

RICARDO DEGUTI DE BARROS SILVA

**A IMPORTÂNCIA DOS CONDICIONANTES
GEOLÓGICO-GEOTÉCNICOS NA
RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS POR
LAVRA DE MINAS A CÉU ABERTO**

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

São Paulo

2000

RICARDO DEGUTI DE BARROS SILVA

**A IMPORTÂNCIA DOS CONDICIONANTES
GEOLÓGICO-GEOTÉCNICOS NA
RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS POR
LAVRA DE MINAS A CÉU ABERTO**

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

**Área de Concentração:
Engenharia Mineral**

**Orientador:
Prof. Dr. Fernando Fujimura**

São Paulo

2000

Silva, Ricardo Deguti de Barros

A importância dos condicionantes geológico-geotécnicos na recuperação de áreas degradadas por lavra de minas a céu aberto. São Paulo, 2000.

194 p.

Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Minas.

1. Recuperação de áreas (Mineração). 2. Mineração a céu aberto. 3. Geotecnia. I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Minas II. t

AGRADECIMENTOS

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo.

Às empresas de mineração que permitiram a realização das visitas técnicas, e em especial ao eng. Carlos M. Nieble, geol. Armando Reis e ao eng. Leonel Imenes.

À Maria Cristina Bonésio, da Biblioteca do Departamento de Engenharia de Minas.

Aos colegas Eduardo César Sansone, Leôncio Carnero, Luís Carlos Rusilo, Nílson Mar Bartalini e Wilson Shiguemasa Iramina pelo incentivo ao desenvolvimento dos estudos em Pós-Graduação.

Expresso meus mais sinceros agradecimentos ao Prof. Dr. Fernando Fujimura, pela acolhida e compreensão.

A Roseli, Massa e Roberto

**A IMPORTÂNCIA DOS CONDICIONANTES GEOLÓGICO-
GEOTÉCNICOS NA RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS POR
LAVRA DE MINAS A CÉU ABERTO**

ÍNDICE GERAL

ÍNDICE DE FIGURAS

ÍNDICE DE TABELAS

RESUMO

"ABSTRACT"

1.	INTRODUÇÃO.....	1
1.1.	Considerações iniciais.....	1
1.2.	Objetivos.....	3
2.	RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS POR LAVRA DE MINAS A CÉU ABERTO.....	5
2.1.	Introdução.....	5
2.2.	Legislação brasileira.....	10
2.3.	Características do empreendimento mineiro.....	14
2.3.1.	Operações de lavra.....	16
2.3.2.	Operações de beneficiamento.....	17
2.3.3.	Localização.....	19
2.3.4.	Vida útil da mina.....	19
2.4.	Degradação de áreas.....	20
2.4.1.	Conceito de degradação.....	21
2.5.	Áreas degradadas na mineração a céu aberto.....	22
2.5.1.	Áreas lavradas.....	23
2.5.2.	Áreas de deposição de estéril.....	25
2.5.3.	Áreas de deposição de rejeitos.....	26
2.6.	Justificativas da recuperação.....	27
2.7.	Conceito de recuperação.....	28
2.8.	Uso futuro da área.....	30
2.9.	Planejamento da recuperação.....	34
2.9.1.	Considerações sobre a recuperação do solo.....	38
2.9.2.	Considerações sobre a revegetação.....	46

3.	PRINCIPAIS CONDICIONANTES GEOLÓGICO-GEOTÉCNICOS INTERVENIENTES.....	49
3.1.	Introdução.....	49
3.2.	Processos de instabilização	50
3.3.	Investigações geológico-geotécnicas.....	55
3.4.	Parâmetros geológico-geotécnicos	57
3.5.	Métodos de análise da estabilidade.....	61
3.5.1.	Taludes em solos ou materiais pouco consolidados	63
3.5.2.	Taludes em rocha.....	73
3.6.	Medidas de estabilização e proteção	79
3.7.	Monitoramento a longo prazo.....	85
3.8.	Características da estabilidade das áreas lavradas.....	86
3.9.	Características da estabilidade das áreas de deposição de estéril.....	88
3.9.1.	Características geotécnicas do estéril.....	90
3.9.2.	Características construtivas das pilhas de estéril.....	90
3.10.	Características da estabilidade das áreas de deposição de rejeitos.....	92
3.10.1.	Características geotécnicas do rejeito	96
3.10.2.	Características construtivas das barragens de rejeito	97
4.	CONFORMAÇÃO TOPOGRÁFICA	100
4.1	Introdução.....	100
4.2.	Compatibilidade com os condicionantes geológico-geotécnicos e controle da erosão	101
4.3.	Compatibilidade com o uso futuro.....	104
4.4.	Aspectos paisagísticos	106
4.5.	Conformação das áreas lavradas.....	110
4.5.1.	Áreas de deposição de estéril	127
4.5.2.	Áreas de deposição de rejeitos	137

5.	CONDICIONANTES GEOLÓGICO-GEOTÉCNICOS APLICADOS A MEDIDAS DE RECUPERAÇÃO - ANÁLISE DOS CASOS	138
5.1.	Exemplo 1 - Mineração de areia industrial.....	138
5.1.1.	Introdução.....	138
5.1.2.	Descrição geral.....	138
5.1.3.	Estudos geológico-geotécnicos para recuperação das áreas.....	142
5.1.4.	Medidas de recuperação das áreas.....	145
5.2.	Exemplo 2 - Mineração de minério de ferro.....	148
5.2.1.	Introdução.....	148
5.2.2.	Descrição geral.....	149
5.2.3.	Estudos geológico-geotécnicos para recuperação das áreas.....	153
5.2.3.1.	Áreas lavradas.....	153
5.2.3.2.	Áreas de deposição de estéril.....	157
5.2.4.	Medidas de recuperação das áreas.....	159
5.2.4.1.	Áreas lavradas.....	159
5.2.4.2.	Áreas de deposição de estéril.....	167
5.2.4.3.	Áreas de deposição de rejeito.....	173
5.3.	Exemplo 3 - Mineração de brita para construção civil.....	173
5.3.1.	Introdução.....	173
5.3.2.	Descrição geral.....	174
5.3.3.	Estudos geológico-geotécnicos para recuperação das áreas.....	174
5.3.4.	Medidas de recuperação das áreas.....	177
6.	CONCLUSÕES FINAIS	182
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	185

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1.	- Lixão na margem do lago resultante de antigas extrações de areia em Carapicuíba, SP	8
Figura 2.2.	- Cava ilustrando o minério e o estéril	15
Figura 2.3.	- Esquema das operações unitárias na mineração	16
Figura 2.4.	- Cava da MBR - Águas Claras	24
Figura 2.5.	- Pilha de estéril- Ferteco	25
Figura 2.6.	- Barragem de rejeito- Ferteco	27
Figura 3.1.	- Relação entre τ e σ	59
Figura 3.2.	- Método de Cullman	63
Figura 3.3.	- Talude infinito.....	64
Figura 3.4.	- Métodos que subdividem a massa em lamelas - caso geral.....	64
Figura 3.5.	- Diagrama de forças na lamela - Método de Fellenius.....	65
Figura 3.6.	- Esquema geral do método de Janbu.....	66
Figura 3.7.	- Adimensionais X e Y do método de Hoek - ruptura circular	67
Figura 3.8.	- Ábaco do Fator de Segurança do método de Hoek - ruptura circular.....	68
Figura 3.9.	- Condições de drenagem para os ábacos de Hoek e Bray.....	69
Figura 3.10.	- Ábaco de Hoek e Bray para ruptura circular - A.....	70
Figura 3.11.	- Ábaco de Hoek e Bray para ruptura circular - B.....	71
Figura 3.12.	- Ábaco de Hoek e Bray para ruptura circular - C	71
Figura 3.13.	- Ábaco de Hoek e Bray para ruptura circular - D	72
Figura 3.14.	- Ábaco de Hoek e Bray para ruptura circular - E.....	72
Figura 3.15.	- Projeção estereográfica da ruptura em cunha	74
Figura 3.16.	- Adimensionais X e Y do método de Hoek - ruptura plana.....	75
Figura 3.17.	- Ábaco do Fator de Segurança do método de Hoek - ruptura plana.....	76
Figura 3.18.	- Taludes com fenda de tração - método de Hoek e Bray.....	77
Figura 3.19.	- Talude sem fenda de tração - método de Hoek e Bray.....	78
Figura 3.20.	- Componentes de um sistema de drenagem superficial	81
Figura 3.21.	- Construção de escada d'água em bancada de cava definitiva.....	82
Figura 3.22.	- Drenos instalados em talude suscetível a percolação de águas subterrâneas.....	84
Figura 3.23.	- Tipos principais de rupturas em minas a céu aberto	86
Figura 3.24.	- Feições típicas das pilhas de estéril erodidas	88
Figura 3.25.	- Detalhe da inclinação da berma e da instalação da canaleta de drenagem	91
Figura 4.1.	- Localização dos pontos de monitoramento fotográfico do local a ser minerado.....	107
Figura 4.2.	- Elementos visuais da paisagem natural.....	107

Figura 4.3.	- Elementos visuais da mineração e sua infra-estrutura	108
Figura 4.4.	- Focalização não desejável, pelo alinhamento da estrada, arborização e pelas encostas do vale do local minerado	109
Figura 4.5.	- Modificação do perfil topográfico do horizonte	109
Figura 4.6.	- Utilização do relevo do terreno e da vegetação para abrigar a mina.....	110
Figura 4.7.	- Água acumulada na cava da antiga pedreira Dib, em São Paulo, SP	111
Figura 4.8.	- Planta planialtimétrica da área anterior à lavra.....	114
Figura 4.9.	- Modelo da área anterior à lavra	114
Figura 4.10.	- Planta planialtimétrica da área lavrada.....	115
Figura 4.11.	- Modelo da área lavrada	115
Figura 4.12.	- Planta planialtimétrica da cava inundada.....	116
Figura 4.13.	- Modelo da cava inundada	116
Figura 4.14.	- Aspecto da área anterior à lavra.....	117
Figura 4.15.	- Aspecto da área lavrada.....	118
Figura 4.16.	- Aspecto da cava inundada.....	119
Figura 4.17.	- Planta planialtimétrica da área anterior á lavra.....	121
Figura 4.18.	- Modelo da área anterior à lavra	121
Figura 4.19.	- Planta planialtimétrica da área lavrada.....	122
Figura 4.20.	- Modelo da área lavrada	122
Figura 4.21.	- Planta planialtimétrica da área após aterro parcial.....	123
Figura 4.22.	- Modelo da área após aterro parcial.....	123
Figura 4.23.	- Aspecto da área anterior à lavra	124
Figura 4.24.	- Aspecto da área lavrada.....	125
Figura 4.25.	- Aspecto da área após aterro parcial.....	126
Figura 4.26.	- Planta planialtimétrica da área anterior á pilha.....	131
Figura 4.27.	- Modelo da área anterior à pilha.....	131
Figura 4.28.	- Planta planialtimétrica de pilha de estéril típica	132
Figura 4.29.	- Modelo de pilha de estéril típica.....	132
Figura 4.30.	- Planta planialtimétrica de pilha de estéril otimizada	133
Figura 4.31.	- Modelo de pilha de estéril otimizada.....	133
Figura 4.32.	- Aspecto da área anterior à pilha.....	134
Figura 4.33.	- Aspecto da pilha de estéril típica	135
Figura 4.34.	- Aspecto da pilha de estéril otimizada	136
Figura 5.1.	- Aspecto geral da Mineração Descalvado.....	139
Figura 5.2.	- Lavra do arenito por escavação direta.....	140
Figura 5.3.	- Vista da cava, com as três camadas de arenito em lavra	141
Figura 5.4.	- Aspecto dos taludes, evidenciando a baixa resistência das camadas	142
Figura 5.5.	- Talude da cava final	144
Figura 5.6.	- Barragem de rejeitos atual e ao fundo a área que está sendo recuperada por aterro.....	146
Figura 5.7.	- Execução de aterro e conformação topográfica da área da barragem desativada.....	147

Figura 5.8.	-	Deposição de estéril no interior da cava	148
Figura 5.9.	-	Aspecto da lavra da FERTECO - Mina de Córrego do Feijão	149
Figura 5.10.	-	Fluxograma do beneficiamento	150
Figura 5.11.	-	Aspecto atual dos taludes da cava	151
Figura 5.12.	-	Taludes da cava final	155
Figura 5.13.	-	Talude da pilha de estéril Menezes	158
Figura 5.14.	-	Setor da cava onde extravasará o futuro lago	160
Figura 5.15.	-	Nível presumido do futuro lago	161
Figura 5.16.	-	Bancadas recuperadas da cava final	162
Figura 5.17.	-	Vista do talude final da cava, com bancadas definitivas	163
Figura 5.18.	-	Retaludamento de bancada para a configuração de cava final	164
Figura 5.19.	-	Execução de reparos localizados	165
Figura 5.20.	-	Aspecto dos taludes definitivos, à distância	166
Figura 5.21.	-	Vista dos taludes finais	167
Figura 5.22.	-	Basculamento de caminhões formando a pilha de estéril	168
Figura 5.23.	-	Construção das pilhas de estéril de forma ascendente	169
Figura 5.24.	-	Pilha de estéril em execução, com contornos curvos	171
Figura 5.25.	-	Pilha de estéril após encerramento	171
Figura 5.26.	-	Aspecto de pilha de estéril após cerca de 5 anos de encerramento	172
Figura 5.27.	-	Vista inferior da mesma pilha, com canaleta de drenagem em primeiro plano	173
Figura 5.28.	-	Talude da cava final	176
Figura 5.29.	-	Vista geral da cava - Pedreira Chapadão	177
Figura 5.30.	-	Área urbana em torno da antiga pedreira	178
Figura 5.31.	-	Bancada em rocha, com altura superior a 20 m	179
Figura 5.32.	-	Canaleta de drenagem entre setores da cava	180
Figura 5.33.	-	Detalhe de estabelecimento de vegetação na bancada	181

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1. - Tipos de instabilizações de taludes nas áreas degradadas na mineração à céu aberto.....	51
Tabela 3.2. - Agentes da instabilização de taludes.....	54
Tabela 4.1. - Cálculo de volumes e áreas da pilha típica	129
Tabela 4.2. - Cálculo de volumes e áreas da pilha otimizada	130
Tabela 5.1. - Parâmetros geotécnicos dos minérios da Min. Descalvado.....	143
Tabela 5.2. - Fatores de segurança das bancadas da Min. Descalvado.....	144
Tabela 5.3. - Classificação dos maciços - Ferteco Córrego do Feijão.....	153
Tabela 5.4. - Resultados de ensaios - Ferteco Córrego do Feijão.....	154
Tabela 5.5. - Parâmetros geotécnicos adotados - Ferteco Córrego do Feijão	155
Tabela 5.6. - Parâmetros geotécnicos - Menezes.....	157

RESUMO

O estudo dos condicionantes geológico-geotécnicos, inserido num contexto ambiental mais amplo, é de fundamental importância ao pleno êxito da recuperação de áreas degradadas em minerações a céu aberto, uma vez que eles proporcionam as condições de estabilidade e segurança compatíveis ao uso pretendido.

A recomposição topográfica de áreas degradadas em conformidade aos condicionantes geológico-geotécnicos também é de grande relevância em projetos de recuperação, devido ao potencial de transformação da paisagem, via de regra profundamente alterada nas minerações a céu aberto. Alternativas de reconstituição topográfica da área devem ser avaliadas, de modo a conciliar o uso pretendido do terreno com as características específicas do local e sua viabilidade social e econômica, procurando-se obter uma paisagem e uma função integrada ao meio em que está inserido. A aplicação de modelagem computacional mostra-se especialmente interessante na definição de alternativas de conformação topográfica das áreas a serem recuperadas.

A aplicação de conceitos geológico-geotécnicos na recuperação de áreas na mineração a céu aberto não deve se dar somente com o fim dos trabalhos de lavra. Pelo contrário, sua aplicação às minerações em atividade proporciona benefícios não só ambientais, mas em termos de segurança e de racionalização das operações de lavra, além da diluição dos custos de recuperação ao longo da vida útil da mina.

ABSTRACT

Reclamation of surface mined areas is a crucial environmental challenge to the mining industry worldwide.

Although reclamation of mined areas usually emphasizes revegetation or wildlife aspects, geotechnical aspect must be reminded as one of the most important reclamation procedures related to surface mined areas.

One of the goals of reclamation is to ensure that the site is left in a condition that allows future use, which means achieving stability of the degraded mined areas. Open pits, waste piles and tailings dams must have compatible safety conditions for the planned future use. Site stability will also provide favourable conditions to the following phases of reclamation.

Final topographical configuration is highly relevant in a reclamation plan. However mined areas are dramatically modified by mining activities, this can be a rare opportunity of getting interesting landscapes. Surface modelling technics by computer can be a valuable tool applied to the conformation of reclaimed areas.

Reclamation concepts must be applied not only after mine life ends, but during its operation, due to the benefits to environment and increase of safety in the open pit operations.

I. INTRODUÇÃO

I.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A questão ambiental vem se tornando cada vez mais crucial na indústria de mineração, tanto nos novos empreendimentos quanto nas minas em operação. Dentro do contexto ambiental, um dos principais aspectos é o que envolve a recuperação das áreas degradadas pela atividade, tais como as cavas resultantes da lavra do minério, as pilhas de estéril e barragens de rejeito resultante do processo de beneficiamento, entre outras áreas industriais relacionadas ao empreendimento mineiro.

A legislação no Brasil tem refletido a crescente preocupação ambiental da sociedade, tornando-se cada vez mais restritiva, o que tem levado a indústria de mineração a incluir definitivamente a recuperação das áreas degradadas no escopo de suas atividades.

A mineração, por sua própria natureza, é uma atividade localizada, restrita a uma área delimitada onde ocorre a jazida do bem mineral de interesse, sendo também restrita pelo tempo, expresso pela vida útil da mina, que pode variar de alguns anos a várias décadas, mas que está fadada a mais cedo ou mais tarde esgotar-se ou tornar-se antieconômica. Dessa forma, embora a lavra constitua-se no uso temporário de um espaço físico, devido à sua marcante interferência no meio ambiente local, não é dispensável a previsão futura, mesmo já nas fases iniciais de sua implantação, da situação dessas áreas e a proposição de alternativas de uso após a exaustão da mina.

A recuperação de áreas degradadas por minerações a céu aberto, sejam aquelas desativadas ou em operação, deve ser entendida como uma série de procedimentos

que visam não apenas preparar a área minerada para um uso futuro, mas também trazer benefícios técnicos e operacionais ao longo da vida útil da mina.

Dentre esses procedimentos estão a estabilização geotécnica e a conformação topográfica das áreas degradadas, os tópicos mais especificamente abordados no presente trabalho.

Quanto à estabilização geotécnica da área, para que seja possível um uso futuro é necessário que as diversas estruturas criadas na atividade de mineração tais como cavas, pilhas de estéril, barragens de rejeito, etc., adquiram níveis de estabilidade e segurança adequados. Aspectos como drenagem devem ser estudados e controlados, para que se evite situações de risco como processos erosivos e instabilizações, quando a área estiver ocupada com outras atividades. A estabilização também é fundamental para as minas em atividade, como por exemplo, a deposição controlada de estéreis e rejeito em local definitivo, que incrementa as condições operacionais e de segurança.

Com relação à conformação topográfica, a área deve ser configurada ao uso futuro e às necessidades paisagísticas, dentro de uma viabilidade técnica e econômica e de acordo com os condicionantes geológico-geotécnicos que garantam uma estabilização a contento da superfície minerada.

A recuperação de áreas degradadas não deve ser entendida apenas como uma atividade subsequente ao encerramento da produção extrativa de bens minerais. Ela deve ser realizada concomitantemente à lavra para colher benefícios já na fase de exploração mineira, evitando-se, por exemplo, novas movimentações de estéreis e rejeitos dispostos sem controle e planejamento, ou melhorando as condições gerais de operação e segurança, além de poder liberar áreas já lavradas para outras atividades econômicas, gerando receita. Adicionalmente, com o empreendimento mineiro efetuando obras de recuperação das áreas degradadas já ao longo de sua

vida útil, ao cessar suas atividades minimiza-se a necessidade de investimentos maciços nessas obras, reduzindo o risco da área ser deixada abandonada sem condições de uso, com elevado ônus para a sociedade como um todo, na forma de impacto visual negativo, instabilizações, assoreamento de cursos de água, geração de pó e outras formas de degradação, além de comprometer futuras atividades econômicas da área.

O custo associado à recuperação de áreas degradadas em minerações a céu aberto pode ser amplamente compensado se executado criteriosamente, e até mesmo reverter em lucros com a exploração de novas atividades nessas áreas, não só para a empresa mineradora como para a sociedade em geral.

1.2. OBJETIVOS

A recuperação de áreas degradadas pela mineração tem sido alvo de diversos estudos, dada a importância do tema e sua inclusão no contexto da preservação ambiental. A predominância de trabalhos a respeito tem sido mais voltada aos aspectos “biológicos” envolvidos, principalmente quanto à recomposição da vegetação das áreas degradadas, que indubitavelmente representam um importante aspecto da recuperação. No entanto, os trabalhos de recuperação do meio físico também desempenham papel primordial no contexto de recuperação, e não devem ser negligenciados. A presente dissertação tem como fundamento básico abordar os aspectos físicos da recuperação de áreas, que dão suporte aos demais aspectos envolvidos na recuperação.

Os objetivos da dissertação são, portanto, analisar os diversos critérios geológicos e geotécnicos envolvidos em projetos de recuperação de áreas degradadas, suas aplicações em casos práticos e discussão de alternativas de recomposição topográfica mediante simulação gráfica utilizando ferramenta computacional para

o modelamento de superfícies (Surfer 5.0), de forma a se projetar um ambiente mais adequado ao uso futuro pretendido da área.

A pesquisa visa também identificar procedimentos para uma maior integração entre os trabalhos de lavra e de recuperação, com ações conjugadas entre as diversas operações unitárias da mineração, incorporando os trabalhos de recuperação ao planejamento de lavra. Com isso poderão ser minimizadas as movimentações futuras de material dentro da mina, além de promover a melhoria das condições de segurança e operação, em especial quanto à cava, pilhas de estéril e barragens de rejeito.

2. RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS POR LAVRA DE MINAS A CÉU ABERTO

2.1. INTRODUÇÃO

No Brasil, a recuperação de áreas mineradas tem sido historicamente relegada a segundo plano. Isso se deve a diversos fatores econômicos, sociais, culturais e históricos que constituem o pano de fundo que também marcou as demais atividades econômicas desenvolvidos no Brasil à partir de sua colonização. Da mesma forma que métodos agrícolas rudimentares esgotavam as terras através da prática de desmatamentos e queimadas, a mineração de ouro e pedras preciosas deixava atrás de si um rastro de áreas devastadas. As grandes extensões territoriais ainda a desbravar e os imensos vazios populacionais tornavam desnecessário qualquer esforço de recuperação, e essas áreas eram simplesmente abandonadas. Se, por um lado, isso contribuiu para a ocupação territorial do país, também nos legou um conceito imediatista e predatório no aproveitamento dos recursos naturais, desprovido de preocupação com as implicações a longo prazo, com reflexo até os dias atuais.

Esse quadro histórico corrobora-se na prolongada lacuna de legislação ambiental específica, implantada somente há alguns anos atrás no Brasil. Até então o minerador não estava obrigado a realizar planos de recuperação. Mesmo após a entrada em vigor desses dispositivos legais, a insuficiência de mecanismos de fiscalização por parte do Estado, a situação muitas vezes informal do minerador, a localização remota ou o acesso restrito dessas áreas, tem inibido a sua recuperação.

Para SÁNCHEZ (1992) existem alguns casos de recuperação de áreas que obtiveram êxito, mas ainda há muito a ser feito. Os obstáculos residem mais na cultura conservadora e em dificuldades institucionais do que em aspectos técnicos.

Para o futuro, é provável que a indústria ao se instalar em determinada área seja responsabilizada não somente pelos danos produzidos, mas também pela recuperação de locais degradados anteriormente, definidos como passivo ambiental.

A situação ainda parecia crítica para que a recuperação no Brasil se tornasse um programa coerente e de custo efetivo, apesar do empenho, conforme relata BARTH (1989). Muitas empresas desejavam empreender programas de recuperação, mas faltava-lhes conhecimento básico para iniciá-los. Isso era especialmente crítico nas ciências biológicas relacionadas com as técnicas de revegetação, essenciais ao êxito das tentativas de reflorestamento. BARTH (1989) observava que em virtude do clima quente e alta taxa pluviométrica, a recuperação podia se dar rapidamente. Prescrevia já então que a recuperação deveria estar plenamente integrada ao processo de mineração.

Convém ressaltar que a ênfase na recuperação de áreas degradadas tem se dado muito mais sobre a mineração que em outras atividades. SÁNCHEZ (1992) nota que no Brasil a recuperação é mais focada na mineração que, por exemplo, na disposição de lixo doméstico e no desenvolvimento urbano e obras públicas, além das atividades agrícolas, mais difíceis de controlar por serem menos evidenciadas pela opinião pública.

MASCHIO ET AL. (1992) a esse respeito acentua que a legislação, embora voltada para a mineração, está desempenhando papel fundamental na evolução do conceito de recuperação de ambientes degradados. Enquanto as pesquisas sobre áreas degradadas no país priorizam as atividades de mineração, as obras civis e a agricultura movimentam, respectivamente, 6 vezes e 100 vezes mais volume de material que a mineração.

Essa ênfase também se repete nos Estados Unidos. DOLL (1988) questiona qual seria afinal, a área afetada pela mineração a céu aberto de carvão. Pelo seu

levantamento, nos Estados Unidos, entre 1930 e 1971 menos de 0,2% da área estava afetada pela mineração e atividades correlacionadas, com 0,1% para o carvão. A quantidade de terras afetadas pela construção de estradas, desenvolvimento urbano e deposição de lixo, além de outras explorações minerais excedia em grande parte a resultante da mineração a céu aberto. A opinião pública, no entanto, considera a atividade mineira como “vilã”, apesar de afetar menos de 1% das terras, provavelmente devido ao fato do distúrbio ser drasticamente visível, com uma aparência estética negativa. Contaminantes de águas superficiais e subterrâneas oriundas de atividades industriais podem poluir e degradar cursos de água e aquíferos vizinhos, afetando uma área ainda maior.

Segundo outro levantamento, KOVALICK (1991) apurou que a maior fonte de resíduos nos Estados Unidos é a indústria de transformação, com 52,2%, seguida pelos aterros de lixo urbano (23,2%), e em menor parcela pela mineração (3%).

De qualquer maneira, muito embora outros setores econômicos sofram menor pressão, a demanda da sociedade é para que os recursos naturais e de energia sejam preservados e que a superfície minerada seja recuperada.

Tendo em vista a situação atual observada das áreas degradadas no Brasil, pode-se classificar essas áreas em:

- *Áreas abandonadas*: São áreas que, após a paralisação definitiva das atividades de lavra, permanecem sem qualquer trabalho adicional de recuperação. Ocorrem geralmente em áreas urbanas de baixa renda ou em áreas afastadas dos grandes centros. São, por exemplo, antigas pedreiras ou portos de areia abandonados, garimpos, áreas de empréstimo para obras públicas como rodovias, barragens, etc. A recuperação dessas áreas, devido à ausência de planejamento só se dá naturalmente a longo prazo, podendo, conforme o caso, prolongar demasiadamente os impactos ambientais negativos ou apresentar potencial de risco futuro. Em

áreas urbanas, por exemplo, o impacto ambiental pode até mesmo evoluir para outras formas de degradação, como o uso desse tipo de área para lixões. É o que ocorre, por exemplo na área ilustrada na figura 2.1, onde um lago resultante da extração de areia em Carapicuíba, na periferia de São Paulo serve atualmente como ponto de despejo de lixo doméstico.



Figura 2.1. Lixão na margem do lago resultante de antigas extrações de areia em Carapicuíba, SP

- *Áreas desativadas temporariamente*: Minas paralisadas temporariamente por motivos legais, técnicos ou de mercado desfavoráveis. As áreas da mina propriamente dita permanecem abandonadas, mas o acesso ainda é mantido restrito pelas empresas detentoras dos direitos minerários ou por particulares. Não se faz a recuperação pela expectativa de retomada das atividades. Dependendo da duração da paralisação dos trabalhos, situações de risco ou impactos ambientais indesejados

estão sujeitos a ocorrer.

- *Áreas em recuperação ou recuperadas propriamente ditas:* Áreas em que já foram realizados ou estão em andamento trabalhos sistemáticos seguindo um projeto de recuperação pré-estabelecido. O número de casos tende a crescer, mas ainda é limitado. As áreas recuperadas podem adotar diversos usos como aproveitamento para atividades de lazer e recreação, industriais ou agropecuária.

No passado, a situação no exterior não foi muito diferente. Os países que passaram pela Revolução Industrial lograram sua acumulação de capital em grande parte às custas de degradação ambiental. Casos exemplares são a poluição do Rio Tâmis, que já em meados do século XIX era dado como um rio morto, e a degradação provocada pela mineração de carvão em vários países da Europa e nos Estados Unidos nos séculos XIX e XX. Como o direito de propriedade tradicionalmente implicava em direito ilimitado de uso, as empresas, e mais especificamente as minerações, tinham total autonomia para fazer o que melhor lhes conviesse no limite de suas propriedades, sem qualquer vinculação ao interesse público. Qualquer iniciativa de tolher esse direito privado era rechaçada com rigor. Conforme DOLL (1988), com relação à degradação de áreas nos Estados Unidos, essa situação perdurou até a década de 1930 quando criou-se o Soil Conservation Service, que visava à preservação de áreas agrícolas, fazendo prevalecer o interesse público caso o exercício do direito privado de uso se mostrasse danoso. BRENNER (1985) relata ainda que nos Estados Unidos até a II Guerra, a mineração de carvão a céu aberto, sem regulamentação adequada, destruiu inúmeros recursos de superfície, contaminou cursos d'água e aquíferos, deixando milhares de hectares de terras sem recuperação.

À partir da segunda metade do século XX, no entanto, os países desenvolvidos movidos pela escassez de áreas disponíveis para moradia, uso industrial e agricultura, entre outros, além da crescente conscientização ambiental da

população, partiram para uma firme iniciativa de exigir a recuperação de áreas das minerações em atividade, através da adoção de legislação mais rígida e de mecanismos de financiamento que, em vários países, têm levado também à recuperação de antigas áreas degradadas abandonadas.

2.2. LEGISLAÇÃO BRASILEIRA

A recuperação de áreas degradadas insere-se no campo do direito ambiental. Segundo o ordenamento jurídico brasileiro, as áreas mineradas devem ser recuperadas e reutilizadas para preservação, fins econômicos ou sociais. Trata-se de matéria constitucional, e é regulada também pelas esferas legislativas federal, estadual e municipal.

Em linhas gerais, a recuperação das áreas degradadas é exigida do minerador através de um plano específico, o PRAD (Plano de Recuperação de Áreas Degradadas) que deve ser entregue anexo ao EIA/RIMA, a ser apreciado pelo órgão ao qual está delegada essa competência, que usualmente é o órgão estadual. Isso é válido para os novos empreendimentos à partir de 1989. Os empreendimentos pré-existentes tiveram na época um prazo de 180 dias para apresentar o PRAD.

ARAÚJO ET AL. (1993), FUNDAÇÃO DO DESENVOLVIMENTO ADMINISTRATIVO (1992), IBRAHIM (1996), SILVA ET AL. (1992), MASCHIO ET AL. (1992), WAISBERG (1991), entre outros, descrevem o enquadramento jurídico da recuperação das áreas degradadas pela mineração, que convém frisar, está em contínua mudança por parte do Legislador, requerendo constante atualização quanto às normas vigentes.

A recuperação de áreas degradadas é matéria constitucional. O artigo 225, parágrafo 2º da Constituição Federal estabelece que “aquele que explorar os

recursos minerais fica obrigado a recuperar o ambiente degradado, de acordo com a solução técnica exigida pelo órgão público competente, na forma da lei”.

A Constituição Federal, no artigo 23, inciso VI estabelece também que União, Estados, Distrito Federal e Municípios tem competência comum na proteção ao meio ambiente. Dessa maneira, o enquadramento jurídico relacionado à recuperação de áreas degradadas pela mineração no Brasil perpassa as três esferas legislativas: federal, estadual e municipal.

Na legislação federal, a lei 6.938 de 1981 veio a estabelecer a Política Nacional do Meio Ambiente, e em seu artigo 2º declara que “A política nacional do meio ambiente tem por objetivo a preservação, a melhoria e recuperação da qualidade ambiental propícia à vida, visando assegurar, no país, condições ao desenvolvimento sócio-econômico, aos interesses da segurança nacional e à proteção da dignidade da vida humana, atendidos os seguintes princípios:

...

VIII: recuperação de áreas degradadas;”

A Resolução CONAMA 001/86 elencou as atividades cujo licenciamento depende de Estudo de Impacto Ambiental (EIA/RIMA), dentre as quais foi incluída a extração mineral, inclusive os de Classe II definidos no Código de Mineração e definiu a competência dos órgãos estaduais.

O decreto federal 97.632 de 1989 estabeleceu instruções sobre o EIA/RIMA. No caso de empreendimentos que se destinem à exploração de recursos minerais os novos empreendimentos no setor mineral deverão apresentar no órgão ambiental competente o EIA/RIMA juntamente com o Plano de Recuperação de Áreas Degradadas. Os empreendimentos já existentes tiveram um prazo de 6 meses para apresentarem seus planos. Dispõe sobre a regulamentação do artigo 2º da lei 6938/81 e dá outras providências:

“art. 1º - os empreendimentos que se destinam à exploração de recursos minerais deverão, quando da apresentação do Estudo de Impacto Ambiental (EIA) e Relatório de Impacto Ambiental (RIMA), submeter à aprovação do órgão ambiental competente Plano de Recuperação de Área Degradada.

parágrafo único: para os empreendimentos já existentes, deverá ser apresentado ao órgão ambiental competente, no prazo máximo de 180 dias, a partir da data de publicação deste Decreto, um plano de recuperação de área degradada.”

O decreto 97.632 de 1989 estabelece também o objetivo da recuperação, em seu artigo 3º: “A recuperação deverá ter por objetivo o retorno do sítio degradado a uma forma de utilização, de acordo com um plano preestabelecido para o uso do solo, visando a obtenção de uma estabilidade do meio ambiente.”

No âmbito do estado de São Paulo, a Resolução SMA nº 18, de 1989 veio a regulamentar o decreto federal 97.632/89, exigindo o PRAD (Plano de Recuperação de Áreas Degradadas) como parte integrante do EIA/RIMA por exploração dos recursos minerais. A Secretaria do Meio Ambiente (estadual) é o órgão competente para sua apreciação.

Mais recentemente, a Resolução SMA nº 03, de 1999 dispensou a apresentação do EIA/RIMA para mineradores que pretendam se estabelecer em áreas de zoneamento minerário regularmente aprovadas. Nesse caso a recuperação está enquadrada na recuperação da área do zoneamento como um todo.

A Constituição Estadual paulista de 1989, em seu artigo 194 determina que “aquele que explorar recursos naturais fica obrigado a recuperar o meio ambiente degradado, de acordo com a solução técnica exigida pelo órgão público competente na forma de lei. Parágrafo único: é obrigatória, na forma da lei, a recuperação, pelo responsável, da vegetação adequada nas áreas protegidas, sem prejuízo das demais sanções cabíveis.”

Anteriormente, a lei estadual 997 de 1976 instituiu o mecanismo de licenciamento ambiental das atividades industriais em São Paulo, com a criação da CETESB. A avaliação do impacto ambiental foi incorporada pelo licenciamento regulamentado pelo Decreto Estadual 8468/76 e centrado na atuação da CETESB.

Ao estado federado cabe também estabelecer enfoques no planejamento territorial e no controle da poluição ambiental nas regiões metropolitanas: especificamente no estado de São Paulo, a Região Metropolitana de São Paulo é regida pelas leis 898 de 1975 e 1172 de 1976 (regulamentada pelo decreto 9714 de 1977), visando a proteção de mananciais. A lei 1817 de 1978 (regulamentada pelo decreto 13095 de 1979) rege o zoneamento industrial na RMSP.

O licenciamento na Região Metropolitana de São Paulo tem sido exercido por diversas agências - Departamento de Proteção aos Recursos Naturais, DLM (licença metropolitana), Secretaria do Meio Ambiente, Cetesb, DAEE, CONDEPHAAT. O DLM executa as atividades constante nas leis 898 de 1975 e 1172 de 1976, regulamentada pelo decreto 9714 de 1977, e diz respeito à proteção dos mananciais da RMSP.

O âmbito legislativo municipal é basicamente constituído por posturas de zoneamento e licenciamento atrelados à própria atividade de exploração mineral e ao uso e ocupação do solo, sem um enfoque específico quanto à recuperação.

2.3. CARACTERÍSTICAS DO EMPREENDIMENTO MINEIRO

O empreendimento mineiro é dotado de algumas características peculiares, que determinam decisivamente a dinâmica da degradação, as configurações das áreas resultantes e a movimentação dos materiais em decorrência da atividade de mineração.

Sucintamente, a atividade mineira a céu aberto compõe-se de uma série de operações que visam extrair um minério, previamente identificado e quantificado por prospecções geológicas, na camada superficial da crosta terrestre, retirando-o do estado bruto em que se encontra e beneficiando-o de modo a obter um concentrado, produto ou matéria-prima vendável, seja para um consumidor final (brita para construção civil), seja para posterior processamento em outro tipo de indústria (concentrado de minério de cobre para a metalurgia do cobre, por exemplo). Classicamente essas operações são divididas em operações de lavra e beneficiamento.

Minério pode ser definido como toda matéria-prima de origem fóssil ou mineral da qual se pode extrair economicamente uma ou mais substâncias de interesse.

A remoção do minério através das operações de lavra quase sempre é acompanhada da retirada de outros materiais, que são o capeamento e o estéril, conforme se constata na figura 2.2.

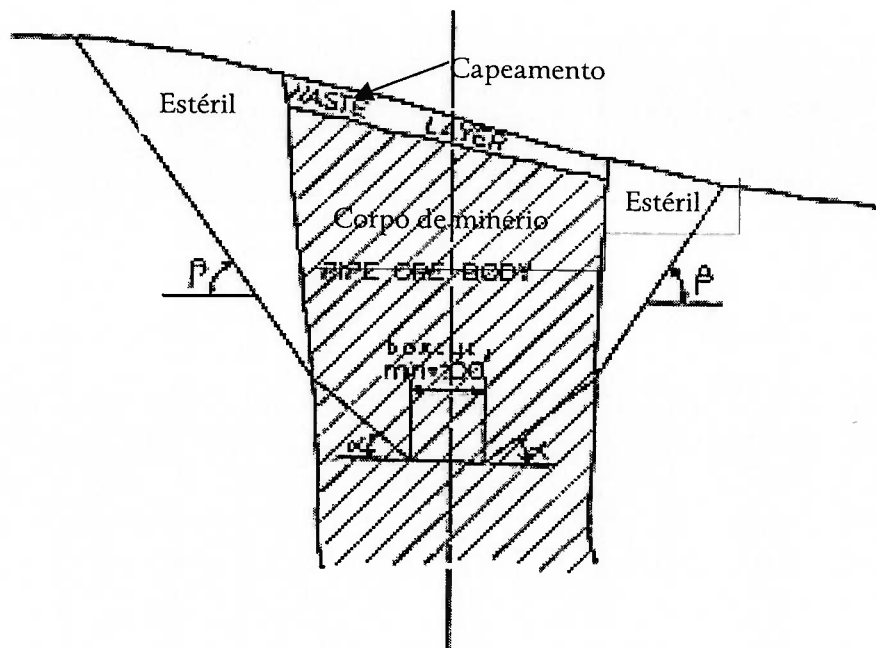


Figura 2.2. Cava ilustrando o minério e o estéril

O capeamento é a camada mais superficial do depósito, via de regra sem valor econômico e constituída na maior parte de solo orgânico e solo de alteração. A altura dessa camada usualmente não é espessa, mas em certos casos, como em minas de calcário, o topo rochoso pode variar significativamente. Sua remoção é requerida para atingir-se o corpo de minério.

O estéril é o solo ou a rocha não mineralizada ou com teor inferior a níveis economicamente viáveis e que, devido à necessidade de manter a estabilidade dos taludes da escavação, precisa ser removido, possibilitando o acesso às porções mineralizadas.

Uma vez extraído, o minério passa por operações de beneficiamento, que conforme sua natureza, podem variar desde uma simples britagem e peneiramento no caso de pedreiras de brita para construção civil, a complexas plantas de moagem e concentração, utilizando diversas operações unitárias, tais como flotação, separação gravimétrica, separação eletrostática, entre outras. O objetivo das operações de

beneficiamento é obter um produto ou concentrado a partir do minério bruto. Uma vez separado o elemento útil do minério no processo de beneficiamento, os demais minerais constituintes são descartados como rejeito.

O diagrama abaixo resume as operações típicas na mineração e os materiais gerados em cada etapa. O diagrama é genérico, dependendo do tipo de minério e algumas operações podem apresentar variações ou não serem necessárias, conforme o caso.

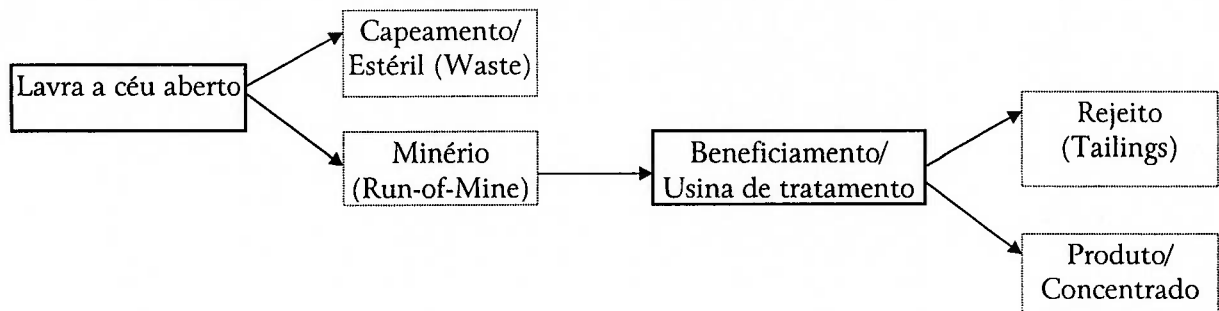


Figura 2.3. Esquema das operações unitárias na mineração

2.3.1. OPERAÇÕES DE LAVRA

A lavra a céu aberto consiste num conjunto de operações destinadas à extração de substâncias minerais ou fósseis da crosta terrestre em superfície. As operações unitárias são basicamente as seguintes:



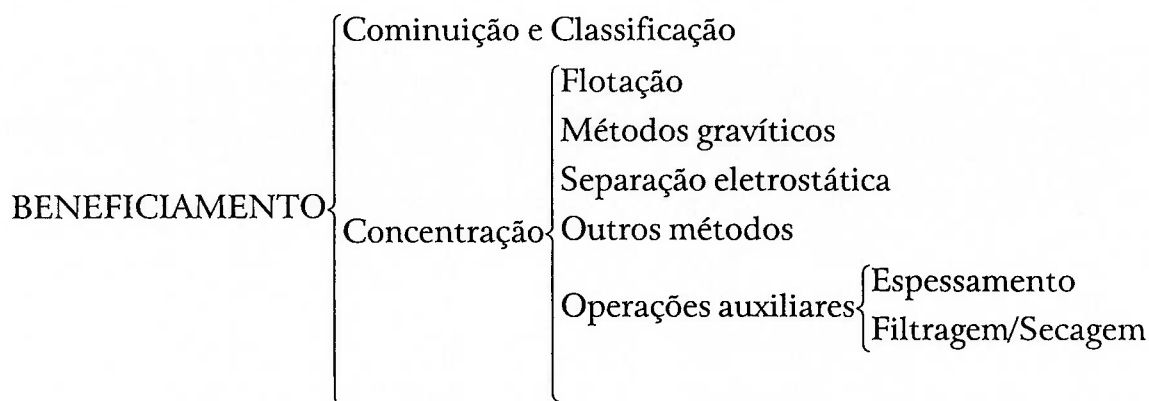
O desmonte é a operação que retira o minério ou estéril de onde ele se encontra "in situ". No caso de maciços rochosos emprega-se o desmonte por explosivos, fragmentando o material rochoso. No caso de rochas brandas ou solos o desmonte pode se dar por escavação direta por shovel, pá-carregadeira, retro-escavadeira ou outro equipamento mecânico. Em minerações de areia e garimpos de aluvião é comum o emprego do desmonte hidráulico, método que consiste em monitores lançando água sob pressão no maciço terroso, saturando-o e provocando sua desagregação. A polpa de água e sólidos resultante é bombeada para os processos subsequentes.

A dragagem é uma forma de desmonte subaquático em que o leito de um reservatório ou curso d'água é succionado por uma tubulação e recalado por uma bomba montada sobre flutuantes (draga) ou escavado mecanicamente por roda de caçambas.

As operações de carregamento e transporte são complementares ao desmonte. No caso de lavra de maciços rochosos isso normalmente é feito por pá-carregadeiras e caminhões que levam o minério (Run-of-Mine) para a britagem, ou se for estéril, para as pilhas de estéril (bota-foras).

2.3.2. OPERAÇÕES DE BENEFICIAMENTO

O beneficiamento consiste das seguintes operações unitárias principais:



As operações de cominuição e classificação visam reduzir granulometricamente o minério e classificá-lo em diferentes frações, seja para obter produtos dentro de determinadas faixas granulométricas, seja para atingir uma granulometria em que o mineral útil é liberado, preparando-o para os processos posteriores de concentração. Consiste das operações de britagem, peneiramento, moagem, ciclonagem ou outras, conforme o processo adotado.

Conceituando de maneira muito simplificada, as operações de concentração tiram partido das propriedades intrínsecas do mineral útil (densidade, características físico-químicas de superfície, propriedades eletrostáticas, etc.) para separá-lo dos outros minerais constituintes de um determinado minério.

Essas operações podem ser por via úmida ou via seca. Quando feita por via úmida, o minério é manuseado sob a forma de polpa, que é uma mistura dos sólidos com água. Nos processos por via úmida, o rejeito gerado é disposto em barragens, chamadas especificamente de barragens de rejeito.

Em muitos casos, a maior parte do minério alimentado na usina de beneficiamento se constituirá em rejeito. Por exemplo, um minério que contenha um teor de cobre de 0,5%, gerando um concentrado de teor de 30% de cobre, resultará em mais de 98% do volume alimentado como rejeito. Esse material, cujo volume numa mina

pode chegar a alguns milhões de toneladas por ano, não tem valor de mercado e deve ser disposto da maneira mais econômica possível, via de regra em barragens.

2.3.3. LOCALIZAÇÃO

As minas, em última análise, são estabelecidas em depósitos de teor de minério anormalmente alto em relação à composição média da crosta terrestre (desde que sua extração se mostre viável tecnológica e economicamente). As jazidas são anomalias minerais em relação à crosta como um todo.

A localização do empreendimento é, portanto, condicionada pelo corpo mineralizado que, por sua vez, excluindo-se aqueles bens minerais de relativa abundância (granito, calcário ou basalto ou areia para construção civil, por exemplo), ocorre em determinados pontos da crosta.

Esse caráter fortemente local também faz com que a atividade de mineração tenha sua extensão limitada pelo próprio corpo mineralizado, que, salvo a exceção de alguns casos de lavra extensiva de carvão ou bauxita (que podem estender-se por vários quilômetros), usualmente ocupa uma área relativamente pequena, quando comparada a outras atividades econômicas extensivas (agricultura, pecuária, reflorestamento, etc.).

2.3.4. VIDA ÚTIL DA MINA

A mineração é um empreendimento peculiar também do ponto de vista de sua duração no tempo e, portanto, no uso temporário da superfície.

Por lidar com um recurso natural não renovável, sua limitação no tempo é inevitável. Desde as fases iniciais do empreendimento, a vida útil da mina é um dos

parâmetros considerados nos fluxos de caixa que definem a viabilidade da implantação do empreendimento.

A partir da cubagem da jazida através de campanhas de exploração geológica é estimada a reserva de minério e prevista a vida útil da mina, que se constitui no horizonte sobre o qual se baseará o planejamento da lavra e das demais atividades mineiras.

2.4. DEGRADAÇÃO DE ÁREAS

Em sentido amplo, a degradação pode ser caracterizada como qualquer alteração ocorrida num ecossistema em relação ao seu equilíbrio original. Os ecossistemas, segundo CAIRNS JR. (1986) são expostos a uma vasta gama de intervenções, variando desde a queda de uma árvore, até a distúrbios que podem afetar grande parte do globo terrestre. Pequenos distúrbios causados por fenômenos naturais são frequentemente seguidos de uma rápida recuperação, mas os distúrbios resultantes das atividades humanas não se recuperam tão facilmente.

Os distúrbios podem ser classificados em:

- 1) Distúrbios imprevistos: descarrilamentos de vagões contendo substâncias tóxicas, vazamentos de petróleo, acidentes marítimos ou acidentes em fábricas (como o vazamento de dioxina em Seveso, na Itália), por exemplo. Nesse caso, as condições pré-existentes no ecossistema da região são desconhecidas. Muitas vezes, a confusão logo após o acidente pode levar à coleta de informações errôneas (tipo de dado errado ou coletado em local errado).
- 2) Distúrbios que vinham ocorrendo há um período substancial de tempo, mas que só recentemente foram detectados: contaminação por efluentes industriais, por exemplo. Tal categoria de acidente só é detectada quando a poluição atinge níveis elevados, causando, no exemplo, a mortandade de peixes ou efeitos

nocivos em seres humanos. Nesses casos, é mais provável que nenhuma informação ambiental prévia tenha sido recolhida. Mesmo que o despejo de efluente tóxico cesse ou seja reduzido a níveis toleráveis, a recuperação do ecossistema só se dá com a remoção ou imobilização do material contaminado. A descontaminação “in situ” é cara e complexa. Remover o resíduo e torná-lo menos nocivo através de diluição é uma solução usual, mas insatisfatória.

- 3) Situações em que o distúrbio é planejado: É possível efetuar uma avaliação ecológica das características prévias. A mineração a céu aberto é um exemplo desse tipo de situação.

Para avaliar um impacto ambiental sobre um determinado ecossistema, CAIRNS JR. (1986) recomenda três principais determinações que devem ser feitas antes de se iniciar quaisquer ações corretivas:

- nível de alteração;
- área em que a alteração ocorreu;
- a importância do ponto de vista ecológico dessa alteração;

2.4.1. CONCEITO DE DEGRADAÇÃO

Conforme SÁNCHEZ (1992) a degradação de áreas pode ser definida como um conjunto de processos ambientais que causam uma perda de produtividade ou queda da qualidade ambiental. Na degradação tem-se:

- 1) perda das características naturais;
- 2) alteração indesejável da paisagem;
- 3) problemas de saúde e segurança públicas;

A degradação ambiental de áreas na mineração pode ser avaliada nos seguintes aspectos, conforme IBRAHIM (1996):

- físicos: compactação do solo, deslizamentos de encostas;

- topográficos: as áreas apresentam perfis de encostas com configuração geométrica, com paredões verticais, morrotes ou depressões no terreno, havendo problemas de instabilidade de taludes;
- químicos: contaminação do solo, da água e do ar, lixiviação de nutrientes do solo, emissão de partículas sólidas e/ou tóxicas na atmosfera, lançamento de efluentes no solo e aquíferos;
- biológicos: desaparecimento ou diminuição da fauna e flora;

Verifica-se que a movimentação e disposição de materiais na mineração a céu aberto produzem, em maior ou menor grau, os efeitos que caracterizam a degradação ambiental. A remoção do minério e do estéril degrada a área lavrada ao criar um espaço vazio no lugar onde havia um terreno natural. O estéril retirado na lavra, por sua vez, causa a degradação da área onde é depositado. Se for gerado um rejeito, sua disposição também acarretará em degradação.

2.5. ÁREAS DEGRADADAS NA MINERAÇÃO A CÉU ABERTO

As áreas degradadas na mineração à céu aberto compreendem basicamente as áreas que foram diretamente afetadas pela extração mineral, bem como aquelas que foram degradadas ao serem utilizadas como local de despejo, bota-foras ou barragens de rejeito.

A degradação de áreas resultantes de atividades industriais auxiliares ou de infraestrutura (por exemplo áreas de lavagem de veículos, oficinas, esgoto e lixo doméstico, etc.) não será abordada nesse estudo.

2.5.1. ÁREAS LAVRADAS

Com exceção da lavra por dragagem e de alguns tipos de lavra a céu aberto, como a lavra por tiras, as áreas lavradas se constituem basicamente em cavas.

Dá-se o nome de cava à escavação resultante da extração das substâncias minerais (minério e estéril) promovida pela atividades da lavra a céu aberto. Usualmente seus taludes são construídos em bancadas, com bermas de acesso, podendo atingir de poucos metros a centenas de metros abaixo da superfície do terreno original.

Os taludes de cava de mineração a céu aberto apresentam características que os tornam relativamente distintos daqueles para outras finalidades. O caráter provisório, uma vez que os taludes se modificam à medida que se avançam os trabalhos de lavra, e a importância que a inclinação global da cava adquire na viabilidade econômica do empreendimento são algumas dessas características, que implicam, para fins de recuperação, em adequar os taludes definitivos a fatores de segurança compatíveis com a estabilidade a longo prazo.

A cava final do empreendimento é definida por critérios de natureza geotécnica e econômica. A cava final é aquela em que os custos de extração do minério e obtenção do produto final, seja por esgotamento do minério, diminuição do teor ou elevação da relação estéril/minério, se igualam à receita obtida com esse produto final, ou seja, o ponto em que o empreendimento deixa de ser viável economicamente. A cava final importa na recuperação na medida em que esta será a configuração final sobre a qual serão aplicáveis os critérios e os trabalhos de recuperação.

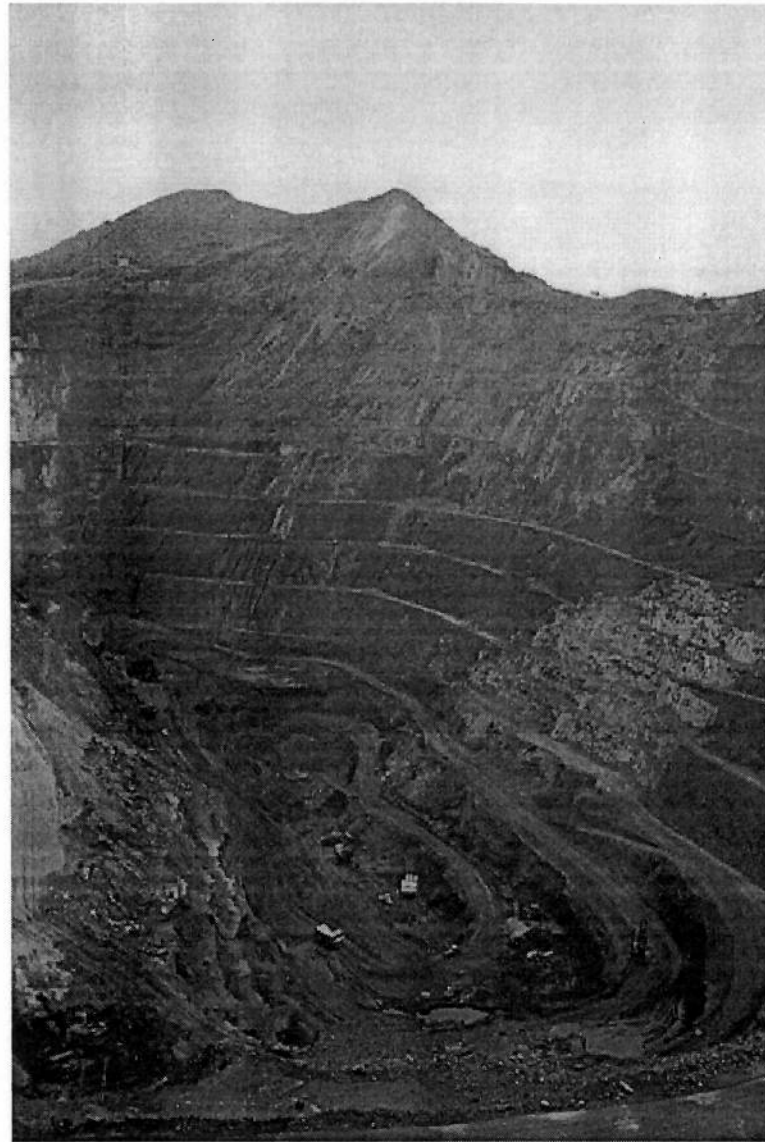


Figura 2.4. Cava da MBR - Águas Claras

A cava a meia encosta é um tipo de cava em que o nível da praça (ponto mais baixo da cava) está igual ou acima da cota de drenagem natural do terreno que a circunda, de forma que as águas pluviais captadas pela cava são drenadas naturalmente para seu exterior.

Conforme o bem mineral extraído, as cavas podem ser em rocha sã, rocha alterada ou em solo.

2.5.2. ÁREAS DE DEPOSIÇÃO DE ESTÉRIL

São as pilhas de estéril ou "bota-foras". O estéril removido na lavra não tem valor econômico e deve ser disposto nessas pilhas (ou bota-foras), em caráter definitivo. O estéril, via de regra, não sofre beneficiamento, e é composto predominantemente de material graúdo.

O estéril é depositado, em geral, em pilhas por basculamento de caminhões vindos da frente de lavra. Em alguns tipos de minerações como as de minério de ferro, onde a relação estéril/minério pode chegar até a $1,1 \text{ t}_{\text{estéril}}/\text{t}_{\text{minério}}$, a deposição desse material é crítica, devido aos volumes e alturas consideráveis da pilha, exigindo uma deposição devidamente controlada e monitorada.



Figura 2.5. Pilha de estéril- Ferteco

As características construtivas das pilhas de estéril estão detalhadas em item específico nessa Dissertação.

2.5.3. ÁREAS DE DEPOSIÇÃO DE REJEITOS

O processo de beneficiamento é, em muitos minérios, realizado por via úmida, de forma que o rejeito encontra-se diluído em água, sob a forma de polpa, sendo descartado através de bombeamento para barragens. Uma vez que o lançamento direto de rejeitos em cursos d'água naturais causaria sérios impactos ambientais em termos de contaminação e assoreamento, o rejeito deve ser depositado em barragens, onde a fração sólida sedimenta-se, recirculando a água clarificada para o processo de beneficiamento ou devolvendo-a de forma controlada ao curso d'água.

As barragens de rejeito frequentemente eram projetadas e operadas para resolver problemas imediatos associados à disposição de sólidos ou recuperar água de processo. Até poucas décadas atrás, escassa consideração se dava à barragem após o esgotamento de sua capacidade (D'APPOLONIA ET AL. (1973)). A recente ênfase na segurança e no meio ambiente tem levado ao reconhecimento das fases de encerramento e definição de uso futuro como essenciais no projeto da barragem.

Normalmente por ter sofrido ação de moagem no beneficiamento, a granulometria dos rejeitos é fina. Em geral, essas barragens são construídas com o próprio rejeito por ciclonação, onde o underflow dos ciclones (grossos) é lançado na crista da barragem, enquanto o overflow (finos) é lançado à montante da barragem, ou por espigotamento, com efeito similar.

A barragem deve ter capacidade adequada para sedimentação de partículas e clarificação da água antes de seu reaproveitamento no processo ou devolução à bacia hidrográfica.



Figura 2.6. Barragem de rejeito- Ferteco

As características construtivas das barragens de rejeito estão detalhadas em item específico nessa Dissertação.

2.6. JUSTIFICATIVAS DA RECUPERAÇÃO

Inicialmente, pode-se argumentar quais afinal seriam os motivos concretos que levariam a se recuperar uma área degradada. KOVALICK (1991) aponta algumas razões. A primeira razão é a proteção da saúde pública. A outra razão para recuperar áreas é econômica, relacionando-se com a necessidade de reutilizar a área. Na Europa, por exemplo, áreas que serviram para curtir couro no século XVII hoje estão se tornando áreas residenciais ou shopping centers. Nesses casos a presença de contaminantes deve ser verificada quanto à compatibilidade com o uso a que se pretende. Os casos de Love Canal (EUA) e Lekkerkerk (Holanda) ilustram os problemas envolvidos quando se utiliza uma área de resíduos industriais para fins residenciais sem maiores cuidados. Nos Estados Unidos, uma área residencial e

uma escola perto de Buffalo, N.Y., foram implantadas sobre um local de deposição de lixo industrial abandonado. Décadas depois, os habitantes de Love Canal atribuíram certas doenças à exposição a esses resíduos tóxicos enterrados. Ao fim, evacuou-se a área e foram necessários trabalhos de recuperação dispendiosos. Alguns estados americanos estabeleceram leis determinando alguns tipos de indústria a recuperarem suas próprias áreas degradadas como pré-condição para venda do empreendimento.

No entanto, a recuperação dessas áreas não deixa de ser uma alternativa atraente. GENSKE e NOLL (1994) descrevem o processo de recuperação de minas abandonadas no distrito do Ruhr na Alemanha e sua transformação em áreas aproveitáveis. Qualquer área maior que 4 hectares desocupada é considerada uma área abandonada, e 80% dessas áreas são antigas minas. Como novas indústrias requerem espaços disponíveis, que é limitado nessa região, a recuperação dessas áreas têm sido cada vez mais motivada.

2.7. CONCEITO DE RECUPERAÇÃO

O conceito de recuperação, seguindo a denominação de BOX apud BITAR ET AL. (1990), compreende as seguintes variações:

- Restauração (restoration): trazer o local alterado rigorosamente às mesmas condições pré-existentes à intervenção;
- Recuperação (reclamation): o local alterado deve ser trabalhado de modo que as condições ambientais acabem ficando próximas às condições anteriores à intervenção;
- Reabilitação (rehabilitation): o local deverá ser destinado a uma dada forma de uso e ocupação do solo, em condições compatíveis com os padrões estéticos dos contornos;

DOLL (1988) esclarece que o termo recuperação (reclamation) é usado em geral para as práticas que vão de encontro às legislações federal e estadual americanas, ou seja, retornar o local às condições de uso pré-mineração (reconstituição do contorno original e comunidades de plantas e animais restabelecidos a níveis pré-existentes). Já a reabilitação (rehabilitation) é o retorno da área a um uso estável e permanente de acordo com um plano prévio, podendo dar novo uso à área, diferente do original, ou seja mudar o uso de uma forma mais benéfica para a sociedade. Já a restauração (restoration) é uma recuperação mais meticulosa, em que se tentaria restaurar com detalhe as condições pré-existentes. A restauração do sítio original só se justificaria se a área possuísse características únicas, mas na maioria das vezes as áreas a serem mineradas não são únicas e possuem características em comum com vastas áreas adjacentes que não serão lavradas.

Numa outra conceituação, a recuperação consiste em fazer retornar o sítio degradado “a uma forma e utilização de acordo com um plano preestabelecido para o uso do solo. O que implica que uma condição estável será obtida em conformidade com os valores ambientais, estéticos e sociais da circunvizinhança. Significa, também, que o sítio degradado terá condições mínimas de estabelecer um novo solo e uma nova paisagem.” (WILLIAMS ET AL., 1990).

Comparando com a conceituação anterior, percebe-se que ela se enquadra mais na definição de reabilitação. Esses conceitos são portanto variáveis de autor para autor. Já para CAIRNS JR. (1986) são possíveis as seguintes alternativas com relação às áreas degradadas:

- restauração do ecossistema à sua condição original;
- reabilitação através da recomposição de algumas de suas características originais
- escolha de um ecossistema alternativo (“enhanced ecosystem”).
- abandono da área: algumas vezes é melhor não fazer nada, como nos casos em que os resultados não estão claros ou são duvidosos.

Para CAIRNS JR. (1986), esse é um processo decisório no qual a flexibilidade das partes envolvidas (indústria, governo, sociedade) é fundamental.

Uma vez que o entendimento da nomenclatura não é pacífico, prefere-se nesse trabalho o termo recuperação, mesmo quando o conceito a que se refira seja mais próximo ao de reabilitação ou “enhanced ecosystem”.

No Brasil, a solução de recuperação exigida por lei enquadra-se mais no conceito de reabilitação, havendo a possibilidade de permitir usos futuros diferentes da situação pré-existente à mineração, pois, como define o decreto federal 97.632 de 1989, em seu artigo 3º, “a recuperação deverá ter por objetivo o retorno do sítio degradado a uma forma de utilização, de acordo com um plano preestabelecido para o uso do solo, visando a obtenção de uma estabilidade do meio ambiente.”

2.8. USO FUTURO DA ÁREA

A recuperação de uma área após um distúrbio drástico ou após a lavra a céu aberto usualmente requer a remodelação da superfície e a reconstituição do solo (JANSEN e MELSTED (1988)). O primeiro passo é selecionar o uso futuro do terreno. Deve-se considerar nessa etapa as necessidades locais e o potencial para construção de um terreno adequado ao suporte dos recursos que são desejados no uso futuro. Objetivos de uso futuro determinam as necessidades de recursos do terreno, mas a disponibilidade dos materiais e o limite dos equipamentos de manuseio condicionam o tipo de recuperação e, dessa forma, as opções de uso que podem ser consideradas.

Uma possível abordagem para definir um objetivo de recuperação seria a construção de um terreno de máxima utilidade e versatilidade para as futuras gerações. Utilidade implica não somente em ter uso produtivo, mas complementar

outros recursos de superfície no local, preenchendo uma carência regional. Quanto à versatilidade, trata-se de proporcionar um terreno capaz de múltiplos usos que possa manter opções abertas para futuras gerações. Custo é uma consideração quanto à viabilidade, assim como tempo, pois o retorno do terreno a uma plena produtividade requererá anos para que o processo de desenvolvimento do solo tenha se completado.

Para muitos, à primeira vista, a melhor opção é tentar reproduzir na medida do possível o terreno tal qual antes da mineração. No entanto, em diversos casos há a oportunidade de eliminar características indesejadas do terreno natural ou de obter-se um recurso diferente para melhor complementar os recursos existentes na localidade. O estabelecimento de um terreno plano em áreas montanhosas ou de um reservatório de água são possíveis exemplos de incremento de recursos em relação à superfície original. Em outros casos, a recuperação natural pode originar habitats ricos.

As áreas mineradas não podem ser consideradas unidades discretas mas sim componentes de um ecossistema mais amplo onde elas ocorrem (DOLL (1988)). Devido às alternativas de recuperação disponíveis, essas áreas podem se tornar um componente de maior valor ao ecossistema que a área anterior à mina. As alternativas de recuperação devem ser avaliadas quanto aos benefícios ao ecossistema como um todo.

Se a área recuperada estiver estética e ambientalmente compatível com a região circunvizinha, o objetivo de restaurar a topografia pré-existente e as comunidades animal e vegetal se tornam redundantes. A ênfase prioritária deveria ser posta sobre o desenvolvimento de um uso estável após a mina que contribua da melhor forma com o ecossistema que o engloba. Considerações quanto às potenciais alternativas de uso futuro da área devem fazer parte do planejamento da recuperação. Há correntes que limitam a recuperação no estabelecimento de um habitat de vida

selvagem, mas nada garante que esse seja o melhor uso da terra nos próximos 50 ou 100 anos. Entretanto, se uma recuperação adequada não fizer parte do processo de mineração, milhares de anos poderão ser requeridos antes da área retornar ao seu estado original.

A oportunidade de modelar e criar o ambiente é praticamente ilimitada, dependendo da criatividade e compromisso das pessoas envolvidas (BAUER (1989)). Um mito é o de que a mineração cria um terreno imprestável, quando é preciso verificar que muitas oportunidades e situações podem estar sendo criadas. Um fato indiscutível, no entanto, é que a mineração deixa cicatrizes perenes na paisagem.

Em especial na mineração de agregados, próxima a centros urbanos, o uso futuro deve ser considerado desde os primeiros momentos do empreendimento. Antes de mais nada, a mineração é uma atividade de movimentação de materiais, e sendo assim, utiliza o mesmo tipo de maquinário que se usa para criar um loteamento. O uso futuro poderia então ser previsto para ocupação habitacional, por exemplo, sem maiores investimentos em equipamentos. Nesse contexto, a mineração não destrói a superfície, mas modifica-a (BAUER (1989)).

Para BAUER (1989), questões importantes para a área degradada são: Onde está localizada? é próxima a alguma rodovia? há infra-estrutura? há necessidade econômica? há demanda para seu uso? Esses serão elementos básicos que nortearão as possíveis alternativas de recuperação.

Para CARTER (1990) planejar a recuperação e definir um uso futuro para a área pode reverter em benefício econômico. No caso de pedreiras próximas a áreas urbanas, o valor do terreno tende a ser crescente. A recomendação é iniciar tão rápido quanto possível os trabalhos de recuperação. Minas de agregados variam muito em suas alternativas de recuperação. Locais em áreas urbanas com potencial

de crescimento têm mais chances que áreas remotas, mas não é só a localização que importa. Muito embora especialistas em desenvolvimento urbano possam sugerir estratégias para um uso futuro, para CARTER (1990), alguns itens são básicos:

- não ser excessivamente modesto quanto a investimentos, pois um plano correto de recuperação pode ser amortizado ao longo da vida do projeto;
- considerar o valor das características intrínsecas: barragens, barreiras visuais, acessos, são necessidades operacionais que podem valorizar o terreno se bem projetados e mantidos;
- trabalhar a favor da natureza, tirando partido de características naturais do terreno, como padrões de drenagem, estabilidade, orientação solar, que devem ser reconhecidos e valorizados.

Portanto, o critério para determinar a forma de recuperação não basta ser apenas adequado tecnicamente, mas deve incorporar atributos e usos pretendidos pela comunidade.

Um desses possíveis usos poderia ser a criação de um ecossistema adaptado para espécies ameaçadas.

BRENNER (1985), referindo-se à mineração a céu aberto de carvão nos Estados Unidos, divide as áreas recuperadas em: ecossistemas agrícolas, pastagens naturais, florestas e várzeas. Na mesma área essas modalidades podem ser combinadas, devendo-se ter em vista o uso final pretendido.

- ecossistemas agrícolas: se uma mina estava em área sob exploração agrícola, há a tendência em se desejar retorná-la ao estado anterior. Pode-se também originar áreas agrícolas em minas localizadas em regiões montanhosas, com carência de terrenos planos para cultivo.
- pastagens naturais: a preocupação é selecionar espécies naturais e acompanhar a sucessão da vegetação, que pode ser problemática.

- florestas: a sucessão natural também é um fator importante para aumentar a diversidade nas comunidades florestais.
- várzeas: o ambiente pode ser melhorado com a criação de ambientes favoráveis à criação de ninhos e plantio de espécies que garantam comida para a fauna. Além dos benefícios da recuperação há uma recarga de água no solo, provendo uma futura reserva de água e recreação.
- várzeas a partir de barragens de rejeito: o rejeito de carvão é potencialmente tóxico devido à formação de ácidos. Uma forma de garantir a formação de lagos é amostrar quais pontos estão isentos de acidez, enquanto aterra-se os locais ácidos do reservatório.

No Brasil, conforme ARAÚJO ET AL. (1993), tem-se notado nos PRADs uma tendência geral de uso futuro para reflorestamento após a lavra. Esse fato pode refletir a ausência de uma diretriz para a recuperação por parte do Estado. Nota-se que a indefinição de uma política de recuperação para as áreas degradadas tem conduzido a um desperdício de parcerias entre o setor público e o privado na recuperação de áreas degradadas, tornando-as aptas inclusive a usos sociais, situação essa eventualmente recomendável no caso de pedreiras vizinhas a unidades de conservação, pedreiras isoladas utilizáveis para aterros sanitários, etc. A definição do uso futuro das áreas não tem sido efetivada de maneira coordenada.

2.9. PLANEJAMENTO DA RECUPERAÇÃO

A recuperação deve ser realizada com base em estudos ambientais, sociológicos, geológicos e de engenharia, respeitando as particularidades da mina e do local em que está situada. Essencialmente, essas particularidades dizem respeito às suas características:

- físicas: topografia, geologia, solos, rede hidrográfica e paisagem
- biológicas: flora e fauna

- sócio-econômicas

A recuperação das características físicas, de modo geral, consiste na etapa primeira dos trabalhos, propiciando condições para que se desenvolvam, na seqüência, as recuperações biológica e sócio-econômica. É de suma importância, portanto, a execução criteriosa dessa fase, para garantir resultados satisfatórios no projeto como um todo.

Toda mina se encerra mais cedo ou mais tarde e isso não é um fato repentino, mas um processo totalmente previsível, que deve ser devidamente planejado (CARTER (1990)). A recuperação não é um evento que ocorre em uma época determinada, mas um processo que se inicia antes da mineração e termina muito depois desta ter se completado. A definição do uso futuro do solo que se fará na área recuperada terá de ser claramente delineada na fase de planejamento. Esta utilização futura norteará as diretrizes e procedimentos que serão aplicados à recuperação.

A recuperação deve ser concomitante à mineração, uma vez que os equipamentos de movimentação estão disponíveis no local. Fica muito mais caro movimentar o material na recuperação, quando ele já poderia ter sido depositado no local definitivo durante a lavra, conforme um projeto de recuperação. Não há custo adicional significativo na recuperação do terreno, quando realizado concomitantemente à lavra.

Para BARTH (1989), as soluções de engenharia exercem um papel importante na recuperação, para garantir que estéreis e rejeitos e a paisagem da mina sejam estabilizados e bem drenados.

Algumas etapas do processo de recuperação, com vistas à revegetação, sugeridas por BARTH (1989) são:

- pré-planejamento

- objetivos da recuperação
- decapeamento e armazenagem do solo orgânico
- lavra do minério
- obras de engenharia no local a ser recuperado
- reposição do solo orgânico
- preparo do local para plantio
- seleção das espécies
- plantio
- manejo e manutenção

A recuperação deve ser encarada como um investimento para o futuro. Uma atitude positiva é considerar a recuperação como um custo inerente ao empreendimento minerário. Na fase de pré-planejamento devem ser identificadas áreas de referência como fonte de sementes (WILLIAMS (1991)). Nessa fase o RIMA fornece todos esses subsídios. O plano de recuperação deve ser um plano de ação baseado na realidade e não apenas um documento burocrático. Deve ser seguido, cumprindo prazos e custos. A recuperação deve ter seus objetivos cuidadosamente escolhidos. Os objetivos de curto prazo devem se apoiar nos de longo prazo, e não basear-se no “vamos esperar para ver o que vai acontecer”.

Não há no Brasil, no entanto, mecanismos de fomento ou financiamento à recuperação de áreas degradadas, como no exterior. Nos Estados Unidos, até 1977, quando foi promulgada o Federal Surface Mining Control Reclamation Act (SMCRA), era consideravelmente variável o modo como eram recuperadas as áreas mineradas. A lei trouxe uma uniformidade na regulamentação das leis estaduais e permitiu o envolvimento da população com o processo. O governo federal fornece fundos para auxílio aos estados, pois a responsabilidade para permissão e recuperação é do estado, a menos que a área esteja em terras federais. Com relação à recuperação, as regulamentações existentes requerem que a terra seja retornada a seu contorno original aproximado ou outras alternativas aceitáveis, que a terra

vegetal seja separada do estéril e que a produtividade seja igualada ou superada em relação à anterior à mina. A lei federal incentiva a revegetação com espécies nativas e recomenda que a vida selvagem seja priorizada. No geral, a lei federal trouxe uma melhoria nas práticas de uso da terra após a lavra. Entretanto, se a lei for muito restritiva ela pode desencorajar o desenvolvimento de novas técnicas.

BRENNER (1985), analisando a mineração de carvão à céu aberto nos Estados Unidos, estimou um custo de recuperação de US\$ 9.000 a 16.000/ha (1985), com a maior parte do custo envolvida com movimentação de terra e recomposição topográfica. Esse custo é virtualmente menor, pois utiliza máquinas da própria operação normal da mina.

REID (1994) apresenta uma visão do empreendedor de mineração quanto a recuperação de áreas no Canadá e do mecanismo para obtenção de fundos. A mineração pela sua própria natureza afeta o terreno, criando impactos ambientais, em particular na mineração de carvão, gerando rejeitos ácidos e estéril. Enquanto se demanda muito tempo e recursos para prevenir ou remediar esses problemas, não se gasta tempo em compreender qual é o impacto dos custos nos balancetes e fluxos de caixa das empresas. A indústria canadense de mineração tem negociado com o governo um regime de suporte financeiro que garanta fundos para as empresas.

Parte da herança da atividade mineira são minas fechadas gerando danos prolongados, principalmente no que se refere à drenagem ácida de barragens de rejeito e estéril. Para garantir que as minas estejam em condições seguras e ambientalmente adequadas quando encerrarem suas atividades, e garantir que não caberá aos governos o ônus para o saneamento da área, muitos países promulgaram leis requerendo planos para quando as minas fecharem e alguma forma de assistência financeira. A província canadense de Ontario, grande produtora de minérios, tem um dos regimes mais avançados nesse sentido. Em 1989, para

assegurar a existência dos “clean-up funds”, foi modificada a lei de Ontario, requerendo um projeto de recuperação das minas a fechar para obter financiamento do governo.

Baseado nessa experiência, um modelo de regime financeiro deve considerar:

- risco: entendimento do fator risco de fechar-se prematuramente empresas de mineração devido a circunstâncias de mercado;
- período de transição: como a legislação é retroativa sobre as minas em atividade, é necessário um tempo para adaptação às novas condições;
- flexibilidade de instrumentos: a relação de instrumentos financeiros deve ser a mais variada e flexível possível para acomodar as diferentes necessidades da indústria.

As regras canadenses requerem que os custos da recuperação das áreas degradadas sejam previstos em balancetes.

Quanto às áreas abandonadas, um programa do governo canadense classificou e priorizou as áreas, enfocando principalmente os resíduos ácidos da mineração de carvão. Os custos para as empresas de mineração para recuperar as áreas são vultosos, mas administráveis ao longo do tempo.

2.9.1. CONSIDERAÇÕES SOBRE A RECUPERAÇÃO DO SOLO

JANSEN e MELSTED (1988) afirmam que a modelagem do terreno estabelece uma superfície na qual o solo deve ser adequado ao uso final pretendido. O tipo de solo, assim, varia conforme o tipo de uso. Alguns usos têm requisitos rigorosos para o solo que os suportará. Alta densidade e resistência do solo são desejáveis para construção e fundação de estradas e ruas, mas indesejáveis para florestas ou

plantio. A construção do solo começa com o desenvolvimento de um projeto adequado. O projeto deve especificar o material a ser usado, selecionando aqueles disponíveis e quais os métodos de movimentação a ser empregados. Textura do solo, porcentagem de fragmentos grossos, mineralogia e composição química são controlados pela seleção do material. Pode-se também modificar o solo com adubos e fertilizantes. A movimentação do material inclui escavação, transporte e disposição final dos solos.

Alguns parâmetros devem ser considerados:

a) Seleção dos materiais adequados: materiais dos horizontes superficiais do solo anterior à mineração frequentemente são os mais adequados para a construção de um novo solo após o distúrbio. Materiais de camadas mais profundas de estéril podem alternativamente ser avaliadas. Para a maioria das lavouras o novo solo deve ser idealmente construído com material de textura média (solo siltoso, silto-argiloso). Fragmentos grossos (rocha e cascalho), devem estar ausentes ou em pequena quantidade. Esse tipo de solo geralmente tem maior capacidade de reter água para as plantas. Alta capacidade de armazenamento de água é mais crucial em climas secos sem chuvas suficientes para reabastecer os solos periodicamente. A ausência de rocha também facilita a operação de colheitadeiras para lavoura. Argila, bem como matéria orgânica, agem como ligantes para estabilizar a estrutura do solo, e atua no armazenamento e liberação dos nutrientes para os vegetais, daí uma porcentagem mínima de argila ser desejável. Solos com argila muito alta geralmente têm baixa condutividade hidráulica e aeração pobre. Qualquer especificação de teor ideal de argila seria arbitrária, mas valores entre 20 e 35% seriam apropriados para uma camada sub-superficial e entre 20 a 30% para a camada superficial. Se o solo contiver matéria orgânica, a argila deixa de ser tão crítica, pois ela a substitui proporcionando capacidade de troca de cátions e ajuda a estabilizar a estrutura do solo. Quanto à areia, um teor menor que 30% está adequado. Solos com baixa matéria orgânica estão sujeitos a encrustamento com a secagem pelo sol. Baixas

taxas de infiltração e estrutura instável de solos com pouca matéria orgânica os faz suscetíveis a altas vazões de superfície de águas de chuva e altas taxas de erosão. O tipo de vegetação determina o pH do solo mais desejável, sendo pH neutro a levemente ácido apropriado a muitas culturas. Ajustes moderados no pH do solo podem ser prontamente feitos com adição de corretivos ao solo.

b) Salinidade e alcalinidade: Em alguns casos, como os carvões do oeste americano, o estéril é geralmente salino ou sódico e difere dos solos superficiais em estrutura e matéria orgânica. Chuvas menores que 350 ou 400 mm por ano não são suficientes para lixiviar os sais da superfície reconstituída. Esse problema somente pode ser minimizado usando materiais isentos de sal para construção do novo solo. Esses materiais superficiais devem ser identificados, separados e estocados até a recuperação. O sucesso ou fracasso no estabelecimento da vegetação no terreno reconstituído tem muito a ver com o controle da presença de materiais arenosos, altos níveis de sal, compactação severa e capacidade de armazenamento de água.

c) Movimentação e disposição de materiais: Os equipamentos e os procedimentos usados para escavar, transportar e dispor os solos precisam ser suficientemente seletivos para separar os materiais desejados e estabelecer no novo solo uma condição física que permita um eficiente fluxo de água e um efetivo desenvolvimento do sistema de raízes da planta. Em alguns casos, conforme o local, os solos recuperados são mais secos que os originais. Nesses solos, as raízes ficam confinadas às fraturas de ressecamento, não explorando grande parte do volume do solo. Ficam com aspecto achatado ou retorcido, com o solo consistindo de massas densas de alta resistência. Isso é resultado de uma compactação por tráfego de máquinas durante a construção do solo ou não destorroamento do solo das camadas profundas. Um equipamento muito utilizado é o scraper, pois pode depositar camadas finas de solo, embora acabe compactando-o. O pior tipo de compactação é o de finas camadas altamente compactadas (que serviram de pista) intercaladas. Esses solos têm baixa capacidade de armazenamento de água e

impossibilitam a formação de um sistema de raízes adequado. A umidade, quando da compactação, tende a formar um solo muito firme para formação de raízes. O problema da compactação pode ocorrer com trator de lâminas também, embora o peso seja melhor distribuído sobre as esteiras. Uma forma de evitar a compactação seria trabalhar com o solo seco, o que muitas vezes é inviável em regiões tropicais.

Segundo WILLIAMS ET AL. (1990), a camada fértil do solo varia conforme o local. É a camada onde se concentram os teores mais altos de matéria orgânica, micro e mesofauna do solo e nutrientes minerais. Em termos pedológicos, são os horizontes O (se existir no local) e A. Nos perfis onde A é raso, pode incluir-se o horizonte B e até parte do C, se o B também for raso ou inexistente. Na prática isso corresponde a uma camada de 10 a 30 cm de espessura. A camada fértil pode estar estocada em cordões ou leiras de não mais que 1,5 m de altura ou pilhas individuais de 5 a 8 m³, também não passando da mesma altura. Durante a remoção, evitar a mistura com o subsolo (horizonte C). A camada fértil poderá ser aproveitada imediatamente ou estocada em depósitos já previamente projetados. O prazo de estocagem não deve passar de dois anos (o que é pouco tempo para mineração, diga-se de passagem).

A cobertura das pilhas por vegetação morta, serapilheira da mata (material solto na superfície da mata, composto de folhas e galhos em decomposição, repleto de microorganismos, insetos e sementes) ou plantio de gramíneas/ leguminosas evita a lixiviação e insolação. Os locais das pilhas devem ser previamente preparados por obras de drenagem e as pilhas protegidas para evitar perdas de solo e nutrientes por erosão e lixiviação.

A camada fértil de solo deve ser colocada em espessura adequada, regulada conforme a topografia, recobrando toda superfície, inclusive taludes, minimizando a movimentação de equipamentos para evitar a compactação. Devem ser feitos trabalhos de controle de erosão. É recomendável, ao longo do sistema de drenagem,

construir pequenos tanques ou bacias de sedimentação. O uso de barreiras de amortecimento, filtros e dissipadores de energia são técnicas importantes no controle da erosão. A compactação de solos é indesejável, e nesses casos deve ser feita subsolagem com escarificador numa profundidade de 40 cm.

O solo é o meio necessário para revegetação e deve ser propício ao crescimento das plantas. Os solos são formados ao longo de períodos de tempo geológicos com materiais como rochas, areias e argilas. Esses materiais por si só são pobres para o crescimento de plantas. Deve haver a atuação de intemperismo, processos biológicos e lixiviação antes que esses solos se tornem produtivos. O novo solo da área minerada deve passar por um processo de intemperismo e aumento de matéria orgânica para formar um solo jovem. Esse solo recém-formado usualmente fica em equilíbrio com o ambiente local, e suas características mudam pouco uma vez que o equilíbrio esteja estabelecido. Esse estágio caracteriza o solo como maduro. Existem casos em que a recuperação não é somente repor o solo anterior à mineração, que pode estar esgotado. O mais correto é avaliar quais circunstâncias em que o solo pode ser repostado ou não, ou quando se pode misturar o solo com o estéril.

A erosão do solo não pode ser totalmente eliminada. Na verdade alguns tipos de erosão ajudam a formar solos reduzindo a granulometria das partículas ao longo do tempo. Essa forma de construção do solo é natural e provavelmente em equilíbrio com as forças naturais destrutivas do solo.

O solo que sustenta os ecossistemas terrestres, além da fragilidade física e química, tem baixa capacidade de formação e regeneração (pedogênese), levando milhares de anos para ser formado (MASCHIO ET AL. (1992)). No rizoplane, os microorganismos liberam ácidos que decompõem minerais presentes no solo e nas rochas e secretam sideróforos que complexam íons metálicos e promovem reações de oxidação e redução de elementos químicos. Degradada pelos microorganismos, a matéria orgânica favorece a manutenção de íons metálicos em solução e a

mitigação de suas toxidades, assim como a capacidade de intercâmbio iônico e retenção de água nos solos.

O valor do solo orgânico no processo de recuperação frequentemente não é reconhecido. Talvez sua maior importância seja a presença de microorganismos. Esse solo deve ser armazenado ou transferido diretamente para a área preparada para a recuperação.

Uma vantagem de haver planejamento prévio é que a recuperação do solo, que toma tempo, pode ser feita ao longo dos 10, 20 ou 30 anos restantes de vida da mina.

DOLLHORF e POSTLE (1988) abordam os métodos de análise física de solos de mina e capeamento, considerando sua importância na reconstituição do solo de mina. A caracterização dos solos geralmente inclui uma longa lista de parâmetros químicos, mas poucos parâmetros físicos. Entretanto a vegetação após a recuperação é limitada mais por efeitos físicos que por problemas químicos. O conhecimento prévio antes da mineração da natureza física dos materiais pode minimizar problemas de solo da mina, tais como deslocamento catiônico, erosão, formação de crostas, infiltração, compactação, escorregamento e degradação estrutural.

As características de interesse do solo são as seguintes:

- Propriedades relativas à textura:

- a) distribuição granulométrica e textura: influencia na infiltração, condutividade hidráulica, absorção de água e troca catiônica;
- b) presença de rocha: não é totalmente deletéria. Elas aumentam a absorção de água do solo, reduzem a evaporação, alteram a temperatura do solo e a área

superficial da massa de solo. Uma mistura de fragmentos grandes e pequenos pode reduzir a porosidade;

c) mineralogia da argila: desempenha papel importante nos solos de mina. Alto teor de argila pode apresentar ruptura, quebramento, porcentagem alta de saturação, infiltração reduzida e condutividade hidráulica. Solos com alta esmectita são suscetíveis a "piping" (tipo de erosão onde o subsolo é erodido deixando túneis de diversos diâmetros).

d) densidade e porosidade: a densidade é função da textura e do tipo de equipamento para revolver o solo e de aplicação de solo de cobertura. Tratores e "scrapers" aumentam a densidade dos solos, acarretando diminuição da porosidade, infiltração, absorção e penetração da raiz. Todos esses efeitos restringem o crescimento das plantas. Um parâmetro essencial para determinar a porosidade é a densidade de partícula, podendo ser determinado por um picnômetro.

e) cor: também é um parâmetro físico, que pode ser usado para estimar o potencial de acidez de rochas e solos de mina. Uma ferramenta é o uso da escala de cores Munsell Soil Color Charts.

- Água da mina:

a) umidade

b) água disponível para o vegetal: o solo deve reter água suficiente para a planta;

c) infiltração: influencia na vazão de água de superfície. Baixa taxa de infiltração indica o potencial para altas vazões de "run-off" e conseqüente erosão e não recarregamento de água de solo da mina. A infiltração é influenciada por muitos fatores, incluindo textura do solo, porosidade, distribuição dos tamanhos dos poros, estrutura, água preexistente, matéria orgânica e teor de sódio.

d) condutividade hidráulica: ou permeabilidade, é a característica do solo que permite a água ou o ar se movimentarem internamente. É influenciada pelo tamanho de partícula, textura, estrutura, matéria orgânica, teor de óxido de ferro, mineralogia da argila, teor de sódio, concentração de sal e das práticas de gestão envolvidas. Geralmente a condutividade de um solo de mina é mais baixa que os

solos naturais devido à perda de estrutura, baixo teor de matéria orgânica e compactação por "scrapers" e tratores.

- Estabilidade do solo da mina:

a) estrutura: é o arranjo das partículas, separadas por planos de fraqueza. Teores altos de argila e matéria orgânica favorecem a formação de estrutura. O desenvolvimento da estrutura diminui a erodibilidade e aumenta o espaçamento de poros, aumentando assim a infiltração e a permeabilidade. Os solos de mina geralmente mostram pouca ou nenhuma estrutura de solo no seu perfil. Solos de mina mais antigos podem exibir estrutura fraca no horizonte superficial devido ao crescimento de raízes, umedecimento e ressecamento, e enriquecimento orgânico. O solo de cobertura após removido e repostado inferiormente proporciona material de melhor qualidade na zona da raiz, mas destrói a estrutura natural do solo. Estudos em Montana, EUA, indicam que a estrutura começa a aparecer em 50 anos.

b) estabilidade do agregado: os agregados do solo são os blocos constituintes da estrutura do solo. Caso sejam desagregados há uma perda geral nas propriedades, com erosão acelerada e encrustamento da superfície, inibindo a germinação da planta;

c) consistência: forças de adesão e coesão a várias unidades. Inclui propriedades de resistência à compressão, atrito, friabilidade, plasticidade, etc. Esse parâmetro é importante para avaliar a adequação do solo para preparação do leito de sementes, suscetibilidade à erosão ou suporte de tensão. Podem ser definidos pelos limites de Atterberg;

d) potencial de empolamento ("shrink-swell"): suscetibilidade do solo de ter seu volume alterado devido à variação de umidade. Se isso for muito significativo pode haver danos às raízes e perda de estrutura;

e) encrustação: devido ao impacto da chuva e a energia do sol, além do ciclo úmido/ seco;

- f) compactação: aumento da densidade devido à aplicação de carga. A umidade também influi, havendo uma umidade em que a compactação é máxima;
- g) potencial de erosão: é o principal fator que nos primeiros anos inibe a recuperação.

Conforme DOLL (1988), o maior dano à produtividade do solo após a mineração é a ruptura da zona de enraizamento. Conseqüentemente, a ênfase no planejamento da recuperação deveria focar mais o restabelecimento de propriedades favoráveis à zona de enraizamento.

O requerimento é de uma zona de raiz não tóxica e não inibidora. Frequentemente o solo pré-mina não está presente na quantidade suficiente ou na qualidade adequada, podendo haver substituição desse material. Essa cobertura deve ser avaliada quanto ao tamanho das partículas, fragmentos de rocha, mineralogia da argila, condutividade hidráulica, etc.

Quanto à reposição do solo, DOLL (1988) afirma que a regulamentação americana parte da premissa (inexata) que a reposição de solo pós-mina irá recuperar a produtividade pré-mina, sem considerar as mudanças que podem acontecer no material após a recolocação e a possibilidade de usar outros materiais disponíveis para substituição do subsolo.

2.9.2. CONSIDERAÇÕES SOBRE A REVEGETAÇÃO

Para LYLE JR. (1987) a recuperação de minas a céu aberto é frequentemente pensada em termos de revegetação e isso não é sem razão. Uma revegetação planejada controla a erosão, dá condições ao solo de ter uma produção e cria um terreno esteticamente agradável. O objetivo de curto prazo da revegetação é controlar a erosão do solo rapidamente com plantas de crescimento rápido.

A revegetação de uma área drasticamente perturbada, como é a resultante de uma mina a céu aberto, é provavelmente a maneira mais simples de estabilizar o solo. É mais barata que qualquer outra forma de estabilização devido ao efeito contínuo e de longo prazo, além de poder dar ao solo uma produção econômica. A vegetação previne ou reduz a erosão do solo ao prover uma cobertura para o solo, que intercepta a água da chuva. As raízes mantêm as partículas de solo agregadas, não deixando que a água arraste o solo.

No entanto, a revegetação não deve ser encarada como um fim em si mesmo. Outros usos futuros, com ou sem necessidade de revegetação não devem ser desconsiderados sem que tenham sido previamente avaliados.

A revegetação da área minerada dependerá da obtenção dos resultados das etapas precedentes do processo de recuperação do solo. Estas fases devem ser implementadas de uma forma cronológica e compreendem: recomposição topográfica e da paisagem, restauração das propriedades físicas, químicas e biológicas, além de controle da erosão do solo em tratamento. Dependerá, também, das características e do plano de utilização futura que for proposto para a área ao término de sua exploração, ou seja, o uso futuro do solo.

A preparação da área a ser revegetada deve incluir, segundo BARTH (1989):

- escarificação profunda da terra, para atenuar a compactação;
- drenagem da superfície para evitar a erosão;
- aplicação de fertilizantes e matéria orgânica;

Especial cuidado deve ser dado ao nível de nutrientes, com análise química e fertilização. A área deve ser protegida até que as plantas estejam bem estabilizadas (dois anos pelo menos) e o pessoal envolvido esteja treinado.

MASCHIO ET AL. (1992), baseados em trabalhos da EMBRAPA, ressalta que na revegetação com espécies arbóreas, é fundamental a seleção de espécies para um bom resultado. Contudo, no Brasil, o primeiro obstáculo é a falta de inventário florístico que subsidie a seleção de espécies potenciais para a recuperação, além da falta de dados ecológicos e silviculturais das espécies nativas para a produção de mudas. A semeadura direta usando-se uma mistura de espécies poderia ser uma alternativa, mas as diferentes épocas de maturação e dormência dificultam o processo. As opiniões sobre a utilização de espécies nativas ou exóticas divergem. Mudanças originadas de matas próximas podem vir a ser uma boa alternativa, desde que retiradas espaçadamente de modo a não afetar a sucessão natural. O autor, levantando trabalhos publicados, chegou às espécies que se destacam como potenciais para recuperação de áreas degradadas: *Mimosa* spp., *Acacia* spp., principalmente.

3. PRINCIPAIS CONDICIONANTES GEOLÓGICO-GEOTÉCNICOS INTERVENIENTES

3.1. INTRODUÇÃO

Para que seja possível um uso futuro planejado da área é necessário que as diversas estruturas geradas na atividade de mineração tais como taludes de cavas, pilhas de estéril e barragens de rejeito mantenham níveis adequados de estabilidade e segurança a longo prazo. Para tanto, o conhecimento dos condicionantes geológicos-geotécnicos é fundamental para a avaliação e proposição de medidas mitigadoras relacionadas à estabilidade dessas áreas, sob pena de ocorrerem os seguintes problemas geotécnicos a longo prazo:

- escorregamento de taludes da cava e pilha de estéril;
- quedas de blocos;
- transbordo ou rompimento da barragem de rejeito;
- exposição inadequada do terreno à erosão;
- assoreamento devido à erosão das áreas lavradas e das áreas de deposição, gerando grandes volumes de sólidos em suspensão e contaminando as águas do meio externo;
- extravazamento descontrolado de águas acumuladas na cava;

A drenagem deve ser projetada para que se evite situações de risco como processos erosivos e instabilizações, quando a área estiver ocupada com outras atividades.

As estruturas geradas pelas atividades mineiras que serão analisadas são as cavas (áreas lavradas), as pilhas de estéril e barragens de rejeito (áreas de deposição). Os problemas geotécnicos envolvidos na recuperação dessas áreas são, a grosso modo, relacionados à estabilização de taludes em cavas e pilhas de estéril, e à estabilidade das barragens de rejeito. Outros problemas como o estudo do adensamento e

recalques em barragens de rejeito e em pilhas de estéril também podem ser de interesse, conforme o uso futuro pretendido.

Basicamente, a sequência dos trabalhos geotécnicos aplicáveis à recuperação pode ser resumida nas seguintes etapas:

- **Estudos de investigação** (diagnóstico/investigação detalhada): Podem ser alvo de estudos nessa fase a pluviometria, topografia e interferências. Recomenda-se topografia por seção, não por irradiação, para não se perder detalhes, que mesmo pequenos, podem ser significativos.
- **Concepção e elaboração do projeto**: inclui-se aí o estudo e análise de alternativas, escolha da solução e anteprojeto, projeto básico, projeto executivo. O projeto deverá inserir-se ao projeto de recuperação como um todo, visando otimizar as obras do ponto de vista estético, econômico e de segurança, e em harmonia com as demais etapas da recuperação.
- **Execução**: deve-se considerar a adequação do projeto à realidade do maciço e com fiscalização adequada;
- **Manutenção e operação das obras**: como em toda obra, deve-se cuidar da manutenção das estruturas, drenagens, etc.

3.2. PROCESSOS DE INSTABILIZAÇÃO

Os processos de instabilização mais sujeitos a ocorrer nas áreas degradadas pela mineração em geral são:

- **Erosão**: laminar, em sulcos, voçorocas, ou erosão interna (piping) em barragens;
- **Escorregamento**: translacionais, rotacionais ou em cunha (plana ou tridimensional);
- **Quedas e rolamentos**: quedas de blocos (solo e rocha) ou rolamento de blocos;
- **Escoamentos**

- Subsidiências

- Recalques: em barragens de rejeito e pilhas de estéril;

Os problemas típicos que ocorrem nas estruturas analisadas estão, portanto, em sua maioria, intimamente ligados aos problemas de instabilizações de taludes. À partir de HOEK (1998), pode-se resumir esses problemas da seguinte forma:

Tabela 3.1. Tipos de instabilizações de taludes nas áreas degradadas na mineração à céu aberto


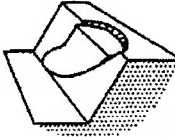
ESTRUTURA	PROBLEMAS TÍPICOS	PARÂMETROS CRÍTICOS	MÉTODOS DE ANÁLISE	CRITÉRIOS
 <p>Landslides.</p> <p>ÁREAS DE OCORRÊNCIA: - cavas - pilhas de estéril - barragens de rejeito</p>	- rupturas complexas em superfícies circulares	<ul style="list-style-type: none"> • presença de falhas regionais • resistência ao cisalhamento dos materiais ao longo da superfície de ruptura • distribuição de água subterrânea no talude, particularmente em resposta à chuva ou submersão do pé do talude • potencial carregamento decorrente de terremoto 	<p>- métodos de equilíbrio limite para superfícies não circulares podem ser usados para estimar variações no Fator de Segurança mediante mudanças no perfil do talude ou da drenagem</p> <p>- métodos numéricos como elementos finitos ou análise de elementos discretos podem ser usados para investigar os mecanismos de ruptura e o histórico dos deslocamentos do talude</p>	<p>- o valor absoluto do Fator de Segurança pouco significa, mas a velocidade da taxa de mudança do fator pode ser usada para julgar a efetividade da medidas mitigadoras</p> <p>- Monitoramento de longo prazo dos deslocamentos de superfície e subsuperfície do talude é o único meio prático de avaliar o comportamento do talude e das medidas mitigadoras</p>
 <p>Soil or heavily jointed rock slopes.</p> <p>ÁREAS DE OCORRÊNCIA: - cavas - pilhas e estéril - barragens de rejeito</p>	Ruptura circular ao longo de uma superfície conchoidal em solo ou maciços rochosos intensamente fraturados	<ul style="list-style-type: none"> • Altura e ângulo da face do talude • resistência ao cisalhamento dos materiais ao longo da superfície de ruptura • distribuição de água subterrânea no talude • potenciais sobrecarga e carregamento decorrente de terremoto 	<p>Métodos de equilíbrio limite bidimensionais que incluem busca automática da superfície crítica de ruptura são usados para estudos paramétricos do Fator de Segurança.</p> <p>Análises probabilísticas, métodos de equilíbrio limite tridimensionais ou análises numéricas são ocasionalmente usados para investigar problemas de taludes</p>	<p>Fator de Segurança > 1,3 para taludes provisórios com mínimo risco de dano.</p> <p>Fator de Segurança > 1,5 para taludes permanentes com riscos de dano significantes.</p>

Tabela 3.1. (Cont.) Tipos de instabilizações de taludes nas áreas degradadas na mineração à céu aberto

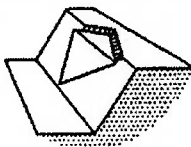
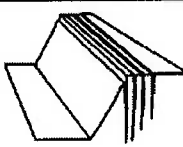
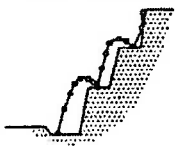

ESTRUTURA	PROBLEMAS TÍPICOS	PARÂMETROS CRÍTICOS	MÉTODOS DE ANÁLISE	CRITÉRIOS
 <p>Jointed rock slopes.</p> <p>ÁREAS DE OCORRÊNCIA: - cavas (em rocha)</p>	escorregamento planar ou em cunhas ao longo de um plano de falhamento ou na intersecção de dois planos de falhamento	<ul style="list-style-type: none"> • Altura do talude, ângulo e orientação • Direção e mergulho das estruturas do maciço • distribuição de água subterrânea no talude • potencial carregamento decorrente de terremoto • Sequência de escavação e instalação de suportes 	Métodos de equilíbrio limite que determinam escorregamentos tridimensionais são usados para estudos paramétricos do Fator de Segurança. Análises de probabilidade de ruptura baseados na distribuição das orientações estruturais e tensões de cisalhamento são úteis em algumas aplicações.	Fator de Segurança > 1,3 para taludes provisórios com mínimo risco de dano. Fator de Segurança > 1,5 para taludes permanentes com riscos de dano significantes.
 <p>Vertically jointed rock slopes .</p> <p>ÁREAS DE OCORRÊNCIA: - cavas (em rocha)</p>	tombamento de colunas do maciço rochoso devido à falhamentos paralelos ou quase paralelos à face do talude	<ul style="list-style-type: none"> • Altura do talude, ângulo e orientação • Direção e mergulho das estruturas do maciço • distribuição de água subterrânea no talude • potencial carregamento decorrente de terremoto 	Análise grosseira do equilíbrio limite de modelos simples de blocos são úteis para estimar potenciais tombamentos	Não há um critério específico, mas a percepção do risco de tombamento normalmente é óbvia. O monitoramento dos deslocamentos do talude é o único meio prático de determinar o comportamento do talude e das medidas mitigadoras.
 <p>Loose boulders on rock slopes.</p> <p>ÁREAS DE OCORRÊNCIA: - cavas (em rocha)</p>	Escorregamento, rolamentos e quedas de rochas soltas ou de matacos no talude	<ul style="list-style-type: none"> • geometria do talude • presença de blocos soltos • presença de estruturas geológicas favoráveis ao desprendimento de blocos 	Cálculo de trajetória dos blocos baseados na mudança e velocidade a cada impacto geralmente é adequada.	A localização, a quantidade e a distribuição do maior número de blocos dá indicação da magnitude do problema e da efetividade das medidas mitigadoras, tais como entelamento, cercas e barreiras no pé do talude

Tabela 3.1. (Cont.) Tipos de instabilizações de taludes nas áreas degradadas na mineração à céu aberto

ESTRUTURA	PROBLEMAS TÍPICOS	PARÂMETROS CRÍTICOS	MÉTODOS DE ANÁLISE	CRITÉRIOS
 <p>Zoned fill dams.</p> <p>ÁREAS DE OCORRÊNCIA: - barragens de rejeito</p>	<p>ruptura circular ou quase circular da barragem, particularmente durante um rebaixamento rápido. Ruptura pela fundação ao longo de camadas pouco resistentes, piping e erosão do corpo da barragem</p>	<ul style="list-style-type: none"> • presença de zonas de material fraco ou permeável na fundação • resistência ao cisalhamento, durabilidade, granulometria dos materiais de construção da barragem, particularmente do filtro • eficácia do sistema de drenagem • estabilidade dos taludes das margens 	<p>Percolação de água deve ser analisada para determinar pressões neutras e distribuição das velocidades através do corpo da barragem. Métodos de equilíbrio limite devem ser usados para estudos paramétricos da estabilidade.</p>	<p>Fator de Segurança > 1,5 para nível cheio e percolação sob controle; > 1,2 para a máxima cheia provável e percolação sob controle; > 1,0 para nível cheio e percolação sob controle e máximo carregamento horizontal pseudo-estática sísmica</p>

As instabilidades de taludes têm agentes que as principiam, que podem ser classificados em:

Agentes predisponentes:

- geológicos (litológicos, estruturais e geomorfológicos)
- geométricos (inclinação e altura)
- ambientais (climáticos)

Agentes efetivos:

- preparatórios (pluviosidade, erosão, congelamento e degelo, variações térmicas, dissolução química, percolação de água)
- deflagatórios (chuva intensa, vibrações, ação antrópica, fusão de gelo e neve)

Desse modo, para cada tipo de talude, pode-se relacionar os seguintes agentes responsáveis por instabilizações:

Tabela 3.2. Agentes da instabilização de taludes

<i>Tipo de talude</i>	<i>Agentes deflagatórios</i>	<i>Agentes preparatórios</i>
a) Taludes de corte e escavações (cava)	- execução do corte (altura excessiva) - chuvas intensas - incidência de águas pluviais/despejos - trincas de tração - vibrações, sismos - erosão	- execução do corte - chuvas prolongadas - erosão - trincas de tração
b.1) Taludes em aterros (barragens de rejeito, pilhas de estéril) com ruptura pelo corpo do aterro	- execução do corte (altura excessiva) - chuvas intensas/ prolongadas - erosão - rebaixamento rápido - vibrações/ sismos - incidência de águas pluviais/despejos	- incidência de águas - erosão - compactação deficiente - drenagem
b.2) Taludes em aterros (barragens de rejeito, pilhas de estéril) com ruptura pela fundação do aterro	- sobrecarga pelo aterro - pressões neutras (tamponagem de drenagens naturais) - chuvas intensas/ prolongadas - rebaixamento rápido - vibrações/ sismos	- execução da obra (deficiências diversas) - drenagem deficiente (colmatação) - chuvas prolongadas - corrosão de armaduras, telas e tirantes (se houver) - degradação de outras partes das obras

As causas da instabilização podem ser internas (diminuição da resistência devido ao intemperismo), externas (devido à sobrecarga, vibrações), ou intermediárias.

A vegetação, de forma geral, tem efeito estabilizador, atuando no balanço hídrico, travamento do solo pelas raízes, proteção contra erosão, mas pode apresentar o efeito contrário, na medida em que a massa vegetal é uma sobrecarga no talude.

Os mecanismos associados à instabilização de taludes são:

- elevação do nível de água: acarreta resistência menor do solo (afetando coesão e ângulo de atrito) devido à saturação e aumento da pressão neutra. O efeito das chuvas precedentes é importante;
- infiltração em encostas com solos gradualmente menos permeáveis;
- vibrações/abalos sísmicos em encostas com solos saturados (detonação em chuvas é fator de risco);
- deterioração dos parâmetros de resistência mecânica do material;

- drenagens em áreas urbanas (especialmente favelas), devendo ser superdimensionadas por causa do lixo;

3.3. INVESTIGAÇÕES GEOLÓGICO-GEOTÉCNICAS

Devem ser identificados os problemas regionais (por exemplo, na mineração, a cava como um todo) e os problemas locais (um talude específico, um setor da cava, por exemplo). Em função da caracterização local ou regional passa-se para enfoques distintos de investigação da estabilidade de taludes.

- Problemas Locais:

No caso dos problemas específicos, seguem-se as fases:

- o levantamento topográfico, em geral de má qualidade para terrenos virgens (via de regra não aparecem matacões, ravinas), deve ser feito se possível por seção, em escala 1:200 ou 1:500;
- geologia de geotecnia: localização e inserção no contexto (rochas, tipo de solo), em mapas geológicos, cartas geotécnicas;
- documentação fotográfica: se disponível de épocas diferentes, são interessantes para análise;
- inspeção cuidadosa: através de visitas detalhadas, fotografias, tentando identificar tipos de instabilidade, mecanismos, interferências e restrições.
- programação da investigação a ser realizada: topografia adicional (topografia específica para geotecnia, mais refinada); sondagens; poços ou trincheiras de inspeção; amostragem, ensaios in situ;
- tipos de investigação:
 - a) sondagens: podem ser a trado, a percussão ou rotativas; definição de solos (tipos), profundidades, presença de nível de água, obstruções;
 - b) escavações exploratórias: poços de inspeção, trincheira, galeria, tubulões;
 - c) amostragem: deformada ou indeformada em solo, testemunhos em rocha;

d) ensaios in situ: principalmente SPT (solos), ensaios de permeabilidade, métodos geofísicos;

No caso das áreas degradadas na mineração algumas dessas informações podem ser depreendidas do histórico de operação da mina.

- Problemas Regionais:

O enfoque nesses casos deve ser outro. Não adianta aprofundar e detalhar a investigação local. É necessário obter informação abrangente e a custo compatível, portanto deve-se aplicar técnicas de alcance extensivo.

- a topografia é na escala de 1:5000, 1:10000;
- estudo geológico, geomorfológico, aerofotogrametria, obtenção de dados de morfologia, características estruturais importantes, áreas com instabilizações (atuais ou pretéritas, durante a vida da mina);
- geofísica: ordem de grandeza dos capeamentos do solo, principais contatos geológicos, posição do nível de água regional;
- outras fontes: mapas e cartas geotécnicas (se disponíveis), vista aérea;

- Instrumentação:

A instrumentação visa detectar movimentação na fase de definição do projeto e após, para monitoração da execução da obra e seu comportamento a longo prazo.

O tipo de instrumentação a ser aplicado consiste de:

- medidores de deslocamentos: marcos superficiais (para controle topográfico dos taludes, por exemplo), extensômetros, fissurômetros (medição de aberturas de fraturas no maciço), medidores de recalque (recalques resultado de adensamento de barragens de rejeito, por exemplo).
- medidas de deformação: deformímetros, inclinômetros (importante em taludes para detectar a superfície de movimentação).
- medidas de carga: carga em tirantes, cargas em estroncas
- medidas de pressão neutra: piezômetro tipo Casagrande, medidor de N.A., piezômetro de máxima;

3.4. PARÂMETROS GEOLÓGICO-GEOTÉCNICOS

Basicamente, os parâmetros geológico-geotécnicos são relativos às estruturas, presença de água de superfície e subterrânea e estado de sanidade do maciço, afetando seu comportamento como um todo. Juntamente com a geometria do talude (altura e inclinação), seja em rocha ou material inconsolidado, esses parâmetros determinam a estabilidade do maciço.

- Fatores geométricos:

No caso de rupturas localizadas, a altura e o ângulo de inclinação da bancada são os fatores mais importantes. Nos casos de rupturas profundas em todo o talude, a análise deve considerar a probabilidade de ruptura de grandes cunhas e rupturas planas quando houver condicionamento estrutural definido, ou ainda rupturas circulares quando o maciço possa ser considerado suficientemente homogêneo para tal. A análise deve ser realizada para um conjunto de bancadas e para o talude final, considerando uma linha de inclinação média. A análise deve ainda levar em conta a possível existência de uma fenda de tração no topo do talude.

- Estruturas:

São feições singulares no interior do maciço, podendo ser, no caso dos maciços rochosos ou solos estruturados, de origem tectônica ou oriunda de alívio de tensões, tais como falhas, fraturas, xistosidades, planos de acamamento, etc. Trata-se de um condicionante geológico muito importante, pois rupturas em maciços geralmente estão associadas às descontinuidades, que se constituem em planos de fraqueza. Para a avaliação da influência estrutural no maciço é importante conhecer:

a) orientação das descontinuidades: caracterizada pela sua direção e mergulho. Na maioria das vezes ocorrem famílias de juntas ou falhas, que são identificadas

plotando-se num diagrama Schmidt-Lambert as diversas descontinuidades investigadas. Com esse levantamento pode-se definir possíveis áreas sujeitas a deslizamentos ao longo de falhas ou de cunhas geradas pela intersecção de descontinuidades, conforme a geometria do talude, por exemplo.

b) espaçamento: é a distância entre descontinuidades, indicando o estado de fraturamento do maciço, quantificado por parâmetros como o RMR (Rock Mass Rating) e outros.

c) rugosidade: indica as irregularidades e ondulações ao longo dos planos de descontinuidade, influenciando no ângulo de atrito.

d) abertura: é a espessura da descontinuidade, podendo estar mineralizada ou preenchida com água, argila ou ar.

e) material de preenchimento e grau de alteração das paredes.

As descontinuidades devem, na medida do possível, ser avaliadas quanto à resistência ao deslocamento (ângulo de atrito).

- Presença de água:

O nível de água é, em muitos casos, determinante em estabilidade de taludes em minas a céu aberto, representando o principal fator desencadeador do processo de instabilidade. A pressão neutra em solo pode ocasionar a saturação do maciço e levá-lo ao colapso. Em rocha, a pressão neutra pode reduzir a resistência ao atrito nas juntas ou causar instabilidade por percolação e remoção do material de preenchimento. O talude usualmente acaba servindo como área de descarga de águas subterrâneas, nele ocorrendo forças de percolação que também diminuem os esforços resistentes ao escorregamento.

- Estado de alteração:

O grau de intemperização ou a existência de setores intemperizados no maciço também são condicionantes geológicos que afetam sua resistência. A escavação do maciço pode expor litologias mais suscetíveis ao intemperismo, o que também pode acarretar diminuição da resistência do maciço. Os perfis de intemperismo em

condições climáticas tropicais úmidas favorecem o aparecimento de fenômenos de instabilidade. O resultado é o zoneamento do maciço em horizontes com características diferentes de resistência e permeabilidade.

- Estado de tensões:

Para a análise da estabilidade, os parâmetros geomecânicos mais representativos dos materiais envolvidos são o peso específico aparente (γ, γ_{sat}), coesão (c) e ângulo de atrito (ϕ).

No modelo de Mohr-Coulomb, a tensão de cisalhamento relaciona-se á tensão normal conforme a equação abaixo:

$$\tau = c + \sigma \cdot \operatorname{tg} \phi$$

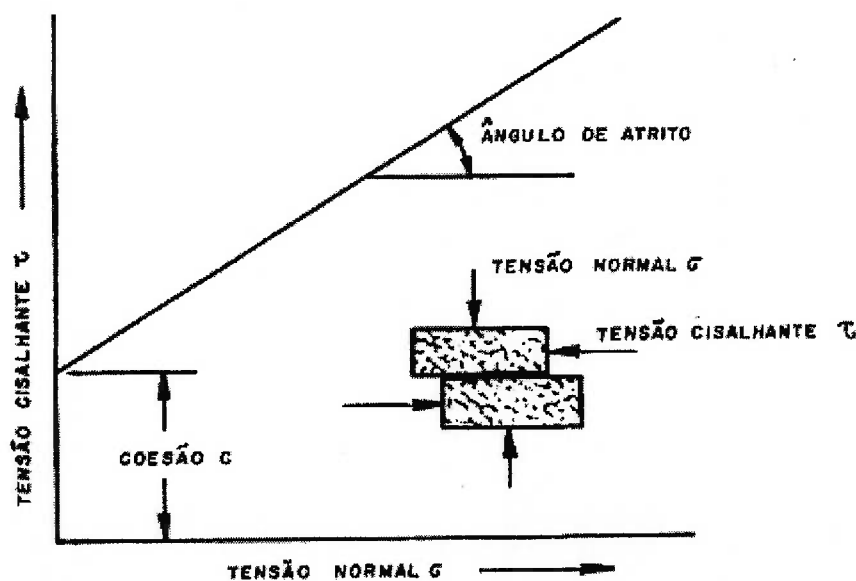


Figura 3.1. Relação entre τ e σ (GUIDICINI; NIEBLE (1976))

No caso de taludes em materiais moles, sem feições estruturais, as características de resistência podem ser definidas por meio de ensaios de compressão simples, triaxiais ou de cisalhamento direto em laboratório.

No caso de maciços rochosos não muito alterados, a resistência global será função das características de resistência dos vínculos que ligam os blocos unitários. Nessas descontinuidades é necessário considerar-se sua geometria, espessura, preenchimento, alteração das paredes, rugosidade, etc. Os módulos de deformabilidade também podem ser um parâmetro interessante, especialmente para a aplicação de modelos matemáticos.

Além dos ensaios em laboratório, outros procedimentos para obtenção desses parâmetros podem ser aplicados:

- ensaios in situ: SPT, CPT, CPTU, piezômetros, dilatômetros
- retroanálises: a premissa básica é que o local já esteja com a instabilidade instalada ou disponha-se de outros locais semelhantes nestas condições (no limite de ruptura, $FS = 1,0$, conhece-se a geometria do talude, a geometria da superfície de ruptura, podendo obter-se c e ϕ).

Características de outros tipos potenciais de instabilização como erosão, rastejo (creep), subsidências, corridas, também devem ser levantadas, se for o caso.

Deve-se também procurar levantar as pressões neutras e condição do fluxo de água, o que é algo complexo, pois redes de fluxo nem sempre se estabelecem, como em maciços fraturados, com caminhos preferenciais de percolação.

No caso dos maciços rochosos ou de solos estruturados, tendo em vista sua heterogeneidade, seu comportamento num dado estado de tensões será governado predominantemente pelas descontinuidades e outros condicionantes geológicos que pelas propriedades da rocha intacta. A ocorrência de colapsos e instabilidades se dá justamente nos planos de fraqueza ou em descontinuidades sob influência de pressão neutra, ou em contatos de litologias diferentes.

A importância dos condicionantes geológicos nesses maciços estruturados se reflete nos modelos de análise de estabilidade de taludes. Uma grande parte dos problemas associados à instabilidade do maciço relacionam-se quase que exclusivamente a esses condicionantes. Exemplos desse fato são os deslizamentos de cunhas, rupturas planas em taludes e queda de blocos em galerias, em virtude de blocos soltos gerados pela intersecção de planos de descontinuidades com a superfície escavada, ou da ação da pressão neutra no maciço. Dessa maneira, na estabilidade de taludes rochosos os principais condicionantes são de natureza geométrica, com forte efeito planar ou tridimensional, resultante do comportamento dos blocos constituintes do maciço face às descontinuidades.

O levantamento desses condicionantes geológicos é, portanto, significativo para uma real compreensão do comportamento do maciço e, conseqüentemente, possibilita configurações mais seguras e econômicas.

3.5. MÉTODOS DE ANÁLISE DA ESTABILIDADE

O objetivo dos cálculos de estabilidade é calcular o fator de segurança ou a probabilidade de ruptura de um dado talude.

Os métodos de cálculo utilizados na estabilidade de taludes são em sua maioria baseados em equilíbrio limite, ou seja, o fator de segurança é uma relação entre o momento limite (resistente) e o momento atuante das forças envolvidas, e se restringem a fenômenos de escorregamento/ ruptura, ao longo de uma única superfície bem definida. Os métodos consideram basicamente quatro tipos de rupturas: ao longo de superfícies planas, circulares, em cunhas e tombamento. Para taludes em solo, os tipos mais comuns são as rupturas planas ou circulares, enquanto que para rochas predominam as rupturas planas, em cunha e tombamento.

A análise da estabilidade de taludes deve considerar:

- As superfícies de ruptura (circular, plana ou em cunha) a serem utilizadas na análise devem ser escolhidas em função das características estruturais do maciço. A partir dos solos estruturados (saprolíticos), as rupturas em cunha começam a ter influência na estabilidade de uma ou mais bancadas;
- A existência de fenda de tração na face superior do talude constatando-se no maciço a existência de estruturas paralelas ou subparalelas à face do talude;
- Os parâmetros geomecânicos a serem adotados no caso das rupturas circulares ou planas e em cunhas geralmente são diferentes (considerar a diferença de ruptura pelo interior do maciço e por planos de fraqueza);
- O histórico da operação da mina, identificando setores instáveis da cava. Alguns dos procedimentos anteriores podem ser dispensados, uma vez que foram considerados, de alguma forma, na estabilidade da cava durante a fase de operação. Há que se considerar, no entanto, que a mina quando em operação, requer uma estabilidade provisória, e que as estruturas herdadas após a exaustão da mina poderão não se apresentar estáveis a longo prazo.

O fator de segurança deve ser encarado como um número relativo, que apenas indica se um determinado talude é mais ou menos seguro que outro. Deve ser superior a 1, pois pode haver possíveis ocorrências de feições geológicas não detectadas nas investigações, além da variabilidade das condições hidrológicas dos maciços e incertezas nos dados de entrada. O valor adotado depende das consequências de uma ruptura e do conhecimento do maciço em particular.

As variáveis de cálculo normalmente consideradas nos métodos são:

c = coesão

γ = peso específico de material

u = pressão neutra

α = inclinação do talude

φ = ângulo de atrito

H = altura do talude

3.5.1. TALUDES EM SOLOS OU MATERIAIS POUCO CONSOLIDADOS

Os métodos para taludes em solo (ou aterro, incluindo-se barragens de rejeito e pilhas de estéril) se classificam entre aqueles que não subdividem a massa e tem geometria simples (Cullman, por exemplo) e aqueles que subdividem a massa em lamelas. Entre esses, a diferença são as hipóteses simplificadoras quanto à superfície de ruptura e às forças interlamelares.

- Método de Cullman:

Esse método, também chamado de cunha plana, admite que a ruptura se dará ao longo de um plano com declividade constante, considerando c e φ únicos. É aplicável a maciços de caráter xistoso. Sua resolução pode ser através de forma gráfica (polígono de forças).

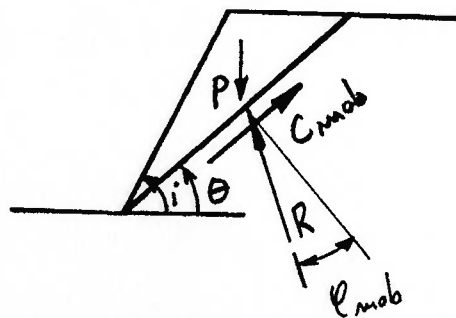


Figura 3.2. Método de Cullman

- Talude infinito:

Aplica-se a superfícies de ruptura planas paralelas à face do talude. O fator de segurança para esse talude é, de modo genérico, definido por:

$$FS = \frac{c + (\gamma \cdot z \cdot \cos^2 \alpha - u) \cdot \operatorname{tg} \varphi}{\gamma \cdot z \cdot \cos \alpha \cdot \operatorname{sen} \alpha}$$

z = altura da camada sujeita a escorregamento

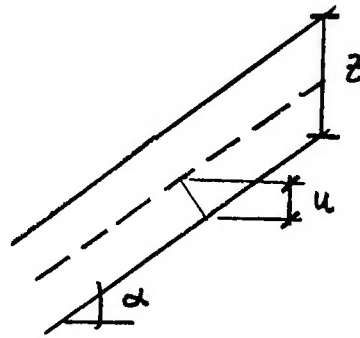


Figura 3.3. Talude infinito

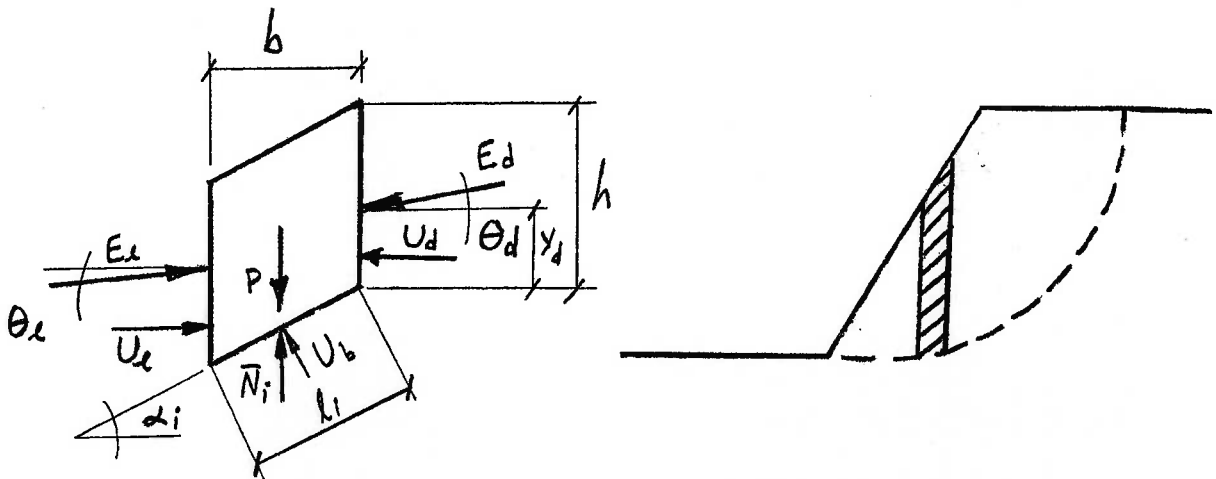


Figura 3.4. Métodos que subdividem a massa em lamelas - caso geral

- Método de Fellenius:

É um dos métodos que subdivide a massa em lamelas. Considera o equilíbrio de forças interlamelares na direção radial, com empuxos interlamelares paralelos à

base, em equilíbrio de momentos, e superfície de ruptura circular. Trata-se de um dos métodos mais usados, por sua simplicidade.

O fator de segurança é definido como:

$$FS = \frac{\sum c \cdot \Delta l + \sum (P \cdot \cos \alpha - U) \cdot \operatorname{tg} \varphi}{\sum P \cdot \operatorname{sen} \alpha}$$

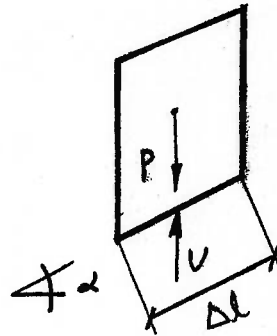


Figura 3.5. Diagrama de forças na lamela - Método de Fellenius

- Método de Bishop simplificado:

Considera que os empuxos interlamelares são horizontais. O método de resolução é iterativo, utilizando a fórmula:

$$FS = \frac{\sum [c \cdot b + (P - u \cdot b) \cdot \operatorname{tg} \varphi] \cdot \frac{1}{M_\alpha}}{\sum P \cdot \operatorname{sen} \alpha}, \text{ onde } M_\alpha = \cos \alpha \cdot \left(1 + \frac{\operatorname{tg} \alpha \cdot \operatorname{tg} \varphi}{FS} \right)$$

- Método de Spencer:

Considera o ângulo dos esforços interlamelares (θ) diferente de zero, mas constante. Também é um método baseado no equilíbrio de momentos e superfície circular de ruptura. É um método de resolução trabalhosa, usualmente aplicado em programas computacionais. O método de Bishop simplificado pode ser considerado um subcaso desse método, com θ igual a zero.

- Método de Morgenstern e Price:

Também é um método baseado no equilíbrio de momentos, superfície circular de ruptura. Considera o ângulo dos esforços interlamelares θ variável. É de solução trabalhosa, viabilizada por cálculo computacional. O método de Spencer pode ser considerado um subcaso desse método.

- Método de Janbu:

Esse método permite considerar superfícies de ruptura não circulares, além de possibilitar cálculo de taludes submersos. Considera somente equilíbrio de forças, não fazendo equilíbrio de momentos. Sua solução se dá de forma iterativa ou por métodos computacionais.

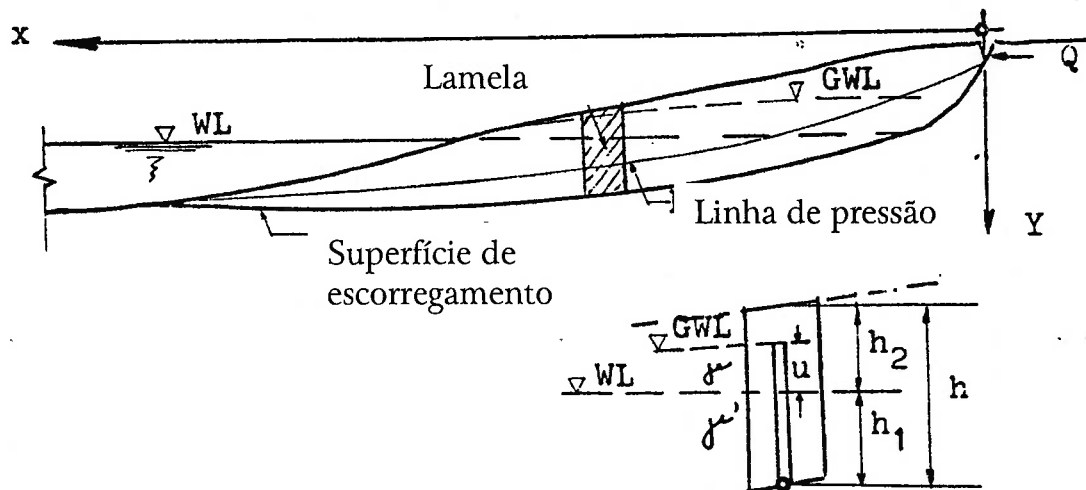


Figura 3.6. Esquema geral do método de Janbu (JANBU (1954))

- Método de Hoek:

Método bastante simples, em que o Fator de Segurança de um dado talude é dado através da intersecção de dois adimensionais X e Y, calculados a partir da tabela da figura 3.6, no ábaco da figura 3.7.

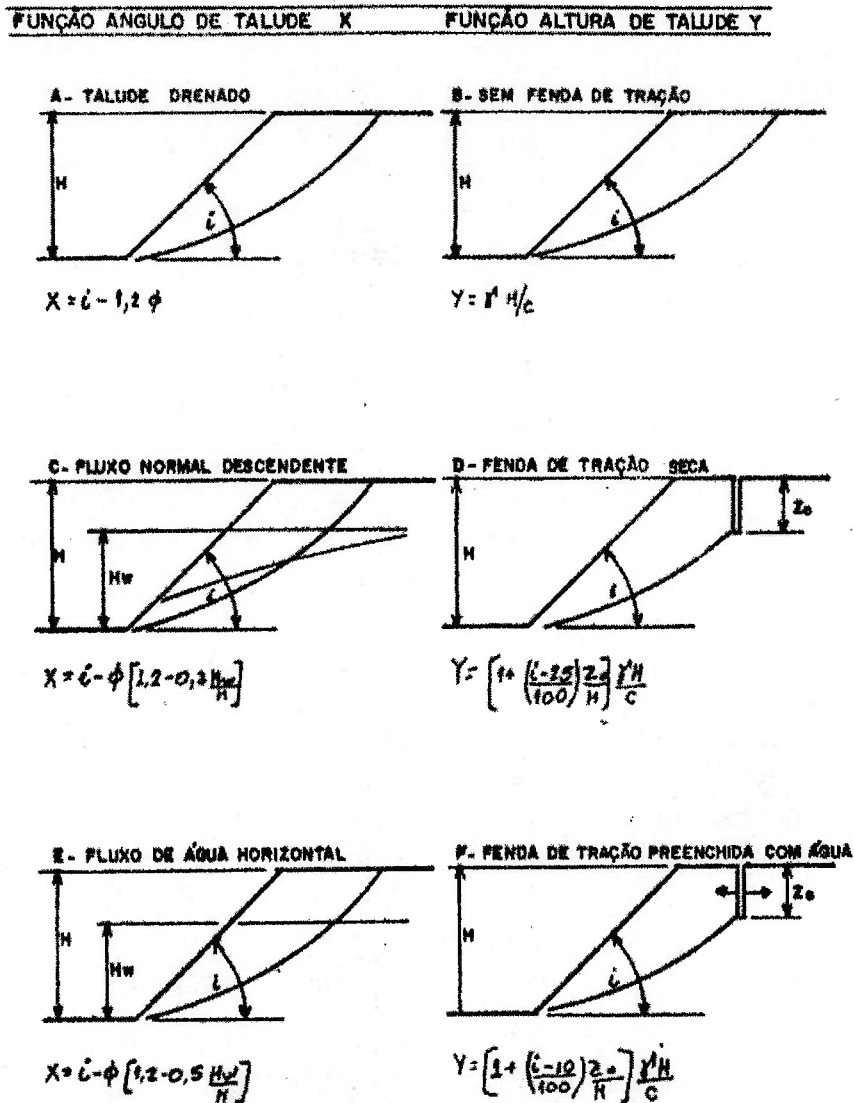


FIG. 17 - ABACO DE PROJETO DE TALUDE 2 - RUPTURA CIRCULAR

Figura 3.7. Adimensionais X e Y do método de Hoek - ruptura circular (HOEK (1972))

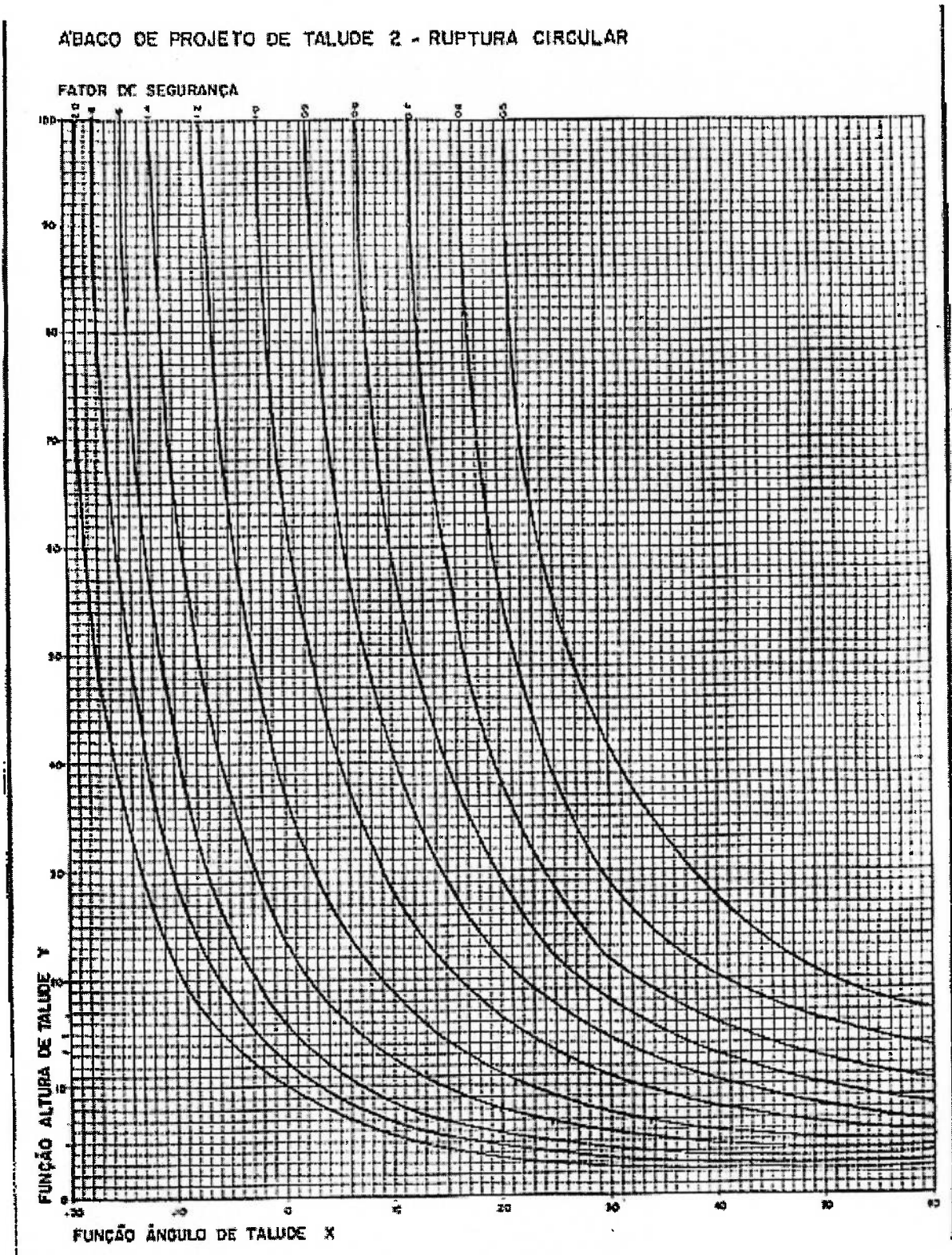


Figura 3.8. Ábaco do Fator de Segurança do método de Hoek - ruptura circular (HOEK (1972))

- Método de Hoek e Bray:

Considera ruptura circular, passando pelo pé do talude. Consiste numa série de ábacos para análises expeditas de estabilidade, compilados a partir de observações de campo. O método possibilita a escolha entre cinco condições diferentes de drenagem para o talude, cada qual correspondendo a um ábaco, onde conhecendo-se os valores de H , γ , ϕ e a inclinação do talude, é possível determinar o fator de segurança.

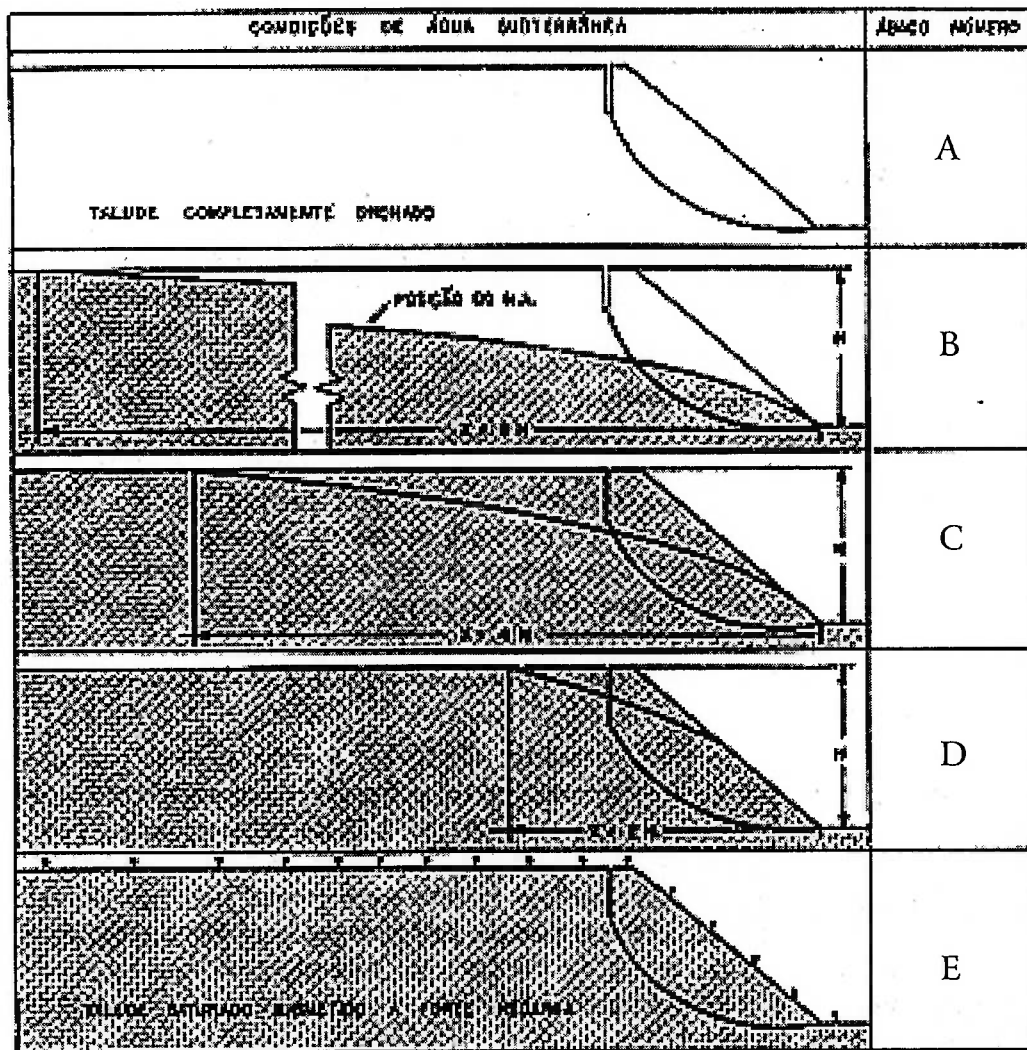


Figura 3.9. Condições de drenagem para os ábacos de Hoek e Bray (GUIDICINI; NIEBLE (1976))

Sendo definidos:

$$\text{Adimensional 1} = \frac{c}{\gamma \cdot H \cdot \text{tg} \varphi}$$

$$\text{Adimensional 2} = \frac{\text{tg} \varphi}{FS}$$

No ábaco (correspondente à condição de drenagem de água), na intersecção do Adimensional 1 (abscissas) e do ângulo do talude, define-se o Adimensional 2 (ordenadas), e daí determina-se facilmente o Fator de Segurança (FS).

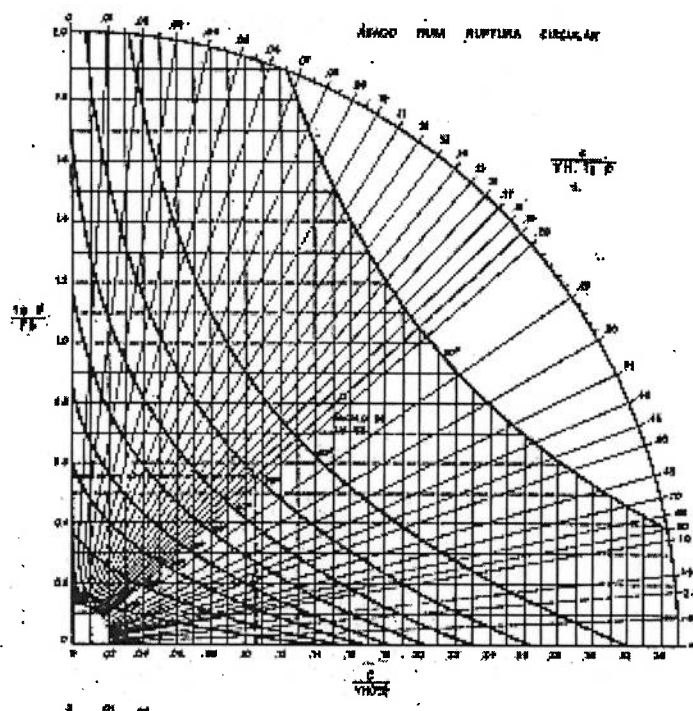


Figura 3.10. Ábaco de Hoek e Bray para ruptura circular - A (GUIDICINI; NIEBLE (1976))

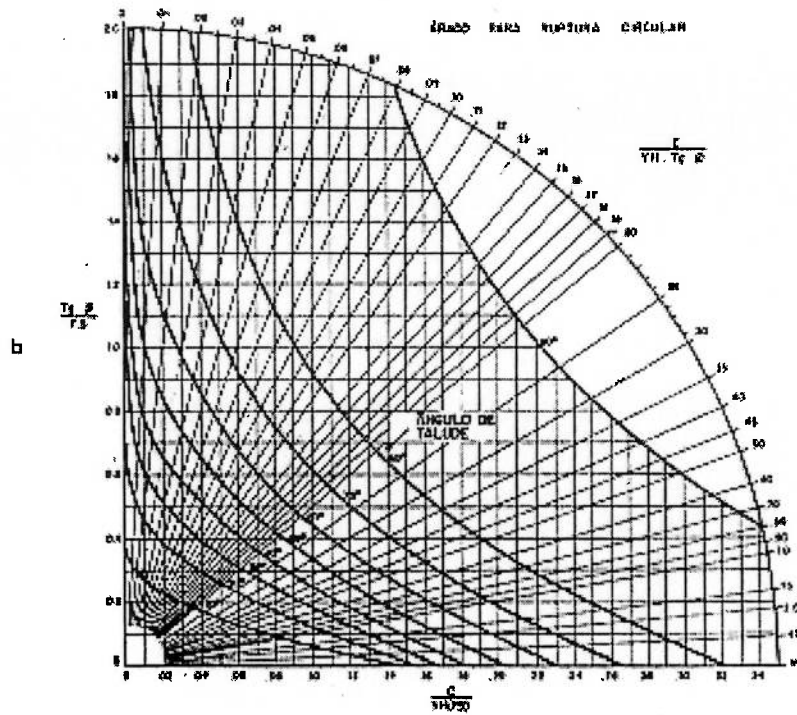


Figura 3.11. Ábaco de Hoek e Bray para ruptura circular - B (GUIDICINI; NIEBLE (1976))

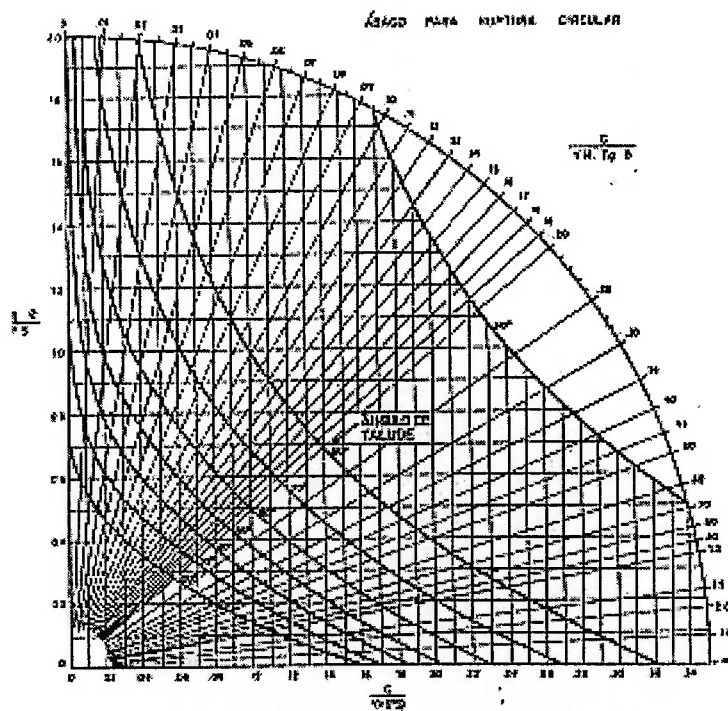


Figura 3.12. Ábaco de Hoek e Bray para ruptura circular - C (GUIDICINI; NIEBLE (1976))

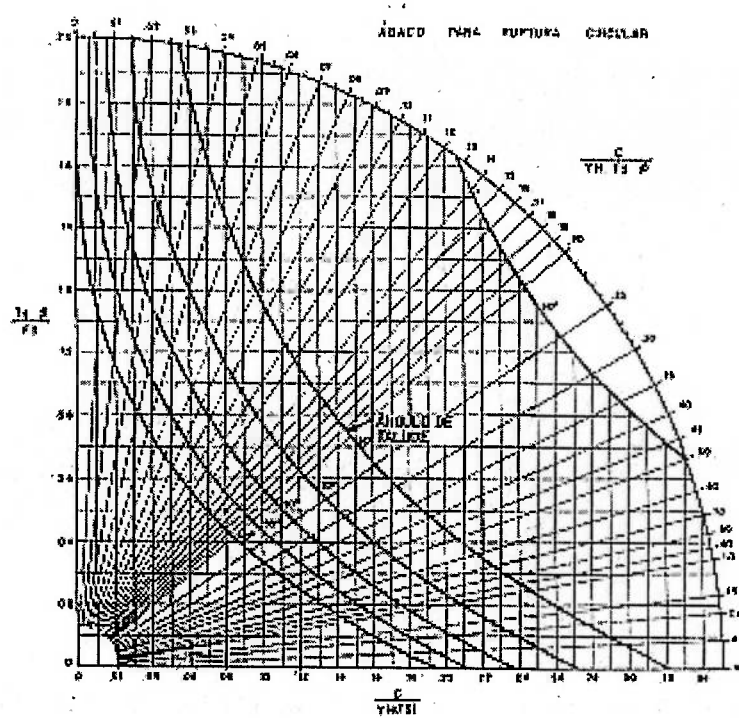


Figura 3.13. Ábaco de Hoek e Bray para ruptura circular - D (GUIDICINI; NIEBLE (1976))

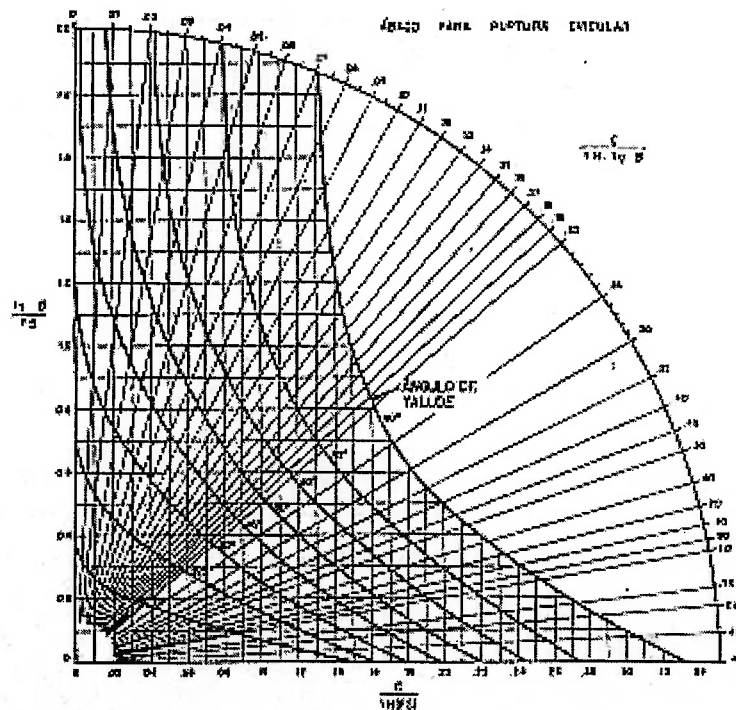


Figura 3.14. Ábaco de Hoek e Bray para ruptura circular - E (GUIDICINI; NIEBLE (1976))

Trata-se de um método também bastante utilizado pela praticidade e rapidez, permitindo analisar grande número de taludes, até mesmo em campo.

3.5.2. TALUDES EM ROCHA

A estabilidade de taludes em rocha depende fundamentalmente das descontinuidades geológicas existentes no maciço, tais como falhas, juntas, planos de acamamento, além das condições hidrológicas. Dessa maneira, na estabilidade de taludes rochosos os principais condicionantes são de natureza geométrica, com forte efeito tridimensional, resultante do comportamento dos blocos constituintes do maciço em relação às descontinuidades.

São aplicados principalmente o método da projeção estereográfica, método de Hoek e método de Hoek e Bray.

- Método de projeção estereográfica:

Esse método, também conhecido como método cinemático de análise, consiste no lançamento dos planos das faces dos taludes e das principais famílias de descontinuidades em estereogramas. A interseção desses planos com as faces dos taludes pode então ser visualizada, e dessa maneira prever se haverá direções críticas na cava em termos de rupturas planas, em cunhas ou tombamentos.

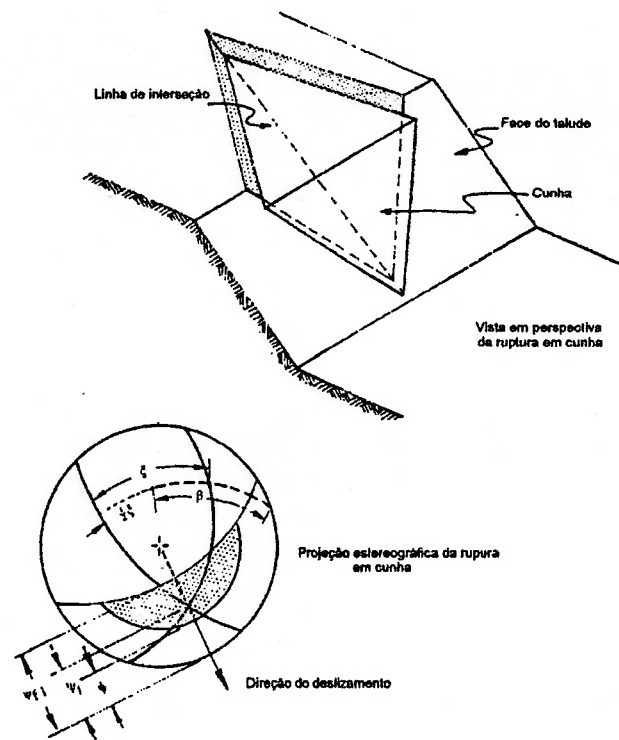


Figura 3.15. Projeção estereográfica da ruptura em cunha (GUIDICINI; NIEBLE (1976))

- Método de Hoek:

Similar ao método para solo. Através do cálculo de dois adimensionais X e Y entra-se no ábaco para achar o fator de Segurança. Apesar de haver métodos mais modernos, é ainda hoje usado pela simplicidade e rapidez.

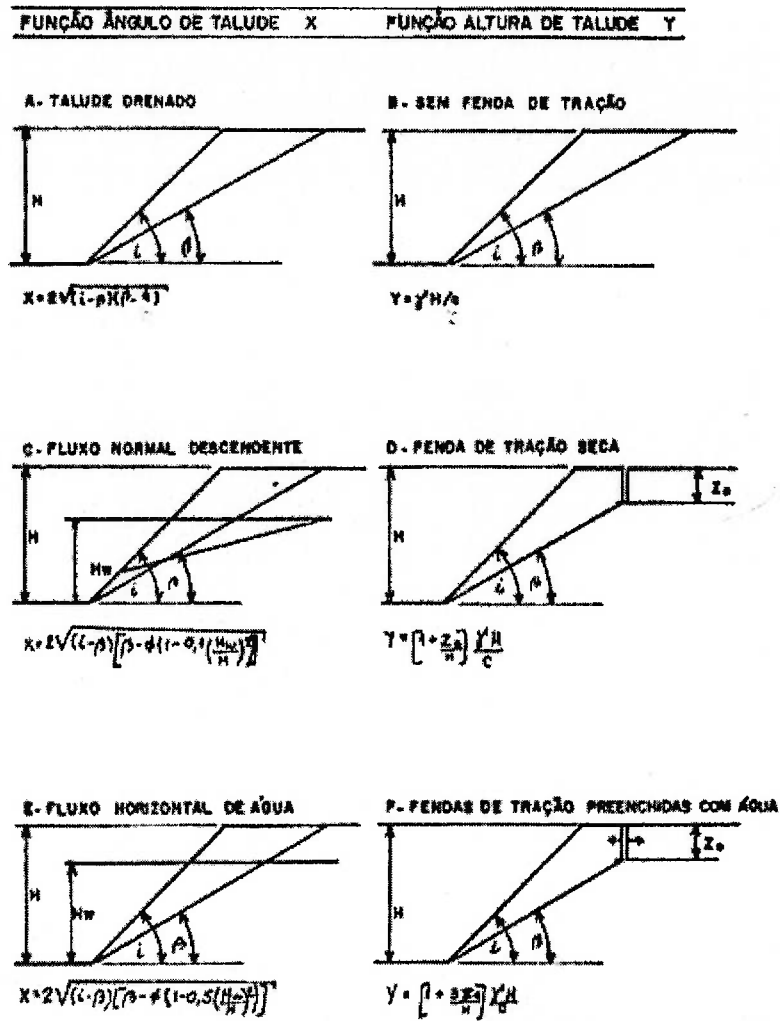


Figura 3.16. Adimensionais X e Y do método de Hoek - ruptura plana (HOEK (1972))

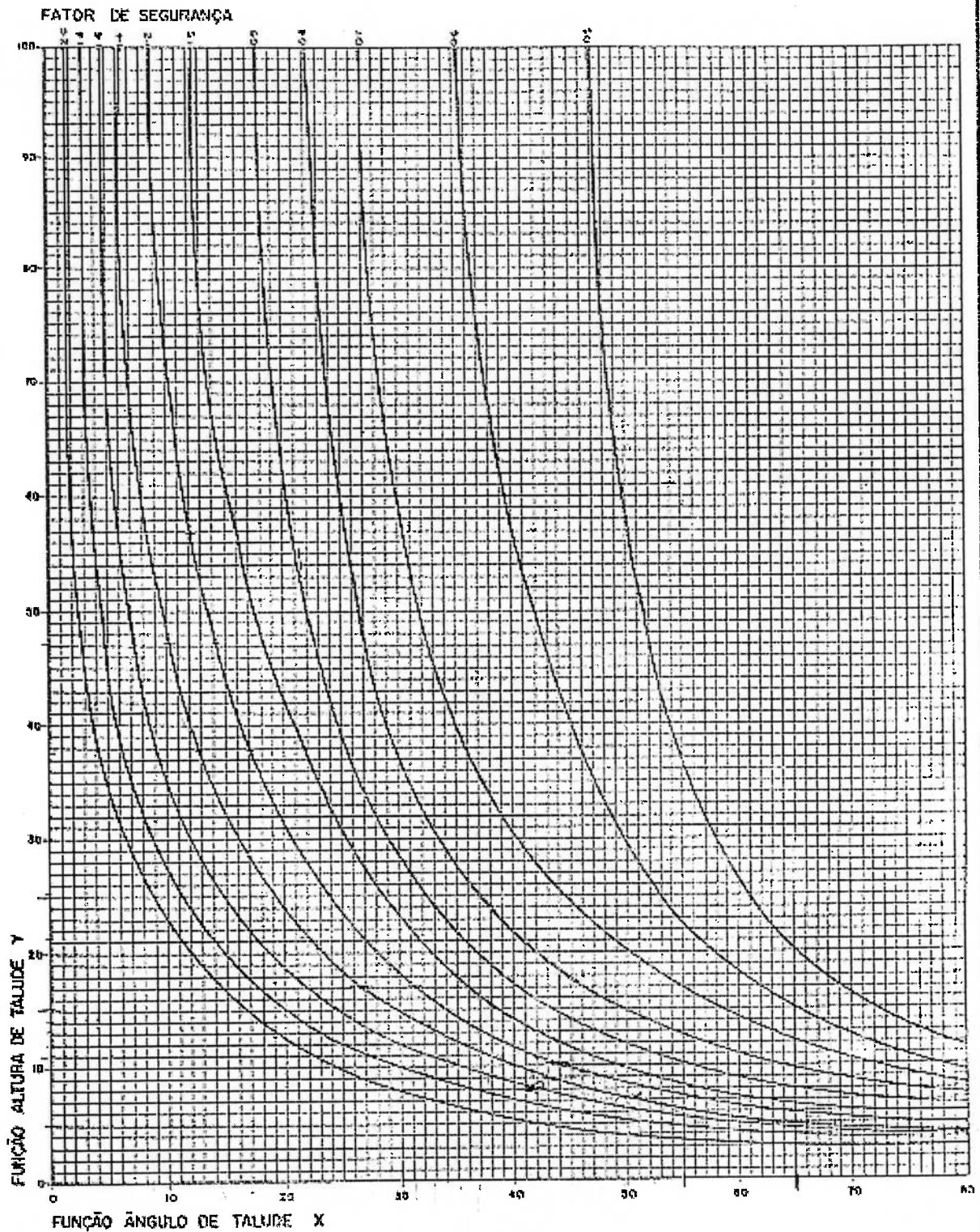


Figura 3.17. Ábaco do Fator de Segurança do método de Hoek - ruptura plana (HOEK (1972))

- Método de Hoek e Bray:

Esse método permite o cálculo, de forma matemática, do fator de segurança. Para rupturas planas, são apresentados três casos: com fenda de tração na face do talude, no topo do talude, e sem fenda de tração.

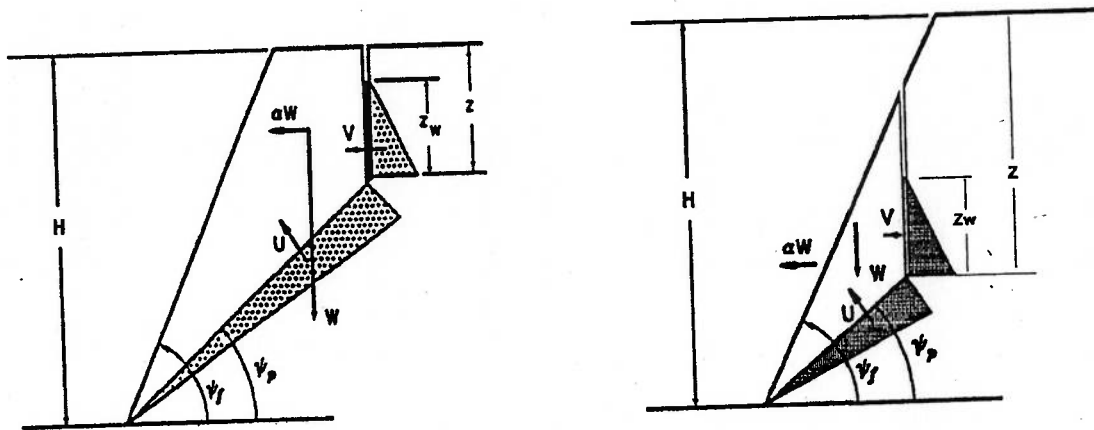


Figura 3.18. Taludes com fenda de tração - método de Hoek e Bray (GUIDICINI; NIEBLE (1976))

A fórmula geral do fator de segurança é expressa por:

$$FS = \frac{c \cdot A + [W \cdot (\cos \varphi_p - \alpha \cdot \sin \varphi_p) - U - V \cdot \sin \varphi_p] \cdot \operatorname{tg} \phi}{W \cdot (\sin \varphi_p + \alpha \cdot \cos \varphi_p) + V \cdot \cos \varphi_p}$$

Onde,

φ_p = ângulo de mergulho da superfície de ruptura

c = coesão ou intercepto de coesão da superfície de ruptura

ϕ = ângulo de atrito da superfície de ruptura

A = comprimento (comprimento x unidade de largura) da superfície

U = força resultante da pressão de água da superfície

V = força resultante da pressão de água na fenda de tração

W = peso do bloco potencialmente instável

α = aceleração horizontal (sismos ou vibrações)

Para taludes com fenda de tração:

$$A = \frac{(H - Z)}{\text{sen } \varphi_p}, U = \frac{\gamma_w \cdot z_w \cdot A}{2}, V = \frac{\gamma_w \cdot z_w^2}{2}$$

$W = \frac{\gamma \cdot H^2 \cdot \left[\left(1 - \left(\frac{Z}{H} \right)^2 \right) \cdot \cot g \varphi_p - \cot g \varphi_f \right]}{2}$, se a fenda de tração interceptar o topo do talude, ou

$W = \frac{\gamma \cdot H^2 \cdot \left[\left(1 - \left(\frac{Z}{H} \right)^2 \right) \cdot \cot g \varphi_p \cdot (\cot g \varphi_p \cdot \text{tg } \varphi_f - 1) \right]}{2}$, se a fenda de tração interceptar a face do talude;

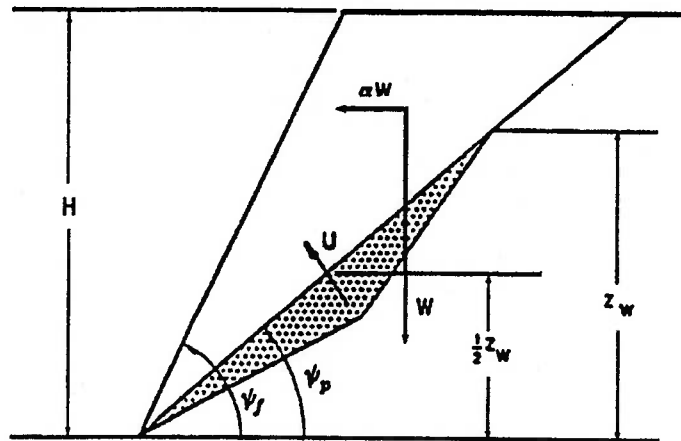


Figura 3.19. Talude sem fenda de tração - método de Hoek e Bray (GUIDICINI; NIEBLE (1976))

Para taludes sem fenda de tração:

$$FS = \frac{c \cdot A + [W \cdot (\cos \varphi_p - \alpha \cdot \text{sen } \varphi_p) - U] \cdot \text{tg } \phi}{W \cdot (\text{sen } \varphi_p + \alpha \cdot \cos \varphi_p)}$$

$$W = \frac{\gamma \cdot H^2 \cdot [\cot g \varphi_p - \cot g \varphi_f]}{2}$$

$$A = \frac{H}{\text{sen } \varphi_p}, U = \frac{\gamma_w \cdot z_w^2}{4 \cdot \text{sen } \varphi_p}$$

3.6. MEDIDAS DE ESTABILIZAÇÃO E PROTEÇÃO

As medidas de estabilização visam de modo geral à:

- Construção de um talude estável
- Manutenção da estabilidade de taludes
- Estabilização de taludes passíveis de sofrerem instabilidades
- Estabilização de taludes com instabilizações em andamento
- Recuperação de taludes rompidos

São medidas de estabilização típicas as obras de terraplanagem, de proteção, de drenagem e de contenção. As obras de recuperação devem considerar a pluviosidade e o regime de águas subterrâneas local, com enfoque nos cuidados com relação à drenagem na cava, na barragem de rejeitos e nas pilhas de estéril, de modo a evitar o surgimento de feições erosivas.

- Obras de Terraplanagem:

Essas obras estão relacionadas a alterações geométricas do talude (diminuição da altura do talude, abatimento da inclinação), de forma a redistribuir as massas a favor de seu equilíbrio. Estão incluídos nesse caso os retaludamentos e a execução de bermas de equilíbrio. A terraplanagem tem o caráter de “solução definitiva”.

Nos casos em que o escorregamento já ocorreu, os procedimentos devem ser:

- remoção ou estabilização do material escorregado;
- suavização do ângulo de inclinação do talude ou redução da altura do talude;
- recomposição do talude com aterro compactado (através de apoio endentado no contato terreno/aterro), e drenagem interna;
- eventual aterro de “contrapeso” ou berma de equilíbrio;

- Obras de Proteção e Drenagem:

Os objetivos desse tipo de obra são:

- reduzir a pressão neutra;
- evitar forças de percolação de água;
- evitar a erosão;

Estão incluídas nesse tipo de obra a condução de águas e impermeabilizações e drenagens superficial e profunda. Algumas medidas são:

- impermeabilização: A imprimação asfáltica é uma medida que requer manutenção frequente e tem mau resultado estético. O revestimento com argamassa ou concreto também requer manutenção, pois está sujeito a trincas e erosão nas bordas. Sua aplicação é pouco comum nas estruturas de mineração.
- proteção vegetal: é uma proteção efetiva contra erosão, mas também tem um efeito de retenção de água.
- drenagem superficial: A drenagem superficial visa captar o escoamento de águas através de canaletas, valetas, sarjetas ou caixas de captação, e em seguida, conduzir essas águas para local conveniente. Devem ser executadas canaletas nas bermas e bancadas, e escadas de água para quebra de energia. Deve haver um anteparo no recebimento de uma escada de água para uma canaleta.

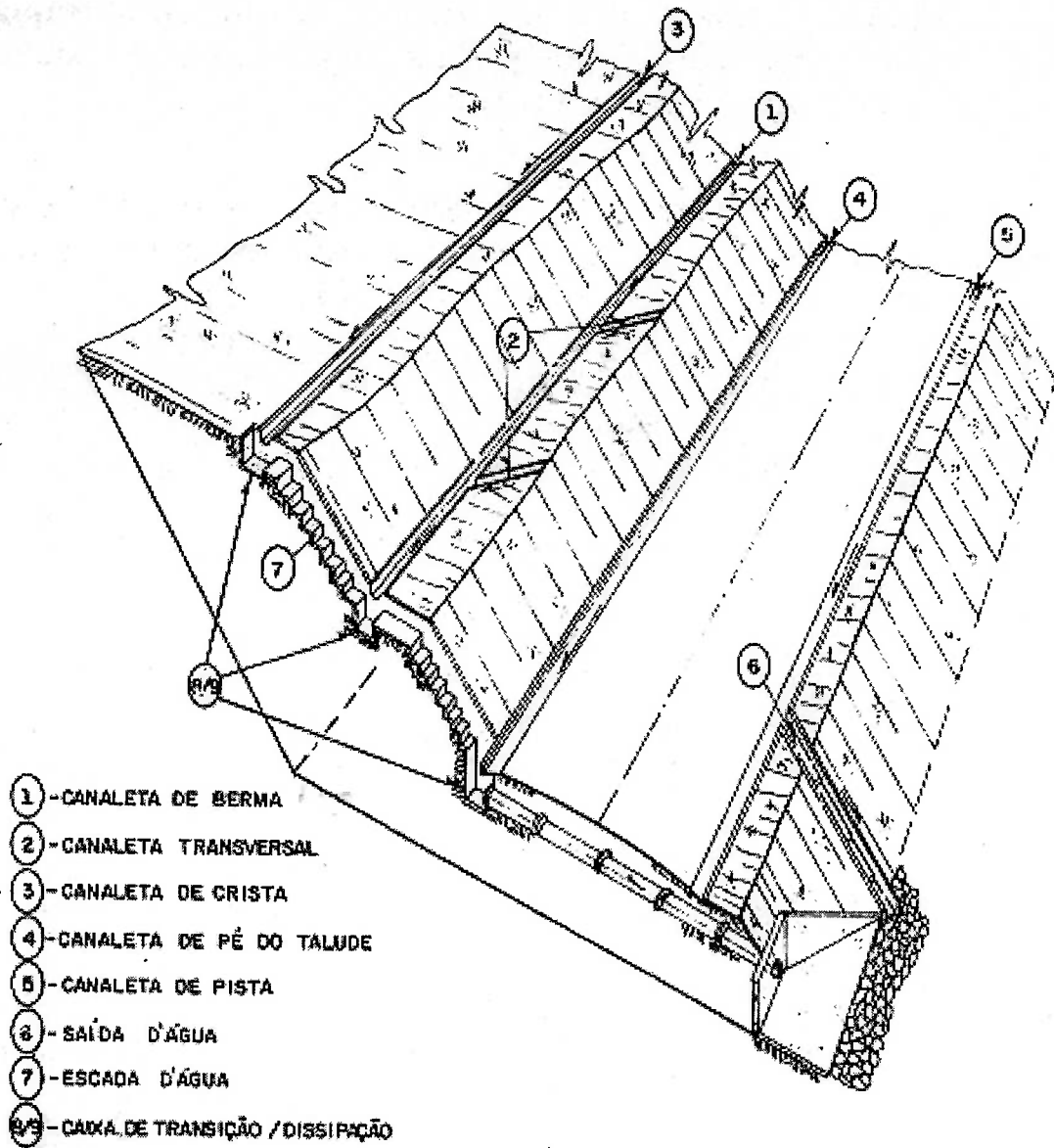


Figura 3.20. Componentes de um sistema de drenagem superficial (CARVALHO (1991))



Figura 3.21. Construção de escada d'água em bancada de cava definitiva

LYLE JR. (1987) dá enfoque especial ao problemas da erosão, prescrevendo um método de prevenção através da construção de estruturas e cobertura do solo com vegetação.

As estruturas atuam da seguinte forma:

- a água de chuva é descarregada em calhas ou canaletas para um ponto de descarga mais seguro;
- passagem da água em canaletas de seções mais largas para quebra da velocidade e sedimentação de sólidos;
- a água em excesso que escoar pela superfície com grande velocidade pode ser retida em reservatórios até que a água se infiltre ou flua em pequenas quantidades;
- materiais erodíveis podem ser cobertos com materiais não erodíveis para proteção, como pedra britada ou rachão.

Já a revegetação proporciona:

- diminuição do impacto das gotas de chuva no terreno;
- obstáculo ao fluxo de água da superfície, favorecendo a absorção de água do solo;
- possibilita formar canais de infiltração através das raízes e estabelecimento de vida animal no solo (insetos, microorganismos);
- o solo vegetal formado tem boa capacidade de absorção de água;

Em cavas em solo ou rocha alterada deve-se implantar drenagem adequada nos taludes provisórios e definitivos. Os taludes finais devem ser imediatamente protegidos com cobertura vegetal. O direcionamento da drenagem deve ser feito no sentido das laterais, e não para o interior da mina. Deve-se também escolher o sentido da drenagem para evitar os materiais mais erodíveis. Deve-se implantar canaletas revestidas, escadas e dissipadores de energia em áreas de forte declive.

- drenagem subterrânea: em casos de aterro, no contato com o terreno do talude, deve ser executado um filtro de areia ou colocação de geotêxtil, concomitantemente ao aterro. Em casos em que houver a necessidade de aterrar uma surgência de água no talude, deverá ser feita a captação com geotêxtil instalado no contato, mais uma camada de material granular e depois o aterro propriamente dito. Em casos de drenagem do maciço, podem ser executados drenos horizontais profundos. Os problemas dos drenos são relacionados a incrustação de natureza química ou colmatação, principalmente nos drenos que não tem fluxo permanente de água.



Figura 3.22. Drenos instalados em talude suscetível a percolação de águas subterrâneas

- Outros Tipos de Obras:

- Obras de contenção: Podem ser passivas (resistem aos empuxos do maciço, como muros de arrimo) ou ativas (impõe esforços resistentes ao maciço, como obras atirantadas). Na mineração tais obras podem ser aplicadas ao atirantamento de blocos de rocha da cava que representem risco significativo de instabilidade. Para pequenos rolamentos de blocos, pode ser feito um entelamento da face do talude. No caso de execução de muros ou cortinas atirantadas em solos é fundamental prever drenagem adequada, com barbacãs (drenos curtos).

- Reforço do solo: Consiste no aumento da capacidade resistente do solo com a inclusão de reforços como injeções, terra armada, aterro reforçado e outros procedimentos do gênero.

3.7. MONITORAMENTO A LONGO PRAZO

O monitoramento do comportamento a longo prazo dos trabalhos geotécnicos de recuperação pode ser feito através do acompanhamento periódico de dados de instrumentação.

Na cava e nas pilhas de estéril podem ser aplicados, por exemplo:

- medidores de deslocamentos através de marcos superficiais para controle topográfico dos taludes,
- extensômetros e fissurômetros para acompanhamento de aberturas de fraturas no maciço;
- medidores de deformação como deformímetros, inclinômetros em taludes para monitorar eventual superfície de movimentação;

Nas barragens de rejeito, podem ser aplicados, principalmente:

- medidores de recalque;
- piezômetro tipo Casagrande, medidor de nível de água, piezômetro de máxima para medidas de pressão neutra, monitorando a rede de fluxo no corpo e fundação da barragem.

Os piezômetros e medidores de nível de água também podem ser adotados em áreas críticas da cava ou das pilhas de estéril que seja conveniente monitorar a pressão neutra.

3.8. CARACTERÍSTICAS DA ESTABILIDADE DAS ÁREAS LAVRADAS

Os taludes de cava de mineração a céu aberto apresentam características que os tornam relativamente distintos daqueles para outras finalidades. O caráter provisório e a importância que a inclinação do talude da cava adquire na viabilidade econômica do empreendimento induzem a lavra a operar com baixos fatores de segurança, acarretando maiores riscos. Para fins de recuperação, isso implica em rever os fatores de segurança dos taludes para uma condição definitiva.

Muitos problemas de estabilidade de taludes podem ser encontrados na escavação de uma mina a céu aberto. Esses problemas têm diversas origens e comumente têm significados apreciavelmente diferentes no projeto e operação da mina. PATTON e DEERE (1970) classificam essas rupturas em três grandes grupos:

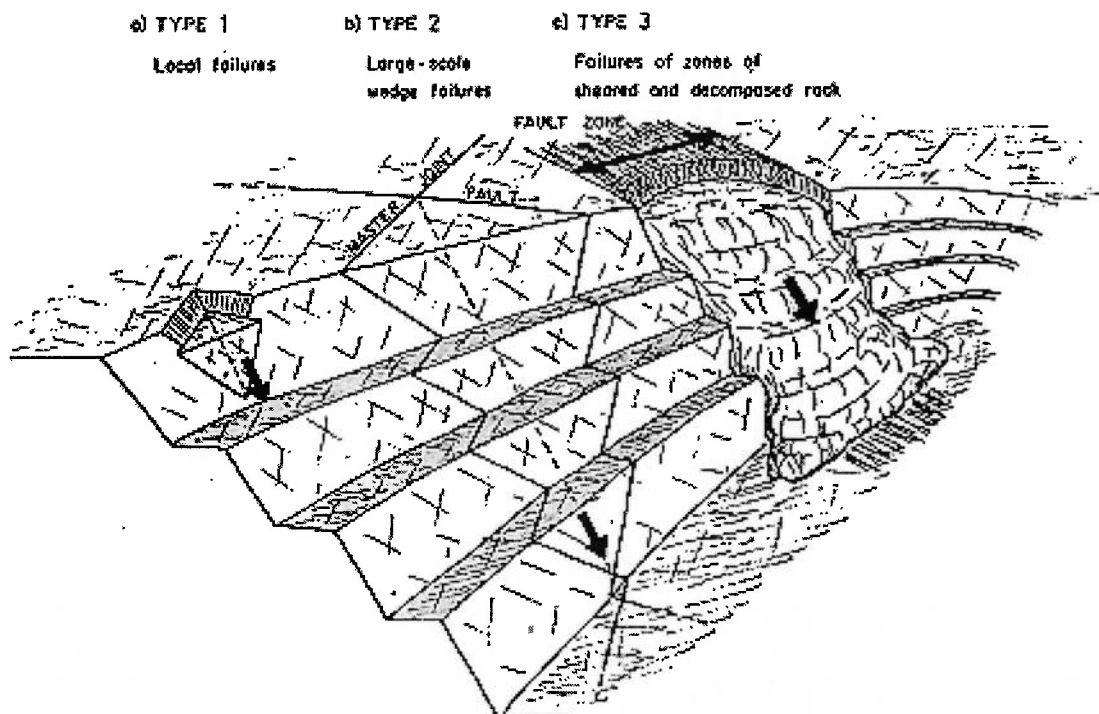


Figura 3.23. Tipos principais de rupturas em minas a céu aberto (PATTON e DEERE (1970))

1) Rupturas locais envolvendo uma só bancada:

Correspondem a rupturas circulares ou mistas em solos e rupturas de pequenas massas rochosas ao longo de planos de descontinuidades (cunhas ou rupturas planas). São quase impossíveis de eliminar sem o uso de taludes excessivamente abatidos ou sistemas de estabilização dispendiosos.

2) Rupturas planas ou em cunhas envolvendo algumas (ou muitas) bancadas:

Nessas rupturas, a massa envolvida é bem maior que as correspondentes ao item anterior e as condições propícias à ruptura são mais difíceis de detectar antecipadamente. As rupturas planas geralmente ocorrem em taludes bastante convexos, ou onde condições de desconfinamento lateral se verifiquem através de sistemas de descontinuidades verticais bastante acentuadas no maciço. As rupturas em cunha são de difícil previsão, pois as condições adversas geralmente exibem duas estruturas geológicas separadas por algumas dezenas de metros, em superfície.

3) Rupturas envolvendo muitas bancadas através de zonas de solo ou rocha cisalhada e decomposta:

Estas rupturas de tipo plano ou aproximáveis a rupturas circulares, geralmente ocorrem quando se verifica um contraste de resistência bastante grande entre o maciço e uma zona de fraqueza. Tais rupturas podem comprometer a estabilidade da cava.

Os taludes finais em rocha devem sofrer desmonte cuidadoso de modo a minimizar o fraturamento do maciço.

3.9. CARACTERÍSTICAS DA ESTABILIDADE DAS ÁREAS DE DEPOSIÇÃO DE ESTÉRIL

Para BARTH (1989), a deposição controlada de estéril é o melhor método para estabilizar grandes depósitos de estéril. Isso se dá com uma camada drenante em rocha na base da pilha, drenagem interna, adoção de bancadas que drenem de fora para dentro e para as laterais do depósito, valetas estabilizadas de drenagem nas laterais do depósito, aterros compactados, e em alguns casos, uma camada de argila compactada sobre as bancadas.

O desvio das águas de superfície das pilhas de estéril é essencial para a preservação de estabilidade das pilhas de estéril, pois via de regra trata-se de material pouco consolidado, suscetível à erosão, além de evitar o aumento demasiado da pressão neutra nas pilhas.



Figura 3.24. Feições típicas de pilhas de estéril erodidas

Deve-se tomar precauções com relação à drenagem da base da pilha e evitar tamponamento de drenagens naturais. Já na escolha do local da pilha de estéril, portanto, deve-se considerar que as grandes áreas requeridas para deposição de estéril podem cobrir nascentes d'água importantes na região.

De acordo com FORNAZARI FILHO ET AL. (1981), os tipos de movimentação que geralmente são observados nos taludes das pilhas são os escorregamentos superficiais e rotacionais, rastejos e corridas de material. A direção e extensão dessas movimentações podem ser detectados e acompanhados através da implantação de sistema de marcos de referência. No entanto, os problemas mais comuns nos taludes estão relacionados à erosão laminar ou em sulcos que decorrem da dinâmica da circulação da água superficial e da erosão eólica. Nesse sentido, a defesa contra esse fenômeno tem sido satisfatória através do desenvolvimento de coberturas vegetais.

Alguns depósitos de estéril são operados por um tempo prolongado e não é possível o reaproveitamento da camada fértil do local. Alguns materiais depositados são passíveis de receber uma cobertura por serapilheira, ou de espécies herbáceas por hidrossemeadura, a lanço, em mudas, placas ou leivas, e até espécies arbustivas e arbóreas, sem a recobertura da camada fértil do solo. Para se conseguir o enraizamento das plantas é preciso que o material tenha uma granulometria com boa porcentagem das frações de areia até argila ($< 2,0$ mm) e baixa densidade in situ (1,4 - 1,6 t/m³). Se o estéril contiver elementos tóxicos, deverá ser feita uma cobertura com argila. Atenção especial deve ser dada à drenagem. Podem ser acrescentados murundus de terra e depressões, para quebrar a rigidez geométrica e favorecer a gama de plantas a serem usadas.

A estabilidade das pilhas de estéril deverá também ser assegurada através da escolha correta dos terrenos da fundação, da compactação dos materiais

depositados, de drenagem adequada, bem como do projeto da própria geometria da pilha. O acidente de Aberfan (País de Gales) no qual 144 pessoas morreram devido ao desmoramento da pilha de uma mina de carvão evidencia a necessidade de estudos criteriosos. Segundo FORNAZARI FILHO ET AL. (1981), laudos indicam que a pilha situava-se na vertente de um morro constituído por arenito fraturado e recoberto por sedimentos glaciais. A presença de uma camada de argilito impermeável na base desses sedimentos condicionou o fluxo de água sob o depósito, levando-o à ruptura.

As pilhas de estéril, desde que construídas adequadamente e de forma definitiva, não requererão intervenções de vulto quando cessarem as atividades mineiras.

3.9.1. CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS DO ESTÉRIL

Segundo FORNAZARI FILHO ET AL. (1981), as pilhas de estéril, ou bota-foras, são constituídas essencialmente por materiais sólidos, geralmente graúdos, permitindo uma deposição em que se tornam auto-portantes, dispensando dessa forma estruturas especiais.

De modo geral, trata-se de material desagregado, de coesão baixa ou mesmo nula.

3.9.2. CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS DAS PILHAS DE ESTÉRIL

O estéril deve ser depositado controladamente, de preferência no sentido ascendente. Se descendente, em ponta de aterro, deve-se estabilizar os depósitos. O sistema de drenagem superficial e a implantação de vegetação devem ser feitos à medida em que se executam os trabalhos de deposição.

As pilhas de estéril são projetadas com bermas de modo a facilitar o acesso e garantir melhor estabilidade.

As principais medidas geotécnicas recomendadas para a deposição de estéril são:

- as bermas devem estar inclinadas para seu interior, de modo que as águas pluviais sejam captadas por canaleta no pé do talude anterior, conforme visto na figura 3.25.

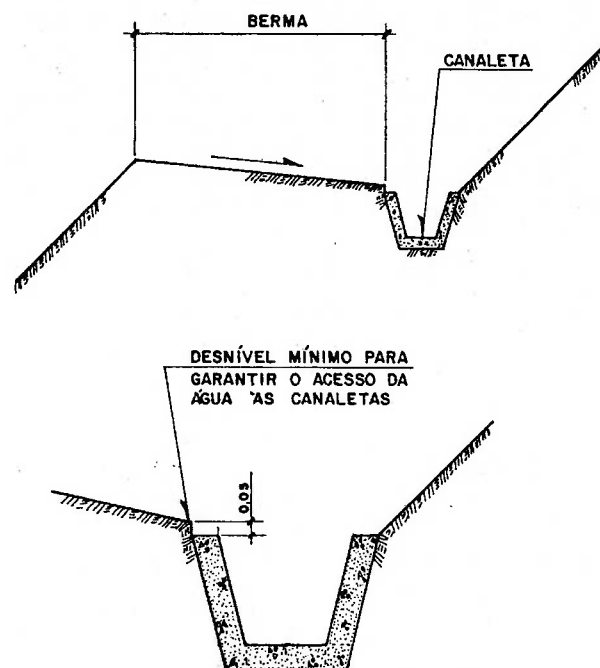


Figura 3.25. Detalhe da inclinação da berma e da instalação da canaleta de drenagem (CARVALHO (1991))

- direcionamento da drenagem das bermas das pilhas no sentido das laterais, não para o interior do talude. Deve-se escolher um sentido da drenagem que evite os materiais mais erodíveis. Deve-se implantar canaletas revestidas, escadas e dissipadores de energia em áreas de forte declive;

- o estéril deve ser depositado controladamente, no sentido ascendente de preferência. Deve-se evitar, sempre que possível, as pilhas formadas por lançamento em ponta de aterro.

3.10. CARACTERÍSTICAS DA ESTABILIDADE DAS ÁREAS DE DEPOSIÇÃO DE REJEITOS

A deposição de rejeitos se constitui numa das grandes atividades da mineração. Os problemas variam amplamente de um minério a outro ou mesmo de uma planta de concentração a outra.

O objetivo da recuperação de uma barragem de rejeitos esgotada é assegurar sua estabilidade física (estabilidade de taludes, sísmica, hidrológica e resistência à erosão) bem como prover um uso produtivo da área afetada pela barragem e proteção ambiental a longo prazo (HOSSEIN ET AL. (1993)). Eventualmente os rejeitos podem ser retomados para reprocessamento futuro, mediante novas condições econômicas de mercado ou advento de novas tecnologias. Usos como material de empréstimo ou como matéria-prima para outras indústrias são alternativas mais remotas, devido ao custo do transporte que inviabiliza a utilização por parte de potenciais consumidores mais distantes. Para grande número dos empreendimentos, a deposição do rejeito em barragens tende a ser definitiva.

Alguns dos principais problemas associados a barragens de rejeito a longo prazo são os seguintes, conforme FORNAZARI FILHO ET AL. (1981):

- Segurança e estabilidade:

Registram-se vários acidentes graves envolvendo barragens de rejeitos. No Chile, em El Cobre, 1961, um terremoto provocou a ruptura de 10 das 14 barragens de

contenção matando mais de 200 pessoas. Todas as precauções devem ser tomadas para que a longo prazo essas massas não sejam remobilizadas.

- Contaminação do ar:

Pode ocorrer a liberação de materiais particulados ou gases no ambiente. Numa barragem de rejeitos no Zimbábue foi registrada uma emissão aérea de 86 t/dia de pó. Rejeitos contendo pirita (FeS_2) podem liberar gás sulfídrico.

- Contaminação da água:

Matérias sólidas provenientes da barragem podem acarretar assoreamento de cursos d'água, acidificação, contaminação por metais pesados, sais dissolvidos, causar turbidez, etc.

O rejeito, por ser um material granular, pouco consolidado, está sujeito predominantemente a rupturas de tipo circular. Para avaliar as condições de estabilidade de uma barragem de rejeitos são aplicáveis as análises de percolação e ruptura pelo maciço e pela fundação, usualmente em solo.

Para isso, os materiais constituintes do corpo da barragem e da fundação devem ser caracterizados, identificando-se os tipos de cada material, sua localização e levantamento de seus parâmetros geotécnicos, bem como os dados geométricos da barragem.

Os parâmetros geotécnicos a serem levantados "in situ" ou em laboratório de cada material envolvido são, basicamente:

- permeabilidade: infiltração, perda d'água, permeabilidade
- coesão e ângulo de atrito: SPT, ensaios triaxiais
- massa específica

Os dados geométricos referem-se a ângulos de taludes de jusante e montante, posição do nível de água, se houver, e disposição dos diversos materiais no maciço e na fundação.

Com esses dados, a percolação de água através do maciço e fundação da barragem pode ser avaliada através do estabelecimento de uma rede de fluxo, obtendo-se as pressões neutras atuantes em diversos pontos no interior da barragem e da fundação. Juntamente com os parâmetros geotécnicos de cada material e os dados geométricos, é possível através de programas computacionais baseados nos métodos de equilíbrio-limite, calcular a estabilidade dos taludes.

Na maioria dos casos a barragem de rejeito, após a desativação tem seu nível de água rebaixado naturalmente, incrementando a estabilidade do depósito. Nesse casos, o monitoramento é conveniente para assegurar a manutenção da estabilidade. O desenvolvimento e evolução da pressão neutra, deformações, recalques, adensamento devem ser observados ao longo do tempo.

As águas de superfície e de mananciais devem, sempre que possível, ser desviadas da barragem de rejeitos, de modo a se prevenir de que no futuro ela venha a formar um represamento da drenagem natural da região, e mobilizar a massa de rejeitos.

Caso os rejeitos da barragem ainda estejam inconsolidados por ocasião da preparação para um uso futuro, uma possível solução pode ser a execução de aterros sucessivos em toda a extensão da barragem. É executada uma primeira camada drenante para captar a água resultante do adensamento, e sobre essa camada seguem as camadas de solo compactado, e depois uma camada de solo vegetal, se for o caso.

Há casos, no entanto, que pode ser interessante a manutenção do rejeito permanentemente submerso. É o caso dos rejeitos piritosos da mineração de

carvão, que se oxidam em contato com o ar, gerando águas ácidas, sendo preferível mantê-los submersos, numa situação que minimiza sua exposição ao ar.

Manter os sedimentos permanentemente sob uma lâmina de água, no entanto, requer uma manutenção contínua e uma responsabilidade a longo prazo. Águas pluviais e subterrâneas que entram na bacia de retenção são os principais problemas a considerar. Uma maneira de evitar isso é construir barragens à montante. A cobertura com capeamento acima da barragem também pode ser aplicada, seguida de revegetação. Em geral o rejeito não é capaz de sustentar o crescimento de plantas e requer capeamento e solo vegetal.

O desvio da drenagem é ainda mais importante caso o uso previsto para a área da barragem exija que ela esteja drenada e consolidada.

Como visto, com relação ao nível de água podem ocorrer as hipóteses:

- reconstituir a lâmina de água;
- rebaixar a lâmina de água;
- rebaixamento do nível da água do interior dos sedimentos;
- aterro complementar da bacia;

Quando a lâmina de água é rebaixada é comum observar a instalação espontânea e rápida de plantas nativas (se o rejeito não contiver substâncias tóxicas). Nesse caso, os cuidados são para não deixar a área receber um volume de solo erodido à montante que possa afetar a estabilidade do barramento ou transpassá-lo. O sistema de desvio de águas de superfície em torno da bacia deve ser permanente. Entretanto se o rejeito estiver numa fração muito fina, ele permanece longo tempo em suspensão, adensando muito lentamente. Para esse caso a solução é aterrar, podendo-se instalar uma manta de geotêxtil entre o rejeito e o aterro, ou instalar sistema de captação de água (drenos, filtros de areia, etc.). A seleção das espécies, caso o rejeito seja tóxico, deve considerar que as raízes não cheguem ao depósito.

Deve-se assegurar mesmo após o término da barragem, a manutenção adequada de suas partes externas. São estas as que ficam expostas aos agentes erosivos, que além de desencadear a poluição do ar e da água podem conduzir progressivamente ao rompimento do depósito.

A cobertura vegetal faz com se torne necessário desenvolver edafologicamente um solo a partir de rejeitos, implicando na geração de matéria orgânica agregando as partículas e permitindo a estruturação do solo e a consequente capacidade de retenção dos nutrientes. Na prática os rejeitos se apresentam com vários fatores adversos tais como: deficiência de nutrientes para as plantas; excesso de metais fitotóxicos; carência de população de microorganismos; pH; salinidade, inconsolidação do material. Técnicas de hidrossemeadura têm sido aplicadas a esse tipo de cobertura.

O encerramento da barragem não deve ser negligenciado nem ser lembrado apenas no fim da vida útil da mina. A disposição não controlada na operação pode gerar situações de alto risco e requerer grandes despesas de manutenção e monitoramento por longo período após o abandono.

O controle dos fluxos de água de superfície e sub-superfície é de suma importância. A longo prazo deve-se monitorar especialmente os sinais de percolação de água e trincas nos taludes da barragem, através de instrumentação por piezômetros.

3.10.1. CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS DO REJEITO

As características físicas e químicas dos rejeitos estarão intimamente relacionadas com os tipos mineralógicos e com os processos adotados na concentração do minério (FORNAZARI FILHO ET AL. (1981)). Da mesma forma, a composição

granulométrica dos rejeitos também varia amplamente, desde um colóide a cascalho fino. Em termos químicos e mineralógicos os rejeitos derivados do processo de concentração, além de apresentarem similaridades com o minério original, podem ter sua composição influenciada pela presença de reagentes da usina de concentração e pelos processos e intensidade de alteração desenvolvidos no tempo, após sua deposição.

Deve-se considerar outros aspectos, como o adensamento em barragens de rejeito. O rejeito, uma vez lançado, sofrerá no início um processo de sedimentação. A seguir, a longo prazo, passa para a fase de adensamento. Para fins de planejamento de uso futuro, é conveniente estudar-se em quanto tempo os sólidos da barragem estarão consolidados e qual a resistência futura desse terreno.

Além do adensamento, conforme o tipo de uso futuro pretendido, pode ser importante estudar-se os recalques a que estará sujeito o rejeito acumulado.

3.10.2. CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS DAS BARRAGENS DE REJEITO

Essas barragens podem ser total ou parcialmente construídas utilizando-se materiais de empréstimo ou o próprio rejeito. A complementação da estrutura pode se dar utilizando as frações mais grosseiras do rejeito, que é bombeado para a barragem e lançado por espigotamento ou por ciclonagem na crista da barragem, em alteamentos sucessivos, onde o "underflow" dos ciclones (grosseiros) é lançado na crista da barragem, enquanto o "overflow" (finos) é lançado à montante, formando uma praia.

O hidrociclone é um equipamento simples, sem nenhuma parte móvel, que através da força centrífuga separa a polpa do rejeito em duas frações, o "overflow", contendo as frações grossas, e o "underflow", contendo as frações finas.

O "underflow" do ciclone, sendo razoavelmente grosso e pouco diluído, tem boas propriedades de resistência ao cisalhamento, e é auto-drenante. O "overflow" sendo fino e diluído geralmente tem baixa permeabilidade, mas tem boas características de fluxo, formando praias com inclinação razoavelmente plana.

Os métodos construtivos são:

- Montante:

Era o método usado no passado. À medida que a altura da barragem subia cada dique sucessivo se movia à montante, cobrindo uma camada de rejeito inconsolidado. Isso resultava num nível de freático próximo à superfície externa da barragem. Qualquer alteração que resultasse em saturação dos diques inferiores (por exemplo, subida de nível do reservatório, chuva torrencial) poderia facilmente levar à ruptura da barragem. Esse tipo de barragem não atende mais os requisitos de estabilidade dos taludes, percolação ou resistência a abalos sísmicos.

- Jusante:

Esse método consistiu numa evolução. É possível com esse método construir drenos sob a barragem e cada camada sucessiva de material grosso do rejeito é depositado sobre uma base drenante de material graúdo. O nível freático na barragem é consideravelmente mais favorável à estabilidade. A desvantagem é o maior volume requerido de material graúdo.

- Linha de centro:

Esse é um método intermediário entre o montante e o jusante, prevendo os sucessivos alteamentos verticalmente sobre o corpo da barragem. Como cada

alteamento apóia-se só parcialmente sobre o rejeito inconsolidado, ainda é um método mais seguro que o à montante.

Em caso de construção da barragem em estágios evita-se um investimento inicial excessivo e proporciona-se uma maior flexibilidade nas decisões futuras. Assim como as pilhas de estéril, as superfícies necessitam ser protegidas contra processos erosivos.

Para D'APOLONNIA ET. AL. (1973), as principais considerações para uma área de disposição de rejeitos dizem respeito à construção em estágios do corpo da barragem usando materiais de empréstimo locais ou de estéril, e controle de água de chuva contra extravasamento, erosão excessiva e geração de efluentes. Frequentemente o fator de maior importância no controle da estabilidade é a percolação pela fundação. O fluxo é grandemente influenciado pelas mudanças que ocorrem no período de operação e depois que a instalação foi abandonada. O controle da percolação requer planejamento cuidadoso e monitoramento ao longo da vida da estrutura.

4. CONFORMAÇÃO TOPOGRÁFICA

4.1 INTRODUÇÃO

Conforme JANSEN E MELSTED (1988), considerações quanto à conformação topográfica são de natureza estética, uso pretendido e versatilidade, embora em alguns países as exigências legais limitem a conformação a uma reconstituição aproximada da superfície original.

Para WILLIAMS ET AL. (1990), a conformação topográfica é um fator dos mais importantes para o sucesso do trabalho de recuperação. O relevo final deve atender a alguns requisitos: estabilidade de solos e taludes, tipos de equipamentos a serem empregados, controle da erosão, aspectos paisagísticos e estéticos, usos futuros pretendidos, e alguma semelhança com o relevo anterior.

A conformação topográfica da área recuperada, no entanto, pode variar desde a recomposição a uma situação similar à original até a criação de um novo ambiente, tentando aproveitar ao máximo a topografia gerada pela mineração.

É importante frisar que a legislação brasileira não determina necessariamente a recomposição da situação original, muitas vezes impossível, e que cada caso deve ser analisado em suas características específicas, para a adoção da melhor solução.

Além da estabilização da área e adequação ao uso futuro, a conformação topográfica deve também atender os seguintes requisitos (HARWOOD e THAMES (1988)):

- melhorias estéticas na paisagem;
- retorno da área a uma condição útil;
- prover uma base apropriada para a revegetação;

- reduzir o potencial de erosão;
- propiciar condições naturais de drenagem;
- propiciar o controle do armazenamento de água;
- eliminação ou controle de áreas de risco ao público como desníveis altos ou lagos profundos;

4.2. COMPATIBILIDADE COM OS CONDICIONANTES GEOLÓGICO-GEOTÉCNICOS E CONTROLE DA EROSÃO

Os condicionantes geológico-geotécnicos aplicados à conformação topográfica da área são de fundamental importância para o pleno êxito da recuperação de áreas degradadas em minerações a céu aberto, uma vez que eles proporcionam as condições de estabilidade e segurança compatíveis ao uso pretendido.

Para BARTH (1989), a formação de uma área de topografia estável é essencial para o sucesso da recuperação. O controle de taludes e da água é fator decisivo para alcançar-se a estabilidade da área.

Conforme DOLL (1988), a partir da legislação americana relativa à minas de carvão a céu aberto os requisitos para a superfície pós-lavra são os seguintes:

- ser ambientalmente compatível com as áreas não afetadas nas adjacências;
- ter drenagem superficial adequada para fora da área recuperada;
- estabelecer locais de recarga do aquífero;
- a superfície deve ser estabilizada e a perda de sedimentos minimizada;

Para DOLL (1988), seguindo esses critérios como roteiro para planejar a configuração topográfica pós-lavra, a maioria das alternativas de uso serão possíveis.

WILLIAMS ET AL. (1990) prescreve alguns cuidados para preparo da área a ser minerada. Inicialmente deve ser feito o desvio das águas de superfície (pluviométricas e de mananciais) das áreas mineradas, para evitar ao máximo a ocorrência de processos erosivos, como o assoreamento e as contaminações físicas e químicas. Isso pode ser feito com valetas, calhas, escadas, tubulações, bueiros. O projeto das obras deve estar condizente com o volume de água resultante das precipitações máximas com base nos dados pluviométricos da região. Valetas ou canaletas em solos erodíveis devem ser protegidas com revestimento em concreto, sacos de solo-cimento, enrocamento, gabiões, geotêxteis, vegetação, etc.

O projeto da conformação topográfica deve levar em conta que uma recuperação efetiva requer uma reavaliação da área como um todo. A morfologia, o caráter e a estrutura da superfície e subsuperfície, e o comportamento da água são componentes interrelacionados para os quais deve-se alcançar o equilíbrio, no que diz respeito a produtividade e a estabilidade física. Um projeto adequado para conformação topográfica de uma área recuperada é fundamental para o controle da erosão.

Para minimizar os potenciais de erosão, as densidades de drenagem devem considerar a resistência à erosão do solo. O procedimento de projeto deve oferecer um meio de “esculpir” o terreno numa forma aproximada a uma superfície natural, em equilíbrio dinâmico com o meio circundante. Devem ser previstos fluxos perenes e intermitentes de água nesses terrenos, de modo a se obter o melhor controle de sedimentação e erosão com um mínimo de manutenção.

Em terrenos de alta declividade (> 20%) deve-se construir bancadas (terraços em patamar), como normalmente ocorre na cava e nas pilhas de estéril. Idealmente as bermas devem ter uma leve inclinação para dentro. É recomendável levar em conta aspectos paisagísticos e estéticos, tentando enquadrar a nova área no contexto da

paisagem da região. A recomposição da topografia deve prever o sistema de drenagem futuro da área (locação de canais ou valetas).

Segundo BRENNER (1985), terraplanar o terreno para tentar obter uma superfície próxima à original resulta muitas vezes em longos planos inclinados e compactação excessiva do solo, que podem acelerar a erosão bem como dificultar a revegetação. Tomando a equação universal de perda do solo:

$$A = R.K.L.S.C.P, \text{ onde}$$

A - perda de solo em t/ha;

R - fator relativo à precipitação pluviométrica regional (da ordem de 125 para a Pensilvânia, e 350 para a Flórida, EUA);

K - fator de erodibilidade do solo (0,17 para estéril de mina, em média);

L - comprimento do talude (m);

S - fator relativo à inclinação (da ordem de 0,1 a 0,2);

C - fator de cobertura vegetal (0,004 para uma cobertura mista de gramíneas e leguminosas);

P - fator de conservação de superfície (sendo 1,0 para terrenos virgens e 0,5 para terrenos terraceados);

Verifica-se pela equação que a perda de solo será menor com uma série de pequenas inclinações que com um único e longo plano de inclinação. A instalação de terraços ou degraus melhora a revegetação e a estabilização dos locais. Se os terraços forem cultivados com árvores e arbustos, estes também poderão servir de abrigo à vida selvagem. A área deve ser reconstituída e protegida com terraços e degraus de modo a manter a perda de solo menor que 6 t/ha. Além das características de inclinação, também afetam a recuperação final de áreas mineradas a compactação, a falta de ligação entre as camadas, reposição de solo de cobertura em época de chuva ou seca excessiva e mudanças no solo original devido à alterações físicas e biológicas.

O terraceamento aumenta a estabilidade e favorece a recuperação. O cuidado é na drenagem, para não se deixar inundar o terraço.

4.3. COMPATIBILIDADE COM O USO FUTURO

A conformação topográfica também deve ser adequada ao uso futuro pretendido.

Por exemplo, uma importante aplicação da conformação topográfica na recuperação de áreas na mineração a céu aberto é a gestão de recursos hídricos através da construção de reservatórios de sedimentação e outras estruturas para prover água e controlar a percolação, o fluxo de águas de superfície e a sedimentação de sólidos carregados.

Reservatórios de água na área recuperada são uma consequência do contorno da superfície, e portanto a conformação topográfica final deve prevê-los ou excluí-los. Água de boa qualidade pode ser um recurso valioso em localidades deficientes em água, de forma que sua captação e uso eficiente em alguns casos pode constituir-se numa alternativa atraente.

Algumas características topográficas favorecem o uso agrícola. A criação de depressões ou bacias na superfície do terreno pode reduzir a vazão de águas de superfície em até 75%, comparado com os métodos tradicionais de preparo e nivelamento de superfícies. Enquanto os terrenos preparados pelos métodos agrícolas tradicionais, como sulcagem e aragem, perdem as propriedades de retenção de água de 1 a 2 anos, as depressões têm a capacidade mantida por 10 a 50 anos. Essas depressões, executados por tratores de esteiras, são recomendadas para todos os taludes em solo de terrenos minerados, especialmente aqueles com inclinações superiores a 20%.

Áreas agrícolas em geral estão sujeitas à erosão devido à inclinação excessiva. A conformação após a mineração proporciona uma oportunidade para modificar a topografia e reduzir ou eliminar alguns desses problemas. Extensão e gradiente da inclinação podem ser alterados construindo uma superfície em terraços. Mesmo onde a superfície natural é adequada ao plantio ou pastagem, algumas modificações podem ser interessantes.

Segundo CARTER (1990), nas áreas agrícolas, em particular, o problema da drenagem é crítico. Uma inclinação mínima de 2% é recomendada. Também deve-se evitar a compactação do solo.

Em pastagens, uma inclinação de 1% pode ser ideal, mas uma inclinação maior geralmente é desejável em zonas úmidas. Nesses terrenos uma inclinação pequena pode causar a formação de alagadiços, devido aos recalques diferenciados do terreno. Inclinações de 2 a 3% são as mais indicadas. Em áreas planas de regiões de baixa pluviosidade, a terra mais produtiva está nas áreas baixas próximas às drenagens.

Terrenos de inclinação suave podem se constituir num recurso escasso em muitas regiões. Terraceando a superfície pode-se proporcionar terreno melhor para agricultura ou desenvolvimento urbano do que a superfície original.

Requisitos topográficos para reflorestamento são geralmente menos críticos que para pastagem ou agricultura, portanto menos terraplanagem é requerida. Mesmo que se queira executar um nivelamento da superfície nesse caso há que considerar-se que árvores se dão melhor em terrenos irregulares que nivelados, que além disso, acarretariam um solo compactado. Muitas vezes a superfície mais suave obtida não compensa a compactação resultante.

Caso a preservação de vida selvagem esteja entre os objetivos do uso futuro da área, algumas técnicas podem ser adotadas para promover a recuperação faunística:

- moldar a topografia, criando ondulações, relevo acidentado, depressões não drenadas da superfície e pequenos acidentes topográficas;
- trabalhar os paredões, taludes altos de rocha remanescentes em pedreiras e cavas profundas, produzindo reentrâncias;
- prever açudes ou reservatórios de água;

É recomendável, portanto a criação, durante as obras de terraplanagem, de diversos murundus (pequenos morrotes de 1 a 2 m de altura) e de algumas depressões pequenas, suaves e rasas, para acumulação de água. Esses elementos contribuirão para a atração de animais.

Uma superfície irregular, minimamente nivelada, é apropriada para a vida selvagem e muitos usos recreativos.

4.4. ASPECTOS PAISAGÍSTICOS

Quanto ao paisagismo, deve-se determinar na fase de pré-planejamento qual a paisagem típica da região, e quando possível levantar a paisagem do local antes de qualquer ação antrópica, descrevendo-a e registrando-a em desenhos e fotos, indicando em mapas os pontos de monitoramento visual como futuros pontos de referência.

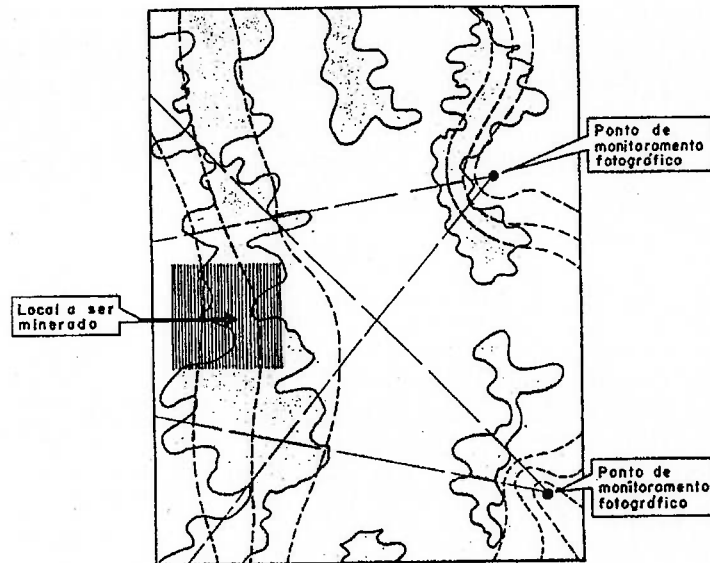


Figura 4.1. Localização dos pontos de monitoramento fotográfico do local a ser minerado (WILLIAMS ET AL. (1990))

A paisagem pode ser analisada antes, durante e depois da atividade de lavra e descrita nos elementos visuais que a compõe: linha, forma, textura, escala, complexidade e cor.

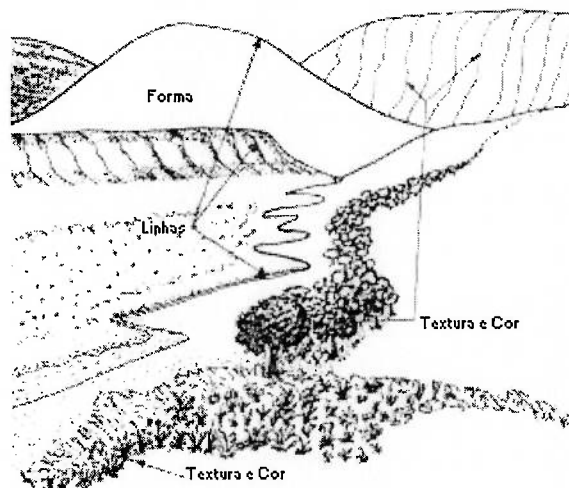


Figura 4.2. Elementos visuais da paisagem natural (WILLIAMS ET AL. (1990))

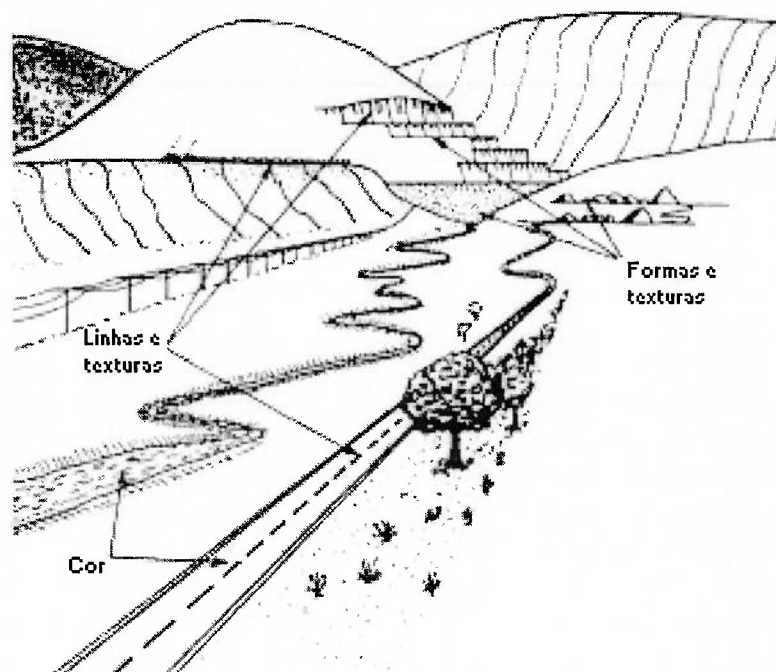


Figura 4.3. Elementos visuais da mineração e sua infra-estrutura (WILLIAMS ET AL. (1990))

Deve-se tentar integrar as práticas de caráter estético e as outras (hídrico, topográfico, vegetativo, etc.), dando especial atenção aos seguintes pontos sensíveis na paisagem:

a) locais onde há linhas paralelas e convergentes (encostas de um vale, por exemplo), que conduzem a atenção do observador para seu término;

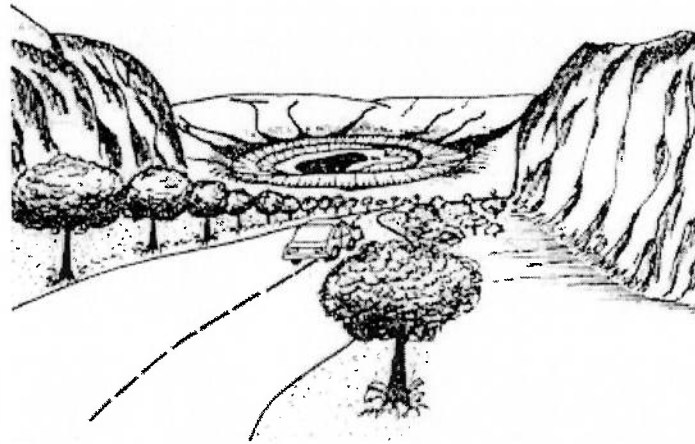


Figura 4.4. Focalização não desejável, pelo alinhamento da estrada, arborização e pelas encostas do vale do local minerado (WILLIAMS ET AL. (1990))

b) a linha de intersecção entre dois planos (qualquer objeto colocado na margem de intersecção chama a atenção); o horizonte é especialmente sensível ao impacto visual;

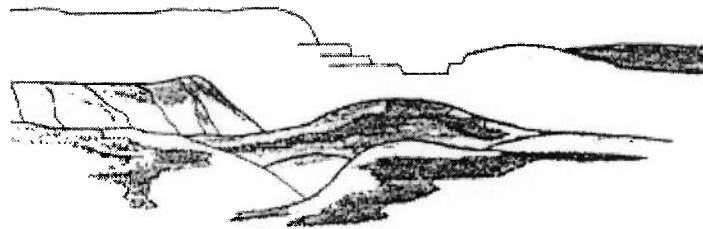


Figura 4.5. Modificação do perfil topográfico do horizonte (WILLIAMS ET AL. (1990))

c) locais que têm grande valor cênico (florestas primárias, atrações históricas, objetos culturais tais como estátuas ou outras formas de arte);

Recomenda-se tomar as seguintes medidas para conservar, recuperar ou melhorar a paisagem após a mineração (WILLIAMS ET AL. (1990)):

a) preservar as paisagens de destaque, como parques ou reservas;

b) esconder certas alterações, tais como abrigar a cava, depósitos de estéril, prédios, estruturas ou modificações não complementares da paisagem com uma cortina vegetal ou dissimular no próprio relevo do terreno;

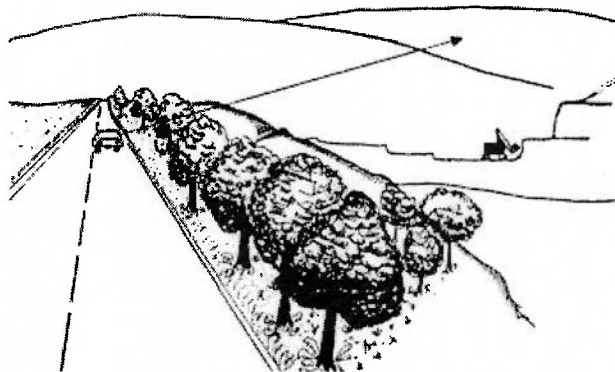


Figura 4.6. Utilização do relevo do terreno e da vegetação para abrigar a mina
(WILLIAMS ET AL. (1990))

- c) complementar a paisagem natural;
- d) incentivar a criatividade pessoal dos tratoristas; sensibilizar os operadores quanto às considerações estéticas da recomposição;
- e) eliminar prédios e equipamentos para não desfigurarem a paisagem;
- f) melhorar a paisagem, tornando-a mais atrativa;
- g) manter a exuberância da vegetação;

4.5. CONFORMAÇÃO DAS ÁREAS LAVRADAS

As cavas, salvo as de meia encosta, tendem naturalmente a acumular água, seja de superfície (chuvas, drenagem) seja de percolação subterrânea. A solução de cava inundada, especialmente aquelas em rocha, portanto é a mais comum.

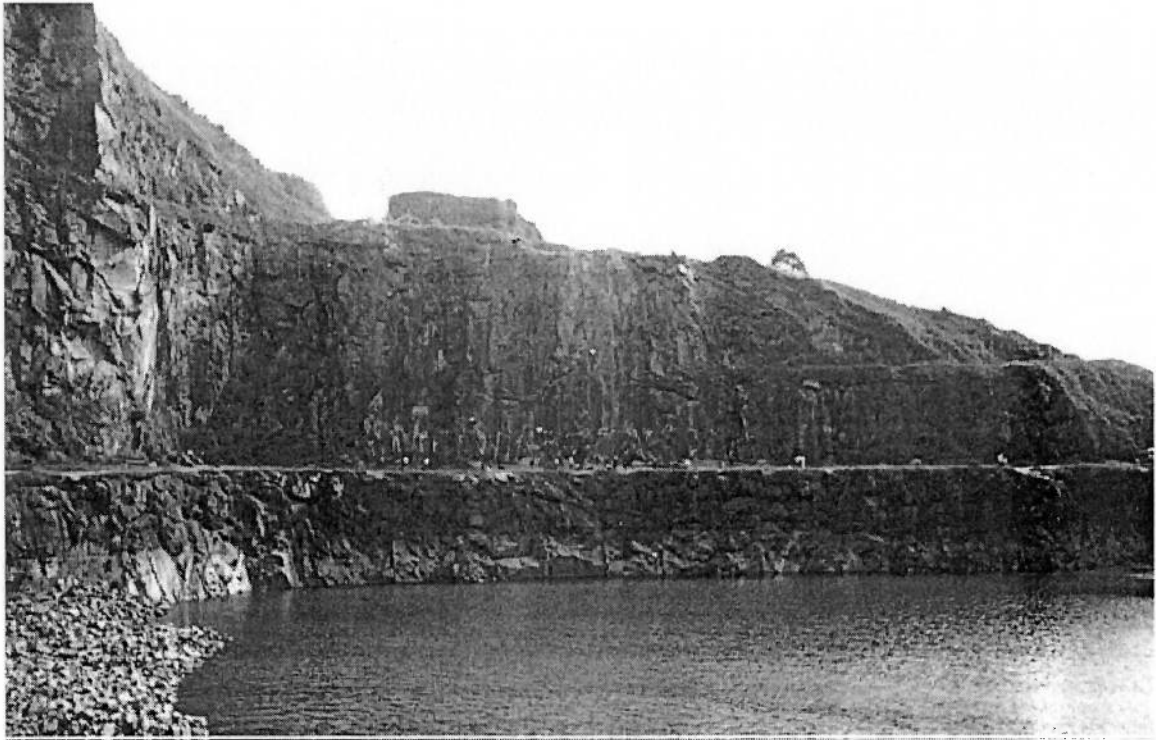


Figura 4.7. Água acumulada na cava da antiga pedreira Dib, em São Paulo, SP

As cavas raramente são aterradas, a menos que sejam de pequena profundidade. Isso se deve ao grande volume de material que seria necessário (uma cava em rocha pode apresentar profundidades de dezenas ou centenas de metros), tornando essa alternativa inviável economicamente. Além disso, haveria a questão de se ter disponível volume suficiente de material, que eventualmente geraria degradação de outra área para fornecimento de material de empréstimo.

Uma vez que o bombeamento contínuo de água da cava após a desmobilização da mineração também seria custoso, a cava acumulará água até seu preenchimento. É uma solução que pode, sem dúvida, criar um ambiente propício para uso recreativo potencial, se devidamente preparada para evitar futuras áreas de risco. Caso se deseje usar a cava como reserva de água para usos mais nobres, estudos de caráter biológico devem ser desenvolvidos, por se tratar de um corpo de água isolado, com baixa taxa de renovação hídrica.

Em cavas em solo ou rocha alterada, como minerações de areia em cava seca, argila ou caulim, por exemplo, devido às características geotécnicas pobres do material, presença de lençol freático, do baixo valor econômico do minério extraído, essas cavas via de regra não atingem grandes profundidades, permitindo seu aterro, ao menos parcial. A recuperação poderá prever a inundação parcial da cava ou permitir a criação de novos terrenos mediante aterro com o próprio material de descobertura da mina (capeamento e estéril). A recuperação pode se dar com um aterro parcial até uma cota que permita a água ser drenada naturalmente para fora da cava. Ao longo da vida da mina, é possível também utilizar uma seção do fundo da cava para local a barragem de rejeito.

Verifica-se a importância de aliar os trabalhos de recuperação ao planejamento de lavra, pois integram-se duas funções na mesma operação: remoção do estéril para avançar a lavra do minério, e recuperação da área mediante aterro parcial da cava, implicando em redução de custos e evitando retrabalhar esse material futuramente. Para tanto, é necessário que haja uma área na cava que permita essa deposição sem comprometer o desenvolvimento da lavra ou bloqueio de seções com minério passível de extração econômica, o que também deve ser previsto no planejamento de lavra.

Nas cavas de meia encosta depressões confinadas no piso podem acumular água e se transformar em viveiro de vetores transmissores de doenças.

Em minerações de areia e argila, principalmente, caso a cava seja inundada, é recomendável o acerto das suas margens, onde os taludes verticais devem passar a ter inclinação mais suave. Com esses trabalhos os taludes das margens do lago remanescente devem contar com uma inclinação de cerca de 25° em relação à horizontal, inclinação esta que dá segurança às margens e impede acidentes como solapamentos, afogamento de seres vivos, etc.

Deve-se considerar que num determinado momento, de acordo com o balanço hídrico local, a cava será completamente inundada, e as águas pluviais e subterrâneas excedentes, que forem por ela captadas, extravasarão. Deverá ser previsto o escoamento desse fluxo através de vertedouro e sistema de drenagem adequado, para que a saída de água se dê de forma controlada, evitando processos erosivos e alagamento de áreas circunvizinhas à cava.

O desmonte das cristas das bancadas da cava eventualmente poderia contribuir para amenizar os impactos visuais (WILLIAMS ET AL. (1990)). A pilha do desmonte é deixada “in loco” para servir como base de recebimento do subsolo. Deve-se, no entanto, ponderar quanto ao efetivo benefício visual dessa solução, que poderá afetar estabilidade do talude como um todo e comprometer seu acesso no futuro.

Demonstrando também a importância da topografia original do terreno no planejamento do uso futuro da área após a lavra, é apresentada a seguir a sequência de figuras 4.8 a 4.16 para simular a conformação topográfica de uma área antes e depois das atividades de lavra. A cava após a lavra sofrerá acúmulo natural de águas subterrâneas e superficiais, transformando-se num lago. Essa é uma solução típica para cavas em rocha (exceto as de meia-encosta).

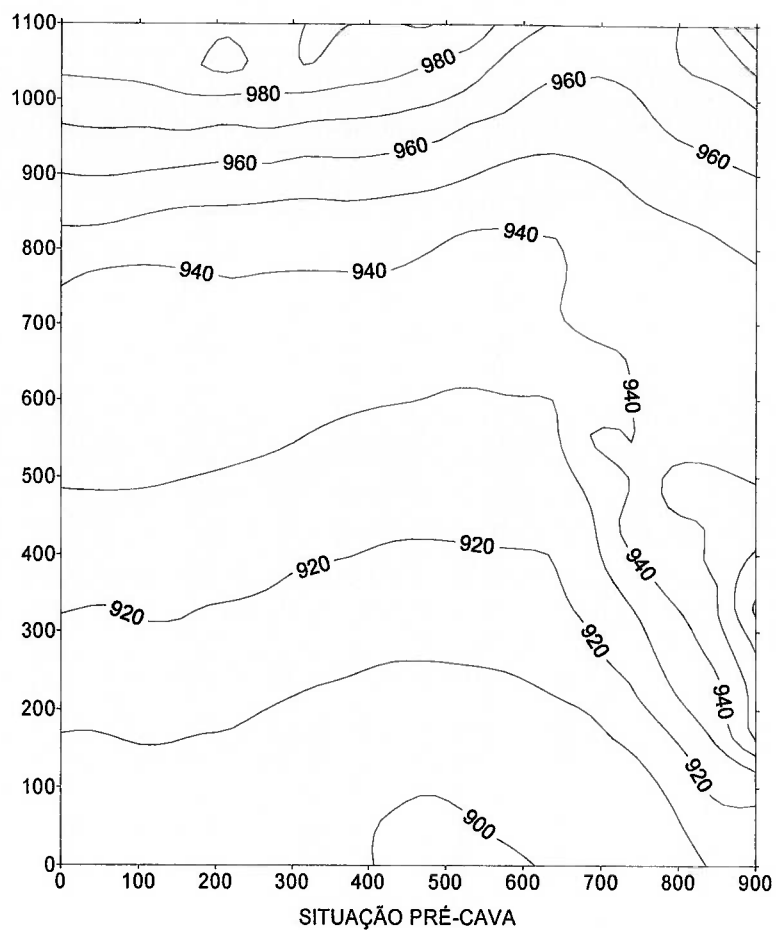


Figura 4.8. Planta planialtimétrica da área anterior à lavra

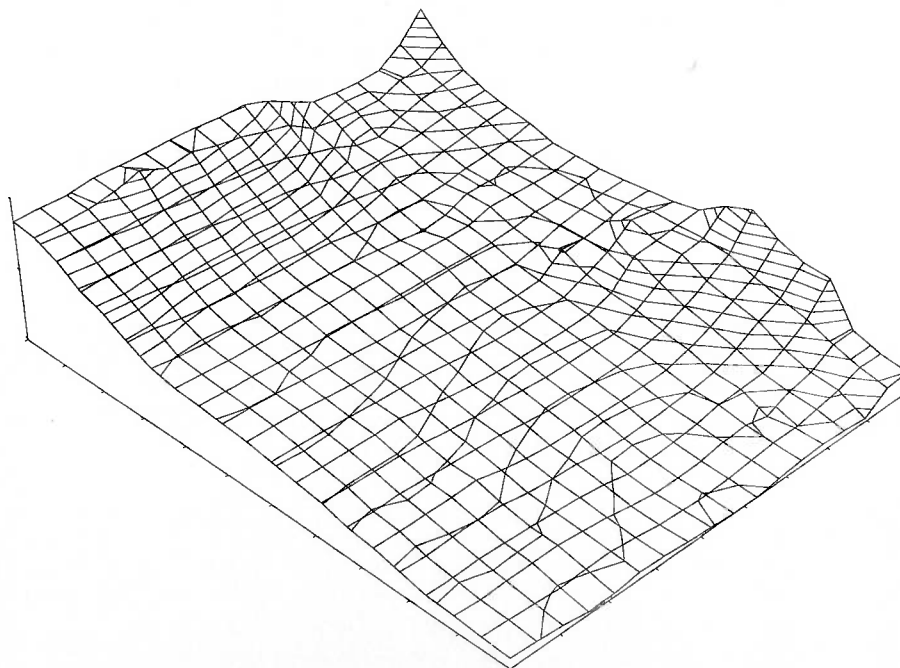


Figura 4.9. Modelo da área anterior à lavra

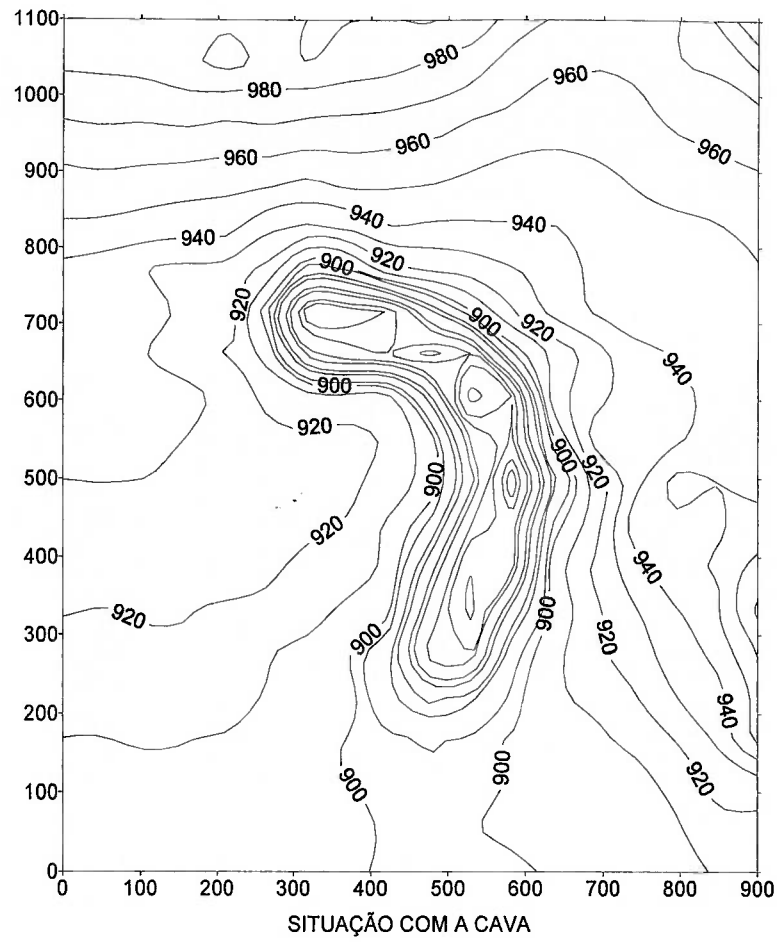


Figura 4.10. Planta planialtimétrica da área lavrada

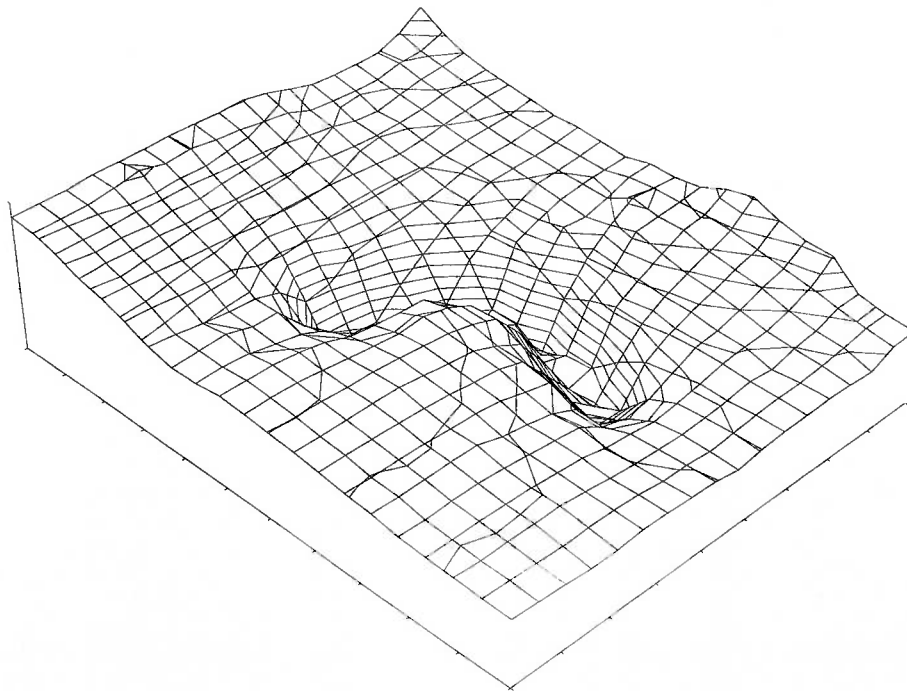


Figura 4.11. Modelo da área lavrada

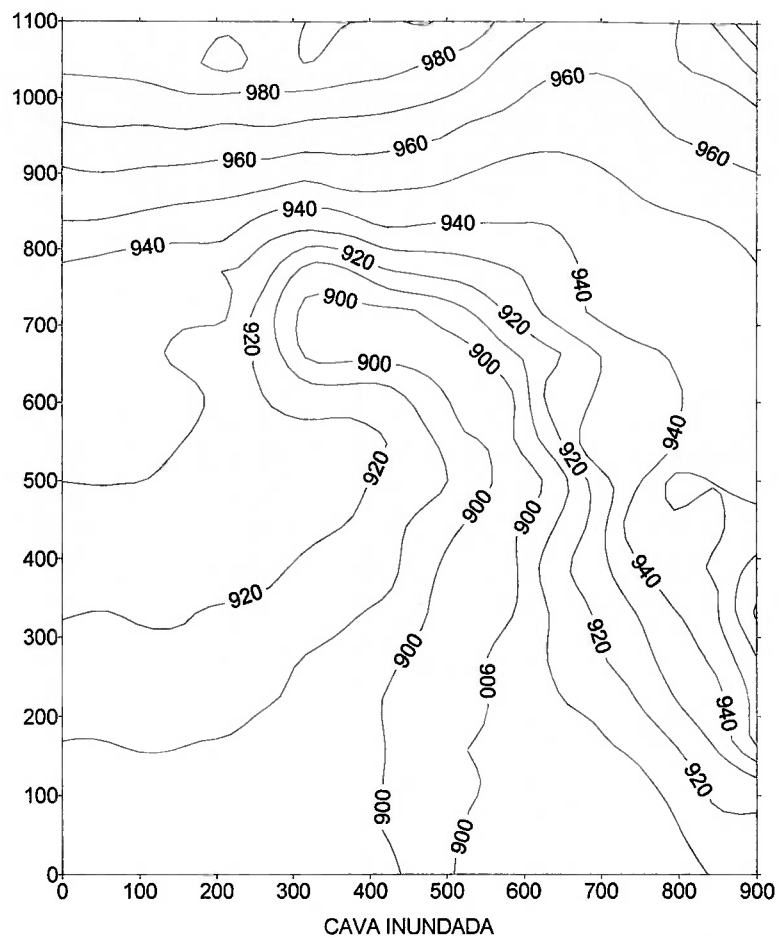


Figura 4.12. Planta planialtimétrica da cava inundada

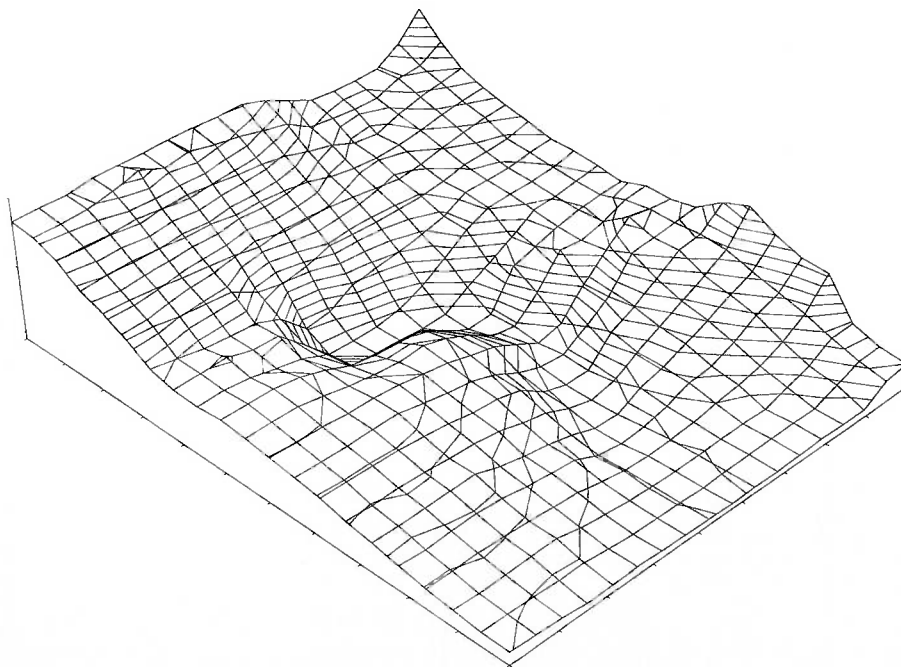


Figura 4.13. Modelo da cava inundada

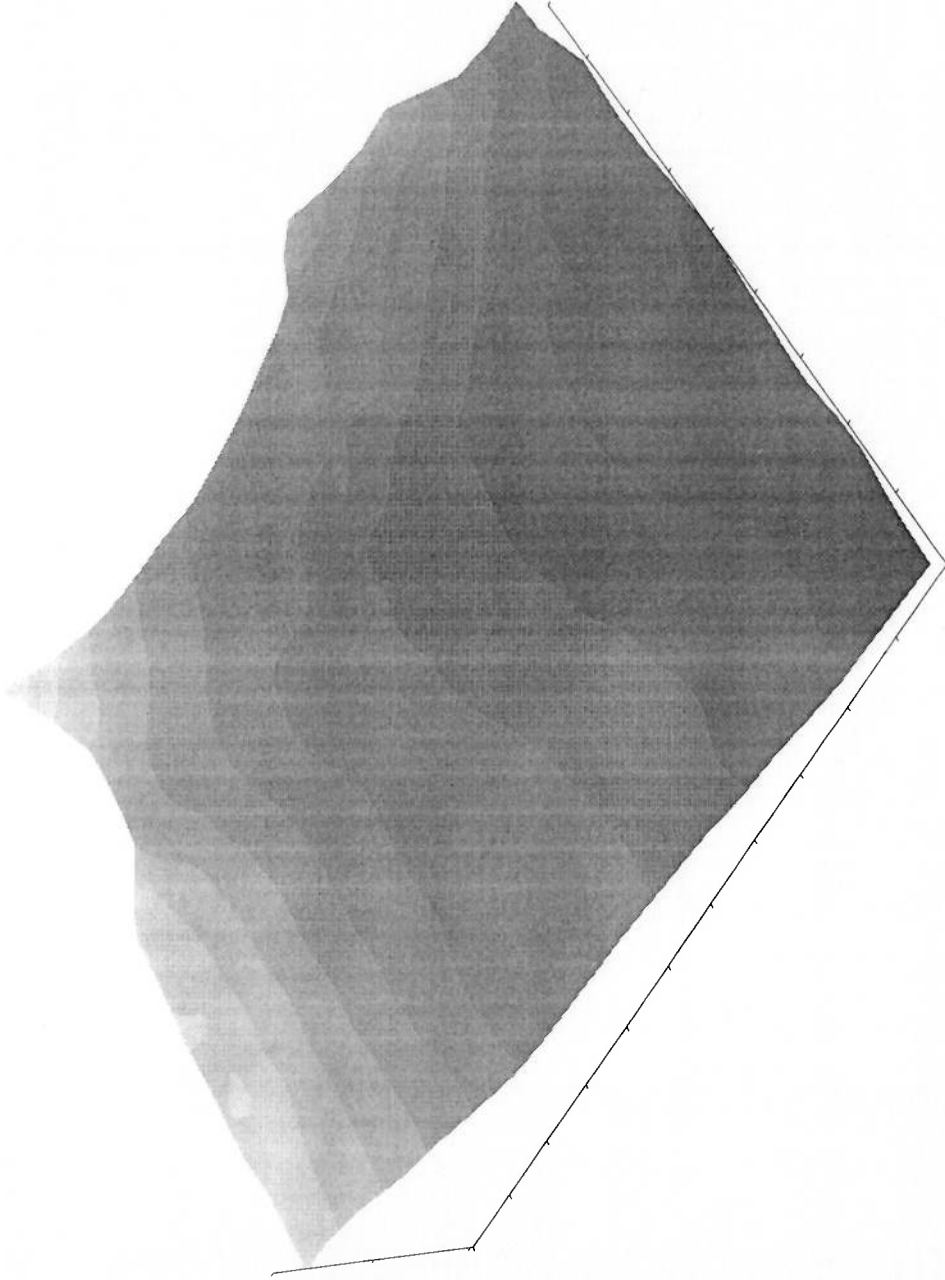


Figura 4.14. Aspecto da área anterior à lavra

A importância dos condicionantes geológico-geotécnicos na recuperação de áreas degradadas por lavra de minas a céu aberto

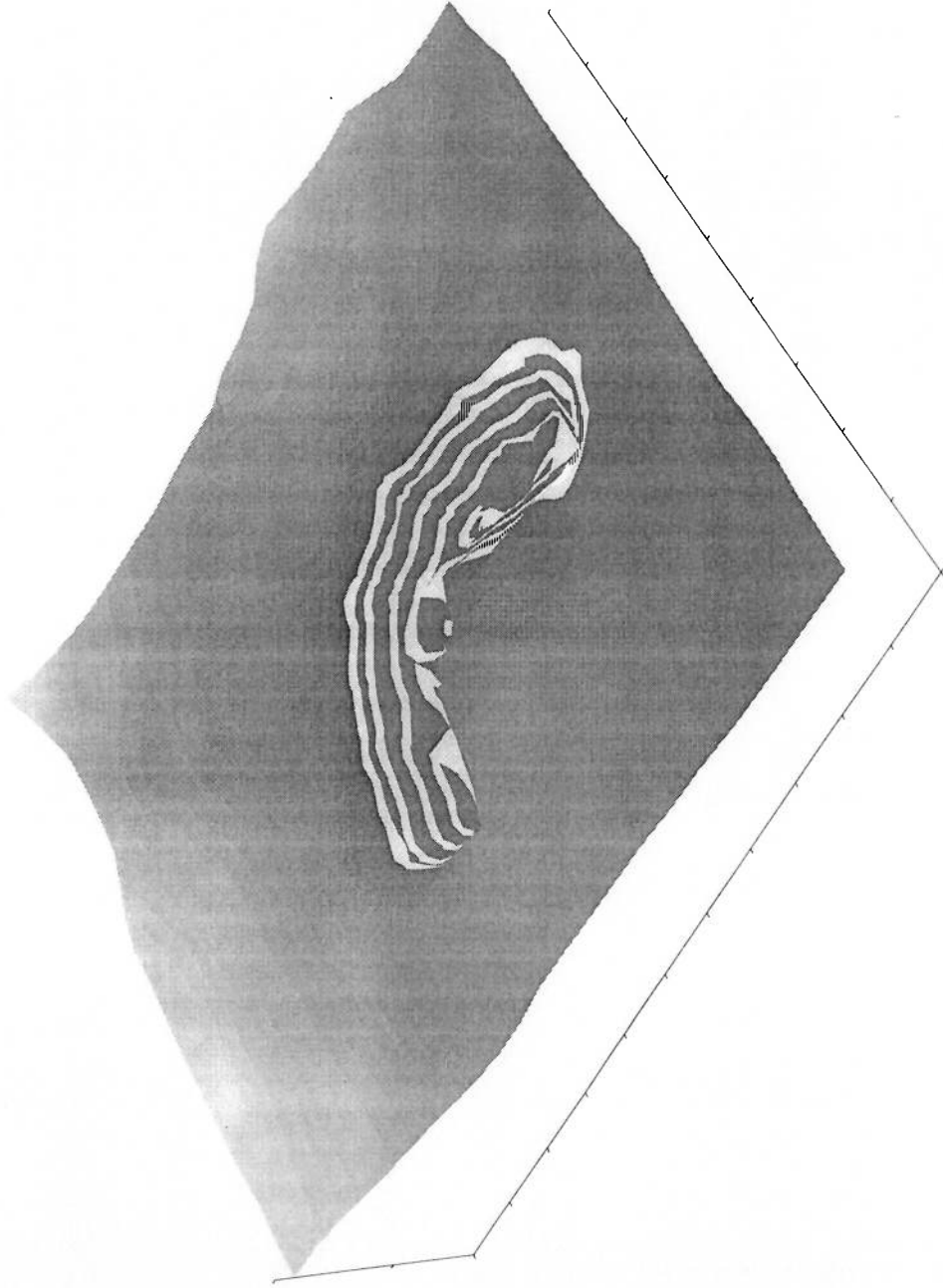


Figura 4.15. Aspecto da área lavrada

A importância dos condicionantes geológico-geotécnicos na recuperação de áreas degradadas por lavra de minas a céu aberto

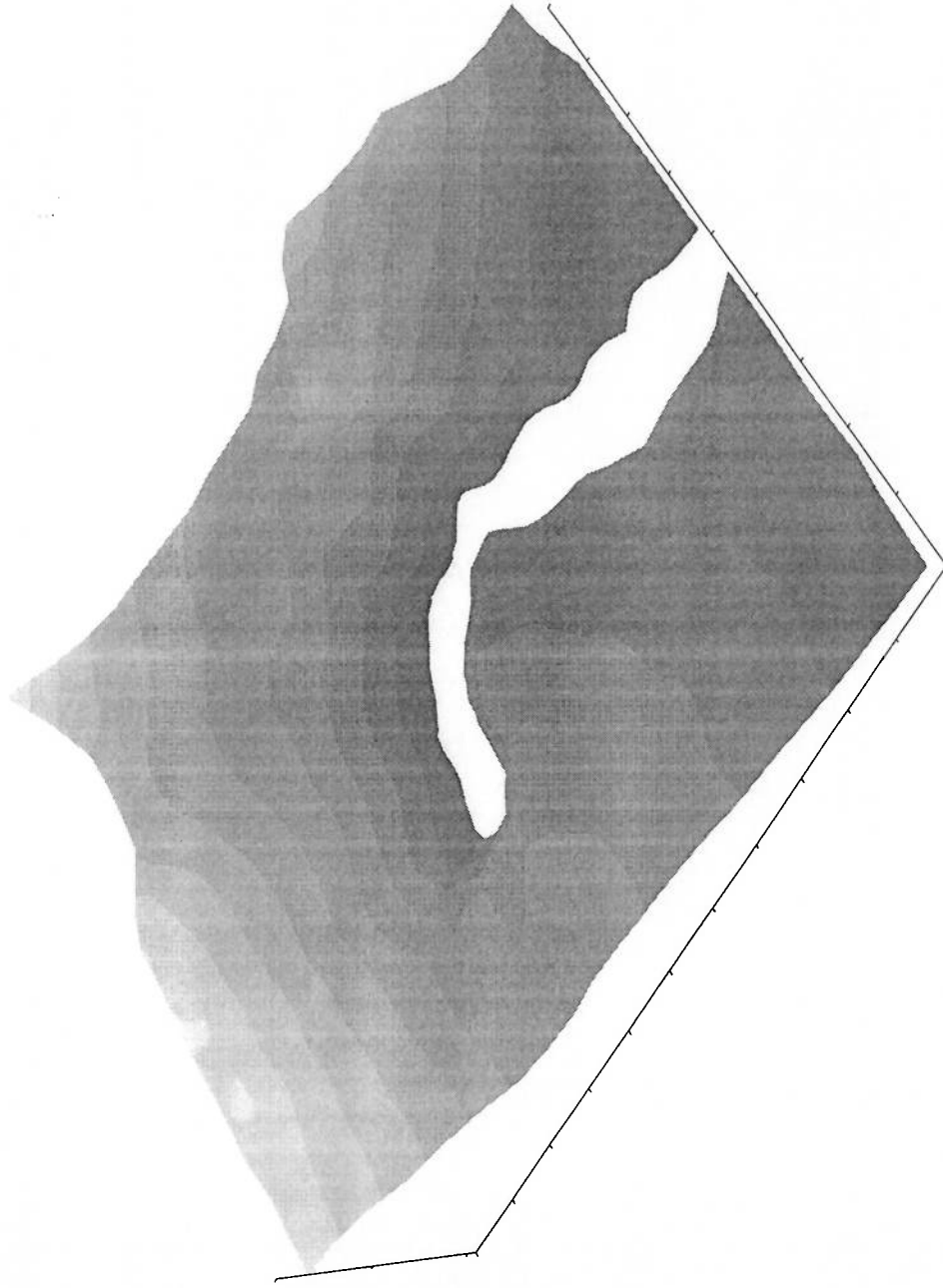


Figura 4.16. Aspecto da cava inundada

A importância dos condicionantes geológico-geotécnicos na recuperação de áreas degradadas por lavra de minas a céu aberto

A próxima sequência, das figuras 4.17. a 4.25., mostra uma cava em solo cuja recuperação prevê aterro parcial até o nível em que o piso da cava intercepta o terreno circundante, de forma que as águas subterrâneas e de superfície são drenadas naturalmente para fora da cava. É uma solução viável somente para cavas pouco profundas, devidos aos volumes envolvidos. O aterro pode ser feito ao longo da vida da mina com o próprio estéril ou rejeito.

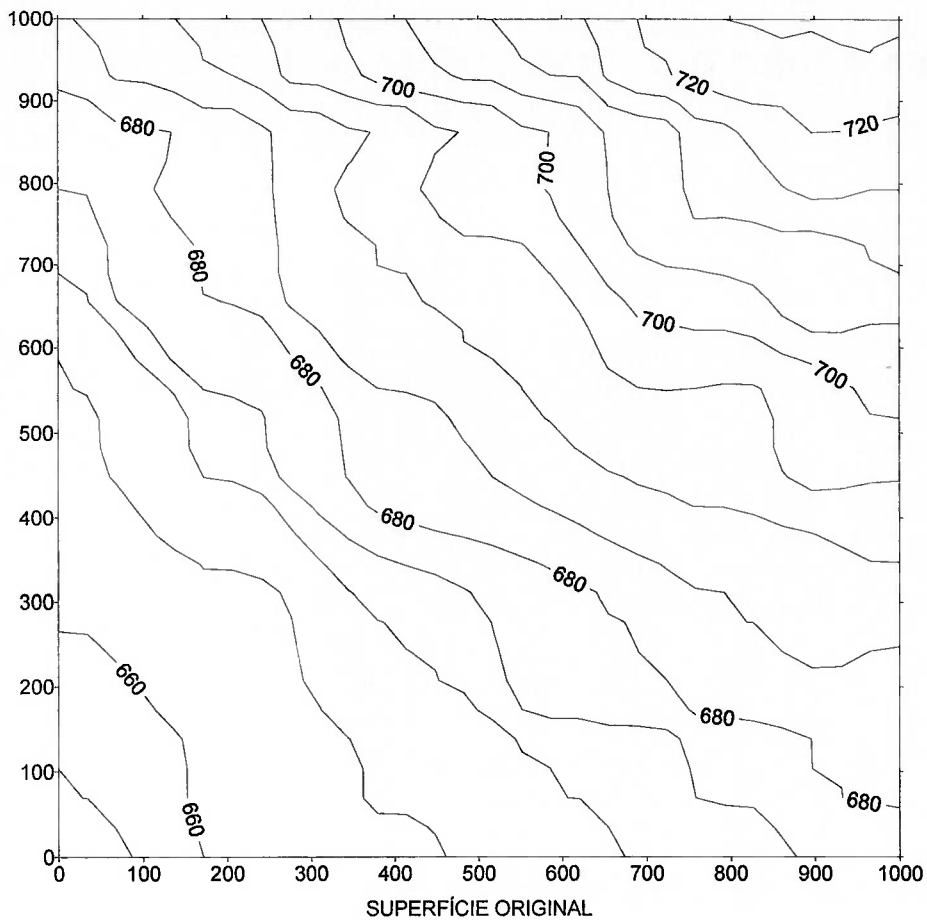


Figura 4.17. Planta planialtimétrica da área anterior à lavra

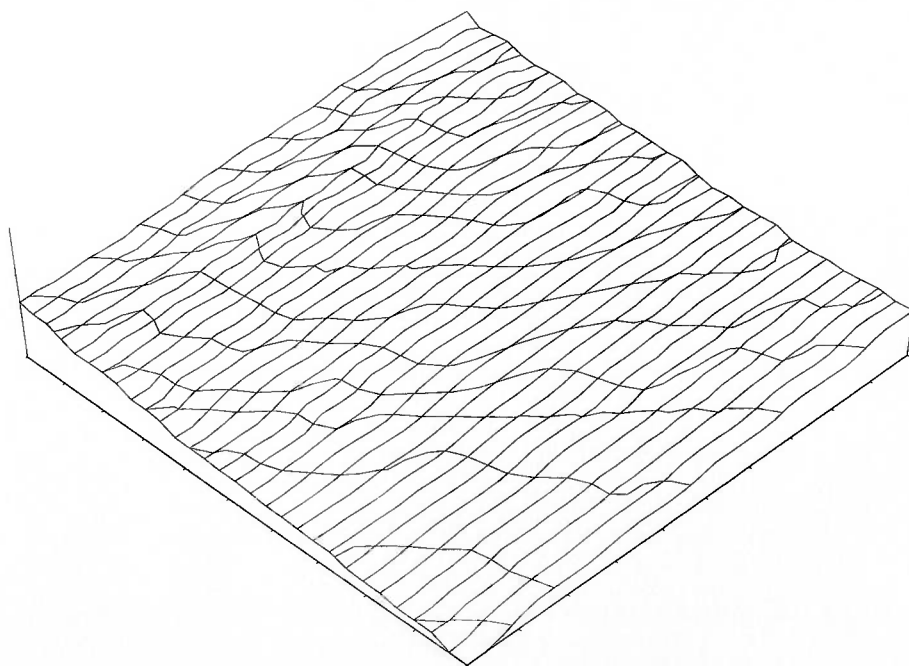


Figura 4.18. Modelo da área anterior à lavra

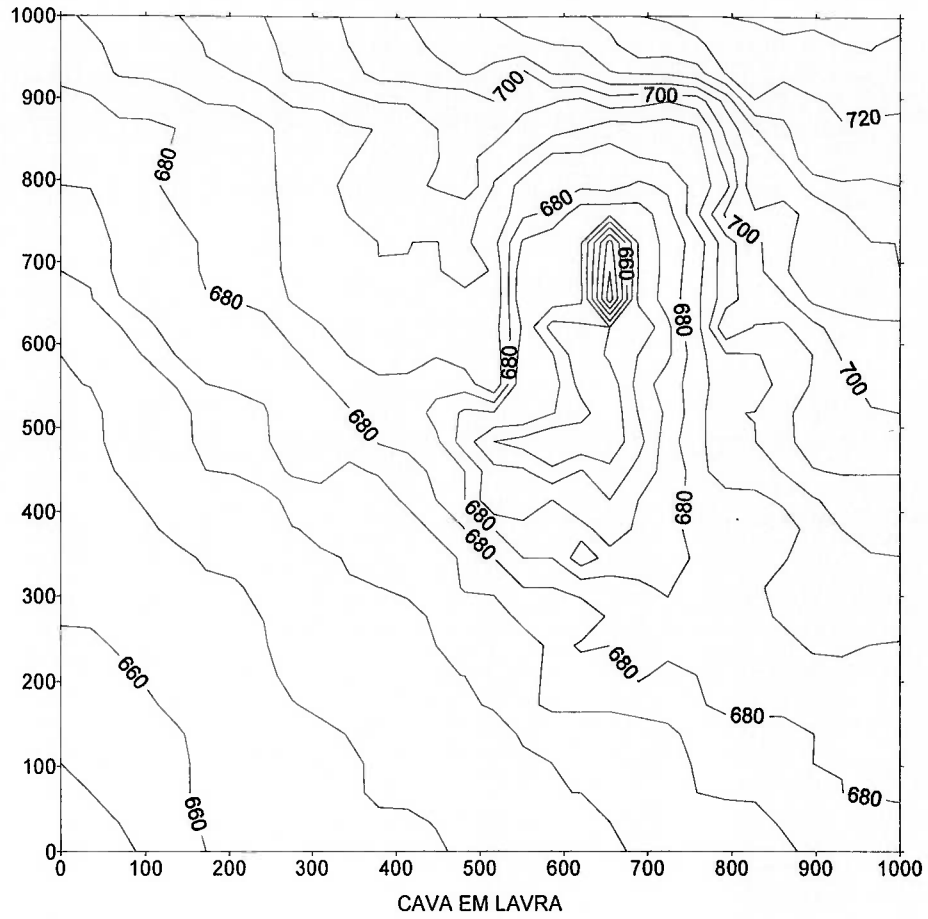


Figura 4.19. Planta planialtimétrica da área lavrada

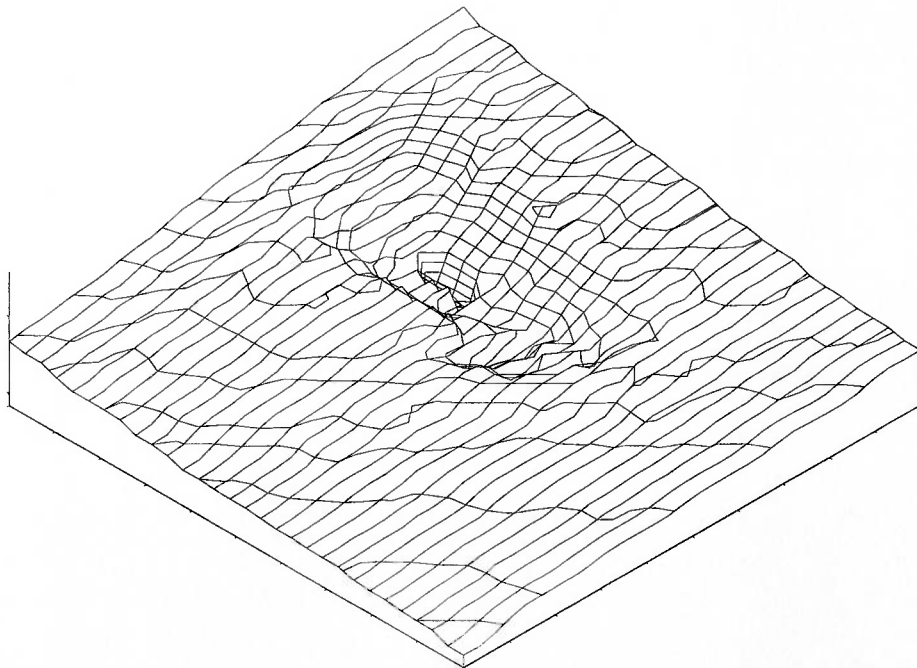


Figura 4.20. Modelo da área lavrada

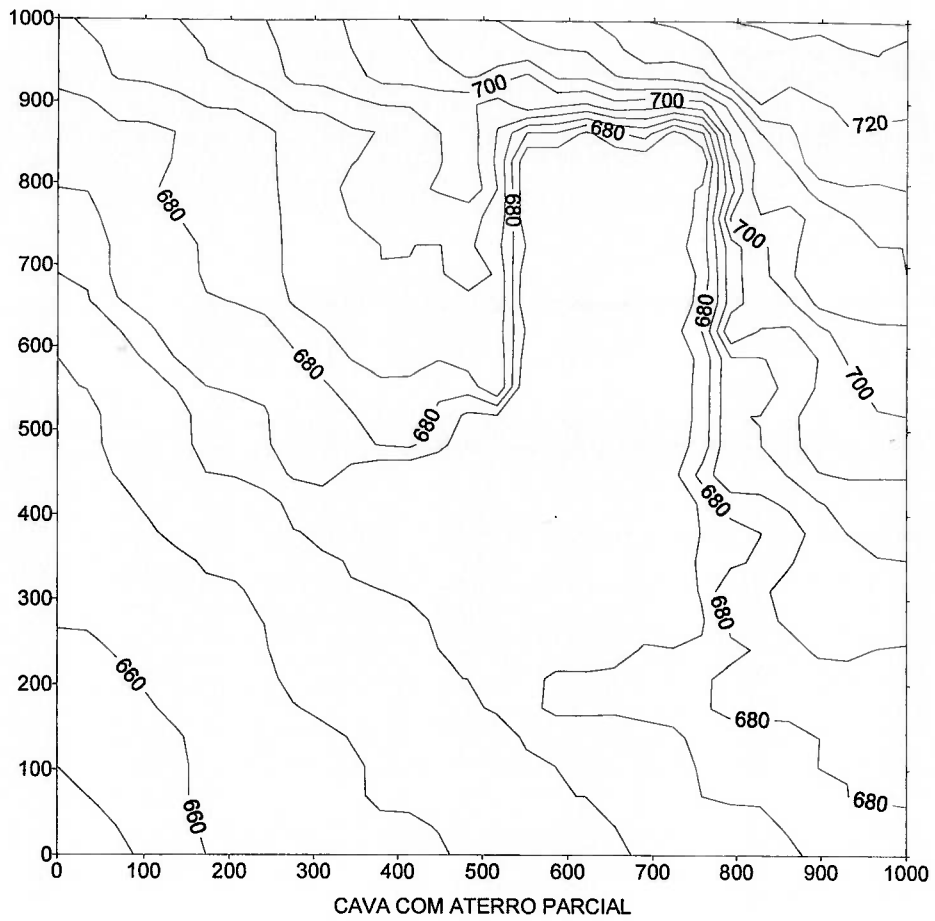


Figura 4.21. Planta planialtimétrica da área após aterro parcial

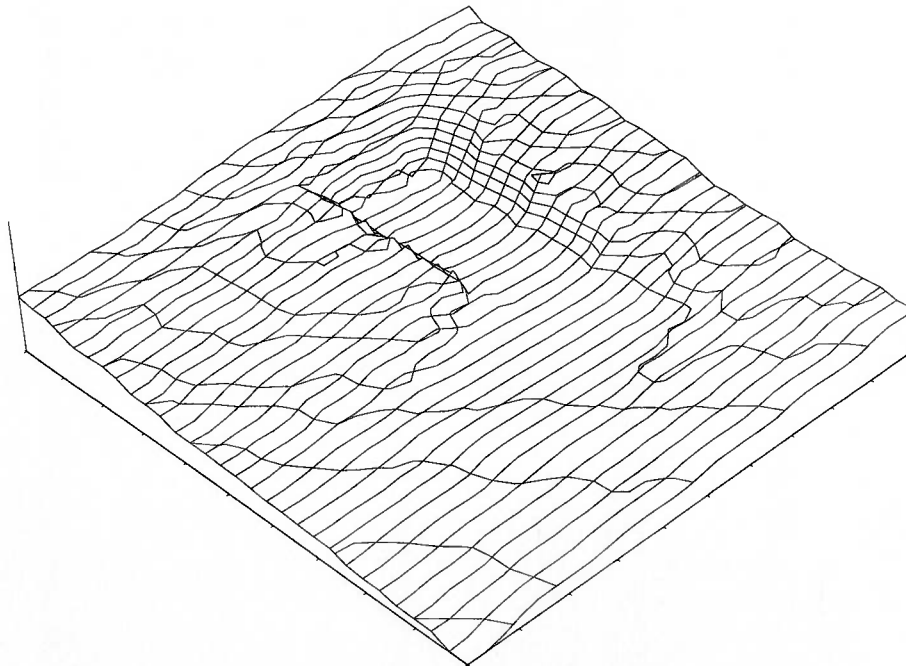


Figura 4.22. Modelo da área após aterro parcial

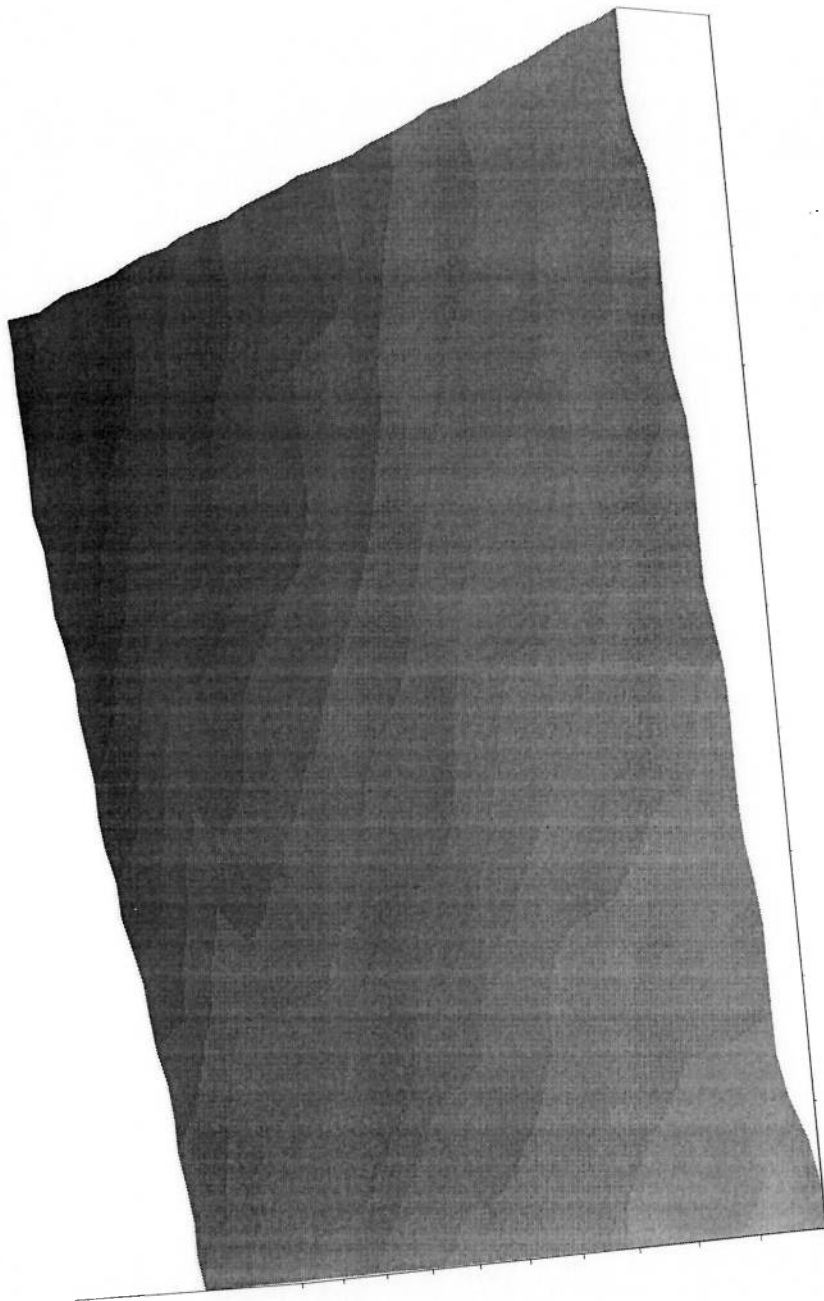


Figura 4.23. Aspecto da área anterior à lavra

A importância dos condicionantes geológico-geotécnicos na recuperação de áreas degradadas por lavra de minas a céu aberto

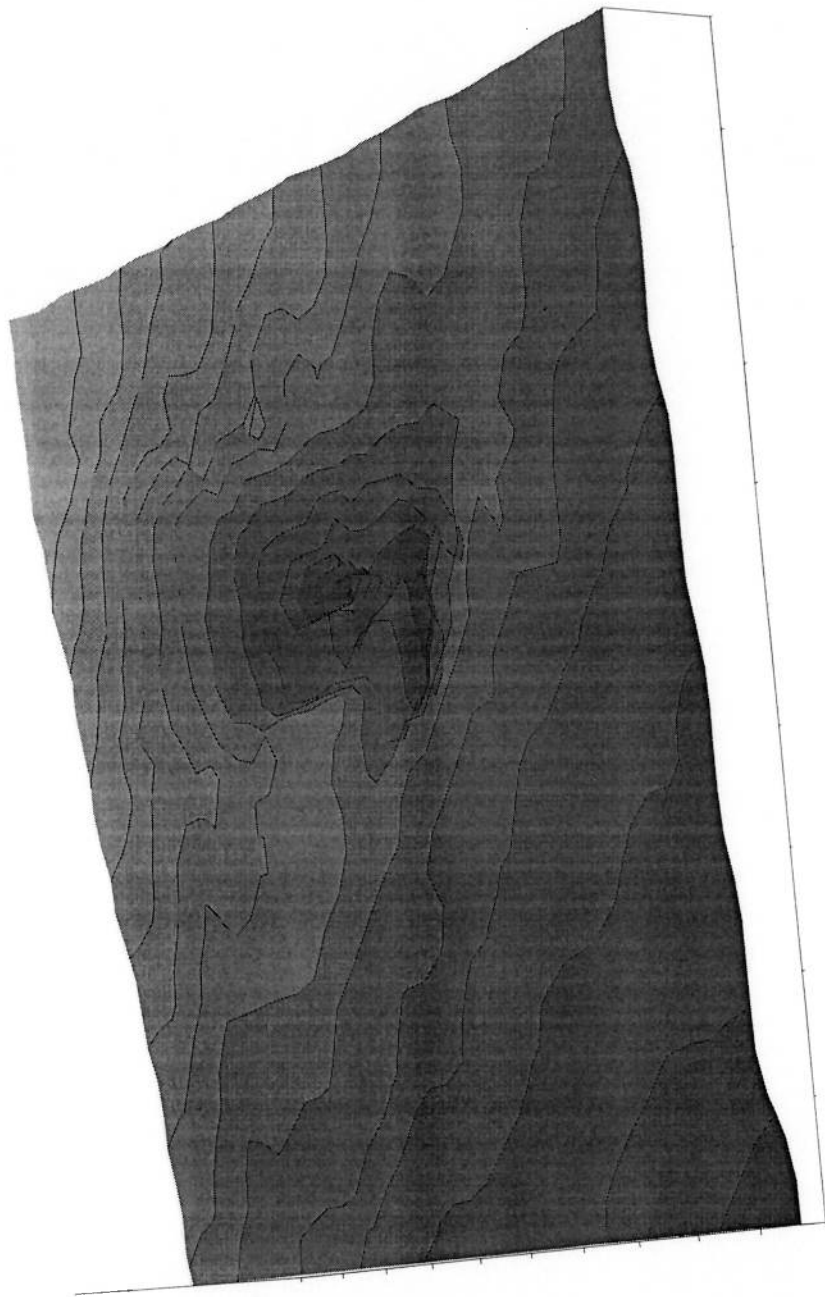


Figura 4.24. Aspecto da área lavrada

A importância dos condicionantes geológico-geotécnicos na recuperação de áreas degradadas por lavra de minas a céu aberto

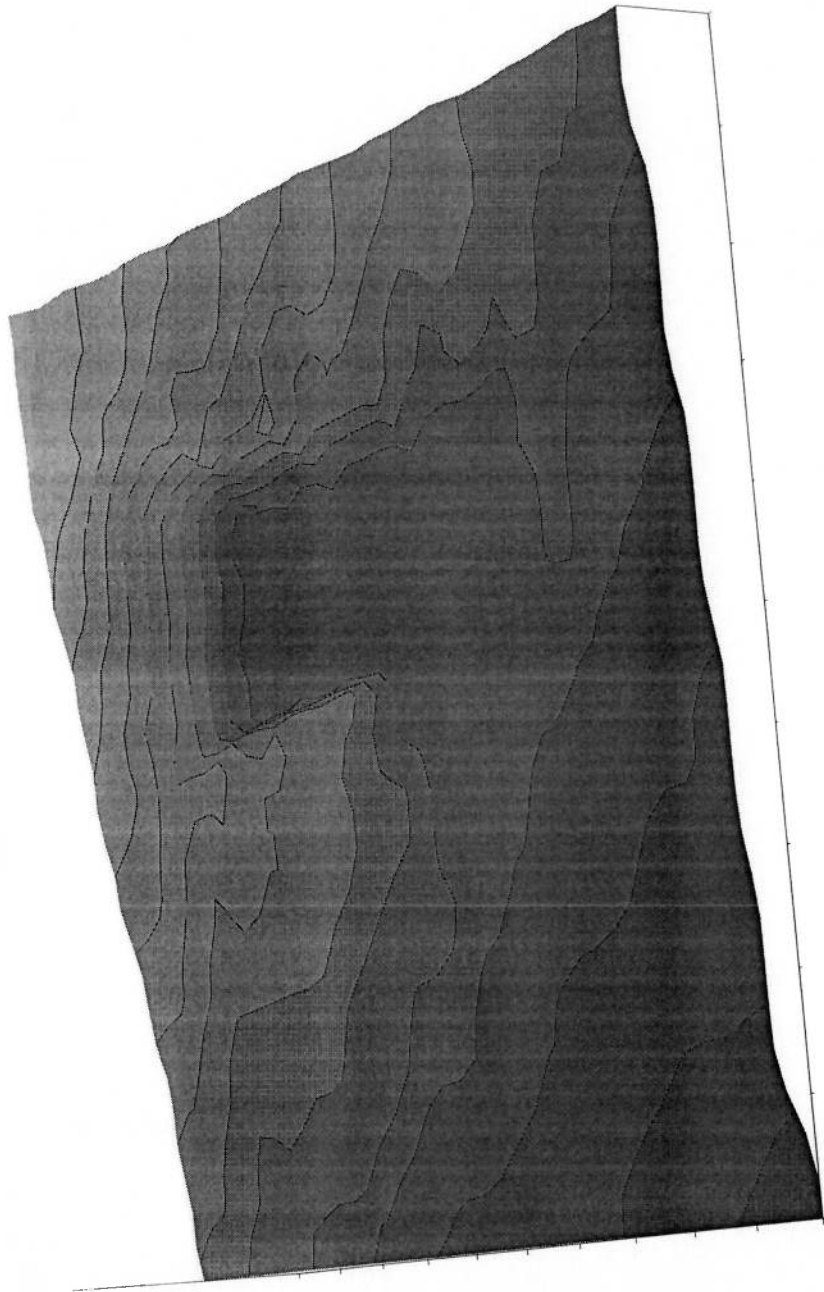


Figura 4.25. Aspecto da área após aterro parcial

4.5.1. ÁREAS DE DEPOSIÇÃO DE ESTÉRIL

Normalmente o estéril é disposto em pilhas (bota-foras). A disposição desse material deve ser feita em local apropriado e já previsto anteriormente. A camada fértil do solo da área deverá ser removida e estocada para recolocação, se a operação do estéril for concluída antes de 2 anos. Caso contrário, a camada fértil do solo deverá ser utilizada em outra área degradada que a necessite. Obras de drenagem para desviar mananciais hídricos deverão ser construídas antes da formação do depósito. A drenagem superficial do depósito será importante para a proteção e controle da erosão. Volumes e alturas deverão ser definidos levando em conta aspectos geotécnicos. Tão logo quanto possível, após a conclusão das obras de formação dos depósitos, deverá ser iniciada a revegetação dos mesmos. Deverão também ser observadas as características dos rejeitos e estéril segundo a norma ABNT (NBR 10004) (resíduo classe I – perigoso; resíduo classe II - não inerte; resíduo classe III – inerte). Os rejeitos de mineração são mais comumente inertes.

Os volumes de estéril envolvidos nas pilhas podem ser consideráveis, como no caso de minerações de minério de ferro. Nas pilhas de estéril, os critérios geotécnicos são fundamentais no projeto e controle da estabilidade dessas pilhas, mas podem ser aliados a uma função paisagística, dispondo o estéril de maneira a harmonizar-se à paisagem local. Outra alternativa é tirar-se partido das características da topografia regular desses depósitos para outros fins (galpões industriais, núcleos habitacionais), desde que o material seja inerte e não apresente riscos potenciais à saúde humana. Em última análise, trata-se de um aterro que necessariamente precisa ser disposto de alguma forma, e que pode muito bem ser conformado topograficamente de acordo com seu uso futuro, já na fase de disposição, desde que atendendo os condicionantes geotécnicos e os métodos adequados de deposição que garantem sua estabilidade.

O exemplo apresenta simulações gráficas para duas configurações de pilha de estéril locadas sobre a área original correspondentes às figuras 4.26. e 4.27. A primeira (figuras 4.28. e 4.29.) refere-se à uma pilha convencional, de faces lineares. A segunda configuração (figuras 4.30. e 4.31.) refere-se à uma pilha que também atende os critérios de estabilidade, mas cujas faces foram moldadas conforme o contorno natural adjacente, e com topo da pilha assimétrico, diminuindo a monotonia de um contorno excessivamente retilíneo. Observa-se nas tabelas 4.1 e 4.2, geradas pela simulação computacional no programa Surfer 5.0, que os volumes das duas configurações é praticamente o mesmo (cerca de 30 milhões de m³). Da mesma forma, o processo construtivo, e conseqüentemente seu custo, é praticamente equivalente com um resultado paisagístico superior na segunda configuração.

Ressalva-se novamente que para qualquer configuração de pilha, independentemente de qual seja o resultado paisagístico final, devem necessariamente ser atendidos os condicionantes de estabilidade geotécnica desses depósitos.

Tabela 4.1. Cálculo de volumes e áreas da pilha típica

```

VOLUME COMPUTATIONS

UPPER SURFACE
Grid File:  PILHATIP.GRD
Rows: 0 to 32766
Cols: 0 to 32766
Grid size as read:      38 cols by 50 rows
Delta X:   35.1351
Delta Y:   30.6122
X-Range:  0 to 1300
Y-Range:  0 to 1500
Z-Range: -9.96517 to 199.87

LOWER SURFACE
Grid File:  PILHAPRE.GRD
Rows: 0 to 32766
Cols: 0 to 32766
Grid size as read:      38 cols by 50 rows
Delta X:   35.1351
Delta Y:   30.6122
X-Range:  0 to 1300
Y-Range:  0 to 1500
Z-Range: -9.96517 to 147.835

VOLUMES
Approximated Volume by
Trapezoidal Rule: 2.96837E+007
Simpson's Rule:   2.96899E+007
Simpson's 3/8 Rule: 2.97185E+007

CUT & FILL VOLUMES
Positive Volume [Cuts]: 2.97466E+007
Negative Volume [Fills]: 63257.1
Cuts minus Fills: 2.96834E+007

AREAS
Positive Planar Area
(Upper above Lower): 1.34489E+006
Negative Planar Area
(Lower above Upper): 605113
Blanked Planar Area: 0
Total Planar Area: 1.95E+006

Positive Surface Area
(Upper above Lower): 1.40374E+006
Negative Surface Area
(Lower above Upper): 605260

```

Tabela 4.2. Cálculo de volumes e áreas da pilha otimizada

VOLUME COMPUTATIONS	
UPPER SURFACE	
Grid File:	PILHAPRO.GRD
Rows:	0 to 32766
Cols:	0 to 32766
Grid size as read:	38 cols by 50 rows
Delta X:	35.1351
Delta Y:	30.6122
X-Range:	0 to 1300
Y-Range:	0 to 1500
Z-Range:	-9.96517 to 229.669
LOWER SURFACE	
Grid File:	PILHAPRE.GRD
Rows:	0 to 32766
Cols:	0 to 32766
Grid size as read:	38 cols by 50 rows
Delta X:	35.1351
Delta Y:	30.6122
X-Range:	0 to 1300
Y-Range:	0 to 1500
Z-Range:	-9.96517 to 147.835
VOLUMES	
Approximated Volume by	
Trapezoidal Rule:	3.09217E+007
Simpson's Rule:	3.08924E+007
Simpson's 3/8 Rule:	3.09418E+007
CUT & FILL VOLUMES	
Positive Volume [Cuts]:	3.10151E+007
Negative Volume [Fills]:	93707.4
Cuts minus Fills:	3.09214E+007
AREAS	
Positive Planar Area	
(Upper above Lower):	1.33837E+006
Negative Planar Area	
(Lower above Upper):	611632
Blanked Planar Area:	0
Total Planar Area:	1.95E+006
Positive Surface Area	
(Upper above Lower):	1.40064E+006
Negative Surface Area	
(Lower above Upper):	611997

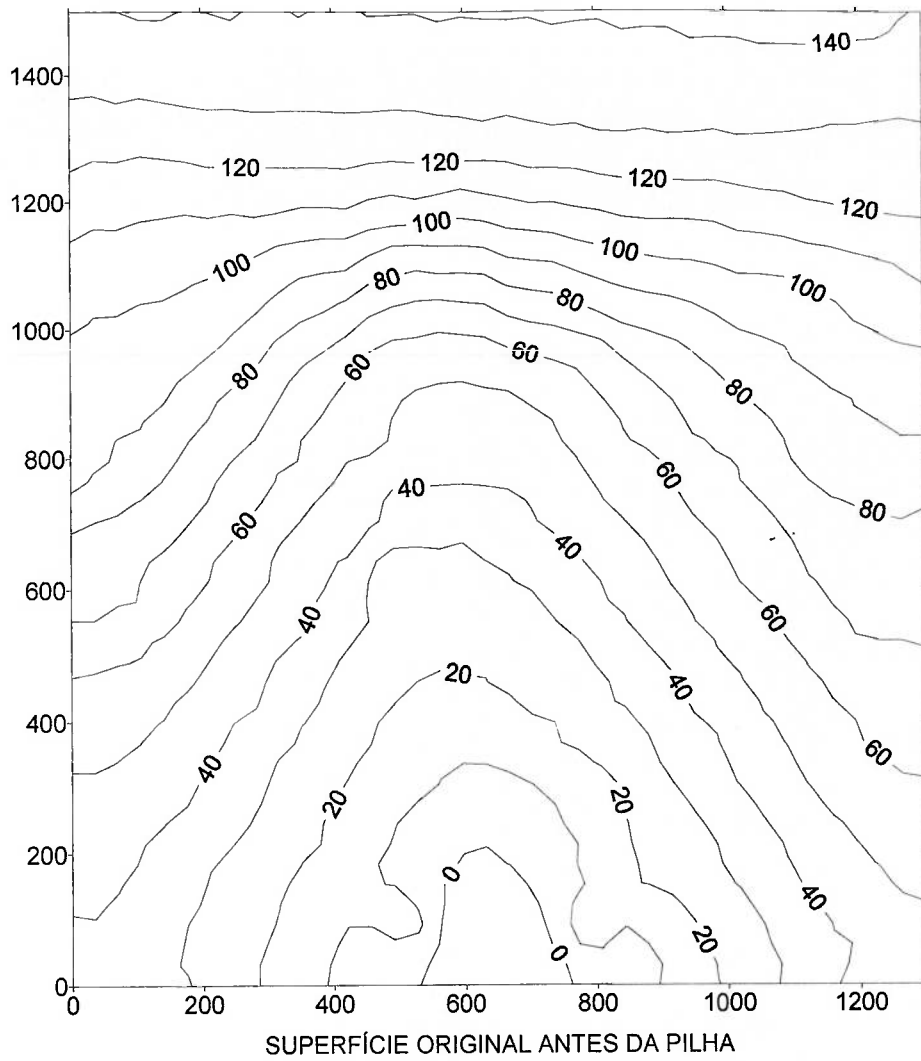


Figura 4.26. Planta planialtimétrica da área anterior à pilha

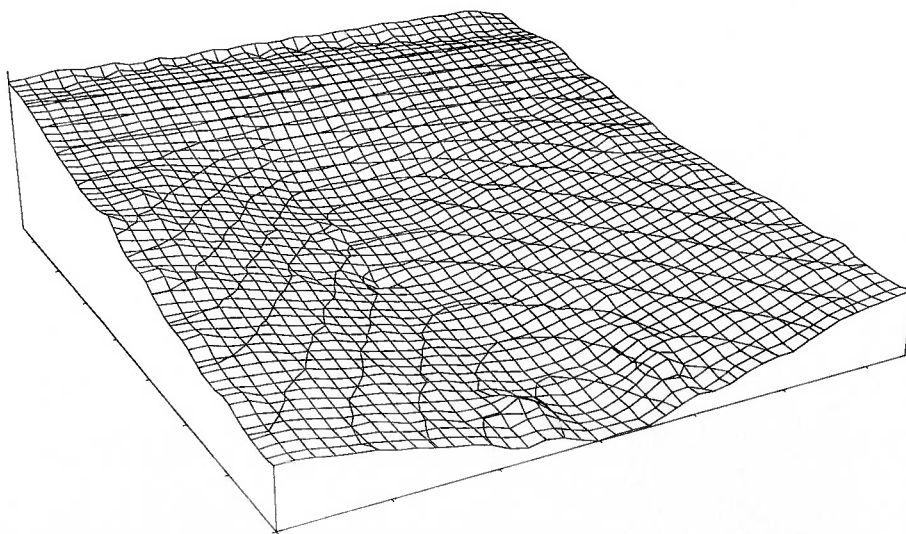


Figura 4.27. Modelo da área anterior à pilha

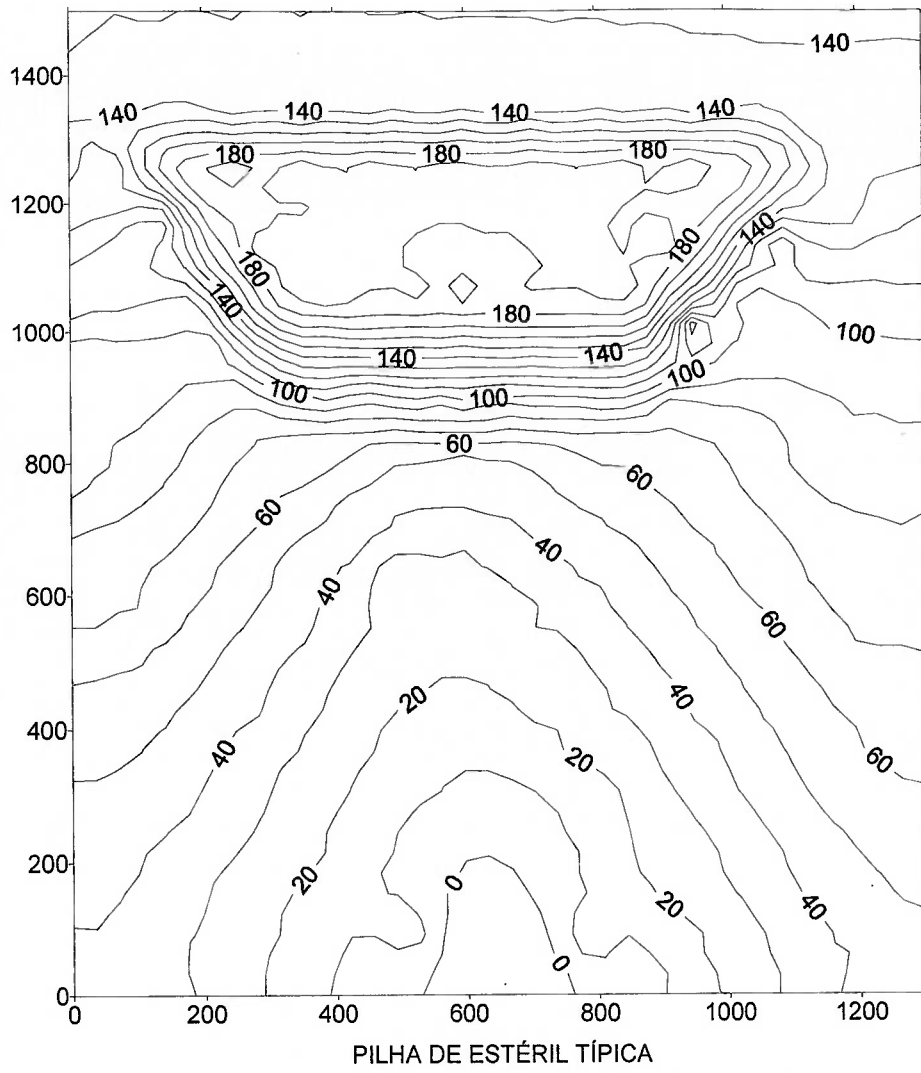


Figura 4.28. Planta planialtimétrica de pilha de estéril típica

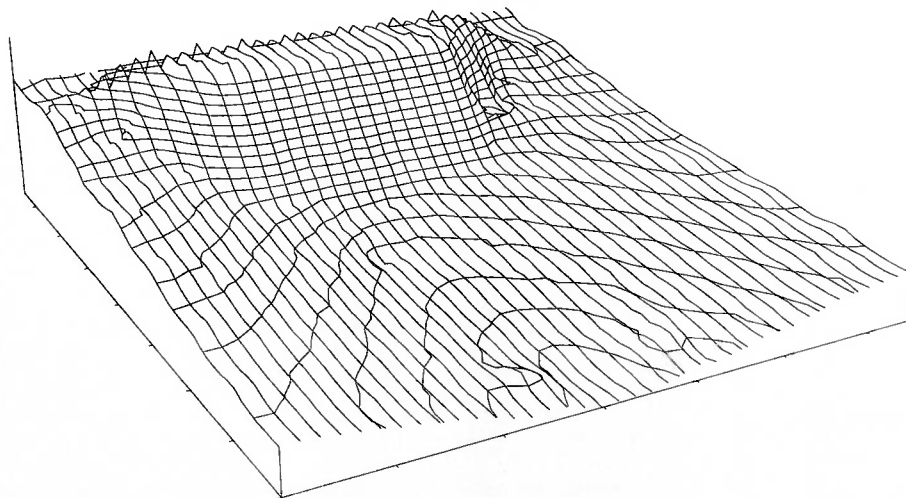


Figura 4.29. Modelo de pilha de estéril típica

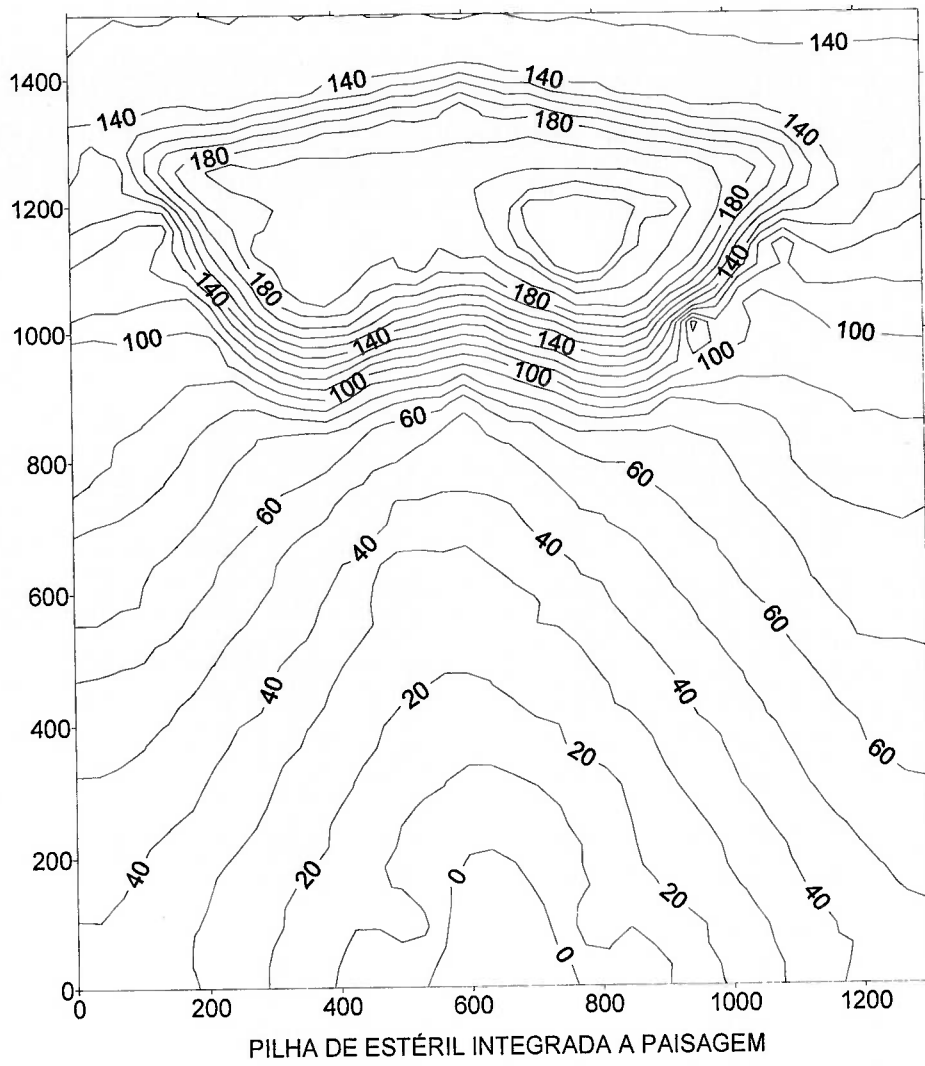


Figura 4.30. Planta planialtimétrica de pilha de estéril otimizada

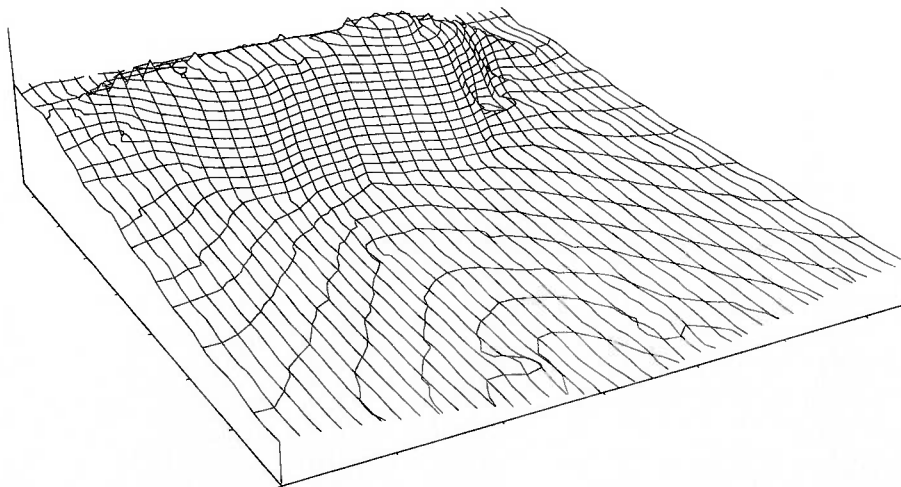


Figura 4.31. Modelo de pilha de estéril otimizada

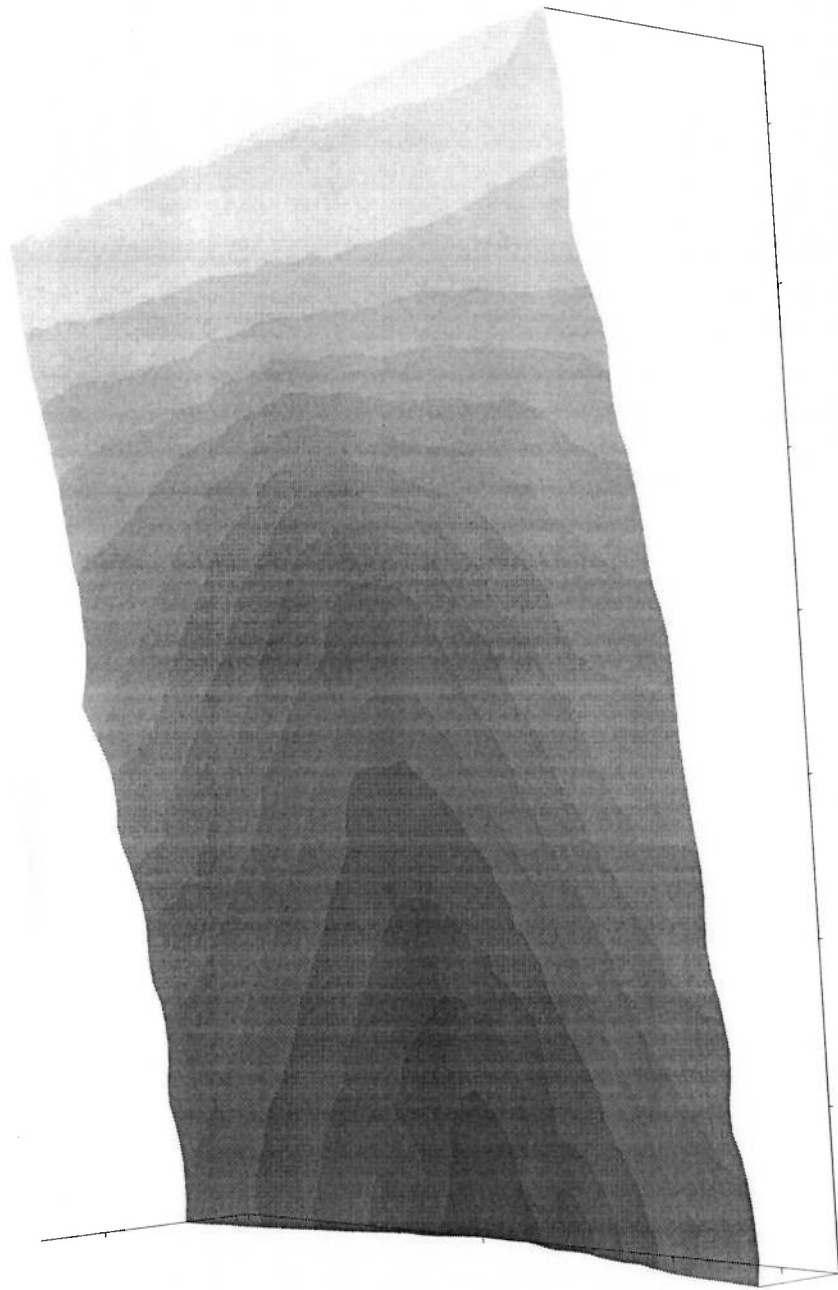


Figura 4.32. Aspecto da área anterior à pilha

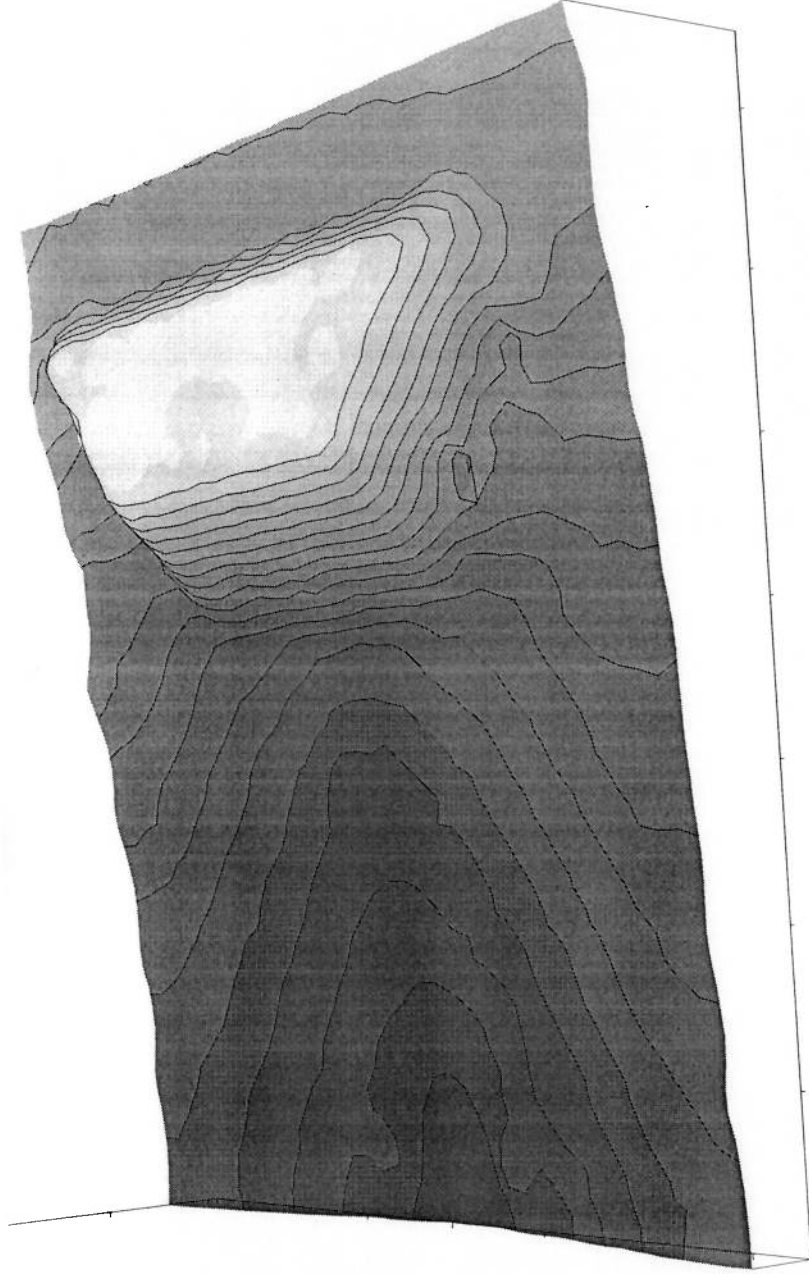


Figura 4.33. Aspecto da pilha de estéril típica

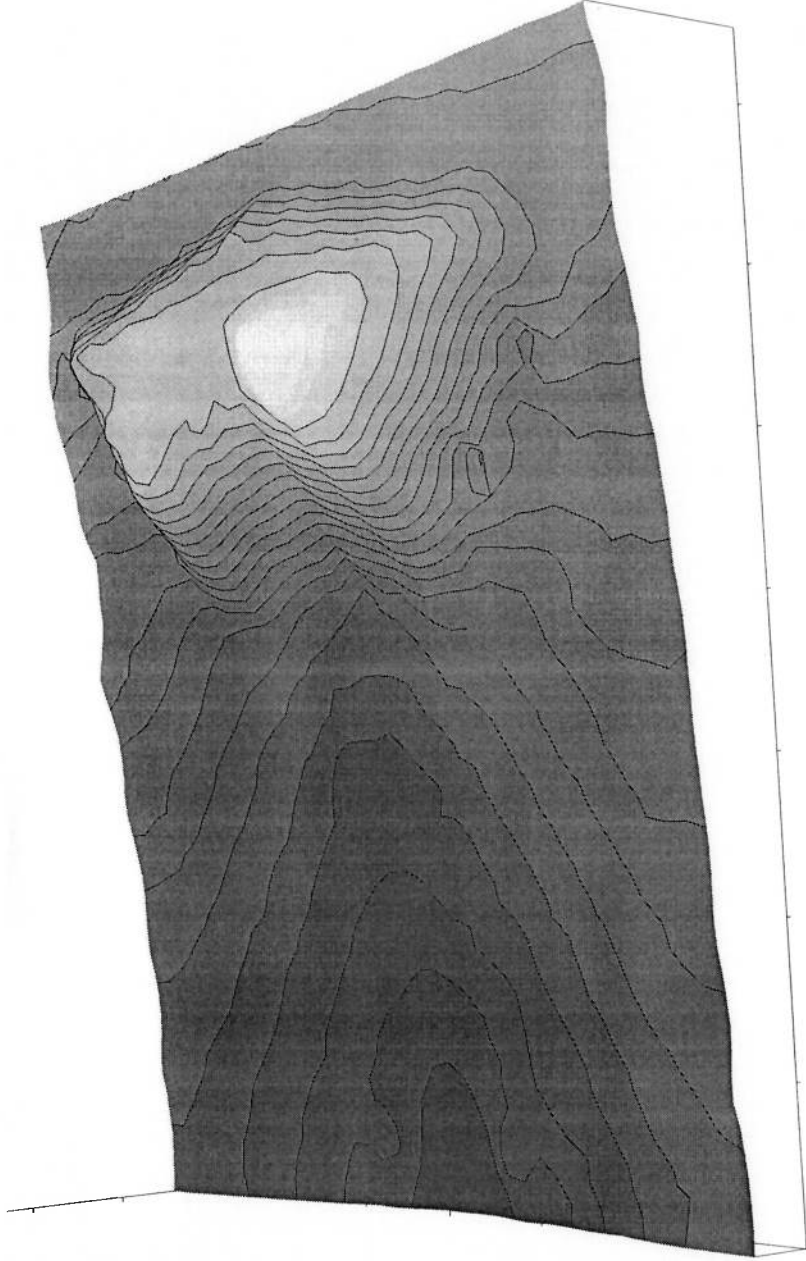


Figura 4.34. Aspecto da pilha de estéril otimizada

4.5.2. ÁREAS DE DEPOSIÇÃO DE REJEITOS

Quando possível, o rejeito deve ser depositado em setores da própria cava. Caso não seja possível, terá de ser disposto em barragens de rejeito. A disposição desses depósitos deve ser feita em local apropriado, e projetada especificamente para contenção de rejeitos de beneficiamento.

De acordo com FORNAZARI FILHO ET AL. (1981), aspectos como forma, tamanho ou coloração da barragem de rejeito podem torná-la incompatível com a paisagem circundante. As barragens transversais aos vales sobressaem-se menos que as situadas longitudinalmente nas encostas ou terrenos planos. A revegetação dos corpos de rejeito, além de auxiliar na estabilização, reduz o efeito visual negativo e pode ser executado durante ou após o período de deposição.

Após o esgotamento da capacidade da barragem ou o fim da vida útil da mina, e com o rejeito já drenado e consolidado e a sua superfície estabilizada, a área pode ser usada para desenvolvimento urbano ou industrial. No entanto, deve-se considerar que essa utilização acarreta no não aproveitamento futuro para reprocessamento do rejeito. Uma restrição quanto ao reaproveitamento da área é a presença de substâncias tóxicas ou radiativas nos rejeitos. No mundo há vários casos de ocupação de antigas barragens com indústrias, e no Brasil, ocupação de barragens de rejeitos de portos de areia para instalação de galpões industriais. A vantagem de reutilizar uma barragem para essa finalidade é que em virtude de sua armazenagem ter sido hidráulica, a superfície resultante tende a ser plana. Uma vez consolidado, o terreno é bastante uniforme, dispensando maiores obras de terraplanagem.

5. CONDICIONANTES GEOLÓGICO-GEOTÉCNICOS APLICADOS A MEDIDAS DE RECUPERAÇÃO - ANÁLISE DOS CASOS

5.1. EXEMPLO 1 - MINERAÇÃO DE AREIA INDUSTRIAL

5.1.1. INTRODUÇÃO

A mineração de areia industrial em São Paulo é explorada em cavas, por escavação mecânica. A mineração de areia para construção civil, por sua vez, é explorada por desmonte hidráulico em cava, ou por dragagem de leitos de rio.

5.1.2. DESCRIÇÃO GERAL

A Mineração Descalvado é uma empresa de mineração de areia industrial (areia para fundição e areia para produção de vidro), pertencente à indústria vidreira CISPER, que responde pela maior parte do consumo de sua produção. Localiza-se em Descalvado, SP, na porção central do estado, a cerca de 40 km de São Carlos.



Figura 5.1. Aspecto geral da Mineração Descalvado

A lavra é realizada em camadas de arenito por escavação mecânica com retro-escavadeiras e carregamento em caminhões, ao longo de bancadas.



Figura 5.2. Lavra do arenito por escavação direta

Basicamente a lavra é realizada em três bancadas, com altura média de dez a quinze metros. Cada bancada corresponde a uma camada diferente de arenito (formação Santa Rita, mais superficial, formação Botucatu, intermediária, e formação Pirambóia, mais profunda), de teores de contaminantes (Fe_2O_3 , argila) variáveis. O material da primeira bancada (Santa Rita), mais superficial, não atende a especificação para produção de areia de vidro, se constituindo em estéril, utilizado para reaterro da cava e recomposição topográfica.



Figura 5.3. Vista da cava, com as três camadas de arenito em lavra

A escala de movimentação de materiais na mina é da ordem de 30.000 t/mês de R.O.M. e estéril. O beneficiamento se dá basicamente por lavagem e classificação, em scrubbers, peneiras rotativas, hidroclassificadores e ciclonagem, classificando o minério conforme as faixas granulométricas exigidas para os produtos. Uma das linhas também incorpora uma separação magnética, para diminuir o teor do contaminante Fe_2O_3 . Há geração de rejeito fino (overflow de ciclonagem, cerca de 2500 t/mês de sólidos), que é encaminhado à barragem de rejeito. Gera-se também sub-produtos, como cascalho e areia grossa, aproveitados pelo mercado local de construção civil. Os produtos da areia beneficiada são posteriormente secados e embarcados em caminhões.

As principais áreas degradadas geradas pelas atividades mineiras são a cava, decorrente dos trabalhos de lavra, e a barragem de rejeitos, onde são lançadas as frações argilosas, que não tem valor econômico. Uma vez que os processos de classificação são por via úmida, o rejeito sob a forma de polpa é bombeado para a

barragem. A deposição do capeamento e do estéril não se constitui em fator de degradação adicional por estarem ambos atualmente sendo depositados em setores do interior da própria cava.

5.1.3. ESTUDOS GEOLÓGICO-GEOTÉCNICOS PARA RECUPERAÇÃO DAS ÁREAS

Os materiais de estéril e minério manuseados são de propriedades geomecânicas relativamente pobres, basicamente na granulometria de solo arenoso. Embora constitua-se de arenitos, com boa coesão inicial, a exposição ao tempo e às águas rapidamente provocam sua degradação, o que tem sido um dos fatores críticos para a estabilização dos taludes.



Figura 5.4. Aspecto dos taludes, evidenciando a baixa resistência das camadas

Para determinação da configuração da cava final, foram realizados ensaios geotécnicos e cálculos de estabilidade dos taludes com a finalidade de verificar o

Fator de Segurança. Foram colhidas amostras indeformadas do solo para os ensaios de massa específica dos grãos, umidade, granulometria e massa específica aparente naturais e ensaios triaxiais tipo adensado não drenado saturados (CU_{sat}) e a partir desses resultados foram calculados os ângulos de atrito e coesão para modelagem do talude. Foram retiradas três amostras indeformadas para ensaios, uma de cada camada da lavra (Pirambóia, Botucatu, Santa Rita).

Foram obtidos os seguintes parâmetros:

Tabela 5.1. Parâmetros geotécnicos dos minérios da Min. Descalvado*

	Pirambóia	Botucatu	Santa Rita
Massa específica aparente natural (γ_n)	1,826 t/m ³	1,784 t/m ³	1,745 t/m ³
Coesão (C_s)	0,5 kg/cm ²	1,2 kg/cm ²	0,25 kg/cm ²
Ângulo de atrito interno (ϕ_s)	42°	33°	14°

O cálculo dos taludes foi feito através do método de Hoek & Bray, ruptura circular.

Foi considerado o ábaco correspondente a talude bem drenado (figura 3.11.) e feito o cálculo do Fator de Segurança individualmente para cada camada.

* MIN. DESCALVADO; PROMINER; Relatório interno, 1997.

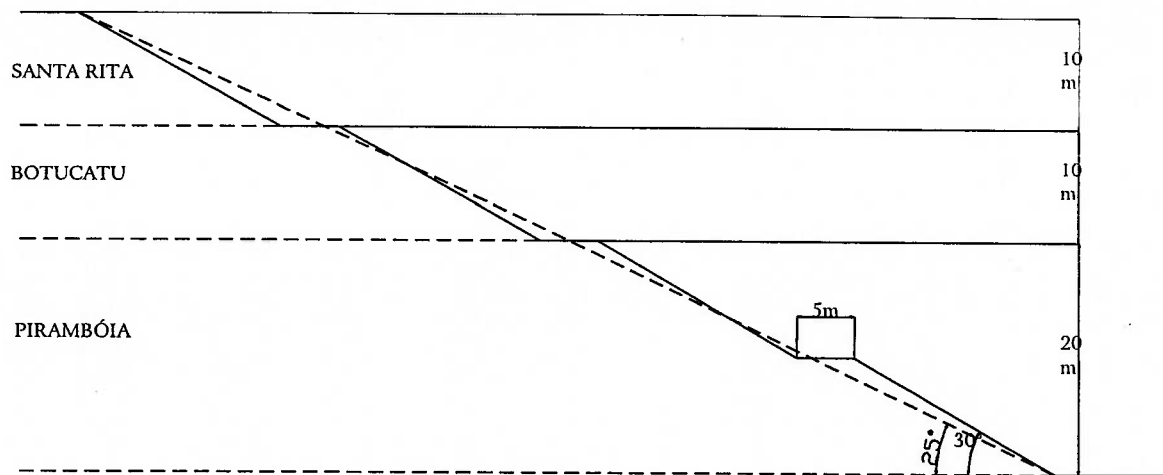


Figura 5.5. Talude da cava final

Analisando os casos extremos, foram utilizadas as alturas e os ângulos de talude provisórios praticados na fase de lavra, que resultaram nos seguintes fatores de segurança:

Tabela 5.2. Fatores de segurança das bancadas da Min. Descalvado*

	Pirambóia	Botucatu	Santa Rita
Inclinação do talude (α)	45°	45°	45°
Altura do talude (H)	20 m	10 m	10 m
Fator de Segurança (FS)	2,0	4,6	1,1

A configuração para cava final, no entanto será bem mais favorável, com taludes individuais de altura máxima de 10m, bermas de 5m e inclinação de 30°. Calculando o fator de segurança para o talude final como um todo, teremos uma inclinação média de 25° e altura de 40m. Para simplificação, tomando como

* MIN. DESCALVADO; PROMINER; Relatório interno, 1997.

predominantes as características geotécnicas da camada inferior (Pirambóia) que suportará a maior carga, temos:

$$\text{Adimensional } l = \frac{c}{\gamma \cdot H \cdot \text{tg}\varphi} = \frac{0,5 \cdot 10}{1,826 \cdot 40 \cdot \text{tg}42^\circ} = 0,304$$

No ábaco da figura 3.11., ângulo do talude = 25°, teremos que o Fator de Segurança do talude final será de 2,4, que representa um nível de segurança adequado.

5.1.4. MEDIDAS DE RECUPERAÇÃO DAS ÁREAS

A configuração de cava final, portanto, terá bancadas de 10 m de altura, com inclinação dos taludes individuais de 30°, bermas com largura final de 5m.

Nota-se que a cava acaba se constituindo num local de acúmulo de água. Atualmente é necessário exaurir continuamente essa água por bombeamento. No futuro, com o encerramento da mina, caso a cava fosse mantida nessa conformação, fatalmente seria inundada. A solução prevista no PRAD do empreendimento, no entanto, é ao longo das atividades de lavra (estimada em mais 15 anos) reaterrar a cava parcialmente, de modo a que se consiga um nível de superfície na praça da cava suficiente para que a água superficial possa escoar para o meio externo.

No momento existem duas frentes de trabalhos de recuperação: um aterro sobre uma antiga barragem de rejeito desativada, ao lado da barragem atual, e a deposição de estéril num setor da cava.

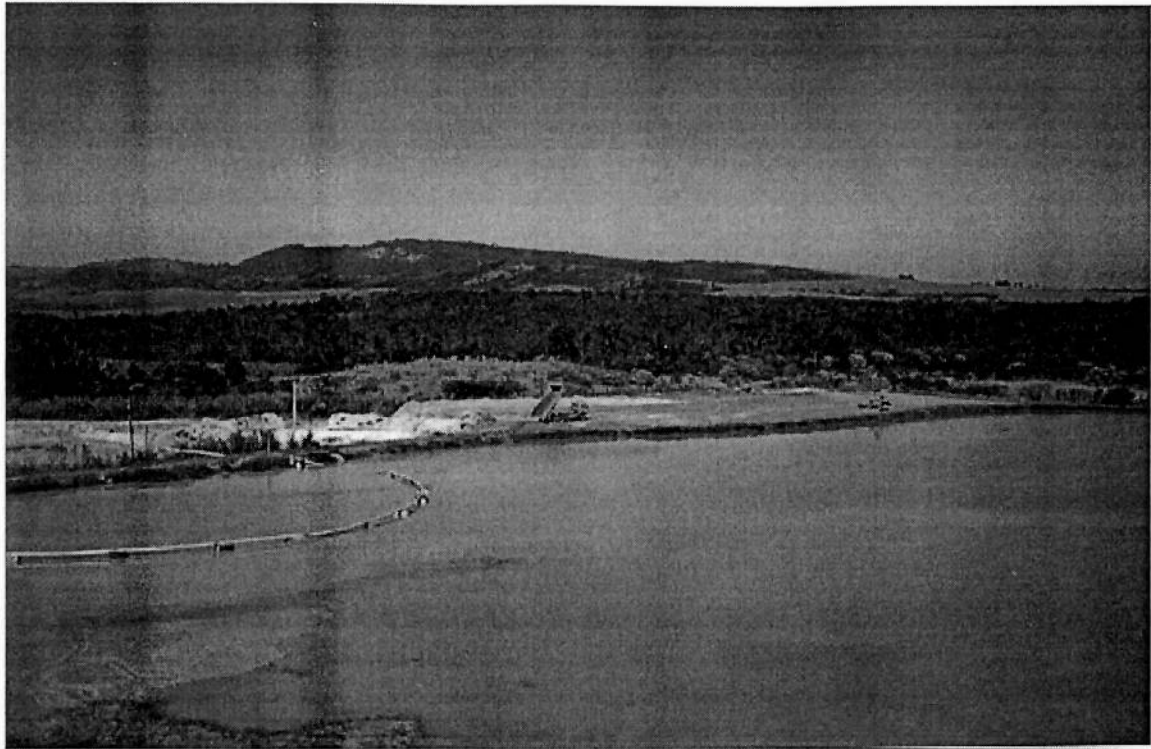


Figura 5.6. Barragem de rejeitos atual e ao fundo a área que está sendo recuperada por aterro

O aterro sobre a barragem desativada é realizado por basculamento de caminhões. O material usado é o estéril retirada da cava, correspondente à camada de arenito Santa Rita. A altura do aterro é da ordem de 5 a 10m. A movimentação e a terraplanagem são feitos por um trator de esteiras e uma motoniveladora, obtendo-se uma superfície final horizontal, que é compatível com o relevo da circunvinhança.



Figura 5.7. Execução de aterro e conformação topográfica da área da barragem desativada

A outra área em recuperação é na cava, onde foi aterrado com estéril um setor que já atingiu o limite de cava final. Como já visto, esse aterro faz parte da recuperação prevista no PRAD, que definiu a recuperação da cava através de reaterro a um nível tal que não haja acúmulo de água no local, e que deverá se estender até o fim da vida útil da mina.



Figura 5.8. Deposição de estéril no interior da cava

Com relação à drenagem das águas superficiais externas, é feito o desvio para fora da cava, adotando a prática de formar leiras de 1,5 a 2,0 m de altura com o próprio solo vegetal, ao longo das bordas das cava. Dessa maneira as águas de superfície são direcionadas, contornando a cava.

5.2. EXEMPLO 2 - MINERAÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO

5.2.1. INTRODUÇÃO

O Brasil, responsável por cerca de 19,2% da produção mundial de minério de ferro (SUMÁRIO MINERAL, 1999), apresenta mineralizações de hematita e itabiritos bastante alteradas e friáveis, com baixa resistência mecânica, requerendo, via de regra, intensos trabalhos de natureza geotécnica na sua exploração (FUJIMURA; NIEBLE (1990)). A remoção de estéril se faz necessária, devido à elevada escala de

produção e às extensas dimensões das cavas. A relação estéril/minério usualmente encontra-se na faixa de 0,5 a 1,0 $t_{\text{estéril}}/1 t_{\text{minério}}$.

5.2.2. DESCRIÇÃO GERAL

A região do Quadrilátero Ferrífero em Minas Gerais concentra o maior número de empresas mineradoras de minério de ferro do país.

Dentre elas, a mina Córrego do Feijão da Ferteeco localiza-se em Brumadinho, MG, a cerca de 50 km de Belo Horizonte. Essa mina está situada nas encostas da Serra do Curral, na cabeceira dos afluentes da bacia hidrográfica do Alto Paraopeba. A região da Serra do Curral é uma área de interesse ambiental, além de ser zona de mananciais.



Figura 5.9. Aspecto da lavra da FERTECO - Mina de Córrego do Feijão

A escala de produção da mina é de 4.800.000 t/ano de minério de ferro R.O.M.

A importância dos condicionantes geológico-geotécnicos na recuperação de áreas degradadas por lavra de minas a céu aberto

Todo o minério é desmontado a céu aberto em bancadas de 10 metros de altura, utilizando-se explosivos, sendo o carregamento feito por pás carregadeiras e escavadeira hidráulica. O estéril é depositado em pilhas e o minério é transportado à instalação de britagem.

O produto da britagem, por sua vez, alimenta a planta de beneficiamento (lavador). O beneficiamento consiste de classificação onde o material ainda passa por uma rebitagem e é lavado e classificado em peneiras e classificadores espirais nos diversos produtos (bitolados, sinter feed, etc.). O rejeito gerado (material menor que 325 mesh) é encaminhado à barragem de rejeitos.

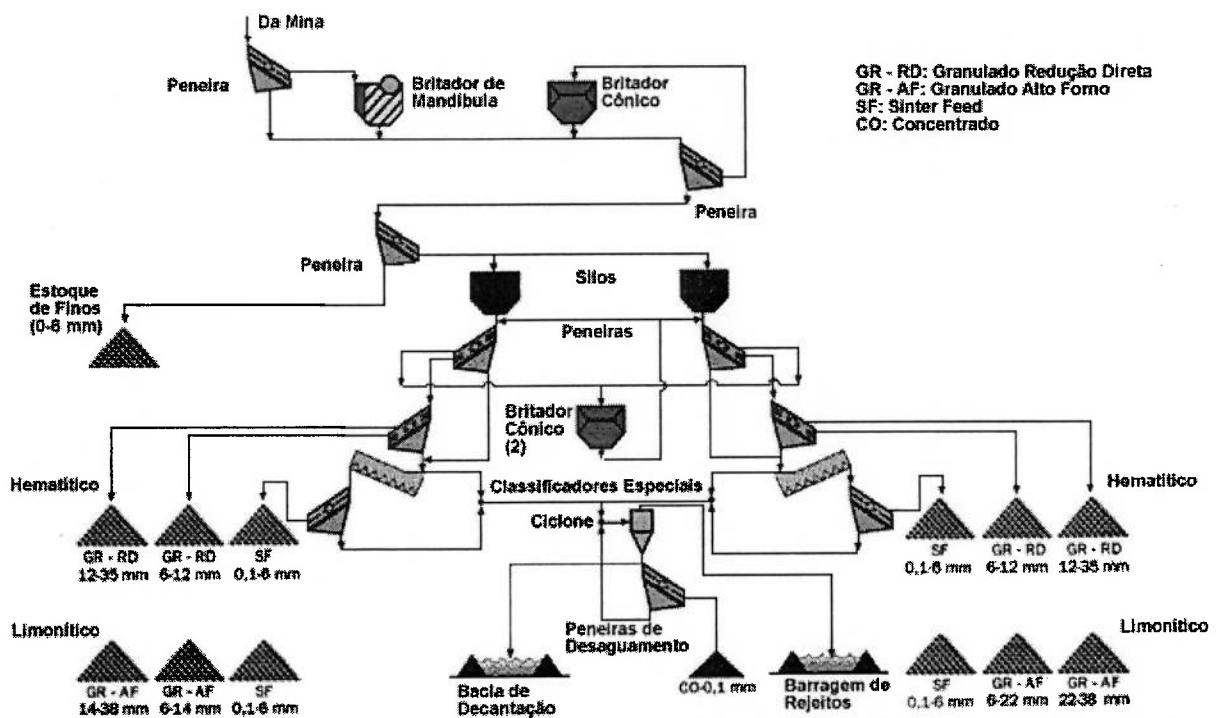


Figura 5.10. Fluxograma do beneficiamento - Mina de Córrego do Feijão

Após o beneficiamento, recupera-se cerca de 77% em produtos, e 23% de rejeito. A maior parte dos produtos é carregada em caminhões até um terminal ferroviário, a cerca de 10 km da mina, e daí embarcado, com destino a siderúrgicas da região Sudeste ou ao mercado de exportação. O rejeito, por sua vez, é bombeado para a

barragem.

Na atual fase dos trabalhos, a lavra de meia-encosta já está esgotada, tendo atingido os limites de cava final nos níveis superiores, restando agora o aprofundamento da lavra na cava propriamente dita.



Figura 5.11. Aspecto atual dos taludes da cava (os inferiores correspondem a bancadas em lavra) - Mina de Córrego do Feijão

Dessa forma, os níveis superiores não mais serão lavrados, e a exploração de minério se dará unicamente a partir da cava. O fim da vida útil está previsto para o ano de 2010.

Outra importante empresa de mineração que lavra áreas na região do Quadrilátero Ferrífero é a MBR, que conta com várias unidades, dentre elas as minas de Águas Claras, Tamanduá e Capitão do Mato.

A mina de Águas Claras da MBR localiza-se no município de Nova Lima, MG. Localiza-se na Serra do Curral, em área de enorme interesse público, ambiental e urbanístico, pois é uma área integrante da paisagem urbana de Belo Horizonte.

A mina de Águas Claras teve seu início em 1972 e atualmente está em fase de desmobilização, com fim da vida útil em 2002. A produção atual de minério de ferro está em 7.000.000 t/ano, já tendo atingido no passado picos de produção de 14.000.000 t/ano.

As minas de Tamanduá e Capitão do Mato são contíguas, e estão a cerca de 30 km de Belo Horizonte, pela BR-040 em direção ao Rio de Janeiro. As minas de Tamanduá e Capitão do Mato tem escala de produção da ordem de 4.000.000 t/ano de minério de ferro, cada. O beneficiamento na mina consiste basicamente de britagem e classificação.

5.2.3. ESTUDOS GEOLÓGICO-GEOTÉCNICOS PARA RECUPERAÇÃO DE ÁREAS

5.2.3.1. ÁREAS LAVRADAS

Os taludes finais das cavas de minério de ferro são usualmente encaixados em itabiritos e filitos de características geotécnicas pobres, o que os tornam fortemente suscetíveis a problemas de estabilidade, erosão e drenagem.

No caso da mina Córrego do Feijão da Ferteco, a cava tem bancadas de 10m de altura, com 65° de inclinação, em média, e bermas de cerca de 3m, atingindo uma altura total de mais de 200m. O maciço rochoso encontrado em Córrego do Feijão pode ser classificado da seguinte forma:

Tabela 5.3. Classificação dos maciços - Ferteco Córrego do Feijão*

Classificação	Descrição
C4	Solo
C3	Rocha alterada mole
C2	Rocha alterada fraturada
C1	Rocha pouco alterada a rocha sã

A cava tem evidenciado que itabiritos pouco coerentes C4 (solo) e C3 (rocha alterada mole) comparecem em grande quantidade, o que levou a Ferteco a proceder a caracterização tecnológica desses materiais através da coleta de amostras indeformadas e ensaios de laboratório, avaliando parâmetros tais como limite de liquidez, índices de plasticidade, umidade, peso específico, ensaios triaxiais, de compressão simples e cisalhamento direto, cujos resultados foram os seguintes:

* GEODINÂMICA; FERTECO. Relatório de reavaliação da estabilidade da porção oeste da mina até o banco 1200, 1996.

Tabela 5.4. Resultados de ensaios - Ferteco Córrego do Feijão*

Amostra	Material	LL	IP	h _{nat}	Triaxial		Compressão simples R _c (Mpa)	Cisalhamento direto		γ _{nat} (t/m ³)
					C (Mpa)	φ		C (Mpa)	φ	
1	C4	-	NP	29,0	0,17	25,3°	0,25	-	-	1,83/1,88
2	C4	-	NP	18,2	0,19	26,2°	0,50	-	-	1,80/1,86
3	C4	-	NP	38,3	0,10	31,5°	0,33/0,13	-	-	1,78/1,93
4	C3	-	NP	8,9	-	-		0,02	71,8	-
5	colúvio	18%	5%	15,8	-	-		0,01	31,1	2,45
6	colúvio	23%	6%	22,4	-	-		0,03	30,7	2,03

No entanto, um dos grandes problemas na Mecânica das Rochas e dos Solos estruturados é a estimativa da resistência em função das descontinuidades presentes. Em consequência, é usual ensaiar-se em laboratório a rocha sã intacta, sem fraturas, e no outro extremo, o solo residual mais maduro, nos quais as estruturas geológicas desempenham pouca ou nenhuma influência na resistência. Os maciços que transicionam entre esses dois extremos é que exigem a realização de ensaios "in situ" normalmente de elevado custo. Assim, frequentemente, lança-se mão da interpolação dos valores entre rocha intacta sã e solo, já que a coleta de amostras nesse tipo de material para ensaios é muito problemática.

Tendo em vista essas considerações e resultados, foram adotados os seguintes parâmetros para a análise da estabilidade:

* GEODINÂMICA; FERTECO. Relatório de reavaliação da estabilidade da porção oeste da mina até o banco 1200, 1996.

Tabela 5.5. Parâmetros geotécnicos adotados - Ferteco Córrego do Feijão*

Parâmetros	Maciço		
	Face do talude	Interior do talude	
		C4	C3/C4
C (Mpa)	0,15	0,33	0,51
φ (°)	28	33	37

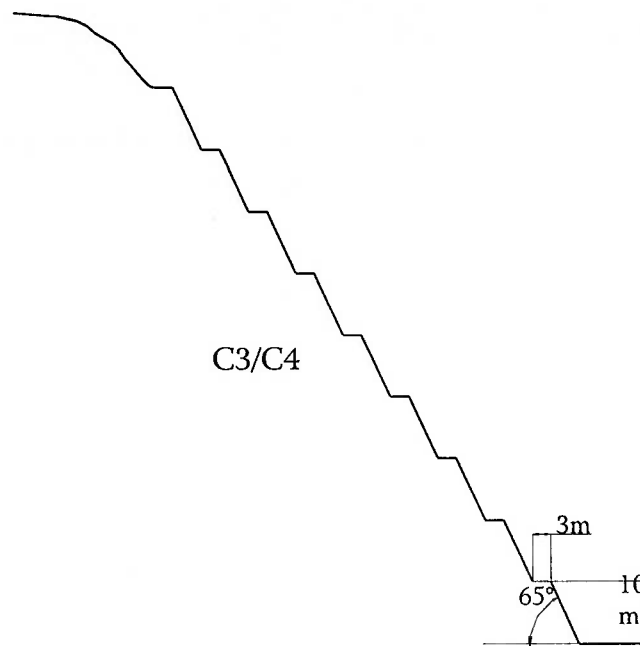


Figura 5.12. Talude da cava final

A partir desses dados, e através de cálculo computacional baseado em método de equilíbrio limite, os resultados obtidos foram:

* GEODINÂMICA; FERTECO. Relatório de reavaliação da estabilidade da porção oeste da mina até o banco 1200, 1996.

Considerando força de detonação ($a=0,05g$)*:

- FS = 1,7 para talude em C4, superfície de ruptura plana com fenda de tração
- FS = 2,2 para talude em C3/C4, superfície de ruptura plana com fenda de tração
- FS = 1,9 para talude em C4, superfície de ruptura plana
- FS = 2,5 para talude em C3/C4, superfície de ruptura plana

Muito embora os fatores de segurança se mostrem aceitáveis, dada a forte componente estrutural na estabilidade, os taludes à medida que atingem a configuração de cava final devem ser periodicamente mapeados, com o objetivo de:

- a) estabelecer um modelo geomecânico, para analisar a estabilidade global da mina à medida que o talude definitivo é implantado;
- b) detectar eventos geológicos localizados que possam interferir na estabilidade (tais como as falhas com grandes aberturas que foram detectadas nos bancos inferiores e que alimentam o nível freático da mina);
- c) detectar instabilidades locais para a implantação de tratamentos localizados, visando a preservação dos acessos e a não propagação das pequenas rupturas para os bancos superiores;

Em consequência, o mapeamento geotécnico torna-se um dos mais importantes subsídios na análise da estabilidade dos taludes. No caso da Ferteco, esse levantamento é feito tomando-se medidas de acamamento a intervalos regulares de 5 a 10m nas bancadas que já atingiram sua configuração final. O objetivo é compartimentar os taludes em domínios estruturais homogêneos. Além da caracterização das discontinuidades, o maciço rochoso é caracterizado em termos de coerência e fraturamento, delimitando-o em zonas geomecânicas homogêneas. São apontados também os trechos de talude com ocorrência de erosão, quedas planares, quedas em cunha e outros possíveis condicionantes.

* GEODINÂMICA; FERTECO. Relatório de reavaliação da estabilidade da porção oeste da mina até o banco 1200, 1996.

O acamamento é a principal descontinuidade geológica que condiciona a maioria das quedas de blocos e placas observadas nos taludes. As zonas de cisalhamento e as juntas se tornam mais importantes quando o acamamento não se apresenta sub-paralelo ao talude, podendo assim formar cunhas instáveis.

A estabilidade dos acamamentos em relação à cava deve ser analisada lançando-se suas respectivas direções e mergulhos em diagramas Schmidt-Lambert (método da projeção estereográfica).

5.2.3.2. ÁREAS DE DEPOSIÇÃO DE ESTÉRIL

Nas minas do Quadrilátero Ferrífero o estéril depositado corresponde em termos gerais a itabiritos e filitos desmontados por explosivo ou escavados, cuja textura predominante é de areia média a grossa com pedregulhos e algum material graúdo.

Na mina de Córrego do Feijão, para a implantação da pilha de estéril "Menezes", os parâmetros utilizados na análise da estabilidade foram os seguintes:

Tabela 5.6. Parâmetros geotécnicos - Menezes*

Materiais	γ_{aparente}	Coesão (t/m ³)	ângulo de atrito
estéril	2,0	1,0	28°
terreno natural	2,0	2,0	30°

* GEODINÂMICA; FERTECO. Diretrizes para execução do depósito de estéril de Menezes, 1993.

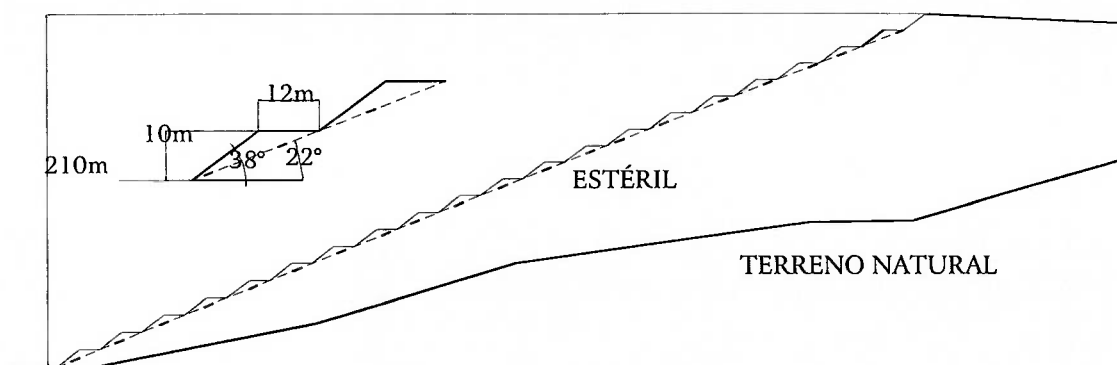


Figura 5.13. Talude da pilha de estéril Menezes

As seções analisadas consideradas mais críticas foram as localizadas nos talvegues, adotando-se portanto os nível de água praticamente no terreno natural. Considerando a superfície de ruptura passando pelo interior do estéril, através de cálculo computacional baseado em método de equilíbrio limite, chegou-se a um fator mínimo de segurança para a condição drenada do depósito de 1,4, com ângulo médio global do taludes de 21,4°.*

O método executivo da pilha deve prever a deposição em ponta de aterro, método ascendente, com bancos de 10 de altura, sendo recomendável a compactação com passagem de equipamentos nos bancos inferiores.

As águas das nascentes do terreno natural devem ser captadas e conduzidas por sistemas de drenagem dentro do depósito e retornadas ao seu curso natural, após passar por uma bacia de sedimentação. O depósito deverá ser dotado de drenagem

* GEODINÂMICA; FERTECO. Diretrizes para execução do depósito de estéril de Menezes, 1993.

superficial adequada e revegetado à medida que os taludes sejam colocados na sua posição definitiva.

O depósito de estéril deverá ser instrumentado por piezômetros, tendo em vista acompanhar principalmente o nível de água no depósito, uma vez que a elevação do mesmo poderá acarretar sérios danos aos taludes.

Com relação à erosão, recomenda-se que as voçorocas sejam preenchidas com estéril e blocos de rocha.

5.2.4. MEDIDAS DE RECUPERAÇÃO DAS ÁREAS

5.2.4.1. ÁREAS LAVRADAS

Dentre as minas do Quadrilátero Ferrífero, a mina de Águas Claras da MBR possui um plano de recuperação em estágio bastante adiantado, em virtude da proximidade do fim de sua vida útil e de sua localização estratégica, próxima à Belo Horizonte, que motivou um projeto de recuperação e uso futuro da área visando a ocupação imobiliária. Esse projeto envolveu as etapas de:

- caracterização do potencial do local ao uso proposto;
- definições de engenharia;
- definições de caráter arquitetônico e paisagístico;

Na atual fase, grande parte das estruturas da mina já estão esgotadas ou em fim de vida útil, como pilhas de estéril e barragem de rejeito. Os trabalhos de recuperação deverão se intensificar após 2002, com a exaustão da mina.

O uso previsto para a cava é a transformação em lago, que terá profundidade de até 250m. A estimativa da MBR é obter-se um total enchimento da cava num prazo de

8 anos, até o extravasamento, na cota 1095.



Figura 5.14. Setor da cava onde extravasará o futuro lago - Mina de Águas Claras

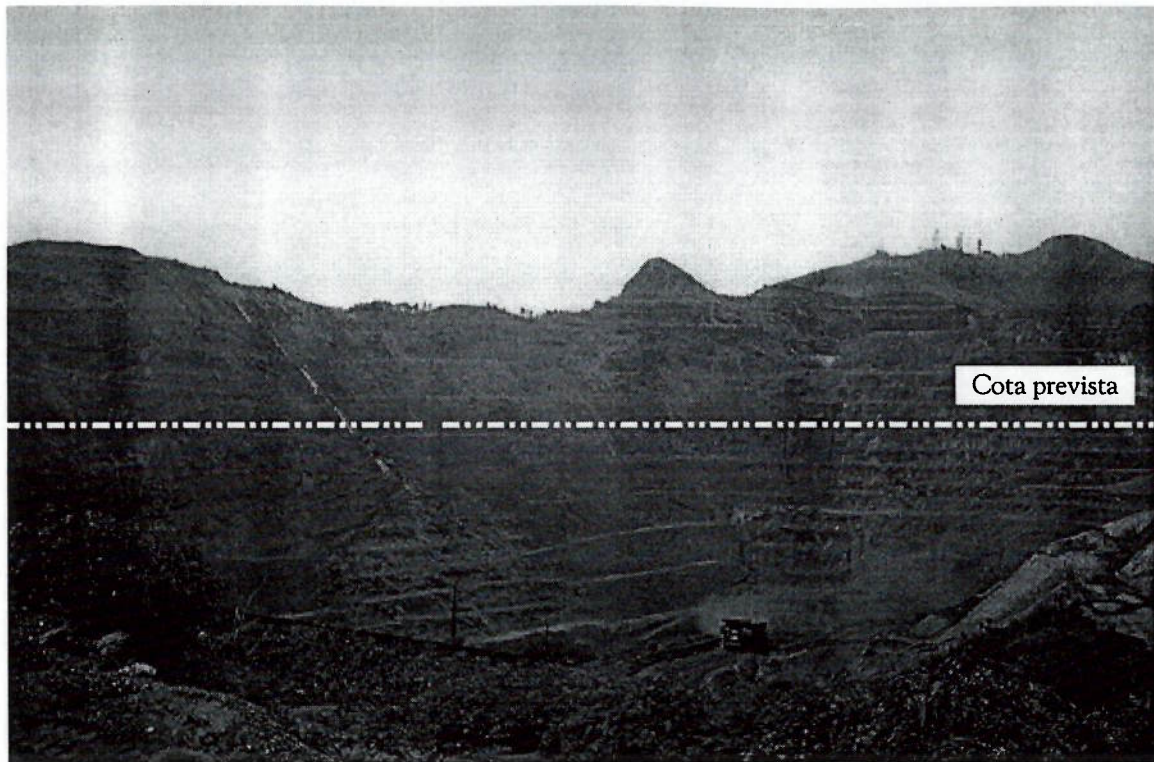


Figura 5.15. Nível presumido do futuro lago - Mina de Águas Claras

Com relação à mina de Córrego do Feijão da Ferteco, o interesse primordial é garantir a estabilidade dos taludes finais, de modo a propiciar condições adequadas de segurança para o prosseguimento da lavra nas cotas inferiores. Concomitantemente, uma vez que a encosta lavrada é um local elevado, que se destaca na paisagem da região, e como os taludes definitivos serão mantidos após o encerramento das atividades, procura-se revegetá-los e configurá-los de modo a se assemelhar à superfície original da encosta, minimizando o impacto visual à distância. Há portanto dois condicionantes básicos a considerar nos trabalhos de recuperação desses taludes, os de caráter geotécnico envolvidos na sua estabilização e aqueles de caráter paisagístico.

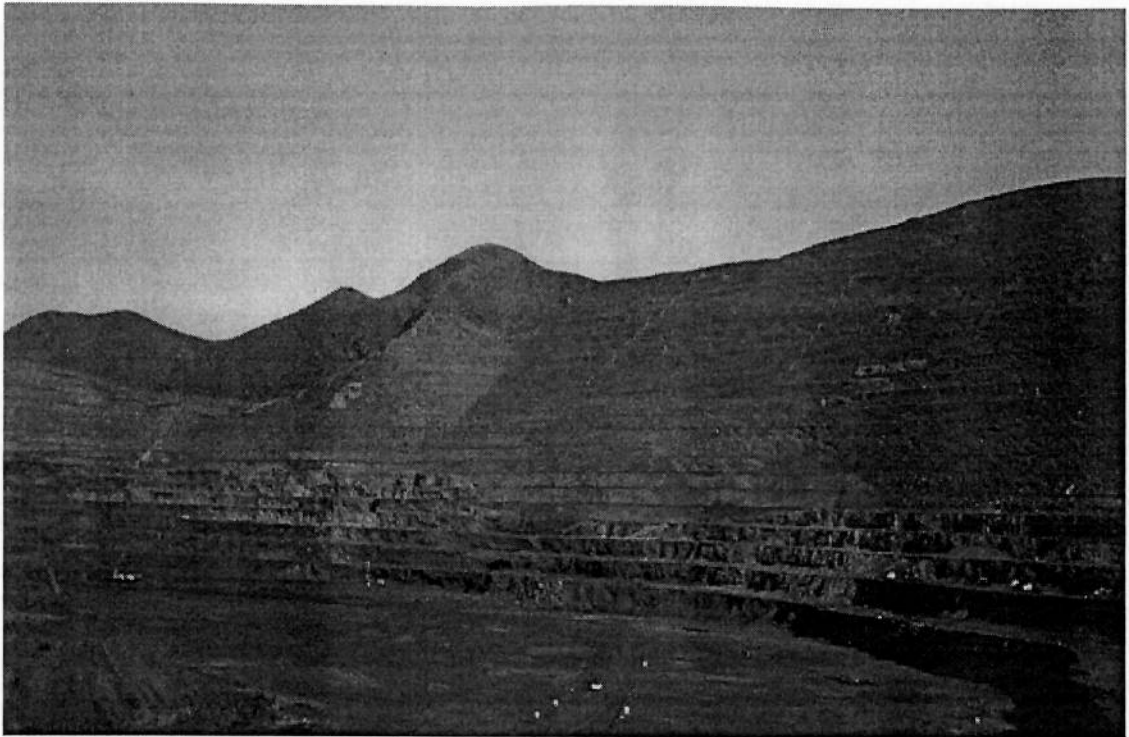


Figura 5.16. Bancadas recuperadas da cava final - Mina de Córrego do Feijão

À medida que a lavra numa determinada bancada atinge o limite da cava final, inicia-se a recuperação do talude definitivo dessa bancada. Essa recuperação envolve basicamente:

- **Retaludamento:** acerta-se o talude ao ângulo previamente definido, por escavação. Nos trechos em que a resistência do maciço não permite a escavação por trator de lâminas, é realizado desmonte cuidadoso à fogo nos últimos 10 a 15m. Na bancada é mantida uma berma de 3m de largura, para acesso de veículos leves.



Figura 5.17. Vista do talude final da cava, com bancadas definitivas - Mina de Córrego do Feijão



Figura 5.18. Retaludamento de bancada para a configuração de cava final - Mina de Córrego do Feijão

- **Revegetação:** por gramíneas, é feita sistematicamente, através de sacos de aniagem ou hidrossemeadura. O objetivo é proteger o talude da ação de águas de chuva, impedindo sua erosão ou saturação e promovendo maior fixação pelo enraizamento, além da melhoria do aspecto paisagístico.

Tratamentos localizados também são aplicados. Em região de tálus adota-se concreto projetado com tela e grampo no 1/3 superior e drenagem profunda com tubos perfurados nos bancos afetados (tubo perfurado, com Bidim).

A presença de material demasiadamente alterado deve ser observada com cuidado.



Figura 5.19. Execução de reparos localizados - Mina de Córrego do Feijão

- **Drenagem:** De um modo geral, é executada canaleta de drenagem ao longo do pé do talude. Em virtude da natureza suscetível do maciço à erosão, essas canaletas são executadas em concreto armado ou pedra argamassada, de modo a não permitir infiltrações. Em algumas bancadas isoladas, caso constatada a percolação de águas subterrâneas, são executados drenos horizontais, para diminuir a pressão neutra no maciço.

Dessa maneira a recuperação das bancadas é executada em paralelo ao desenvolvimento da lavra, em sentido descendente (da bancada mais alta para a mais baixa), à medida que a operação de lavra é terminada nessas bancadas.

Numa análise mais global, considerando-se a estabilização não apenas de uma bancada individual, mas de todo o talude final (atualmente com uma altura da ordem de 280 m), são tomadas medidas de caráter mais extensivo. Uma delas é a

execução de obras de drenagem para coleta das águas das bancadas. Em função da extensão das bancadas (cerca de 3 a 4 km), a captação de águas das bancadas foi dividida em duas seções. As águas da metade de cada bancada fluem para um extremidade, e as da outra metade fluem para o lado oposto. Em cada lado da cava há escadas d'água coletoras. À medida em que os taludes definitivos são executados, as escadas d'água também são prolongadas por mais uma bancada, acompanhando a execução no sentido descendente.

Outra preocupação de caráter mais abrangente é o aspecto do talude e sua integração à paisagem local. Para tanto, o contorno da cava final acompanha o contorno geral da serra, e as bancadas minimizadas de modo a manter somente as vias de acesso de manutenção, no esforço de tornar a superfície resultante mais natural.



Figura 5.20. Aspecto dos taludes definitivos, à distância - Mina de Córrego do Feijão



Figura 5.21. Vista dos taludes finais - Mina de Córrego do Feijão

5.2.4.2. ÁREAS DE DEPOSIÇÃO DE ESTÉRIL

Na mina de Águas Claras da MBR, as pilhas de estéril após os trabalhos de terraplanagem e estabilização serão ocupadas por loteamento imobiliário a ser instalado, tomando partido da topografia regular que pode ser obtida na sua conformação.

Nas minas de Tamanduá e Capitão do Mato, da MBR, as pilhas de estéril serão construídas não somente com critérios de engenharia, mas considerando condicionantes paisagísticos, como:

- execução de pontos altos assimétricos na pilha, para originar um aspecto menos monótono;
- procurar local as pilhas em áreas já degradadas;
- adequar o projeto com pilhas mais baixas e mais extensas, de modo a ser possível depositar um montante total de estéril da ordem de 80.000.000 m³ e, ao mesmo

tempo, adequar-se as pilhas ao terreno circundante de modo que elas não se constituam em pontos destoantes da paisagem;

Outra solução adotada é fazer-se, ao invés de uma única pilha de estéril, mais pilhas de menor volume, em conformidade às características topográficas do local, de modo a se integrarem mais facilmente à paisagem.

Na mina de Córrego do Feijão, em função do tempo de atividade, há pilhas já completadas e recuperadas, e outras em fase de execução. A deposição de estéril é bastante crítica, devido à necessidade de se depositar esse material nas áreas disponíveis, predominantemente de encosta, às baixas características mecânicas do estéril e aos grandes volumes envolvidos. Em função disso a deposição é controlada, no sentido ascendente em bancadas, e eventualmente, com o uso de instrumentação.



Figura 5.22. Basculamento de caminhões formando a pilha de estéril - Mina de Córrego do Feijão

As bancadas das pilhas são formadas a partir de basculamento em ponta de aterro de caminhões de estéril vindos das frentes de escavação na mina. Uma vez aterrado um patamar da pilha, parte-se para depositar o estéril numa nova camada acima.



Figura 5.23. Construção das pilhas de estéril de forma ascendente - Mina de Córrego do Feijão

A deposição de estéril é realizada em áreas que foram submetidas previamente a obras de tratamento e drenagem prévia da base da pilha, inclusive para nascentes e olhos d'água aflorantes na base, canalizando-as em valas, cobrindo com material rochoso e conduzindo a água a um canal ou tubulação. Essa fase de preparação é importante para evitar-se rupturas pela base das pilhas.

Na fase de execução, as bancadas são formadas com altura e ângulo definidos por critérios geotécnicos. À medida que as bancadas são formadas, vão sendo executadas obras de drenagem, como canaletas revestidas e escadas de água,

essenciais para a manutenção da estabilidade desse tipo de material. A drenagem nas pilhas é especialmente importante, devido à baixa consistência do material, sendo assim altamente suscetível à erosão e instabilizações. Nas bancadas definitivas procede-se à revegetação por hidrossemeadura.

Dessa forma, são prescritos os seguintes cuidados:

- a) os trabalhos para permitir uma eficiente drenagem superficial devem se constituir em tarefa constante na formação das pilhas pois o material estéril é facilmente erodível. Esse fato, associado à infiltração de água no depósito pode levar à sua instabilização. Portanto, mesmo sobre a superfície não acabada do depósito deve-se prever uma drenagem superficial adequada.
- b) o sistema de drenagem deve compreender os seguintes elementos:
 - b.1) valeta periférica, contornando a área do depósito, que tem como finalidade evitar que as águas de superfície escoem para as pilhas;
 - b.2) bermas dos taludes com caimento transversal no sentido do pé do talude e transversal, no sentido dos contrafortes dos vales, da ordem de 3% e preferencialmente 2%. A água captada nas bermas deve ser drenada para as valetas periféricas ou outras distribuídas ao longo dos taludes.
 - b.3) manutenção periódica.

As pilhas de estéril, além dos requisitos de estabilidade, devem sempre que possível se harmonizar com a paisagem local, de modo que com o passar dos anos a paisagem assuma um aspecto mais natural, com contornos suavizados.

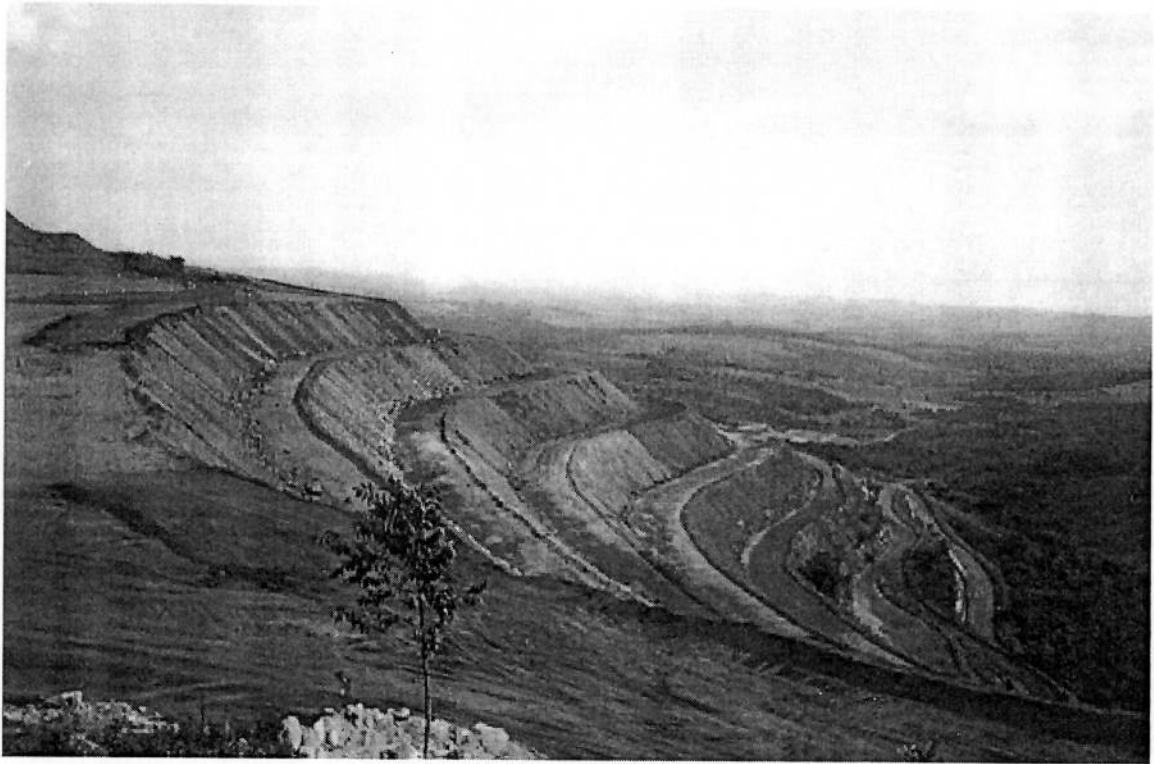


Figura 5.24. Pilha de estéril em execução, com contornos curvos - Mina de Córrego do Feijão

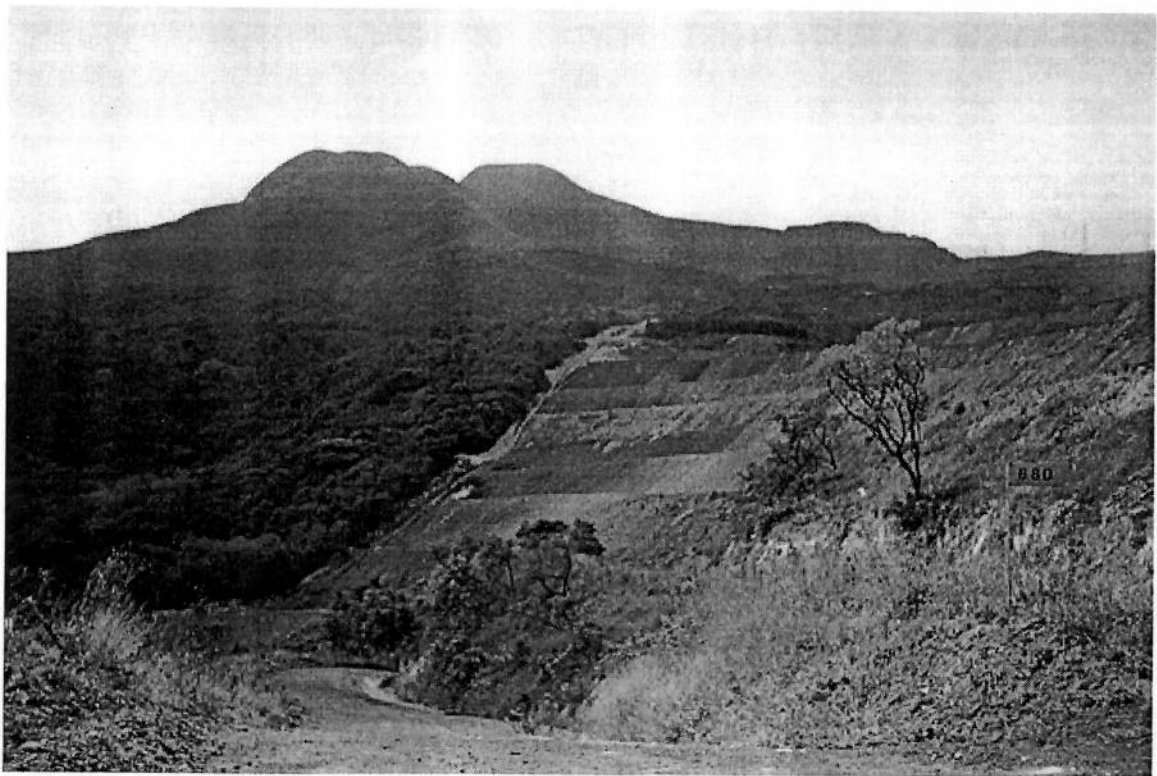


Figura 5.25. Pilha de estéril após encerramento - Mina de Córrego do Feijão

Após encerradas, as pilhas devem ser monitoradas até o estabelecimento de condições de estabilidade, com a complementação dos trabalhos de hidrossemeadura e manutenção das estruturas de drenagem, principalmente.



Figura 5.26. Aspecto de pilha de estéril após cerca de 5 anos de encerramento

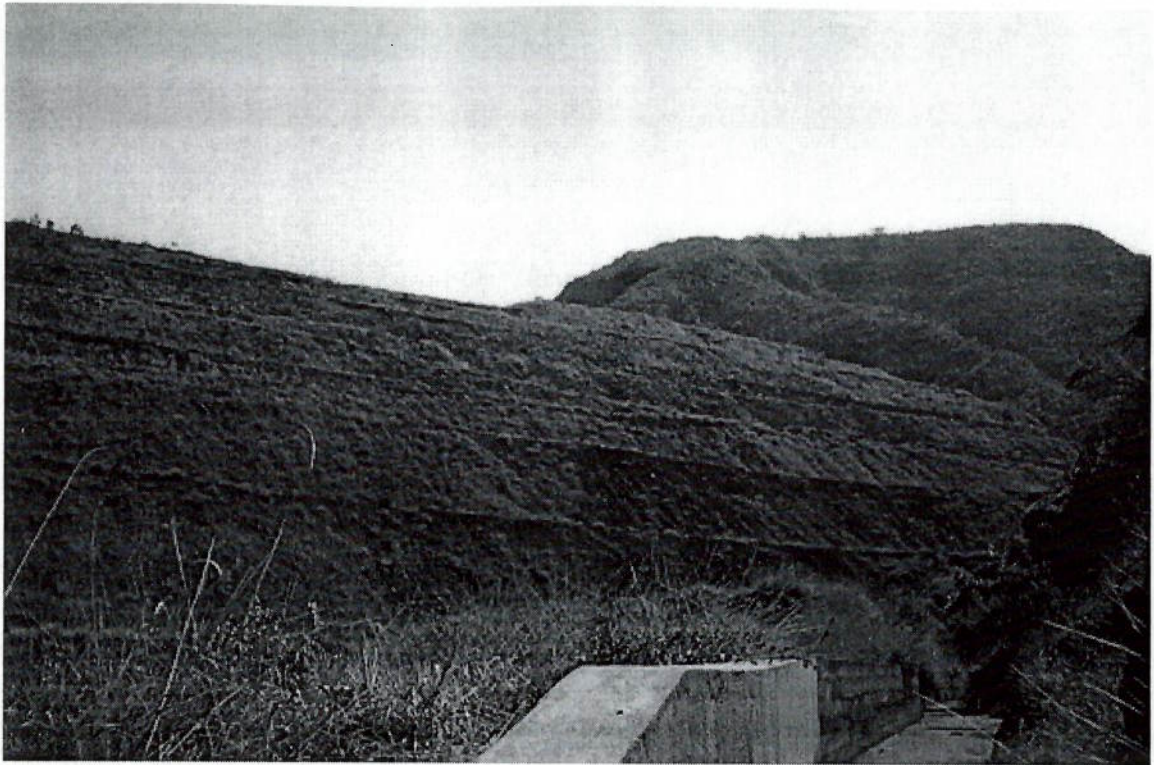


Figura 5.27. Vista inferior da mesma pilha, com canaleta de drenagem em primeiro plano - Mina de Córrego do Feijão

5.2.4.3. ÁREAS DE DEPOSIÇÃO DE REJEITO

Na mina de Águas Claras da MBR, a barragem de rejeito será mantida submersa, sendo transformada em área de lazer, como lago artificial.

5.3. EXEMPLO 3 - MINERAÇÃO DE BRITA PARA CONSTRUÇÃO CIVIL

5.3.1. INTRODUÇÃO

As pedreiras constituem-se em importante atividade mineradora, produzindo brita para construção civil. Devido à proximidade dos centros urbanos, a questão da recuperação das áreas degradadas adquire maior repercussão. Não há, a princípio,

geração de estéril. O tipo de minério é variável, sendo comuns no estado de São Paulo pedreiras em granito, calcário e basalto.

5.3.2. DESCRIÇÃO GERAL

As pedreiras podem apresentar porte bastante variável. Uma pedreira de grande porte na região da Grande São Paulo pode atingir uma produção da ordem de 60 mil m³/mês de pedra britada. Pedreiras de médio porte, mais comuns no interior e em outras capitais, podem produzir cerca de 15 a 30 mil m³/mês de pedra britada. Pedreiras de pequeno porte (abaixo de 8 a 10.000 mil m³/mês) também têm presença significativa.

Após o desmonte da rocha por explosivos, o beneficiamento é basicamente realizado por uma instalação de britagem e peneiramento. Algumas pedreiras são dotadas de sistema de lavagem para produção de areia artificial, podendo incorporar barragens de rejeitos. Via de regra não há estéril gerado, mas podem ocorrer volumes significativos de capeamento em solo que devem ser removidos e convenientemente dispostos. Em algumas pedreiras pode ocorrer o acúmulo de volumes significativos de produtos de baixa aceitação no mercado, como os finos (pó de pedra).

5.3.3. ESTUDOS GEOLÓGICO-GEOTÉCNICOS PARA RECUPERAÇÃO DAS ÁREAS

O dimensionamento adequado dos taludes finais, em termos de inclinação e altura total é fundamental para garantir tanto a segurança das operações desenvolvidas na área como a implantação integral do plano de recuperação proposto. A observação do maciço, especialmente as fraturas e a surgência de água, bem como do comportamento dos diversos setores da cava ainda na fase de lavra são essenciais,

uma vez que na análise da estabilidade predominarão as características estruturais do maciço.

Com relação à drenagem recomenda-se que as cristas das bancadas tenham uma sobrelevação constituída de pedras juntadas a fim de proteger as faces dos taludes, evitando-se processos erosivos. Nos locais de incorporação da água drenada ao meio é interessante formar um leito de rachão ou dispor blocos de rocha para evitar a formação de voçorocas ou erosões.

Após a desativação do empreendimento é importante a observância dos caminhos preferencialmente formados pelas águas de chuva nas encostas e taludes, para que o plano de drenagem possa ser reformulado com o aproveitamento dos referidos caminhos para a instalação dos elementos de drenagem.

Cada berma deve ter uma inclinação de 2% para seu interior, drenando água para canaletas longitudinais e escadas dissipadoras de energia.

Como exemplo de cálculo de estabilidade, toma-se a seguir um exemplo de uma pedreira típica em granito, analisando-se a estabilidade pelo método de Hoek, ruptura plana.

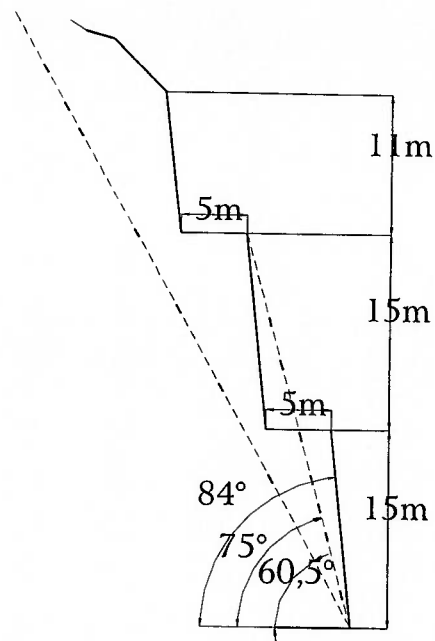


Figura 5.28. Talude da cava final

Adotando-se os seguintes parâmetros:

$$c_r = 1,5 \text{ kg/cm}^2$$

$$\varphi_r = 40^\circ$$

$$\gamma_r = 2,6 \text{ t/m}^3$$

$$\beta = 60,5^\circ$$

Na figura 3.16., considerando talude drenado e sem fenda de tração, tem-se:

$$Y = \frac{\gamma_r \cdot H}{c_r} = \frac{2600 \cdot 41}{15000} = 7,1$$

$$X = 2 \cdot \sqrt{(i - \beta) \cdot (\beta - \varphi_r)} = 2 \cdot \sqrt{(75 - 60,5) \cdot (60,5 - 40)} = 34,5$$

Conhecidos X e Y, consulta-se o ábaco da figura 3.17. que resulta num fator de segurança da ordem de 2,0, que é satisfatório.

Mais uma vez, convém frisar que nas cavas em rocha predominam os condicionantes estruturais do maciço, que deverão ser convenientemente apurados numa inspeção em campo.

5.3.4. MEDIDAS DE RECUPERAÇÃO DAS ÁREAS

Um caso de recuperação envolvendo uma pedreira desativada é o da antiga pedreira Chapadão. Localizada em Campinas, SP, a área foi transformada numa área de lazer (praça Ulisses Guimarães).



Figura 5.29. Vista geral da cava - Pedreira Chapadão

A pedreira desenvolveu suas atividades em cava de meia-encosta, explorando basalto. A cava final resultante apresenta uma única bancada.

A pedreira Chapadão, localizada em bairro de médio a alto padrão de Campinas-

SP, está totalmente inserida no perímetro urbano, o que veio a impedir o prosseguimento de suas atividades.



Figura 5.30. Área urbana em torno da antiga pedreira

Na cava observa-se que a bancada tem altura variável, atingindo até mais de 20 metros, com talude praticamente vertical, em maciço basáltico. Os taludes em rocha se mostram estáveis.

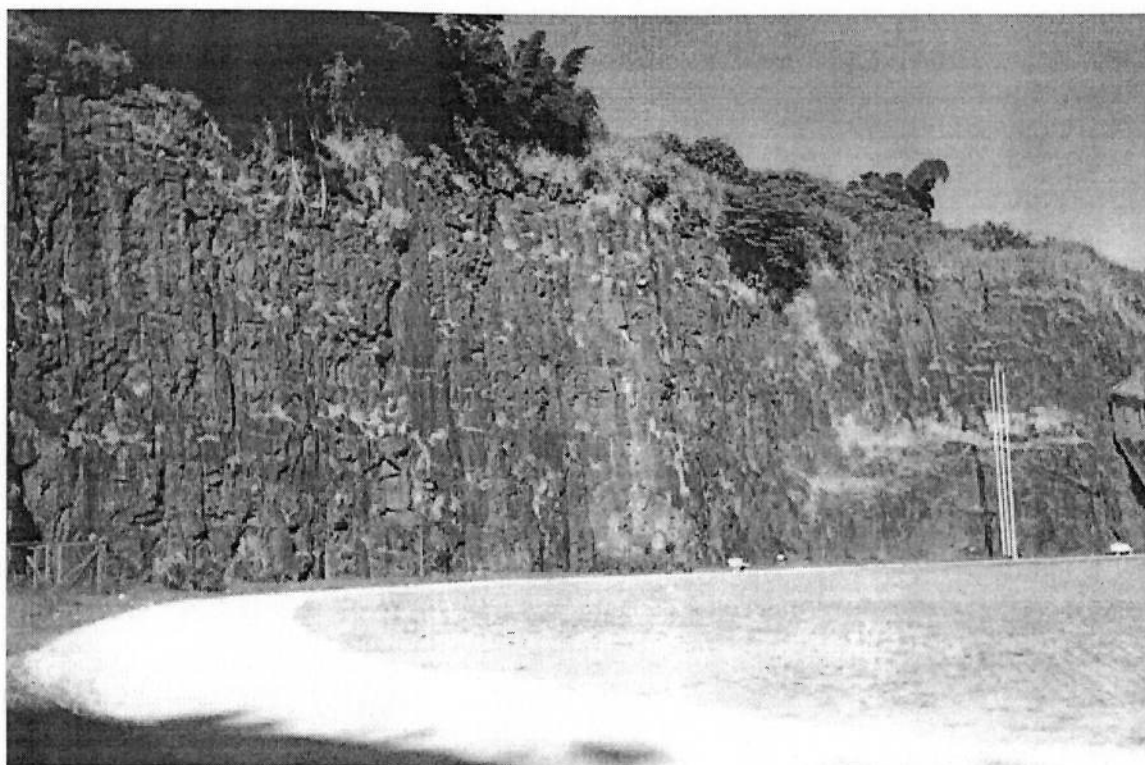


Figura 5.31. Bancada em rocha, com altura superior a 20 m

Um aspecto fundamental observado refere-se à drenagem tanto de águas subterrâneas como pluviais. A cava acaba funcionando como uma drenagem natural, captando águas superficiais e subterrâneas. A cava, se for mais baixa que o nível dos terrenos circundantes naturalmente tende a acumular água, mas mesmo nas cavas de meia-encosta, devido à grande área de captação e a impermeabilidade da rocha, as vazões de água tendem a ser significativas, especialmente nas chuvas, de forma que esse fluxo deve ser conduzido para fora da cava de maneira planejada. Na figura 5.32. percebe-se a canaleta de drenagem revestida de paralelepípedos, entre os setores da cava.



Figura 5.32. Canaleta de drenagem entre setores da cava

Em termos de revegetação da cava, verifica-se que mesmo taludes em rocha sob determinadas condições podem adquirir vegetação espontaneamente a longo prazo.

As condições físicas que proporcionam essa recuperação estão relacionadas à presença de água, ocorrendo em taludes sujeitos a surgências, com face irregular e dotada de reentrâncias, que proporcionam pequenas plataformas, servindo de sustento à vegetação. Quanto menor a altura da bancada, mais natural é o aspecto do talude revegetado.

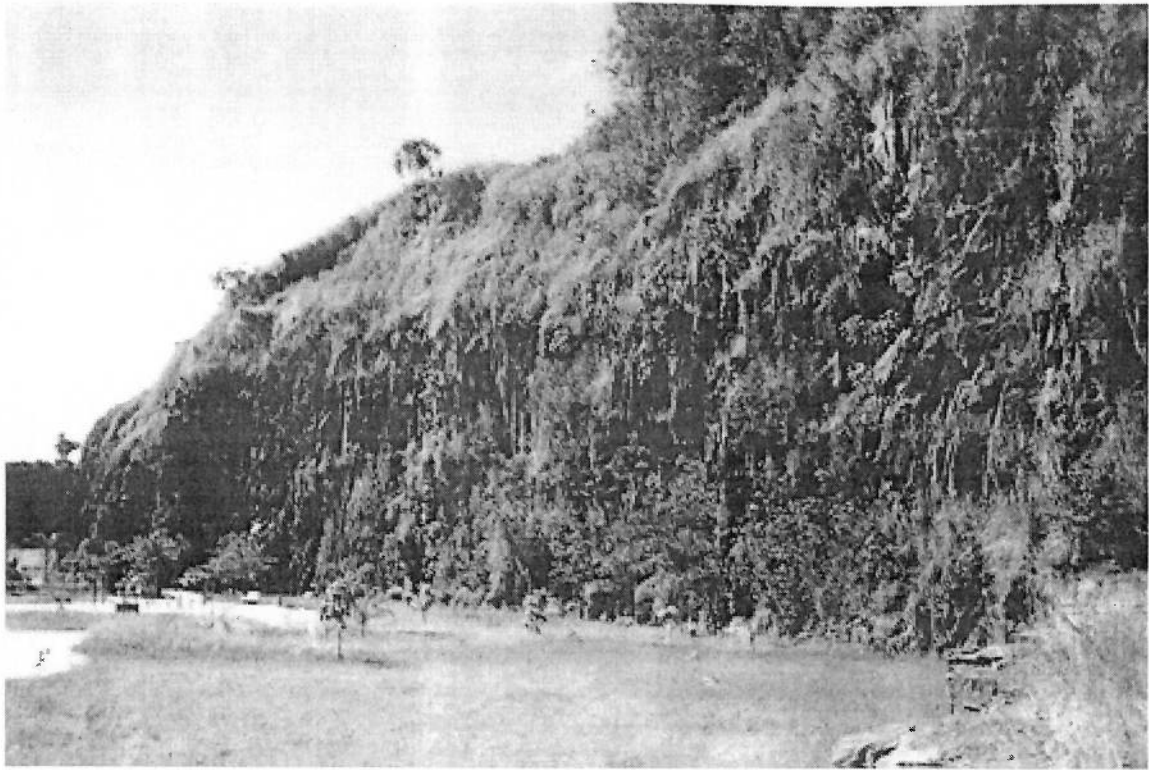


Figura 5.33. Detalhe de estabelecimento de vegetação na bancada

6. CONCLUSÕES FINAIS

Nas páginas precedentes buscou-se expor a relevância dos condicionantes geológico-geotécnicos, fundamentais ao êxito dos trabalhos de recuperação das áreas degradadas por lavra de minas a céu aberto.

O primeiro capítulo situa o contexto do tema pesquisado e estabelece os objetivos do presente trabalho. É apresentada a situação atual de relativa escassez de trabalhos que abordam o escopo de engenharia envolvido na recuperação de áreas na mineração a céu aberto, quando comparados às pesquisas em outras áreas igualmente importantes, mas mais comumente associadas à questão ambiental, tais como a revegetação, por exemplo.

O segundo capítulo é dedicado a uma apresentação dos conceitos fundamentais relacionados às diversas disciplinas intervenientes no tema escolhido. Inicialmente é traçado um breve panorama histórico e da legislação brasileira relacionada à recuperação de áreas degradadas na mineração a céu aberto. A seguir são descritas as características peculiares do empreendimento mineiro, das operações de lavra e beneficiamento e dado o conceito de vida útil da mina. Na sequência são definidos os conceitos de degradação, recuperação, bem como descritas as características típicas das áreas degradadas na mineração a céu aberto. Nesse capítulo também são abordados os temas do uso futuro e planejamento da recuperação, onde se verifica que a recuperação de áreas não deve se constituir somente de atividades a serem tomadas em áreas já degradadas, mas também de atividades de prevenção para minimizar a degradação durante a execução das atividades mineiras. É possível planejar as atividades de mineração em conformidade à futura configuração da área, dentro de um plano de lavra adequado, com benefícios não apenas ambientais, mas em termos de segurança e de racionalização das operações unitárias, além de diluir os custos de recuperação ao longo da vida da mina, cujo

uso futuro da área poderá ainda se tornar uma fonte de renda após seu encerramento.

O terceiro capítulo trata dos condicionantes geológico-geotécnicos propriamente ditos. São abordados os processos de instabilização a que estão sujeitas as áreas degradadas na mineração a céu aberto, quais as investigações geotécnicas e quais parâmetros geomecânicos de interesse a serem levantados. A seguir são apresentados os métodos de cálculo de estabilidade e medidas de estabilização aplicáveis. São descritas também as características construtivas de estruturas como cavas, pilhas de estéril e barragens de rejeito, bem como as características geotécnicas típicas do estéril e do rejeito.

No quarto capítulo é abordado o tema da conformação topográfica das áreas degradadas. Na definição da futura conformação topográfica da área deve-se tirar proveito do grande potencial de movimentação de materiais na mineração, que tem a capacidade de modelar o terreno de uma forma criativa, sem necessariamente incorrer em custos adicionais significativos. Sempre que possível, a recuperação de áreas degradadas na mineração a céu aberto deve aproveitar os terrenos gerados, que podem agregar características interessantes à paisagem original, desde que obedecendo aos requisitos de estabilidade determinados pela análise dos condicionantes geológico-geotécnicos. Na definição da melhor conformação topográfica a modelagem tridimensional da superfície por simulação computacional é uma importante ferramenta, fornecendo subsídios tanto em termos paisagísticos como em termos quantitativos para a análise técnico-econômica de diversas alternativas de recuperação.

Finalmente, o quinto capítulo trata da aplicação dos condicionantes geológico-geotécnicos a três tipos de mineração: areia industrial, minério de ferro e brita para construção civil. É descrito cada tipo de empreendimento, e quais critérios geológico-geotécnicos e medidas de recuperação são aplicáveis a cada caso.

Dessa forma, retomando-se os objetivos estabelecidos no primeiro capítulo, foram desenvolvidos ao longo da presente dissertação a análise dos diversos critérios geológico-geotécnicos envolvidos nos projetos de recuperação de áreas degradadas na mineração, a sua aplicação em casos práticos, a análise da recomposição topográfica dessas áreas por meio de modelagem computacional visando proporcionar alternativas à definição da configuração final da área a ser recuperada, bem como a discussão do tema da integração dos trabalhos de recuperação ao planejamento da lavra.

A análise dos condicionantes geológico-geotécnicos é essencial para que sejam proporcionadas as necessárias condições de estabilidade do meio físico. O conhecimento dos condicionantes que regem a estabilidade das áreas envolvidas na recuperação fornece subsídios a um uso futuro compatível, através do estabelecimento de um plano de recuperação viável, que proporcione as necessárias condições de segurança, criando um ambiente propício à implementação das demais fases de recuperação.

Em cada caso, os condicionantes geológicos-geotécnicos, associados aos padrões de drenagem, topografia, carências regionais e demais características que envolvem o conhecimento do meio físico da área devem ser considerados e valorizados na recuperação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABRÃO, P. A. A mineração e o meio ambiente. In: CURSO de mineração e meio ambiente: aspectos legais e técnicos. Belo Horizonte, Instituto Brasileiro de Mineração, 1983. p. 15-39.
- ARAÚJO, N. et al. A experiência de um enfoque regional no tratamento dos planos de recuperação de áreas degradadas nas bacias hidrográficas do Estado de São Paulo. In: CONGRESSO ÍTALO-BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE MINAS, 2. São Paulo, 1993. *Anais*. São Paulo, EPUSP, 1993. v. 1. p. 587-600.
- BABA, L. J. N. et al. Estudos geotécnicos relacionados com o projeto de deposição de rejeitos de concentração de itabiritos por flotação. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA, 6., Salvador, 1990. *Anais*. São Paulo, ABGE/ABMS, 1990. v. 1, p. 35-43.
- BARTH, R. C. Avaliação da recuperação de áreas mineradas no Brasil. *Boletim Técnico. Sociedade de Investigações Florestais. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, n. 1, p. 1-41, 1989.*
- BAUER, A. M. Uso futuro de áreas mineradas. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL SOBRE MINERAÇÃO EM ÁREAS URBANAS, São Paulo, 1989. *Anais*. Brasília, Ministério da Infraestrutura, 1989. p. 29-35.
- BITAR, O. Y. et al. A abordagem do meio físico nos estudos de recuperação ambiental de áreas de mineração de areia na Região Metropolitana de São Paulo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA, 6., Salvador, 1990. *Anais*. São Paulo, ABGE/ABMS, 1990. v. 1, p. 251-9.

- BITAR, O. Y. et al. Indicadores geológico-geotécnicos na recuperação ambiental de áreas degradadas em regiões urbanas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA, 7., Poços de Caldas, 1993. **Anais**. São Paulo, ABGE, 1993. v. 2, p. 177-83.
- BITAR, O. Y. **Avaliação da recuperação de áreas degradadas por mineração na Região Metropolitana de São Paulo**. São Paulo, 1997. 185 p. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- BLIGHT, G. E.; WILLIAMSON, J. R. G. Tailings dams and the environment in South Africa. **International Water Power & Dam Construction**, London, v. 46, p. 22-7, Oct. 1994.
- BRASIL. Ministério das Minas e Energia. Departamento Nacional da Produção Mineral. **Plano diretor de mineração para a região metropolitana de São Paulo: diagnóstico e diretrizes**. São Paulo, DNPM/SNM, 1979. 2 v.
- BRENNER, F. J. Land reclamation after strip coal mining in the United States. **Mining Magazine**, London, v. 153, n. 3, p. 211-7, Sept. 1985.
- CAIRNS JR., J. Restoration, reclamation and regeneration of degraded or destroyed ecosystems. In: SOULÉ, M. E., ed. **Conservation biology: the science of scarcity and diversity**. Sunderland, Sinauer Associates, 1986. p. 465-84.
- CARTER, R. A. Planning for second uses. **Rock Products**, Chicago, v. 93, n. 1, p.66-71, Jan. 1990.
- CARVALHO, P. A. S. **Manual de geotecnia: taludes de rodovias; orientação para seu diagnóstico e soluções de seus problemas**. São Paulo, IPT, 1991.

- CARVALHO, M. P.; DE SILVIO, E.; SOARES, L. Barragem de rejeitos na mina do Pitinga. *Minérios, Extração e Processamento*, São Paulo, n. 215, p. 26-32, jan./ fev. 1997.
- COSTANZO JR., J. *Síntese metodológica dos estudos geológico-geotécnicos aplicados ao projeto de mineração*. São Paulo, ABGE, 1985.
- CUNHA, M. A.; MARCHI, A. J. Aplicação dos estudos geológicos-geotécnicos na estabilização de frentes de pedreiras. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA, 4., São Paulo, 1984. *Anais*. Belo Horizonte, ABGE, 1984. v. 1, p. 53-70.
- D'APPOLONIA, E.; ELISSON, R. D.; GORMLEY, J. T. Abandonment of tailings facilities. In: INTERNATIONAL TAILING SYMPOSIUM, 1., Tucson, 1972. *Tailings disposal today*. San Francisco, Miller Freeman, 1973. p. 571-605.
- DEERE, D. U.; PATTON, F. D. Slope stability in residual soils. In: PANAMERICAN CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, 4., San Juan, 1970. *Proceedings*. New York, American Society for Civil Engineers, 1971. v. 1, p. 87-170.
- DE MELO, C. E.; PACHECO, E. B. Aspectos geotécnicos da recuperação de um lago de resíduos industriais. In: SIMPÓSIO SOBRE BARRAGENS DE REJEITOS E DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS INDUSTRIAIS E DE MINERAÇÃO, Rio de Janeiro, 1987. *Anais*. Rio de Janeiro, ABMS/ABGE/CBGB/DTG-CE, 1987. v. 2, p. 110-20.

- DOLL, E. C. Relation of public policy to reclamation goals and responsibilities. In: HOSSNER, L. R., ed. **Reclamation of surface-mined lands**. Boca Raton, CRC Press, 1988. v. 1, p. 41-53.
- DOLLHORF, D. J.; POSTLE, R. C. Physical parameters that influence succesful minesoil reclamation. In: HOSSNER, L. R., ed. **Reclamation of surface-mined lands**. Boca Raton, CRC Press, 1988. v. 1, p. 81-104.
- FORNAZARI FILHO, N. et al. Geologia aplicada à disposição de rejeitos de mineração: a problemática e contribuições a diagnose e solução. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA, 3., Itapema, 1981. **Anais**. S.L., ABGE, 1981. v. 3, p. 355-73.
- FUJIMURA, F. **Análise de estabilidade de taludes em rocha**. São Paulo, EPUSP, 1996. /Notas de aula da Disciplina PMI-723 - Mecânica de rochas aplicada a mineração I/
- FUJIMURA, F.; NIEBLE, C. M. Metodologia dos trabalhos geotécnicos para a recuperação de áreas degradadas por minerações de ferro no Brasil. In: CONGRESSO ÍTALO-BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE MINAS, 1., Cagliari, 1990. **Anais**. Cagliari, Università degli Studi di Cagliari/Departamento de Engenharia Minas EPUSP, 1990. p. 395-410.
- FUNDAÇÃO DO DESENVOLVIMENTO ADMINISTRATIVO. **Licenciamento em meio ambiente no Estado de São Paulo**. São Paulo, 1992.
- GENSKE, D. D.; NOLL, P. Managing land reclamation, examples from the German coal mining district. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENVIRONMENTAL ISSUES AND WASTE MANAGEMENT IN ENERGY

- AND MINERAL PRODUCTION, 3., Perth, 1994. **Proceedings.** Perth, Curtin University of Technology, 1994. p. 87-95.
- GUIDICINI, G.; NIEBLE, C.M. **Estabilidade taludes naturais e de escavação.** São Paulo, Edgard Blucher/ EDUSP, 1976.
- HANTZ, D. Slopes design in surface mines. **International Journal of Surface Mining,** Rotterdam, v. 2, n. 2, p. 87-92, 1988.
- HARWOOD, G. D.; THAMES, J. L. Design and planning considerations in surface-mined land shaping. In: HOSSNER, L. R., ed. **Reclamation of surface-mined lands.** Boca Raton , CRC Press, 1988. v. 1, p. 137-58.
- HEALE, E. L. Reclamation of tailings and stressed lands at the Sudbury, Ontario operations of INCO Limited. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE ABATEMENT OF ACIDIC DRAINAGE, 2, Montreal, 1991. **Proceedings.** S.L. s. ed. s.d. s.p.
- HOEK, E. **Estimando a estabilidade de taludes escavados em minas a céu aberto.** São Paulo, Associação Paulista de Geologia Aplicada, 1972. (Tradução n.4)
- HOEK, E. **Practical rock engineering.** Ontario, Rocscience, 1998.
- HOEK, E.; BRAY, J. **Rock slope engineering.** 3 ed. London, The Institution of Mining and Metallurgy, 1991.
- HOSSEIN, M.; HASSANI, F. P.; LEDUC, R. A brief survey of current surface waste disposal practices in the metal mining industry. **International Journal of Surface Mining and Reclamation,** v. 7, p. 23-8, 1993.

- IBRAHIM, M. M. C. **Utilização de áreas degradadas pela mineração: o caso da Pedreira Itaquera.** São Paulo, 1996. 183 p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS. **Manual de recuperação de áreas degradadas pela mineração: técnicas de revegetação.** Brasília, 1990.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. **Mineração e meio ambiente.** Brasília, 1992.
- JANBU, N. Application of composite slip surfaces for stability analysis. In: EUROPEAN CONFERENCE ON STABILITY OF EARTH SLOPES, Estocolmo, 1954. **Proceedings.** Estocolmo, s.ed., 1954. v. 3, p. 43-9.
- JANSEN, I. J.; MELSTED, S. W. Land shaping and soil construction. In: HOSNER, L. R., ed. **Reclamation of surface-mined lands.** Boca Raton, CRC Press, 1988. v. 1, p. 125-36.
- KELLY, E.; SPOTTISWOOD, D. **Introduction to mineral processing.** New York, Wiley, 1982.
- KENNEDY, B. A., ed. **Surface mining.** 2 ed. Littleton, Society for Mining, Metallurgy and Exploration, 1990.
- KOPPE, J. C.; NOVA, P. A. C.; COSTA, J. F. C. L. Projeto e recuperação de área degradada por lavra de granito ornamental em Viamão, RS, Brasil. In: CONGRESSO ÍTALO-BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE MINAS, 2. São Paulo, 1993. **Anais.** São Paulo, EPUSP, 1993. v.1. p. 395-404.

- KOVALICK, W. K. Reclaiming of degraded areas. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE GESTÃO E TECNOLOGIAS DE TRATAMENTO DE RESÍDUOS, 1, São Paulo, 1991. *Anais*. S.L. s. ed. s.d. p. 1-20.
- LOOTENS, D. J.; GREENSDALE, W. M.; BAKER, J. M., eds. *Environmental management for the 1990's*. Littleton, Society for Mining, Metallurgy and Exploration, 1991.
- LYLE JR., E. S. *Surface mine reclamation manual*. New York, Elsevier, 1987.
- MASCHIO, L. M. A., et al. Evolução, estágio e caracterização da pesquisa em recuperação de áreas degradadas no Brasil. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS, Curitiba, 1992. *Anais*. Curitiba, UFPR/FUPEF; 1992. p. 17-33.
- MILLS, C.H. Achieving a final land use for three mining projects. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENVIRONMENTAL ISSUES AND WASTE MANAGEMENT IN ENERGY AND MINERAL PRODUCTION, 3. Perth, 1994. *Proceedings*. Perth, Curtin University of Technology, 1994. p. 233-48.
- MINESOFT LTD. Computer software helps model surface reclamation projects. *Mining Engineering*, Littleton, v. 43, n. 4, p. 399-400, Apr. 1991.
- MOHR, R. Control of surface mine drainage at Coeur d'Alene's Thunder Mountain Mine. *Mining Engineering*, Littleton, v. 43, n. 2, p. 210-2, Feb. 1991.

- NIEBLE, C. M.; ROCHA, R. S.; REIS, A. O. Uma sistemática para análise de estabilidade de taludes de mineração em maciços de rocha alterada e solos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA, 2., São Paulo, 1978. *Anais*. São Paulo, ABGE, 1978. v. 2, p. 281-96.
- OLIVEIRA, J. E.; CARDOSO, A. C. M. Condicionantes geológicos-geotécnicos de projeto de barragem de contenção de rejeitos de São Bento. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA, 7., Poços de Caldas, 1993. *Anais*. São Paulo, ABGE, 1994. v. 1, p. 169-77.
- PATTON, F. D.; DEERE, D. U. Significant geologic factors in rock slope stability. In: SYMPOSIUM ON THE THEORETICAL BACKGROUND TO THE PLANNING OF OPEN PIT MINES WITH SPECIAL REFERENCE TO SLOPE STABILITY, Johannesburg, 1970. *Planning open pit mines: proceedings*. Cape Town, The South African Institute of Mining and Metallurgy, 1970. p. 143-51.
- RAMOS, J. M.; ROCHA, J. A experiência da MBR em trabalhos sobre a recuperação de áreas de mineração de ferro. In: SIMPÓSIO ANUAL DA ACADEMIA DE CIÊNCIAS DO ESTADO DE SÃO PAULO, 6., São Paulo, 1982. *Anais*. São Paulo, Aciesp, 1982. 15 p.
- RAMOS, J. M. S.; TÁRCIA, R. E.; VÊNCIO, F. N. Estudo de drenagem na mina de Conceição, Itabira, CVRD. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA, 4., São Paulo, 1984. *Anais*. Belo Horizonte, ABGE, 1984. v. 1, p. 159-73.
- REID, P. Mine reclamation and financial assurance. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENVIRONMENTAL ISSUES AND WASTE

- MANAGEMENT IN ENERGY AND MINERAL PRODUCTION, 3., Perth, 1994. **Proceedings**. Perth, Curtin University of Technology, 1994. p. 15-20.
- ROCA, A. C. C. et al. **Resíduos sólidos industriais**. 2. ed. São Paulo, CETESB, 1993.
- SANCHEZ, L. E. Land reclamation in Brazil: current situation and future trends. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENVIRONMENTAL ISSUES AND MANAGEMENT OF WASTE IN ENERGY AND MINERAL PRODUCTION, 2., Calgary, 1992. **Environmental issues and management of waste in energy and minerals production: proceedings**. Rotterdam, Balkema, 1992. p. 129-35.
- SENDLEIN, L. V. A.; YAZICIGIL, H.; CARLSON, C. L., eds. **Surface mining environmental monitoring handbook**. New York, Elsevier, 1983.
- SILVA, W. S.; FORNAZARI FILHO, N. **Unidades de conservação ambiental e áreas correlatas no Estado de São Paulo**. São Paulo, Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1992.
- SILVEIRA, N. J. E.; ORTIGÃO, R. L. C. R. Recuperação de áreas degradadas por resíduo sólido da indústria coureiro-calçadista em Gramado, RS, Brasil. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS, Curitiba, 1992. **Anais**. Curitiba, UFPR/FUPEF; 1992. p. 189-209.
- SUMÁRIO MINERAL. Brasília, v.19, 1999. www.dnmp.gov.br. 25/03/2000. www.dnmp.gov.br/sm99-1.doc
- SUMER, S. et al. Alberta lake re-established after draining to mine coal. **Mining Engineering**, Littleton, v. 47, n. 11, p.1015-9, Nov. 1995..

- UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE FOREST SERVICE.
User guide to engineering: mining and reclamation in the West. S.L, 1979.
(SEAM Program)
- YOSHIKAWA, N. K. **Análise de parâmetros geomecânicos de interesse a lavra de minas.** São Paulo, 1990. 221 p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- WEISBERG, I. A mineração e as leis ambientais no Brasil. **Brasil Mineral**, São Paulo, n. 85, p. 24-32, jan./fev. 1991.
- WILLIAMS, D. D. A revegetação de áreas degradadas pela mineração. **Minérios: Extração e Processamento**, São Paulo, n. 171, p.43-7, ago. 1991.
- WILLIAMS, D. D. et al. **Manual de recuperação de áreas degradadas pela mineração: técnicas de revegetação.** Brasília, IBAMA, 1990.