inclusive, foram especialmente desenvolvidos com o propósito de efetuar o desenvolvimento, as aberturas e a produção o mais rápido possível.

5.6 TÓPICO ESPECIAL: ESTABILIDADE DE ESCAVAÇÕES MINEIRAS SUBTERRÂNEAS

Talvez nenhuma outra ciência reflita tão bem a arte de minerar quanto o controle de estabilidade das escavações. Nas minas, ao contrário do que ocorre na engenharia civil, onde as obras são permanentes, é geralmente impossível evitar a rotura dos terrenos em algum momento; importa escavar do modo mais econômico possível, o que implica geralmente elevadas velocidades de desmonte; a estabilidade das escavações apenas interessa enquanto elas são necessárias; a respectiva progressão através dos maciços rochosos é uma consequência direta da exploração mineira que se pretende efetuar e do método de lavra empregado.

Em comparação com a Geomecânica Aplicada à Engenharia Civil, que se apresenta como estática e servindo uma engenharia de construção, a Geomecânica Aplicada à Engenharia de Minas tem caráter mais dinâmico, ao serviço, essencialmente, de uma engenharia de demolição (Mendes, 1985). Isso se deve ao fato de que o projeto de minas é sempre altamente dependente do comportamento geomecânico de um certo maciço rochoso heterogêneo comumente por natureza. A Geomecânica, com efeito, ocupa-se de materiais geológicos e averigua o comportamento não só desses materiais como dos meios (os maciços rochosos e terrosos) em que aqueles ocorrem. As rochas e os maciços rochosos só muito raramente podem ser considerados homogêneos e isótropos. Além disso, só em casos muito particulares os maciços rochosos podem ser considerados como contínuos, dado que são afetados por variados sistemas de diáclases e falhas, além de diversos vazios naturais. Assim, o estado original de tensões no maciço rochoso e as propriedades geomecânicas *in situ* das rochas constituintes dele são difíceis de estimar com precisão.

Entretanto, embora tais aspectos sejam complexos ao serem tratados matemática e fisicamente, pode-se obter resultados aproximados por meio de medidas *in situ* e modelos matemáticos de simulação. Com a vulgarização dos computadores e a generalização dos métodos numéricos de cálculo, um importante impulso foi dado à aplicação da Geomecânica à exploração mineira. Apesar de os métodos numéricos de cálculo, nomeadamente as técnicas dos elementos finitos e de fronteira, permitirem importantes análises de sensibilidade em relação a alguns dos parâmetros, se a caracterização dos dados de entrada em nada



Pilares da mina de Passagem, em Mariana (MG), com locação do veio mineralizado sub-horizontal



Galeria de transporte na mina de Passagem, em Mariana (MG)



Mina de níquel em Fortaleza de Minas (MG)



Lavra por bancadas na mina de minério de ferro de Carajás (PA), com destaque para os taludes em processo de revegetação



Lavra hidráulica por monitores em plácer contendo ouro em Paranaíta (MT)

os métodos dos elementos de contorno, os métodos dos elementos distintos e os métodos híbridos.

EXERCÍCIOS RESOLVIDOS

1. Uma galeria de 4,5 m de largura será feita por um minerador contínuo em uma camada de carvão de 1,5 m a uma profundidade de 150 m. Qual é a tensão de compressão máxima vigente no entorno da abertura considerando uma densidade média da rocha sobrejacente de $\gamma = 2,5 \text{ t/m}^3$?

Solução

A relação entre a largura da abertura e a altura (L/A) é $3(4,5/1,5)$. Usando a Fig. 5.15 e considerando que o minerador contínuo executa aberturas ovais, a tensão de compressão crítica para $L/A = 3$ será de cerca de 4. Se a densidade $\gamma = 2,5 \text{ t/m}^3$, então a tensão de compressão crítica máxima será:

$$\sigma_v = 4\gamma \cdot h = 4 \times 2,5 \text{ t/m}^3 \times 150 \text{ m} = 1.500 \text{ tf/m}^3 = 150 \text{ kgf/cm}^2$$

2. Uma passagem de minério circular será construída em uma rocha arenítica competente e homogênea ($k = 0$). Levando em conta que a densidade do maciço sobrejacente $\gamma = 2,5 \text{ tf/m}^3$ e que as propriedades *in situ* resistência à compressão $C_0 = 1.700 \text{ kgf/cm}^2$ e resistência à tração $T_0 = 105 \text{ kgf/cm}^2$, pede-se determinar os fatores de segurança de longo prazo para a obra. Qual é a profundidade máxima permitida do túnel nas condições estabelecidas?

Solução

Usando a Fig. 5.11, verifica-se que o fator de concentração de tensão máximo (tração) está localizado no teto da abertura, tendo valor igual a -1 , enquanto o outro fator de concentração de tensão máximo (compressão) está localizado nos pontos laterais das aberturas, tendo valor igual a $+3$.

Para a estabilização em longo prazo, os fatores de segurança indicados são:

- * 8 para esforços de tração (σ_{Tmax});
- * 4 para esforços de compressão (σ_{cmax}).

Assim:

$$\sigma_{Tmax} = \frac{(-1) \cdot 105 \text{ kgf/cm}^2}{8} = -13 \text{ kgf/cm}^2$$

ALARGAMENTOS AUTOSSUPORTANTES

6.1 CÂMARAS E PILARES

Segundo esse princípio fundamental, a parte valiosa do corpo mineral só é parcialmente extraída: porções maiores ou menores permanecem para a sustentação dos terrenos sobrejacentes e a garantia de construções superficiais, se for o caso. Essas partes residuais de material útil são denominadas pilares. Os pilares que separam as aberturas contíguas são deixados para prover um suporte natural. Nesse método, o minério é escavado mediante a abertura de espaços subterrâneos, denominados câmaras, deixando-se pilares para suportar o teto e as paredes. Os pilares são geralmente constituídos por material de qualidade inferior, uma vez que não serão explotados. A relação entre as áreas dos pilares e das câmaras pode ser elevada e depende da resistência geomecânica do maciço e da profundidade da frente de lavra. Com a abertura em cotas cada vez mais profundas, em virtude da lavra de praças inferiores, incrementam-se os esforços de tensão sobre os pilares, além da probabilidade do aparecimento de novas fraturas consequentes dos esforços provocados pelo carregamento e sua interação com a abertura de vazios (Caranassios et al., 1993).

Se o depósito for contínuo e as aberturas forem executadas sistematicamente, a aparência em um plano (ou em planta) se assemelha aos quarteirões de uma cidade

sado caso a caso. Discussões mais detalhadas sobre esse assunto estão além do objetivo desta obra. Os interessados nesse tema podem consultar publicações específicas sobre Mecânica das Rochas, como Brady e Brown (1985) e Hoek, Kaiser e Bawden (1995).

A principal vantagem do método dos alargamentos abertos é sua alta flexibilidade, como destacado por diversos autores, como Morrison e Russel (1973), Hamrin (1982), Lyman (1982) e Haycocks (1992), todos citados por Hartman e Mutmansky (2002). Esse método pode ser facilmente modificado, permitindo até a lavra em diversos níveis de modo simultâneo, e há a possibilidade de mecanização, inclusive com o uso de equipamentos de grande porte. Por ser um método seletivo, permite o abandono dos pilares em rocha estéril ou minério pobre, o que aumenta a recuperação para algo em torno de 60% a 80% e diminui a diluição para a faixa entre 10% e 20% (Quadro 5.1).

Entretanto, como se sabe, a tensão no maciço rochoso e particularmente nos pilares eleva-se bastante com o aprofundamento das minas. A manutenção da estabilidade do teto do realce aberto é condição essencial para a segurança na lavra, sobretudo se a rocha encaixante não for de boa qualidade e for preciso escalar grandes alturas para efetuar as operações de suporte. Além disso, há dificuldades em prover uma boa ventilação em aberturas muito grandes. Finalmente, como desvantagem do método, seria possível destacar a perda de minério em certos pilares onde a recuperação for impossível ou muito difícil.

6.3 LAVRA POR RECALQUE

A lavra por recalque (*shrinkage*) é uma modalidade de lavra ascendente na qual o minério é desmontado em tiras horizontais a partir da parte de baixo da abertura projetada e na direção de seu topo e acumulado na mesma abertura, servindo de plataforma para os mineiros e de suporte para as paredes do alargamento. Também chamado de *método de armazenamento* ou *método de lavra estacionária*, esse método se baseia em uma abertura vertical, isto é, feita praticamente segundo um plano vertical ou quase vertical, a um ângulo geral maior que o ângulo de repouso natural do minério desmontado.

Como o minério empola e aumenta seu volume quando desmontado, cerca de 30% a 50% (Peele; Church, 1941, p. 10-274) dele deve ser retirado à medida que o desmonte ocorre, a fim de possibilitar espaço suficiente na abertura para os

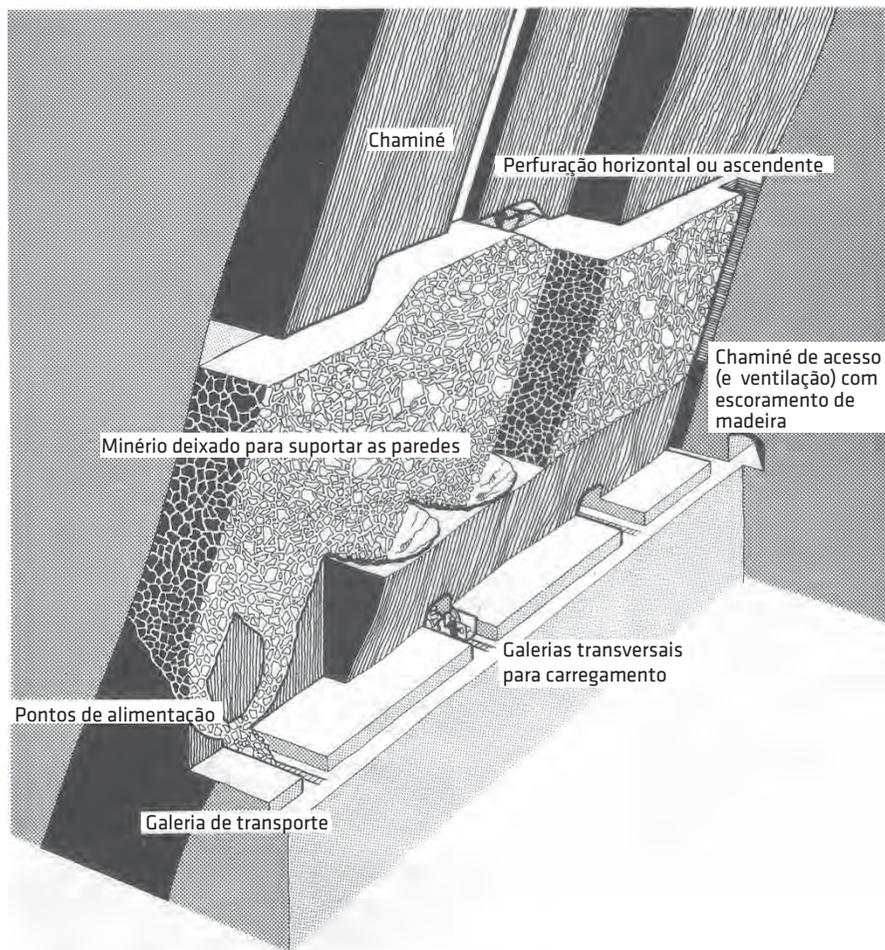


FIG. 6.8 Lavra por recalque usando funis de descarga e carregadoras

Fonte: Hamrin (1986).

6.3.4 AVALIAÇÃO DAS PRÁTICAS MINEIRAS

Por ser um método de ciclo operacional relativamente simples e muito adequado para pequenas minas, o método por recalque já foi o mais usado na lavra subterrânea de rocha dura no passado. Além disso, ele era frequentemente selecionado por requerer pequeno investimento de capital, em máquinas principalmente, e ter recuperação geral de até 75% (durante a lavra, 85%-95%; durante a recuperação de pilares, 60%-80%) (Hartman; Mutmansky, 2002) e uma taxa de produção razoável. Além do ciclo operacional relativamente simples, esse método requer muito pouco escoramento e dispensa paleação. A extração é praticamente completa nos veios estreitos, embora pilares da central de transporte devam ser

Também foi adotado nas minerações de tungstênio no Norte do Brasil, na mina de fluorita de Panelas (PE) e na mina de cobre de Camaquã, em Caçapava do Sul (RS).

6.4 LAVRA POR SUBNÍVEIS

O método de lavra subterrânea por recalque é um dos mais antigos métodos de lavra, mas apresenta como um de seus maiores inconvenientes a retenção de parte considerável do minério nas aberturas. A necessidade de retenção do minério desmontado nas aberturas para servir de plataforma para as operações de perfuração e desmonte faz com que apenas cerca de um terço dele possa ser liberado em um tempo programado. Esse é seguramente o principal “gargalo” concernente à aplicação desse método, o que tem levado à sua substituição pelo método de lavra subterrânea por subníveis (*sublevel stoping*).

Assim, para a lavra de corpos de minério muito inclinados e regularmente competentes com encaixantes também competentes, e mesmo em corpos bem espessos, o método de lavra por subníveis tem sido selecionado. Nele, o corpo de minério é verticalmente dividido em níveis, e entre cada par de níveis adjacentes as aberturas são efetuadas segundo o padrão e as dimensões mais convenientes. Esse método tem como reforço principal das encaixantes os pilares de rocha constituídos por minério ou estéril, quando possível. Há diversos tipos de pilares estruturais, os quais subdividem o nível em câmaras, destacando-se, entretanto, o pilar de teto (*crown pillar*), o pilar-base (*sill pillar*) e os vários pilares laterais ou verticais (*rib pillar*).

Em cada nível, o pilar de teto protege a capa das aberturas, enquanto o pilar-base mantém estável o nível inferior, onde se instala a central de transporte para o escoamento do minério da abertura. Segundo a essência do desenvolvimento do método, a partir do acesso principal são construídas galerias de acesso internível estrategicamente posicionadas e, então, a partir de tais galerias são executados furos para o posterior carregamento com explosivos e o desmonte para a execução dos alargamentos por sucessivos subníveis (Fig. 6.9).

Tais furos, que podem ser inclinados ou verticais, como representado na Fig. 6.11, são adequadamente distribuídos de forma a dividir o espaço entre os níveis adjacentes em subníveis. As paredes das aberturas não são reforçadas, e, no caso de um corpo de minério de grandes dimensões, o corpo pode ser dividido em várias câmaras menores, nas quais o minério deixado no local serve

sistema de descarga. A Fig. 6.11B mostra uma abertura transversal por subníveis a ser executada em um corpo de minério espesso. O comprimento da abertura é pequeno e pilares laterais são deixados em ambos os lados da abertura para posteriormente serem recuperados. Travessas e passagens de minério duplas ligando as aberturas ao nível de extração são então necessárias nesses casos. Os cortes devem ser efetuados a partir do extremo superior do contato do minério com as encaixantes e devem prosseguir até atingir toda a extensão do corpo mineral naquele contato. A perfuração é realizada por furos transversais com origem nos diferentes horizontes dos subníveis projetados para a abertura.

Plano ao nível de extração

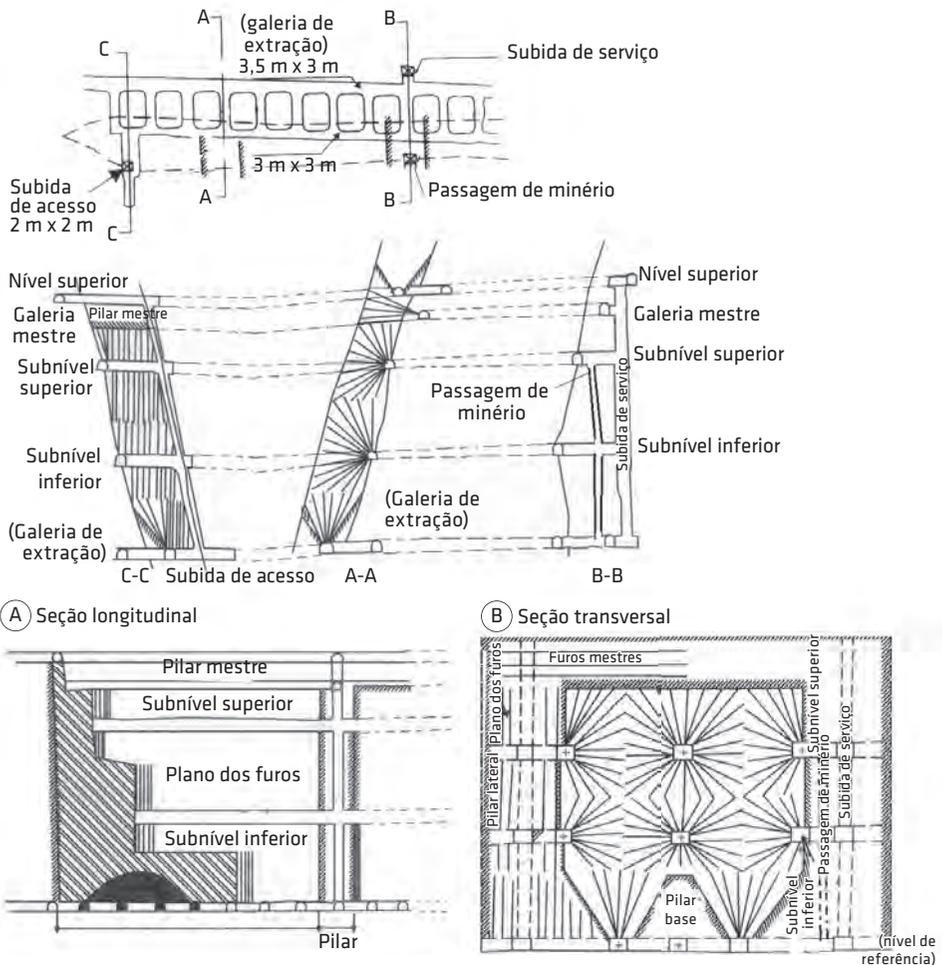


FIG. 6.11 (A) Lavra por subnível longitudinal e (B) lavra por subnível transversal
Fonte: modificado de Tatiya (2005).

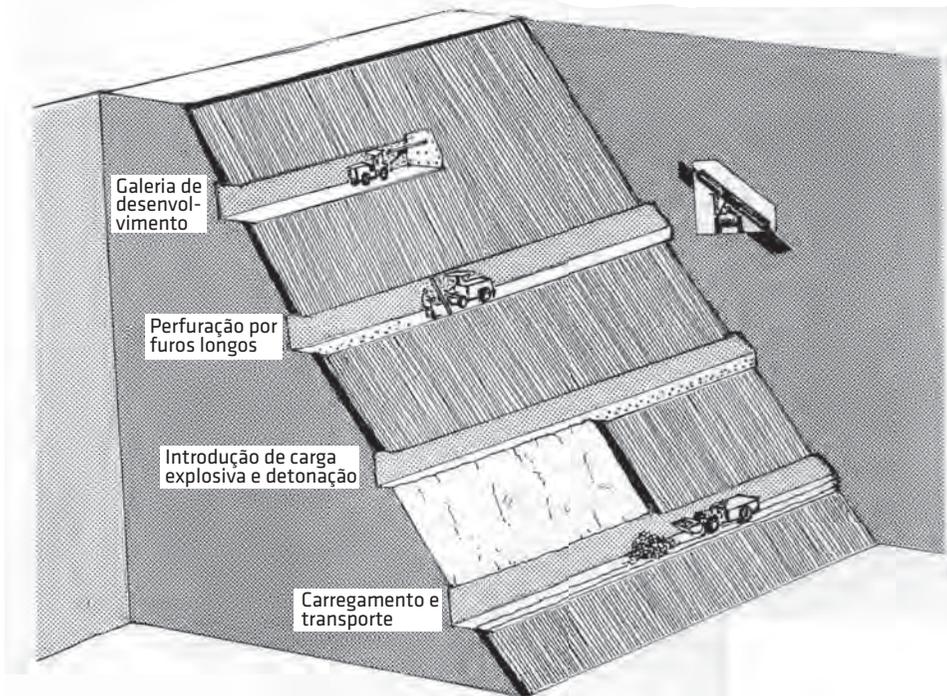


FIG. 6.15 Esquema da lavra de um veio de minério estreito com o uso de equipamentos de pequeno porte

Fonte: Hamrin (1997).

Entretanto, o tempo e os custos para efetuar o desenvolvimento podem ser elevados em alguns casos. O tempo para o desenvolvimento e os custos para a fragmentação aumentam bastante quando a espessura do depósito é pequena, e a resistência da rocha, alta. Além disso, há a necessidade de mão de obra especialmente treinada, sobretudo para garantir a execução dos furos longos segundo o planejado, sem desvios. Os principais impactos ambientais desse método são devidos a ruído, vibrações, onda aérea e danos estruturais nas estruturas eventualmente construídas na superfície próxima aos desmontes de rocha, principalmente quando se utilizam furos de grande diâmetro e o método VCR.

O método de lavra por subníveis pode ser adaptado a várias situações, e essa é uma das razões da sua ampla utilização no Brasil. A mina subterrânea de zinco da Votorantim Metais em Vazante (MG), que conta com 162 km de galerias escavadas e sete níveis de produção, dos quais quatro estão em operação, está utilizando a modalidade *vertical retreat mining* (VRM). Para prolongar sua vida

- * *condição 2*: a resistência à compressão dos pilares, que, como visto anteriormente, está associada às suas feições em termos de forma e volume, além das características de comportamento mecânico do maciço circundante.

Assim, o dimensionamento de pilares se constituiria na resolução das equações antes consideradas circunscritas às condições 1 e 2.

Os métodos mais usados são os experimentais ou empíricos até quando utilizam parcialmente princípios teóricos mais sofisticados, sendo, nesse caso, denominados no meio científico como semiempíricos.

EXERCÍCIO RESOLVIDO

- a] Especificar as dimensões seguras de pilares infinitos de carvão sob as seguintes condições:
- * profundidade da camada mineralizada: 300 m;
 - * espessura da camada mineralizada: 8 m;
 - * vão do teto estável: 8 m;
 - * peso específico médio do capeamento: 0,025 MN/m³;
 - * resistência à compressão do pilar: 20 MPa;
 - * fator de segurança adotado: 1,2;
 - * peso específico do pilar de suporte: 0,030 MN/m³.
- b] Determinar a taxa de extração para o caso referido.

Solução

- a] Os pilares podem ser considerados como colunas submetidas a carregamentos verticais correspondentes ao peso total das rochas sobrejacentes até a superfície. Considerar:

$$A \cdot H \cdot \gamma_m + a \cdot h \cdot \gamma_p \leq a \cdot \sigma_c / FS \quad (1)$$

em que:

A = área da seção do maciço por pilar de suporte (área em planta);

H = distância entre a parte superior do pilar de suporte e a superfície;

γ_m = peso específico médio do maciço rochoso;

a = área da seção horizontal do pilar de suporte (área em planta);

h = altura do pilar de suporte;

γ_p = peso específico médio do pilar de suporte;

sete

ALARGAMENTOS SUPORTADOS

Os alargamentos suportados são aqueles que requerem algum tipo de material artificial para a manutenção da estabilidade das aberturas. Os métodos de lavra por alargamentos suportados são selecionados quando as aberturas não se mantêm estáveis durante a fase de produção ou quando o abatimento e a subsidência não são permitidos. O suporte é provido por material externo, que pode ser trazido aos realces. São mais apropriados para minérios ricos cujo valor alto contrabalance a elevação dos custos decorrente da instalação dos suportes artificiais e/ou do enchimento e a menor produtividade relativa desse tipo de lavra (ver Quadro 5.1). Essa menor produtividade é consequência direta dos desmontes menores (levando ao trabalho em alargamentos relativamente pequenos), do aumento das operações conjugadas e da dificuldade própria de manuseio dos suportes e/ou do enchimento.

A principal característica favorável desses métodos é sua alta recuperação, que pode atingir até 100%, fato altamente desejável para minérios ricos. Três métodos estão contidos nessa classe:

- * alargamentos esteados;
- * alargamentos com estruturas retangulares;
- * corte e aterro ou enchimento.

-base ou térreo, são denominadas sucessivamente, como em um edifício, primeiro andar, segundo andar, terceiro andar etc. Quando em opera o plena, pode-se verificar no mínimo três andares em funcionamento simultâneo: um andar mais alto em lavra (andar de lavra), um imediatamente abaixo (andar de paleamento) (*shovelling floor*) e um onde se localiza a central de transporte.

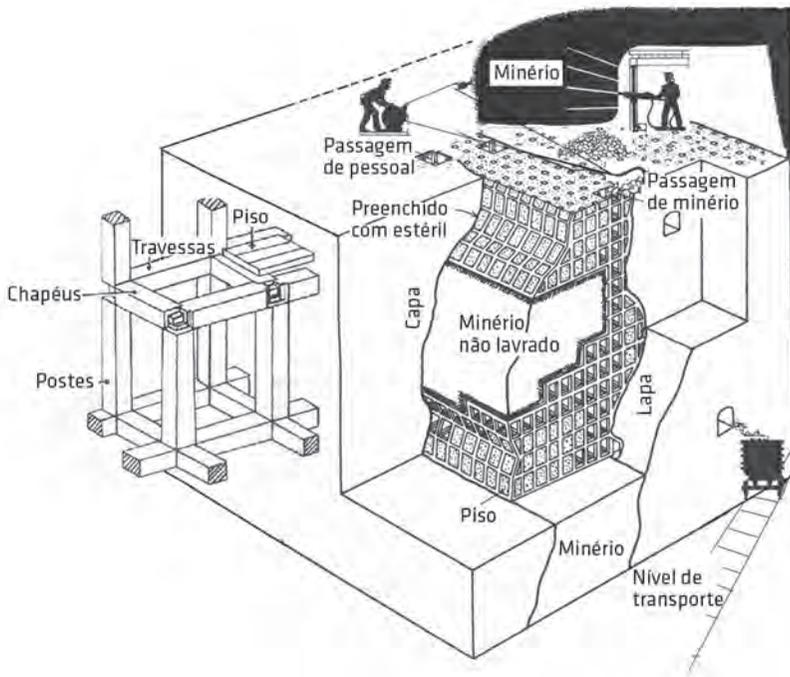


FIG. 7.2 Lavra com estruturas retangulares em um depósito maciço e irregular e representa o dos elementos das esquadrias

Fonte: adaptado de Hartman (1987) e Sandier (1962).

Em veios, os chapéus são, geralmente, assentados com a maior dimensão perpendicular   dire o do corpo. Já em depósitos maciços, essa maior dimensão deve estar paralela   dire o de maior incidência de esforços de compressão no realce. Em termos de encaixe e ajuste das peças das esquadrias, o arranjo de *poste contra poste* (*post butting*)   menos usado que o de *chapéu contra chapéu*, pois este apresenta mais elasticidade e menores deforma es, embora o primeiro proporcione maior resistência às tensões verticais. Há várias op es para o encaixe das peças, mais difíceis no caso de peças roli as e de se o não quadrada, segundo Peele e Church (1941, p. 10-215 a 10-219). Sobre os chapéus ou sobre as travessas, dependendo do tipo de encaixe, são montados pranchões,

que transferiam o material para as passagens e destas para o silo da câmara de britagem, quando finalmente o minério era içado por esquipas. Depois o método de lavra foi alterado para o *vertical retreat mining* (VRM), variante do alargamento em subníveis. A mina de fluorita em Morro da Fumaça (SC) utilizava passagens de minério verticais de dois estágios, com grelha de malha quadrada; o minério era transportado por carregadeiras elétricas *bob-cat* até os chutes e, depois, carregado em vagonetas, e o enchimento era feito hidraulicamente; nas zonas de maior estabilidade, foi adotado o método de recalque (Neme, 2011). Durante grande parte do século passado, a lavra subterrânea de carvão de Germunde, na região do Douro, em Portugal, era feita por meio do acesso em flanco de encosta e da aplicação de um método de desmonte ascendente de corte e aterro. De 1900 até 1966, a superfície foi muito pouco afetada, exceção feita a algumas regiões localizadas interceptadas diretamente pelos trabalhos. A partir de 1966 e até o fechamento da mina, em 1996, o método de desmonte com enchimento foi substituído pelo método de lavra por abatimento dos tetos (Curi, 1995).

7.4 TÓPICO ESPECIAL: ESTABILIZAÇÃO DE ESCAVAÇÕES SUBTERRÂNEAS

7.4.1 CAUSAS DA INSTABILIDADE DAS ROCHAS

A instabilidade e o eventual desabamento de rochas em escavações subterrâneas dependem de vários fatores, incluindo as propriedades geomecânicas do maciço, a forma e o tamanho das aberturas, a profundidade e o método construtivo. Bieniawski (1989; 1992) adverte que a fratura e o conseqüente desabamento de rochas em escavações subterrâneas são causados principalmente por:

- * sobrecarga da rocha intacta sobrejacente;
- * movimentos relativos de blocos de rocha causados por ação da gravidade, pressão da água ou tensões *in situ*.

Hudson e Harrison (1997) correlacionam os fatores que condicionam a instabilidade dos maciços rochosos por meio de uma matriz de interação em que se pondera: a estrutura do maciço rochoso, as tensões existentes, a interação entre maciço e suporte, a forma das aberturas, a influência da percolação da água, as falhas e alterações, a profundidade da escavação e o método construtivo (Fig. 7.9). Na diagonal dessa matriz estão destacados os fatores principais que originam a instabilidade, ou seja:

Tab. 7.3 CATEGORIAS DO MACIÇO ROCHOSO SEGUNDO O ÍNDICE RMR

RMR	Categoria	Qualidade da rocha
81-100	I	Muito boa
61-80	II	Boa
41-60	III	Média
20-40	IV	Má
<20	V	Muito má

Fonte: Bieniawski (1989).

Tab. 7.4 PONDERAÇÃO DE PARÂMETROS PARA O ÍNDICE Q

Descrição	Valor	Descrição	Valor
1. Rock quality designation (RQD)		4. Índice de diáclases (J_n)	
A. Qualidade muito má	0-25	A. Maciça, sem diáclases ou com poucas fissuras	0,5-1,0
B. Qualidade má	25-50	B. Uma família de diáclases	2
C. Qualidade média	50-75	C. Uma família e algumas diáclases aleatórias	3
D. Qualidade boa	75-90	D. Duas famílias de diáclases	4
E. Qualidade excelente	90-100	E. Duas famílias e algumas diáclases aleatórias	6
		F. Três famílias de diáclases	9
		G. Três famílias e algumas diáclases aleatórias	12
		H. Quatro famílias de diáclases ou mais	15
		I. Rocha triturada e terrosa	20
2. Índice da rugosidade de diáclases (J_r)		5. Fator de redução por água (J_w)	
a) Contato nas duas faces da descontinuidade		A. Escavações secas ou pequenas afluências inferiores a 5 L/min de forma localizada	1,0
b) Contato nas duas faces da descontinuidade com deslocamento <10 cm		B. Afluência ou pressão média, com lavagem ocasional do enchimento de diáclases	0,66
A. Diáclases descontínuas	4	C. Afluência importante ou alta pressão, em rocha competente com descontinuidades sem enchimento	0,5
B. Diáclases onduladas, rugosas e irregulares	3	D. Afluência importante ou alta pressão, com lavagem considerável do enchimento das diáclases	0,33
C. Diáclases onduladas lisas	2	E. Afluência excepcionalmente alta, escoamento ou pressão elevada no momento de explosões e diminuição com o tempo	0,2-0,1
		F. Fluxo grande que não diminui	0,1-0,05

embora, para grandes escavações com alturas significativas dos hasteais, seja normal utilizar até 10 cm de espessura, ainda que Q tenha valores altos e próximos de 30.

As classes de suporte 5, 6 e 7 consistem na aplicação de concreto projetado com espessuras que variam de 7 cm a 15 cm, combinado com o uso sistemático de tirantes. Nesses casos, os espaçamentos dos tirantes são os indicados na diagonal superior do ábaco. Nessas classes de suporte, pode-se também aplicar o sistema de arcos metálicos RRS. Os arcos armados reforçados com concreto projetado RRS (classe de suporte 8) serão necessários quando a espessura normal de $S(fr)$ for insuficiente para suportar as cargas, ou quando a superfície da abertura for irregular. O reforço com RRS pode ser mais adequado, uma vez que a espessura e o espaçamento dos arcos podem variar segundo as conveniências de cada caso. Em rocha excepcionalmente ruim e em escavações amplas, pré-injeções e operações de drenagem deverão ser executadas sistematicamente. Nesses casos, usa-se o sistema de suporte RRS com revestimento de concreto em seção completa CCA, reforçando-o com placas de aço. A espessura do revestimento tipo CCA pode variar de 30 cm a 1,0 m (Torres; Gama, 2012).

7.4.4 DIMENSIONAMENTO DO SUPORTE PARA ESCAVAÇÕES SUBTERRÂNEAS

Existem muitos métodos para o dimensionamento dos diversos tipos de suporte para escavações subterrâneas, e a seguir se apresentam os mais comuns.

Suporte com tirantes

O sistema de suporte com tirantes consiste em ancorar no interior do maciço uma barra (ou prego) de material bem resistente, que confira um aumento substancial da resistência à tração, confinando o maciço e realçando suas características resistentes (Fig. 7.11).

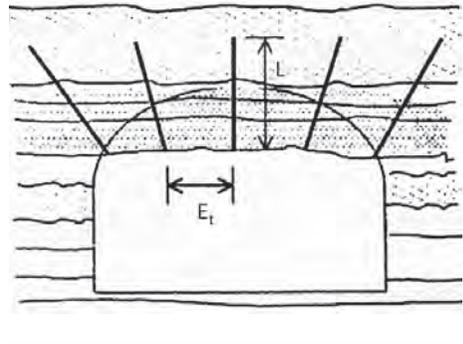


FIG. 7.11 Esquema típico de suporte com tirantes, em que L = comprimento do tirante e E_t = espaçamento entre tirantes

Com base no sistema RMR, pode-se selecionar um sistema de cavilamento utilizando a Tab. 7.6, em que

ALARGAMENTOS ABATIDOS

São métodos de lavra subterrânea que demandam, para a sua aplicação, que o corpo de minério tenha continuidade e homogeneidade e que a capa seja sempre suficientemente instável para desabar, preenchendo o espaço do minério que foi lavrado. Segundo Silveira e Amigo (1985), pelo abatimento do teto, a uma distância controlada da frente de lavra, dissipa-se, com a realização de trabalho, parte da energia armazenada no maciço rochoso, resultando num alívio das tensões instaladas nas vizinhanças da escavação e no consequente aumento da segurança. Além disso, a rocha desabada empola (aumenta de volume), inibindo a progressão do abatimento, a partir do momento em que os blocos de rocha passam a exercer reações apreciáveis sobre o teto, favorecendo a sustentação. São, em geral, métodos de alta produtividade, em face da simplicidade das operações unitárias conjugadas a serem empregadas. Normalmente, são utilizados em minérios de menor valor unitário, pois a diluição costuma ser alta. A recuperação é comumente diminuída pelo abandono de parte do minério onde a diluição é muito grande. Entre os métodos mais utilizados, destacam-se:

- * lavra por frentes amplas;
- * abatimento em subníveis;
- * abatimento de blocos.

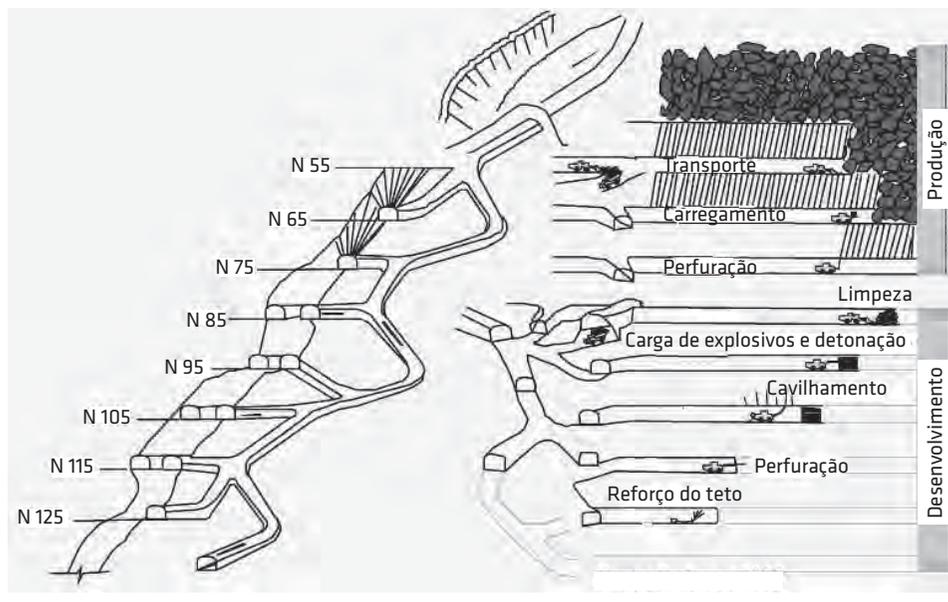


FIG. 8.4 Esboço da lavra por subníveis N na mina de cromita de Ipueira, em Andorinha (BA)
 Fonte: Ferbasa (2007).

A denominação do método de abatimento em subníveis provém dessa sua característica, ou seja, a divisão dos níveis da mina em subníveis, os quais é permitido abater. Para assegurar o abatimento controlado do teto e das rochas encaixantes, bem como para suavizar o fluxo de minério desmontado através das galerias e travessas de coleta, um estudo geotécnico deve ser executado para dimensionar o tamanho das diversas aberturas. Alguns dos parâmetros mais importantes a determinar para a execução desse dimensionamento são o intervalo entre os subníveis, as dimensões das galerias e travessas, o espaçamento entre as travessas, a inclinação dos furos e a quantidade de material estéril entre os furos, como indicado na Fig. 8.5.

8.2.1 APLICABILIDADE

O método de abatimento em subníveis é particularmente adaptável a grandes depósitos minerais maciços, extensos em profundidade e com mergulho acentuado, de preferência (ou, excepcionalmente, tabular, mas de boa espessura). É caracterizado pela detonação dos furos entre dois subníveis seja transversalmente, seja longitudinalmente, pela retirada do minério e pelo preenchimento do espaço vazio criado com rocha estéril obtida do abatimento controlado do teto e das rochas encaixantes sobrejacentes à abertura. Desse modo, a exis-

5.1), sendo tal custo comparável àqueles dos métodos de lavra a céu aberto. Possui alta taxa de produção e é considerado um dos métodos mais apropriados para a produção em grande escala, chegando a atingir produtividades da ordem de 50 t/homem/turno e recuperações de mais de 90% se os pilares forem recuperados (Quadro 5.1). Esse método pode ser mecanizado e é considerado seguro, pois os trabalhadores ficam pouco expostos a condições de risco, uma vez que trabalham sob teto protegido e em boas condições de ventilação.

O sistema de transporte é seu principal inconveniente ou “gargalo” e seu fator crítico de sucesso. O trabalho de desenvolvimento para a construção do relativamente complexo sistema de passagens de minério é, geralmente, lento, enfadonho e caro. A necessidade de um desenvolvimento abrangente e a demora para que se atinja a produção plena são outros de seus inconvenientes. Outras limitações são a alta possibilidade de diluição, que precisa ser constantemente controlada, o que impossibilita o uso do método para minérios mais valiosos, e a possibilidade de subsidência em áreas extensas, causando danos ambientais na superfície. Há também certa dificuldade relacionada ao controle do abatimento e do processo de fragmentação. Em particular, é complicado lidar com os grandes blocos de rocha não completamente apoiados e os matacões em um maciço rochoso já muito fraturado e instável.

Assim, essas diversas limitações e inconvenientes acabam por inviabilizar a sua aplicação na maioria dos casos práticos. Isso tudo torna esse método muito pouco popular, sendo adotado apenas para a lavra de alguns minérios de ferro e minérios disseminados de baixo teor (como nos pórfiros de cobre ou molibdênio). Entretanto, como é um método de produção em grande escala, está sendo utilizado em algumas das maiores minas do mundo, como as minas kimberlíticas de diamante de Palabowra, na África do Sul, e El Teniente, no Chile, lavrando-se minérios com teores de 0,7% a 1,0% de cobre.

8.4 TÓPICO ESPECIAL: SUBSIDÊNCIA MINEIRA

O princípio fundamental dos métodos de lavra subterrânea por alargamentos abatidos pressupõe a ruptura controlada do maciço rochoso sobrejacente. Dissipa-se assim, com a realização desse trabalho de ruptura, parte da energia interna armazenada no maciço, do que resulta um certo alívio das tensões junto às frentes de lavra, favorecendo a segurança das operações. Além disso, o material estéril (encaixantes) desabado gradualmente preenche os vazios cria-

capeamento for inferior a 100 pés sob a estrutura a proteger, e pilares não poderão ser extraídos no espaço entre duas áreas de proteção adjacentes se a distância entre elas for menor que a profundidade do capeamento. Na Fig. 8.11 é mostrado um esquema representando a referida norma para o caso de uma residência localizada em um terreno nivelado.

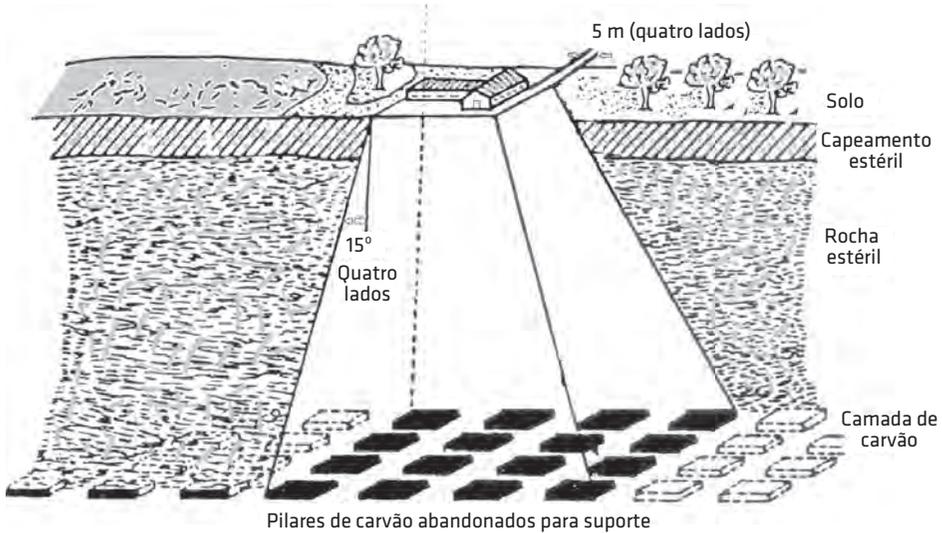


FIG. 8.11 Prática mineira para a proteção das estruturas superficiais segundo a lei estadual da Pensilvânia (EUA)

Fonte: modificado de Gray e Meyer (1970 apud Peng, 1978).

EXERCÍCIOS RESOLVIDOS

1. Usando a curva de evolução da subsidência apresentada na Fig. 8.10, calcular a subsidência máxima prevista à superfície considerando uma camada de 1,8 m de carvão à profundidade de 150 m a ser lavrada pelo método de paredes longas. A largura da face de lavra é de 120 m e pilares serão deixados entre elas.

Solução

A relação largura/profundidade (L/P) é de $120/150 = 0,8$. Utilizando a curva exibida na Fig. 8.10, a relação D/E que corresponde ao valor mencionado é 0,75.

Como a altura ou a espessura da camada de carvão é de 1,8 m, então a subsidência máxima prevista será de $1,8 \text{ m} \times 0,75 = 1,35 \text{ m}$.

nove

SELEÇÃO DO MÉTODO DE LAVRA E NOVAS TECNOLOGIAS

9.1 SELEÇÃO DO MÉTODO DE LAVRA

A lavra de minas deve ser executada por meio de um conjunto de operações e serviços inter-relacionados, com a filosofia de extrair o minério do modo mais eficiente, seguro, ambientalmente sustentável e rentável segundo o método de lavra selecionado.

Após a aprovação do projeto de lavra de minas e sua implantação, inicia-se a lavra propriamente dita, que é conduzida pelo método selecionado com a intervenção de quatro sistemas inter-relacionados:

- * sistema de escavação e manuseio dos materiais;
- * sistema de controle de estabilidade das escavações;
- * sistema de apoio às operações;
- * sistema administrativo geral.

Em princípio, existem as seguintes possibilidades de lavra:

- * a céu aberto;
- * a céu aberto, seguindo-se um estágio de transição à lavra subterrânea;
- * subterrânea;
- * simultânea, por combinações de métodos de lavra a céu aberto e subterrânea.

A soma geral de todas as características consideradas para cada método, como exemplificado na Tab. 9.2, leva a uma totalização, e a comparação entre as diversas totalizações identifica os métodos mais bem posicionados, que são os que devem ser selecionados *a priori*. Os valores numéricos podem ser ajustados para que sejam obtidas respostas conclusivas, inclusive com a adição de outras características de interesse, como as características geomecânicas do maciço rochoso das encaixantes e do minério. Os métodos pré-selecionados são então comparados por meio de critérios operacionais (como discriminado nos Quadros 2.1 e/ou 5.1), geomecânicos e ambientais para que a escolha definitiva possa ser tomada.

Tab. 9.1 CATEGORIAS DE PONTUAÇÃO PARA CADA CARACTERÍSTICA DAS JAZIDAS

Preferível	3-4
Provável	1-2
Improvável	0
Inadequado	-49

Fonte: Nicholas (1981 apud Hartman; Mutmansky, 2002).

Tab. 9.2 PONTUAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DAS JAZIDAS PARA A SELEÇÃO DOS MÉTODOS DE LAVRA

Característica da jazida	Forma ^(a)			Espessura ^(b)				Mergulho ^(c)			Mineralização ^(d)		
	M	T	I	e	I	E	E ⁺	B	M	A	U	P	E
Lavra por bancadas	3	2	3	2	3	4	4	3	3	4	3	3	3
Lavra por tiras	0	4	-49	4	2	0	0	3	0	-49	3	0	0
Abatimento de blocos	4	2	0	-49	0	2	4	3	2	4	4	2	0
Alargamentos em subníveis	2	2	1	1	2	4	3	2	1	4	3	3	1
Abatimento por subníveis	3	4	1	-49	0	4	4	1	1	4	4	2	0
Frentes amplas	-49	4	-49	4	0	-49	-49	4	0	-49	4	2	0
Câmaras e pilares	0	4	2	4	2	-49	-49	4	1	0	3	3	3
Recalque	2	2	1	1	2	4	3	2	1	4	3	2	1
Corte e enchimento	0	4	2	4	4	0	0	0	3	4	3	3	3
Estruturas retangulares	0	2	4	4	4	1	1	2	3	3	3	3	3

^(a) M = maciço; T = tabular; I = irregular.

^(b) e = estreito; I = intermediário; E = espesso; E⁺ = muito espesso.

^(c) B = baixo; M = médio; A = alto.

^(d) U = uniforme; P = progressiva; E = errática.

Fonte: adaptado de Nicholas (1981 apud Hartman; Mutmansky, 2002).

9.2 NOVAS TECNOLOGIAS

Apesar de todo o desenvolvimento tecnológico verificado no século passado, principalmente após o período pós-Segunda Guerra Mundial, a essência tecnológica da lavra de rochas duras não se alterou substancialmente. Nas minas de hoje, tanto a céu aberto quanto subterrâneas, perfuração e detonação ainda são usadas com frequência para fragmentar rochas duras, e carregadoras e caminhões ainda são empregados rotineiramente para, respectivamente, carregar e transportar minério e estéril. A fase de exploração continua centrada nos testemunhos de sondagem. Pode-se afirmar que um mineiro do início do século passado não teria a menor dificuldade em reconhecer uma operação mineira atual.

Mas, evidentemente, houve evolução nas operações unitárias de lavra. Equipamentos de maior porte, mais robustos e mais produtivos são desenvolvidos a cada dia. Novas tecnologias para o desenvolvimento de aberturas na lavra subterrânea têm sido criadas, e modelos computadorizados dos corpos minerais e planejamento de minas (incluindo até o uso de realidade virtual e simulação de operações em certos casos) vão sendo gradativamente testados em minas de todos os tipos. Obviamente, as operações essenciais do ciclo de lavra, tais como o desmonte, o carregamento e o transporte, continuarão a existir, mas o uso de perfuratrizes, escavadoras, carregadoras e caminhões provavelmente será mais restrito, com a tendência de substituição desses equipamentos convencionais por sistemas de lavra contínuos, mais inteligentes, automatizados e até, eventualmente, robotizados. A maioria das operações mineiras já são mecanizadas hoje em dia, mas quase totalmente não automatizadas. A habilidade dos engenheiros de minas em planejar operações mineiras ainda está muito limitada em virtude dos, em geral, relativamente poucos conhecimentos sobre o corpo mineralizado. Os métodos atuais de desmontes rochosos impõem restrições na rentabilidade e na segurança.

Em síntese, percebe-se que novas abordagens e tecnologias estão florescendo na área de lavra de minas, e tudo isso deverá atingir seu auge na próxima década. Prevê-se que as minas terão então equipamentos mecanizados capazes, inclusive, de minerar seletivamente corpos minerais em certos casos. Práticas geofísicas convenientemente incorporadas às operações rotineiras de perfuração e desmonte das rochas irão alimentar com dados, de modo contínuo, modelos computacionais, que facilitarão sobremaneira a delimitação precisa do

EXERCÍCIOS PROPOSTOS DE MÚLTIPLA ESCOLHA

1. A lavra engloba as de operações unitárias, exceto:
 - a] perfuração;
 - b] desmonte;
 - c] carregamento e transporte;
 - d] britagem.

2. Não se pode considerar como parte integrante da mina:
 - a] todas as áreas em processo de exploração mineral;
 - b] escritórios, oficinas, refeitórios e máquinas;
 - c] poços de extração, pilhas de estéril e barramentos de rejeito;
 - d] áreas de servidão e insumos em geral.

3. Qual dos métodos a seguir não é de lavra a céu aberto?
 - a] por bancadas;
 - b] por corte e aterro;
 - c] por tiras;
 - d] por poços de extração;
 - e] por monitores hidráulicos.

4. Não corresponde a uma tradução aceitável da expressão *run of mine* (ROM):
 - a] resultado das operações mineiras (ROM) na lavra;
 - b] resultado da aplicação do ciclo das operações mineiras;
 - c] minério beneficiado;
 - d] minério “tal-qual”;
 - e] minério bruto.

5. O que mais distingue a lavra por tiras em relação aos demais métodos de lavra a céu aberto a seco é:
 - a] a operação conjugada de escavação e transporte;
 - b] sua alta produtividade;
 - c] o desmonte mecânico sem o uso de explosivos;
 - d] o uso dos maiores equipamentos de lavra de toda a mineração.

6. Qual das condições a seguir mais dificulta a aplicabilidade da lavra hidráulica?
 - a] depósito tabular;
 - b] presença de muitos matacões;

A importância da mineração para o País salta à vista quando 'minérios de ferro e seus concentrados', exclusivamente, ocupam a 2ª posição na lista dos produtos mais exportados (2016). Planejar a extração do minério é fator determinante para uma operação técnica e economicamente otimizada.

Lavra de minas vem suprir uma lacuna em livros em português sobre o tema, ao apresentar de maneira didática os fundamentos das lavras de minas a céu aberto e subterrânea. A obra apresenta conceitos básicos, detalhes técnicos sobre os métodos de lavra – incluindo extração a seco, via úmida, autossuportados, com suporte artificial e por abatimento –, e a aplicação de novas tecnologias nas operações de lavra.

Uma obra repleta de ilustrações, exemplos e exercícios propostos, fecha com chave de ouro, no Cap. 9, com uma metodologia para a seleção do método de lavra mais adequado para uma dada jazida. É um livro-texto fundamental para estudantes de Engenharia de Minas, Geologia e Engenharia Geológica, e obra de referência para Engenharia Civil, particularmente Engenharia Geotécnica, e avaliações de Engenharia Ambiental.

Assim sendo, quanto à obra que ora se apresenta, posso atestar que será muito útil a todos aqueles interessados na arte de minerar, pois ressalta os elementos essenciais da lavra de minas tanto a céu aberto quanto subterrânea. O livro do Prof. Adilson aborda as metodologias de lavra e os critérios de seleção, a análise do ciclo de operações unitárias, a estabilidade de maciços rochosos, e ainda inclui a resolução de exercícios práticos, constituindo uma brilhante contribuição para os técnicos, engenheiros e estudantes do fascinante campo da Lavra de Minas.

Prof. Dr. Vidal Navarro Torres
Pesquisador Titular do ITV-Vale

Patrocínio:



Fundação
GORCEIX

ISBN 978-85-7975-250-6



9 788579 752506

