

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MINAS

TESE DE DOUTORADO

**ESTUDO DO FLUXO  
DE MATERIAL FRAGMENTADO  
NA MINERAÇÃO SUBTERRÂNEA,  
COM O USO DE MODELOS FÍSICOS**

Autor: José Margarida da Silva

Orientadora: Profa. Maria de Fátima Andrade Gripp

Belo Horizonte, fevereiro de 2005.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MINAS

José Margarida da Silva

**ESTUDO DO FLUXO  
DE MATERIAL FRAGMENTADO  
NA MINERAÇÃO SUBTERRÂNEA,  
COM O USO DE MODELOS FÍSICOS**

Tese de Doutorado  
apresentada ao Curso de Pós-graduação  
em Engenharia Metalúrgica e de Minas  
da Universidade Federal de Minas Gerais

Orientadora: Profa. Maria de Fátima Andrade Gripp

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

2005

“Nenhum de nós é tão bom quanto nós todos juntos”.

Dedico esta tese ao Criador  
e a toda a minha família:  
ao exemplo de meus pais,  
à amizade de meus irmãos,  
ao carinho dos amigos.

Em especial ao amor de Dayse,  
e às pequenas e doces Natália e Laura.

## Agradecimentos

O autor expressa seus agradecimentos a todos que de maneira direta ou indireta auxiliaram na realização do trabalho, em especial a:

- Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal Superior (CAPES) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), que financiaram a bolsa de doutorado e a pesquisa, respectivamente;
- Profa. Maria de Fátima Andrade Gripp (DEMIN/EE/UFMG), pelo incentivo, pela orientação paciente, segura, objetiva e competente;
- à Mineração Morro Velho, pela possibilidade de observação *in loco* do fluxo de material fragmentado;
- ao Prof. José Aurélio Medeiros da Luz (DEMIN/EM/UFOP), colaborador na realização e análise de resultados dos ensaios preliminares;
- aos demais companheiros do Departamento de Engenharia de Minas, da Escola de Minas da UFOP, pelo incentivo e confiança, em especial ao Prof. Rodrigo Peluci Figueiredo, pelo auxílio com indicações bibliográficas;
- aos graduandos Solanno Fabrícus Cabral Dias, Daniel Arantes Cunha, Edmárcia da Silva Lino, Eduardo Antônio Silva, Marcílio Resende, Marsol de Oliveira Sol e Marcelo Resende de Almeida (DEMIN/EM/UFOP), Anna Sanz Borrás (Universidade Politécnica da Catalunha), bolsistas e voluntários da realização de ensaios e determinação de propriedades;
- aos engenheiros Itamar Machado Magalhães (Glencore, Peru), Carlos Alberto da Silva (FERBASA), Júlio César Ferreira Rocha (CMM), Luciano Tomazi Santos Penna (São Bento Mineração/Eldorado), Luís Carlos Guidotti Porto (Mineração Jundu, São Paulo), Carlos Roberto Quinteiro (LKAB, Suécia), Alessandro Medina Pinto (Cia Nitroquímica/Votorantim), Rafael C. Matta (EMITANG), João Luiz Nogueira (Geosol), Geraldo Batistelli (Samarco Mineração) e Delciane Porfiro (MBR) pelas informações disponibilizadas;
- aos funcionários da UFOP: Laboratório de Tratamento de Minérios (DEMIN/EM), setores de serralheria e marcenaria, Marcílio Pedrosa (informática);
- à Sra. Ana Maria Sá de Oliveira, bibliotecária do Centro de Tecnologia Mineral (RJ); à srta. Walkiria de Souza, Fundação Gorceix, pelo apoio administrativo;
- ao Sr. Neri Válter de Souza, da Carpintaria Madelar (Ouro Preto, MG) pelo auxílio com sugestões no projeto e construção de modelo físico.

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	ix
LISTA DE TABELAS	xiv
LISTA DE NOTAÇÕES E SÍMBOLOS	xvi
RESUMO	xix
1 – INTRODUÇÃO	1
2 – OBJETIVOS	4
3 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
3. 1. Introdução	6
3.1.1. Terminologia e Definições Preliminares	7
Escavações subterrâneas	8
Silos e tremonhas	10
Pilhas	11
3. 2. Materiais fragmentados	13
3.2.1. Tamanho de partícula	13
3.2.2. Tipos de materiais fragmentados	15
3.3. Fluxo em tremonhas e silos	17
3.3.1. Introdução	17
Propriedades de fluxo de material fragmentado	18
Ângulo de atrito e ângulo de repouso	18
Coesão	19
Forma de partícula	20
Massa específica aparente (ou volumétrica)	22
3.3.2. Padrões de fluxo	22
Fluxo em massa	22
Fluxo em funil	22
Fluxo misto	24
3.3.3. Problemas de fluxo	24
Formação de arco	25

Formação de canal preferencial de fluxo	27
3.3.4. Fluxo em silos	29
3.3.5. Projeto de fluxo em silos	32
3.3.5.1. Etapas do projeto de fluxo em silos	33
Determinação das propriedades de fluxo do material	33
Determinação da geometria do silo	34
Carga exercida sobre paredes do silo e do alimentador	35
Detalhamento da estrutura e revisão de projeto	37
3.4. Escavações subterrâneas	38
3.4.1. Introdução	38
3.4.2. Métodos de lavra subterrânea	39
3.4.3. Sistemas de fluxo de material em minas subterrâneas	44
3.4.4. Segurança em escavações com fluxo por gravidade	51
3.5. Padrão de fluxo em escavações subterrâneas	55
3.5.1. Comportamento mecânico do material granular	55
3.5.2. Regras básicas do fluxo por gravidade	58
3.5.3. Problemas de fluxo por gravidade em passagens	64
3.6. Projeto de fluxo por gravidade em passagens de minério e chutes	65
3.6.1. Introdução	65
3.6.2. Fatores de projeto	65
3.6.3. Tipos de passagens de minério	66
3.6.4. Seções das passagens de minério	67
3.6.5. Direção das passagens de minério	68
3.6.6. Inclinação de passagens de minério e de chutes	69
3.6.7. Comprimento das passagens	71
3.6.8. Ramificações, curvas e joelhos	71
3.6.9. Dispositivos de transferência	72
3.6.10. Pressão em portões de descarga	73
3.6.11. Equação de Janssen para passagem inclinada	74
3.6.12. Projeto de pontos de carregamento de material	77
3.7. Abordagens no estudo de fluxo de material fragmentado em mineração .....	77
3.7.1. Introdução: utilização de modelos	77
3.7.2. Modelos Físicos	80
Modelo de ROSE e TANAKA (1959)	80

Modelo de JANELID (1972)	81
Modelo de BLIGHT e HAAK (1994)	81
Modelo do <i>International Caving Study</i> (desde 1998)	83
3.7.3. Modelos Numéricos	86
Modelo de BEUS <i>et alii</i> (1997)	87
Modelo de MCNEARNY e BARKER (1998)	87
3.7.4. Outras abordagens	89
Expressões analíticas	89
Equações empíricas	89
Ensaio em plena escala	90
3. 8. A prática corrente na mineração subterrânea a respeito de fluxo por gravidade de material fragmentado .....	91
3.8.1. Introdução	91
3.8.2. Recomendações e regras práticas	93
4 – METODOLOGIA	96
4.1. Materiais e métodos utilizados em determinação das propriedades de fluxo dos materiais	98
4.2. Metodologia utilizada em ensaios em modelos de silos	102
4.3. Metodologia utilizada em ensaios em tubos cilíndricos inclinados	103
4.4. Descrição do projeto e da construção de modelo físico de passagem .....	104
4.5. Metodologia dos ensaios em modelo físico de passagem .....	105
4.5.1. Preparação dos ensaios em modelo físico de passagem .	105
4.5.2. Descrição dos ensaios em modelo físico de passagem ....	107
4.5.3. Metodologias utilizadas nas observações nos ensaios em modelo físico de passagem .....	107
5 – RESULTADOS E DISCUSSÃO	110
5.1. Ensaio em modelos de silos	110
5.1.1. Resultados de vazões em modelos de silos	111
Ensaio em modelo de silo vibratório	111
Ensaio em modelos de silo estáticos	112
5.1.2. Equação da vazão específica em modelo de silo vibratório	115

5.2. Ensaaios em tubos cilíndricos inclinados	116
5.2.1. Equação da velocidade normalizada	117
5.3. Levantamento da prática em fluxo por gravidade de material fragmentado	118
5.4. Determinação de propriedades dos materiais	120
5.4.1. Resultados de determinação de índice de forma de materiais .....	122
5.4.2. Resultados de determinação de módulo de finura de materiais .....	123
5.4.3. Resultados de determinação de maior dimensão de partícula .....	125
5.5. Resultados dos ensaios em modelo de passagem de minério	130
5.5.1. Introdução	130
5.5.2. Análise dos problemas de fluxo observados	131
5.5.3. Análise da determinação da vazão de fluxo	134
Análise da influência da coluna de material	136 e 168
Análise da influência da inclinação da passagem	153 e 168
Análise da influência da umidade	153
Análise da influência do joelho na passagem	156
Análise da influência da presença de argilosos	156
Análise da influência dos problemas de fluxo	159
Análise da influência da direção do joelho	164
Análise da influência da seção de descarga	168
Análise da influência da faixa granulométrica	168
 6 – CONCLUSÕES	 171
 7 - CONTRIBUIÇÕES ORIGINAIS AO CONHECIMENTO	 175
8 - RELEVÂNCIA DOS RESULTADOS	176
9 - SUGESTÕES PARA TRABALHOS POSTERIORES	177
 PUBLICAÇÕES DO AUTOR RELACIONADAS COM O TRABALHO	 178
DADOS BIOGRÁFICOS DO AUTOR	178
 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	 179

## LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Elementos no sistema de passagens.	10
Figura 3.2 – Seção vertical típica de conjunto silo e tremonha.	11
Figura 3.3 - Movimentos do material fragmentado.	16
Figura 3.4 - Grupos principais de materiais estocados, em função de sua mobilidade. ....	16
Figura 3.5 - Subtipos de material grosseiro.	17
Figura 3.6 – Padrões de fluxo em silos.	24
Figura 3.7 – Formação de arco mecânico e de arco coesivo.	26
Figura 3.8 – Formação de canal preferencial de fluxo.	28
Figura 3.9 – Diagrama para determinação do coeficiente $K_s$	31
Figura 3.10 - Arranjo típico na lavra de abatimento em subníveis.	42
Figura 3.11 - Arranjo típico na lavra de abatimento em blocos.	42
Figura 3.12 - Arranjo típico na lavra de alargamento em subníveis.	43
Figura 3.13 – Sistema de transporte de material fragmentado na Mina de Kiruna (Suécia), conforme PFLEIDER <i>et al</i> (1968). ....	46
Figura 3.14 – Sistema de transporte de material fragmentado na Mina de Spruce (EUA), conforme PFLEIDER <i>et al</i> (1968). ....	46
Figura 3.15 – Sistema de transporte de material fragmentado na Mina de Susquehanna (EUA), conforme PFLEIDER <i>et al</i> (1968). ....	47
Figura 3.16 – Sistema de transporte de material fragmentado na Mina Consolidated (EUA), conforme PFLEIDER <i>et al</i> (1968). ....	47
Figura 3.17 – Sistema de transporte de material fragmentado na Mina Algoma (Canadá), conforme PFLEIDER <i>et al</i> (1968). ....	48
Figura 3.18 – Sistema de transporte de material fragmentado na Mina de United Verde (EUA), conforme PFLEIDER <i>et al</i> (1968). ....	48
Figura 3.19 – Sistema de transporte de material fragmentado na Mina de Caland (Canadá), conforme PFLEIDER <i>et al</i> (1968). ....	49
Figura 3.20 – Sistema de transporte de material fragmentado na Mina de Carol (Canadá), conforme PFLEIDER <i>et al</i> (1968). ....	49
Figura 3.21 - Fatores para a ruptura em passagens de minério.	54
Figura 3.22 - Elipsóide de movimento.	58
Figura 3.23 – Evolução do escoamento de material.	59
Figura 3.24 - Zonas de movimento durante o processo de escoamento de	

material. ....	59
Figura 3.25 - Largura de saída (e) e largura de entrada (w) do fluxo. ....	61
Figura 3.26 – Seleção do silo para os tipos de materiais grosseiros. ....	63
Figura 3.27 - Relação entre a largura do canal de fluxo e a distância entre as saídas de descarga. ....	64
Figura 3.28 – Campo de aplicação do sistema de transferência de material na lavra subterrânea. ....	70
Figura 3.29 – Base teórica dos ensaios de BLIGHT e HAAK (1994). ....	75
Figura 3.30 – Curvas obtidas da pressão sobre o portão para várias inclinações da passagem. ....	76
Figura 3.31 - Modelo de passagem de minério de BLIGHT e HAAK (1994). ....	83
Figura 3.32 – Pressão no portão da passagem versus altura de minério, respectivamente para as inclinações de 90°, 70°, 60° e 50°. ....	84
Figura 3.33 – Modelo físico do trabalho de pesquisa no ICS (MUSTOE, 2002). ....	85
Figura 3.34 – Modelo físico em escala real, simulando o chute e sua estrutura de suporte, utilizado por BEUS <i>et alii</i> (1997). ....	88
Figura 3.35 – Acesso à passagem para inspeção e retirada de entupimento e bloqueios. ....	93
Figura 3.36 - Relações dimensionais entre a dimensão característica da seção da passagem de minério e a granulometria do material. ....	94
Figura 4.1 - Fases do trabalho de estudo do fluxo de material fragmentado em mineração subterrânea. ....	96
Figura 4.2 – Formação de pilha para homogeneização na determinação do índice de forma de partículas. ....	101
Figura 4.3 - Dispositivo construído para aplicação da norma NBR 7809, de medição das dimensões de partículas para determinação do fator de forma. ....	101
Figura 4.4 – Medição com paquímetro digital na determinação do índice de forma de partículas. ....	101
Figura 4.5 - Geometria dos modelos de silos utilizados para os ensaios de fluxo. ....	103
Figura 4.6 – Representação esquemática do dispositivo de ensaios de fluxo em tubos cilíndricos inclinados. ....	103
Figura 4.7 – Fotografia de ensaio de fluxo de areia em tubo inclinado. ....	104
Figura 4.8 – Modelo físico de passagem de minério utilizado para o estudo	

do fluxo de material fragmentado. ....	106
Figura 4.9 – Fotografia do modelo físico de passagem de minério utilizado no estudo do fluxo de material fragmentado. ....	106
Figura 4.10 - Etapas do ensaio em modelo físico de passagem. ....	109
Figura 5.1 – Resultados de vazão mássica média de esferas de aço e de dolomita (tamanho médio de 6,4mm) para diversas dimensões da abertura de descarga, em modelo de silo vibratório. ....	111
Figura 5.2 – Resultados de vazão mássica média de esferas de vidro e de dolomita (tamanho médio de 0,7mm) para diversas dimensões da abertura de descarga, em modelo de silo vibratório. ....	113
Figura 5.3 – Resultados de vazões mássicas médias de fluxo de esferas de vidro e de dolomita, para o silo estático cilíndrico. ....	113
Figura 5.4 – Resultados de vazões mássicas médias de fluxo de esferas de vidro e de dolomita, para o silo estático prismático. ....	114
Figura 5.5 – Curva granulométrica da areia utilizada em ensaio em modelo de passagem. ....	126
Figura 5.6 – Curvas granulométricas da brita 2 de gnaïsse. ....	127
Figura 5.7 – Referência de tamanho para determinação de distribuição granulométrica através do aplicativo WipFrag. ....	128
Figura 5.8 – Curva de distribuição granulométrica obtida do aplicativo WipFrag para uma amostra de brita 0 de dolomita. ....	128
Figura 5.9 - Curvas granulométricas obtidas para as britas 0 de dolomita e de gnaïsse. ....	129
Figura 5.10 – Curvas granulométricas obtidas para as britas 1 de dolomita e de gnaïsse. ....	129
Figura 5.11 - Traçadores coloridos feitos de brita 1 de dolomita, antes da descarga em ensaios em modelo de passagem. ....	133
Figura 5.12 - Traçadores coloridos feitos de brita 2 de gnaïsse, antes da descarga em ensaios em modelo de passagem. ....	133
Figura 5.13 – Variação percentual da vazão em função do tempo de estocagem em ensaios em modelo físico de passagem. ....	133
Figura 5.14 – Arco, visto de janela intermediária do modelo físico, em ensaio com brita 2, modelo inclinado de 60°, Joelho inclinado de 60°, 3,7m de coluna de material, seção de descarga de 12cm x 16cm. ....	137
Figura 5.15 – Detalhe de arco, visto de janela intermediária do modelo, em	

ensaio com brita 2, modelo inclinado de 60°, joelho inclinado de 60°, 3,7m de coluna de material, seção de descarga de 12cm x 16cm. ....	137
Figura 5.16 - Movimentação de material em ruptura de arco em ensaio com brita 2, modelo de passagem inclinado de 60o, joelho inclinado de 60°, 3,7m de coluna de material, vista através de parede de acrílico. ...	138
Figura 5.17 - Detalhe do arco formado na saída de descarga em ensaio com brita 2, modelo inclinado de 70°, sem joelho, 3m de coluna de material. ....	138
Figura 5.18 - Arco formado na alimentação do material em modelo físico de passagem, para ensaio com brita 2, passagem inclinada de 75°, sem joelho, 2,0m de enchimento, visto de baixo. ....	138
Figura 5.19 – Resultados de vazões volumétricas aparentes de britas de gnaiss em modelo físico de passagem, com 3m de coluna de material, seção de 12cm x 16cm. ....	143
Figura 5.20 – Resultados de vazões volumétricas aparentes de britas de gnaiss em modelo de passagem de minério, com 2m de coluna de material, seção de 12cm x 16cm. ....	144
Figura 5.21 – Resultados de vazão volumétrica aparente de britas de gnaiss em modelo de passagem de minério, com 0,9m de coluna de material, seção de 12cm x 16cm. ....	145
Figura 5.22 – Resultados de vazões volumétricas aparentes de britas de gnaiss em modelo físico de passagem, com 2,0m de coluna de material, seção de 6cm x 8cm. ....	146
Figura 5.23 – Resultados de vazão volumétrica aparente de britas de dolomita em modelo de passagem de minério, com 2m de coluna de material, seção de 12cm x 16cm. ....	147
Figura 5.24 – Resultados de vazão volumétrica aparente de britas 1 e 2 de gnaiss e de brita 1 de em modelo de passagem, 3m de coluna de material, seção de descarga de 12cm x 16cm. ....	149
Figura 5.25 – Resultados de vazão volumétrica aparente de brita 1 de gnaiss, brita 1 de dolomita e brita 2 de gnaiss em modelo de passagem, 3m de coluna de material, seção de 12cm x 16cm. ....	150
Figura 5.26 – a) Arranjo dos fragmentos antes da descarga em ensaio com brita 0 de gnaiss, em ensaio com modelo inclinado de 90°, 3m de coluna de material; b) arranjo dos fragmentos antes da descarga	

em ensaio com brita 2 de gnaïsse, em ensaio com modelo inclinado de 60°, 2m de nível de coluna de material. ....	151
Figura 5.27 – a) Detalhe do arranjo dos fragmentos antes da descarga em ensaio com mistura 1 em modelo de passagem, inclinada de 60°, 2m de coluna de material; b) detalhe do arranjo dos fragmentos antes da descarga em ensaio com mistura 2 em modelo de passagem, inclinada de 60°, 2m de coluna de material. ..	152
Figura 5.28 – a) Mistura 3 após descarga em modelo de passagem inclinado de 60°, 2m de coluna de material; b) arco de mistura 4 em modelo de passagem, inclinada de 60°, 2m de coluna de material. ...	152
Figura 5.29 – Problemas em ensaios com areia: a) retenção de material nas laterais em ensaio com passagem inclinada de 75°, com 3,7m de coluna de material; b) formação de arco em ensaio com areia em passagem e joelho inclinados de 60°, 3,7m de coluna de material. ....	154
Figura 5.30 – Resultados de vazão volumétrica aparente em modelo de passagem sem joelho, coluna de material de 3m, seção de descarga de 12cm x 16cm. ....	155
Figura 5.31 – Resultados de vazão volumétrica em ensaios com modelo de passagem sem joelho e com modelo de passagem com joelho acoplado, 1,6m de coluna de material, seção de 12cm x 16cm. ....	157
Figura 5.32 – Resultados de vazão volumétrica de ensaios com brita O de gnaïsse, brita 2 de gnaïsse e misturas desses materiais, com coluna de material de 2m, seção de descarga de 12cm x 16cm. ....	158
Figura 5.33 - Resultados médios de vazão em ensaios em modelo de passagem, seção de 6cm x 8cm, 2m de coluna de material. ....	166
Figura 5.34 - Resultados médios de vazões volumétricas nas seções de descarga testadas do modelo de passagem de minério. ...	169
Figura 5.35 - Razão entre vazões ( $r_v$ ) em função da razão entre tamanhos ( $R_{D90}$ ) nos ensaios em modelo físico de passagem. ....	170

## LISTA DE TABELAS

Tabela III.1 - Distribuição de tamanho de fragmentos em passagem.	14
Tabela III.2 - Valores de ângulos de repouso dinâmico.	20
Tabela III.3 – Valores de ângulo de atrito interno.	21
Tabela III.4 – Valores de ângulo de atrito ao longo de paredes de tremonhas para materiais grosseiros. ....	21
Tabela III.5 - Dados de acidentes fatais na mineração no Brasil.	53
Tabela III.6 – Relações dimensionais entre a dimensão da passagem de minério e o tamanho máximo do maior bloco. ....	68
Tabela IV. 1 – Massa mínima de amostra inicial para determinação de distribuição granulométrica, segundo a NBR 7216. ....	100
Tabela V.1 – Propriedades dos materiais testados nos ensaios em modelos de silos. ....	110
Tabela V.2 – Comparação entre valores previstos e valores medidos para a vazão mássica em modelos estáticos de silos. ....	114
Tabela V.3 – Razão de vazões de dolomita em função da abertura relativa ( $h/d_m$ ) no modelo de silo vibratório. ....	115
Tabela V.4 - Razão de vazões de esferas em função da abertura relativa ( $h/d_m$ ) no modelo de silo vibratório. ....	115
Tabela V.5 – Parâmetros da equação de regressão da vazão específica em modelo de silo, tipo alimentador de gaveta.	116
Tabela V.6 - Propriedades dos materiais e resultados de vazões em escoamento de material granular em tubos inclinados. ....	117
Tabela V.7 – Propriedades dos materiais utilizados em ensaios em modelo de passagem, seção de descarga de 12cm x 16cm. ....	121
Tabela V.8 - Resultados de ensaios para determinação do índice de forma dos materiais. ....	122
Tabela V.9 - Resultados de ensaios para determinação do índice de forma dos materiais, após ensaios em modelo de passagem.	123
Tabela V.10 - Resultados de ensaios para determinação do módulo de finura dos materiais utilizados em ensaios em modelo de passagem.	124
Tabela V.11– Resultados das determinações do $D_{90}$ dos materiais. ....	127
Tabela V.12 – Verificação da influência da estocagem na vazão de	

descarga em ensaios em modelo de passagem, seção de 12cm x 16cm. ....	134
Tabela V.13 – Valores médios de vazão de fluxo aparente de areia e de britas obtidos em modelo de passagem, de seção retangular (12cm x 16cm). ....	135-136
Tabela V.14 - Valores médios de vazão de fluxo aparente de misturas de britas e de argila em modelo de passagem, de seção retangular (12cm x 16cm). ....	139
Tabela V.15 – Descrição de ensaios de britas e de misturas em modelo de passagem, 2m de coluna de material, seção de descarga de 12cm x 16cm. ....	140
Tabela V.16 - Resultados médios de vazão volumétrica aparente em ensaios com modelo de passagem, com joelho acoplado, seção de descarga de 12cm x 16cm. ....	141
Tabela V.17 - Razões entre vazões médias de descarga de materiais em modelo de passagem, seção 12cm x 16cm. ....	142
Tabela V.18 – Influência na vazão de descarga da ocorrência de fluxo em funil ou estagiado em ensaios em modelo de passagem. ....	159
Tabela V.19 - Análise de ensaios com grande incidência de problemas de fluxo em ensaios em modelo de passagem...	160
Tabela V.20 – Influência na vazão de descarga da ocorrência de arcos em ensaios em modelo físico de passagem. ....	162-163
Tabela V.21 – Resultados de vazão de descarga com a variação do ângulo entre direção da passagem e direção do joelho..	164
Tabela V.22 – Propriedades dos materiais utilizados em ensaios em modelo de passagem, seção de 6cm x 8cm. ....	165
Tabela V.23 – Valores médios de vazão aparente de areia e de britas em modelo de passagem, de seção 6cm x 8cm .....	167
Tabela V.24 – Massa retida em zona passiva nos ensaios com seção de 6cm x 8cm, 60° de inclinação. ....	167
Tabela V.25 - Razões das vazões médias de descarga em modelo físico de passagem, seção de 6cm x 8cm. ....	168
Tabela V.26 - Razão entre vazões para um mesmo material entre seções testadas no modelo de passagem. ....	170

## ISTA DE NOTAÇÕES E SÍMBOLOS

- $a$  – largura do fluxo móvel (ou do elipsóide de movimento)  
 $a_N$  – semi-eixo maior do elipsóide de movimento  
 $A_s$  – área da seção transversal  
 $b_N$  e  $c_N$  - semi-eixos horizontais do elipsóide de movimento  
 $D$  – dimensão característica da seção da passagem de minério  
 $d$  – tamanho máximo do maior fragmento (ou bloco)  
 $D/d$  – razão entre saída da passagem e tamanho máximo de fragmento  
 $D_{90}$  – abertura pela qual passa 90% do material alimentado  
 $D_b$  – diâmetro do silo  
 $d_m$  - diâmetro médio das partículas  
 $D_o$  – dimensão característica do chute, do canal preferencial ou do alimentador  
 $d_s$  – massa específica volumétrica (ou aparente) do material estocado  
 $dz$  – altura do elemento de material fragmentado  
 $e$  – base dos logaritmos  
 $e$  – dimensão característica (largura ou diâmetro) da saída do silo  
 $e/d_m$  – razão entre saída do silo e tamanho médio de partícula  
 $E_g$  – elipsóide limite  
 $E_N$  - elipsóide de movimento  
 $E_v$  – elipsóide de isovelocidade  
 $f$  - resistência do arco de material  
 $g$  – aceleração da gravidade  
 $h$  - altura da comporta do modelo de silo vibratório  
 $H$  - altura do silo  
 $H_e$  - altura do elipsóide de movimento  
 $H_m$  - altura da coluna de material  
 $H_N$  - altura da interface de materiais no eixo vertical da abertura de descarga do silo  
 $H_o$  - comprimento do chute  
 $h_p$  – comprimento da passagem de minério  
 $K$  – razão entre a pressão lateral e a pressão vertical (ou entre a tensão lateral e a tensão normal)  
 $K_A$  – coeficiente de empuxo ativo de Rankine  
 $K_N$  - cone de movimento no reservatório (silo ou passagem), relativo ao ponto N  
 $K_p$  - fator de formação de canal preferencial de fluxo

- $K_s$  – coeficiente para determinação da seção da abertura de descarga do silo  
 $l$  - lado mínimo da seção quadrada da abertura de descarga  
 $L$  - largura da abertura de descarga  
 $N$  – coeficiente de uniformidade da distribuição Rosin-Rammler  
 $p$  – distância entre aberturas de descarga  
 $P$  - perímetro  
 $p_b$  – pressão vertical na base do silo  
 $Q_m$  - vazão mássica de material  
 $Q_v$  - vazão volumétrica de material  
 $q_v$  - vazão volumétrica específica  
 $R$  – raio hidráulico  
 $R_{D90}$  - razão entre  $D's_{90}$   
 $R_N$  – raio do elipsóide no ponto N  
 $r_s$  – raio interno do silo  
 $r_v$  – razão entre vazões  
 $S$  - razão da superfície real por unidade de volume da amostra  
 $S_s$  - área superficial de esferas de mesmo tamanho por unidade de volume  
 $v$  – razão da velocidade superficial de escoamento pelo co-seno da inclinação  
 $V_e$  – volume do elipsóide de movimento  
 $v_{max}$  - velocidade máxima  
 $V_N$  – volume de material granular descarregado através do reservatório  
 $w$  - dimensão característica (largura ou diâmetro) da entrada do fluxo  
 $W$  – peso do elemento de material fragmentado  
 $x$  - abscissa do ponto  
 $X_c$  - tamanho característico da distribuição Rosin-Rammler  
 $X_{max}$  - tamanho característico da distribuição Gaudin-Schuhman  
 $z$  – altura do ponto na passagem de minério  
 $Z_r$  – coluna de material do silo
- $\mu$  - coeficiente de atrito do material  
 $\alpha_m$  - inclinação do modelo de passagem de minério  
 $\alpha_t$  – inclinação do tubo (em relação à horizontal)  
 $\alpha$  - inclinação de deslizamento de material  
 $\alpha_m$  - ângulo de repouso dinâmico

- $\alpha_R$  – ângulo de repouso natural
- $\beta$  – inclinação da passagem de minério (em relação à horizontal)
- $\mu'$  - coeficiente de atrito da parede do silo
- $\theta$  – ângulo da seção vertical da tremonha com a horizontal
- $\Theta$  - ângulo entre a direção da passagem e a direção do joelho
- $\sigma_L$  - tensão horizontal ou lateral
- $\sigma_n$  - tensão normal
- $\sigma_y$  - tensão de ruptura do material não confinado
- $\gamma$  - peso específico do material
- $\zeta$  – tensão cisalhante
- $\delta$  – ângulo de atrito entre o material e a parede do reservatório (passagem ou silo)
- $\varepsilon$  - porosidade do material granular
- $\lambda$  - fator de forma ou coeficiente de angularidade
- $\rho_p$  - massa específica da partícula
- $\varphi$  - ângulo de atrito interno do material
- $E$  – excentricidade do elipsóide de movimento

## RESUMO

O principal objetivo deste trabalho foi o estudo do fluxo por gravidade de material fragmentado através de escavações que compõem a infra-estrutura de uma mina subterrânea, com o uso da técnica de modelos físicos.

Na revisão bibliográfica são abordados: a terminologia referente ao tema; as propriedades de fluxo de materiais fragmentados relevantes; as regras básicas do fluxo por gravidade; os parâmetros e as diretrizes para o projeto de fluxo de material fragmentado; os padrões de fluxo; os problemas que interferem na vazão de material fragmentado; os fatores para a ruptura em passagens; a segurança nas operações em escavações subterrâneas com fluxo por gravidade; os arranjos típicos de métodos de lavra subterrânea; as operações com o fluxo por gravidade de material fragmentado; as abordagens adotadas no estudo do fluxo por gravidade em mineração.

Apresenta-se levantamento da prática na mineração subterrânea relativa ao fluxo de material fragmentado. Os dados obtidos revelam não existência de metodologia clara, de linguagem adequada, de estatísticas, de definição de parâmetros e de literatura objetiva. Os resultados apontam a necessidade de documentação criteriosa para estudo desse fluxo, de acordo com as condições locais de cada mina.

Apresentam-se resultados de determinação de propriedades físicas dos materiais utilizados e de vazões de descarga obtidas em ensaios com modelos de silos e com tubos cilíndricos inclinados. São apresentadas as equações obtidas. Os resultados de vazão obtidos confirmam a dificuldade de previsão da taxa de descarga de material granular.

São descritos a construção de modelo físico de passagem, a metodologia dos ensaios executados e os problemas de fluxo documentados. O projeto do modelo físico construído é detalhado.

Os resultados obtidos de vazão de material fragmentado confirmam a influência da razão entre dimensão da passagem e dimensão do material, da umidade, da presença de material argiloso, da inclinação da passagem e da coluna de material no comportamento do material e na vazão.

**Palavras-chave:** material fragmentado, modelos físicos, mineração subterrânea, passagem de minério, fluxo por gravidade.

## **ABSTRACT**

The main objective of this work was the study of gravity flow in excavations, mainly ore passes, in underground mining, by use of physical models.

At review of literature it is presented terminology, flow properties of bulk materials, laws of gravity flow, flow design, flow patterns, flow phenomena, such as arching and rat holing, issues of security at work in ore pass systems, mining methods and material transfer systems and approaches about the study of gravity flow in ore passes.

It was accomplished a rising of the practices on underground mines about gravity flow in excavations. This rising revealed the absence of data, methodology, adequate approach and adequate literature about this matter. It is necessary establishment of carefully and detailed records about evolved phenomena, according local conditions.

From the developed work, it is presented physical properties of materials utilized at tests in bins and pass models, and in inclined tubes. It is presented the equations determined from data. The results revealed the difficulty of rate of discharge prediction.

It is presented physical model construction, at reduced scale. This model is based on ore pass in ore body mined by sublevel stoping. It is also recorded phenomena description, measured parameters, results of volumetric discharge rate. The design of physical model is detailed. These results are analyzed, conclusions are established and suggestions to new researches are presented.

The results revealed the influence of ratio of pass section dimension to maximum particle dimension, moisture, presence of argillaceous materials and of the material column on gravity flow.

**Key words:** bulk material, physical model, underground mining, ore pass, gravity flow.

## 1 – INTRODUÇÃO

Material granular é um conjunto de partículas sólidas distintas, que interagem apenas nos pontos de contato. As partículas podem variar de tamanho, forma e orientação. Pelo motivo de seu comportamento mecânico bastante complexo, que não se enquadra perfeitamente em nenhum dos outros comportamentos (sólidos, fluidos ou gases), para alguns autores, trata-se de um outro estado da matéria. O material granular pode se comportar às vezes como um sólido (deformando-se quando submetido a cargas compressivas), como um líquido (pode fluir ou verter), como um gás (apresenta características de compressibilidade e é formado por partículas sem vínculo) e ainda de uma maneira peculiarmente sua. O termo grosseiro é usado para o material fragmentado que inclui partículas de tamanho superior a 8" (20 cm).

Em diversas situações o material granular ou particulado é produzido por algum processo de fragmentação e a denominação material fragmentado é preferida. Esse conjunto de partículas pode estar em movimento devido à ação da força da gravidade; quando isso ocorre, temos um fluxo de material fragmentado.

No fluxo de materiais granulares na indústria geralmente necessita-se da estocagem, mesmo nas operações contínuas. A estocagem de material fragmentado é utilizada basicamente para assegurar maior capacidade de regularização de fluxo entre duas operações ou para permitir a homogeneização do conjunto de partículas ou fragmentos.

Na mineração é comum o fluxo por gravidade nas passagens de material (minério, estéril ou de material de enchimento), nos silos (subterrâneos ou nas usinas de tratamento de minérios); nos britadores, nos alimentadores de equipamentos e nos chutes de descarga. O fluxo por gravidade de material fragmentado é um processo de transporte importante em diversas aplicações industriais. O transporte de minério, de estéril e de rejeitos representa um custo dos mais elevados na operação de uma mina.

As questões relativas ao fluxo de material no processo de abatimento na lavra subterrânea não estão no escopo deste trabalho.

Os fatores que afetam a vazão de descarga de material fragmentado são muitos. Entre esses fatores, destaca-se a geometria do reservatório.

A taxa de descarga de materiais granulares recebeu atenção durante todo o século XX, mas, como pode ser observado, até a década de 60, a preocupação era maior com os aspectos da construção dos reservatórios. Os princípios do fluxo por gravidade de materiais fragmentados foram formulados na década de 70, por JENIKE (1961), JOHANSON e COLIJN (1964), no que diz respeito aos silos; e por KVAPIL (1965), JANELID e KVAPIL (1966), com abordagens mais voltadas para o fluxo por gravidade em escavações subterrâneas.

Vários fatores justificam a necessidade do estudo de fluxo por gravidade de material fragmentado, em particular a questão da segurança dos trabalhos e dos custos resultantes de paradas e de operações de desbloqueios do material retido em silos ou em escavações. Esta questão assume um papel essencial, devido ao grande número de escavações na mineração subterrânea em que se utiliza o recurso do transporte por gravidade e aos índices de acidentes verificados.

As pesquisas mais recentes nesse campo têm procurado o desenvolvimento de modelos de comportamento mais precisos. O desenvolvimento na caracterização e melhoria do fluxo de materiais é baseado no entendimento do fluxo de materiais, bem como em anos de experiência nesse campo. A partir de relações empíricas e outros resultados, podem ser estabelecidas diretrizes de projeto.

A construção de modelos em escala reduzida e a observação do comportamento dos mesmos podem auxiliar na determinação do problema de fluxo e podem dar uma indicação da efetividade de uma modificação do desempenho. Os modelos físicos têm um campo de utilização bem definido ao longo dos últimos cinquenta anos, em várias áreas e em todo o mundo. Os ensaios em modelos físicos representam vários aspectos do comportamento mecânico do objeto de estudo, sendo uma ferramenta útil para se definir parâmetros importantes para o projeto da geometria dos sistemas de passagens de minério e de estocagem em silos, evitando-se ou minimizando-se as modificações de estruturas.

Dado o crescimento previsível da mineração subterrânea nas próximas décadas (ZABLOCKI, 1997; HARTMAN, 1987), com a progressiva exaustão das reservas mais acessíveis e as restrições ambientais, conhecendo a incidência de problemas diversos relacionados com o fluxo de material fragmentado (paradas, acidentes, comprometimentos da produção, aumento dos custos), considera-se que essa questão assume um papel essencial. Na mineração subterrânea, a formação de arco estável, com interrupção do fluxo, parada de produção e exposição a riscos, é problemática.

A principal contribuição da presente tese é o estudo do fluxo por gravidade de material fragmentado através de escavações que compõem a infra-estrutura de uma mina subterrânea, com o uso de modelo físico em escala reduzida. Além do levantamento da prática corrente nas minas subterrâneas e a produção de textos que relatem essa prática e enfatizem os princípios do fluxo de material fragmentado.

Pelo exposto, considera-se essencial o estabelecimento de centro de estudos nessa área. Este trabalho foi o primeiro passo lógico nesse sentido.

Este trabalho foi subdividido em oito fases, sendo concluído com a análise e interpretação dos dados obtidos, elaboração da tese e sua apresentação, em um total de 48 meses.

## 2 – OBJETIVOS

O principal objetivo proposto neste trabalho foi o estudo do fluxo de material fragmentado por gravidade, através de escavações que compõem a infra-estrutura de uma mina subterrânea. As escavações que compõem a infra-estrutura de uma mina subterrânea, cujo fluxo foi estudado, foram as passagens de minério. O desenvolvimento de modelos físicos em escala reduzida constituiu parte importante deste trabalho.

À medida do desenvolvimento do trabalho, outros objetivos subsidiários foram consolidados, como o levantamento do estado atual da prática corrente no fluxo de material fragmentado por gravidade em minas brasileiras e a obtenção de um arcabouço básico de textos, experiência e informações úteis para a atividade de mineração subterrânea que relatem essa prática e os princípios do fluxo por gravidade de material fragmentado.

Esta pesquisa incluiu:

- a realização de amplo trabalho de pesquisa bibliográfica (em livros-texto, artigos publicados em periódicos nacionais e internacionais, anais de eventos, relatórios de projetos de pesquisa, relatórios de empresas, *sites* da Internet, trabalhos finais de graduação, relatos de profissionais, entre outros);
- a verificação das regras que regem o fluxo de material fragmentado, através de ensaios preliminares em modelos em escala reduzida, artesanais ou industriais;
- a realização de trabalhos de pesquisa de campo com visitas técnicas a mineradoras do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais e a preparação de textos que relatem a prática e a terminologia correntes no fluxo de material fragmentado;
- a determinação de propriedades de fluxo de materiais fragmentados para a caracterização física dos materiais utilizados em ensaios;
- a realização de pesquisa em laboratório, utilizando modelos físicos em escala reduzida para estudo do fluxo de material fragmentado em silos e em passagem de minério, escavação utilizada em diversos métodos de lavra,

notadamente nos métodos de lavra por alargamento em subníveis (*sublevel stoping*) e por abatimento em subníveis (*sublevel caving*).

A contribuição visada nesta pesquisa foi propiciar elementos para a melhoria do projeto de fluxo de material fragmentado por gravidade e para a maior segurança dos trabalhos no manuseio de materiais, em reservatórios do tipo silos, incluindo-se aí tremonhas e alimentadores ou nos diversos elementos do sistema de passagens de minério: pontos de carregamento, gavetas de carregamento, grelhas, passagens propriamente ditas, chutes de descarga e portões de controle. Com a realização deste trabalho e apresentados os pontos de dificuldades, as necessidades reais de novos estudos poderão ser determinadas com mais facilidade e pertinência.

## 3 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 3. 1. Introdução

A atividade de estocagem, como todas as atividades de movimentação ou manuseio de materiais granulares (*materials handling*), situa-se numa área interdisciplinar, não sendo totalmente coberta por nenhuma especialidade do conhecimento.

Essa área avançou muito nos anos 60 em relação aos silos de materiais fragmentados. Antes dessa época, segundo PERRY e GREEN (1984), o projeto de silo era realizado por tentativa e erro e o sucesso era assegurado apenas se o material fosse de fluxo livre. Isso mudou radicalmente com o trabalho de JENIKE (1961 e 1964). Esse trabalho resultou na identificação de critérios que afetam o fluxo de material em reservatórios de estocagem, no estabelecimento das equações que definem o fluxo granular e dos coeficientes que afetam o fluxo, definindo os fatores de fluxo para diversos projetos de silo-tremonha, bem como as especificações para se determinar experimentalmente as propriedades de materiais fragmentados que afetam o fluxo e a estocagem.

O manuseio de materiais fragmentados na mineração envolve as operações de carregamento, estocagem e transporte. A mecanização extensiva das operações mineiras subterrâneas, a melhoria das técnicas de desmonte por explosivo e o conhecimento a respeito do fluxo de material fragmentado tornaram possível otimizar o manuseio de materiais fragmentados e a própria fragmentação de rocha (JUST, 1980).

Inicialmente é apresentada nesta revisão a terminologia básica a respeito do fluxo de material granular e fragmentado, envolvendo as formas de estocagem, os reservatórios e dispositivos de transferência de materiais, entre outros. Nesse contexto estão os silos, as tremonhas, as pilhas, as escavações, os chutes e os alimentadores.

A seguir apresentam-se os tipos de materiais fragmentados, o fluxo em tremonhas, em silos e em tubos inclinados, as propriedades de fluxo de material fragmentado, o projeto de fluxo em silos, os padrões de fluxo, os problemas de fluxo; os métodos de lavra subterrânea que utilizam o fluxo por gravidade em passagens de minério e/ou em

chutes, as questões de segurança em escavações com fluxo por gravidade, o padrão de fluxo em escavações subterrâneas.

Discutem-se o comportamento mecânico do material granular, as regras básicas do fluxo por gravidade, os problemas de fluxo por gravidade em passagens, o projeto de fluxo por gravidade em passagens e chutes, os fatores de projeto, os parâmetros das passagens (seção, direção, inclinação, comprimento), ramificações, curvas e joelhos, os dispositivos de transferência de material fragmentado, a pressão em portões de descarga, o projeto de pontos de carregamento de material.

São mostradas abordagens do estudo de fluxo de material fragmentado em mineração (modelos físicos, modelos numéricos, expressões analíticas, equações e regras empíricas, ensaios em plena escala, regras práticas) e a prática corrente na mineração subterrânea no fluxo de material fragmentado por gravidade.

### **3.1.1. Terminologia e Definições Preliminares**

No contexto deste trabalho, material granular é um conjunto de partículas sólidas distintas, que interagem apenas nos pontos de contato, imersas em fluido intersticial. Nesse conjunto, as características das partículas podem variar com relação ao tamanho, à forma e à orientação. As partículas podem estar em contato instantâneo ou prolongado umas com as outras. A faixa granulométrica varia em geral de micrométrica a decimétrica e a forma pode ser mais arredondada, alongada ou em placas. Na mineração prefere-se a denominação material fragmentado.

Podemos classificar as formas principais de estocagem de material granular em pilhas e silos.

Pilhas (*stockpiles*) são sistemas não confinados de deposição de materiais fragmentados, com formas cônicas, alongadas ou radiais, com lados inclinados, cuja inclinação é fornecida por uma propriedade do material fragmentado denominada ângulo de repouso, definida no item 3.3 deste trabalho. São usadas para maiores capacidades e para material mais grosso, com o objetivo de regularização do material (efeito “pulmão”) e/ou de homogeneização.

Silos são reservatórios cilíndricos ou de seção retangular, usados para estocagem de menores quantidades relativamente às pilhas e para material mais fino. Os silos podem ser classificados entre agrícolas e industriais e de acordo com a construção. Podem ser de construção metálica ou com concreto ou ainda escavados em rocha (comuns na mineração subterrânea). Materiais muito valiosos ou muito solúveis para serem estocados em pilhas são estocados em silos. Os silos são indicados apenas para minérios que não sofram segregação, sejam de fluxo livre e quimicamente estáveis.

As escavações subterrâneas eventualmente servem à estocagem de materiais (minério e estéril). Nesse caso, para efeito de estudo, são similares aos silos. Como o sistema em estudo é a mineração subterrânea, a seguir inicia-se o detalhamento destas definições pelas escavações da lavra subterrânea em que acontece o fluxo por gravidade de material fragmentado.

### **Escavações subterrâneas**

São diversas as escavações realizadas numa mina subterrânea: poços, túneis, rampas, galerias, subidas, passagens. O fluxo de material fragmentado por gravidade ocorre nas passagens ou caídas (*passes*) e nos silos escavados em rocha. As passagens são escavações inclinadas ou verticais denominadas, em função do material transferido, passagens de minério (*ore passes*), passagens de estéril (*waste passes*) ou passagens de material de enchimento (*fill passes*).

As passagens são comuns a diversos métodos de lavra e podem ser escavadas na rocha ou podem ser construídas em lances, à medida do avanço da lavra, com introdução de tubos ou quadros. Têm seções quadradas, retangulares ou circulares. A dimensão característica é da ordem de 1 a 3m nos casos brasileiros; no exterior são comuns seções de 1,5 a 9m. O espaçamento varia de 5 a 15m, dependendo do método de lavra aplicado. O comprimento varia de 18 a 180m (BEUS *et alii*, 2001).

As passagens constituem a forma primária de transferência vertical de minério lavrado para silos e gavetas de carregamento, de onde o minério é transportado até alcançar a superfície. Esses sistemas podem ser usados para qualquer rocha fragmentada.

Os elementos de um sistema de passagem de minério estão nos níveis da mina, nas estruturas na porção superior da passagem (ponto de carregamento, gaveta, grelha, britador ou rompedor), na passagem propriamente dita e nas estruturas na base da passagem (chute de descarga e suporte). Nem sempre uma mina em particular apresentará todos os elementos (STACEY e SWART, 1997); algumas vezes eles até se confundem. Na figura 3.1 são apresentados alguns desses elementos e outros termos correlatos. No item 3.4 deste trabalho são mostrados exemplos de sistemas de passagens de minérios em minas subterrâneas brasileiras e estrangeiras.

O ponto de carregamento (*draw point*) é o local onde o minério é escoado ou extraído. Do ponto de carregamento, o minério é transportado para a gaveta (*box hole, chamber* ou *tip*), que é o local de onde o material é lançado na passagem de minério.

As passagens são também usadas para estocagem temporária de minério (BEUS *et alii*, 1997; BLIGHT e HAAK, 1994). São usualmente deixadas preenchidas, pelo menos parcialmente; nesse caso, sua extremidade inferior é fechada por um portão radial que pode ser aberto para se retirar o minério e então fechado novamente. Esse dispositivo é normalmente denominado chute.

Observa-se que alguns autores, como KVAPIL (1965 b), denominam de chute a passagem que apresenta dispositivo de controle do fluxo, enquanto outros autores reservam a denominação de chute especificamente para o dispositivo de controle de descarga, sendo às vezes denominado ainda bica de descarga.

O portão de controle ou comporta de descarga (*gate*) é um dispositivo (uma porta, uma válvula ou outro) usado para controlar o fluxo do material de passagens, silos ou tremonhas para um britador ou dispositivos de transporte (esquipes, carregadeiras, caminhões, vagões, correias transportadoras). É usado para fechar a passagem e deve ser projetado para suportar a pressão estática exercida pela coluna de minério na passagem e também às pressões dinâmicas da queda de minério e impacto sobre o mesmo. Os portões diferem no projeto, dependendo do material, da dimensão da tremonha e das condições de descarga. Os chutes estão presentes também na britagem, construídos geralmente de material metálico.

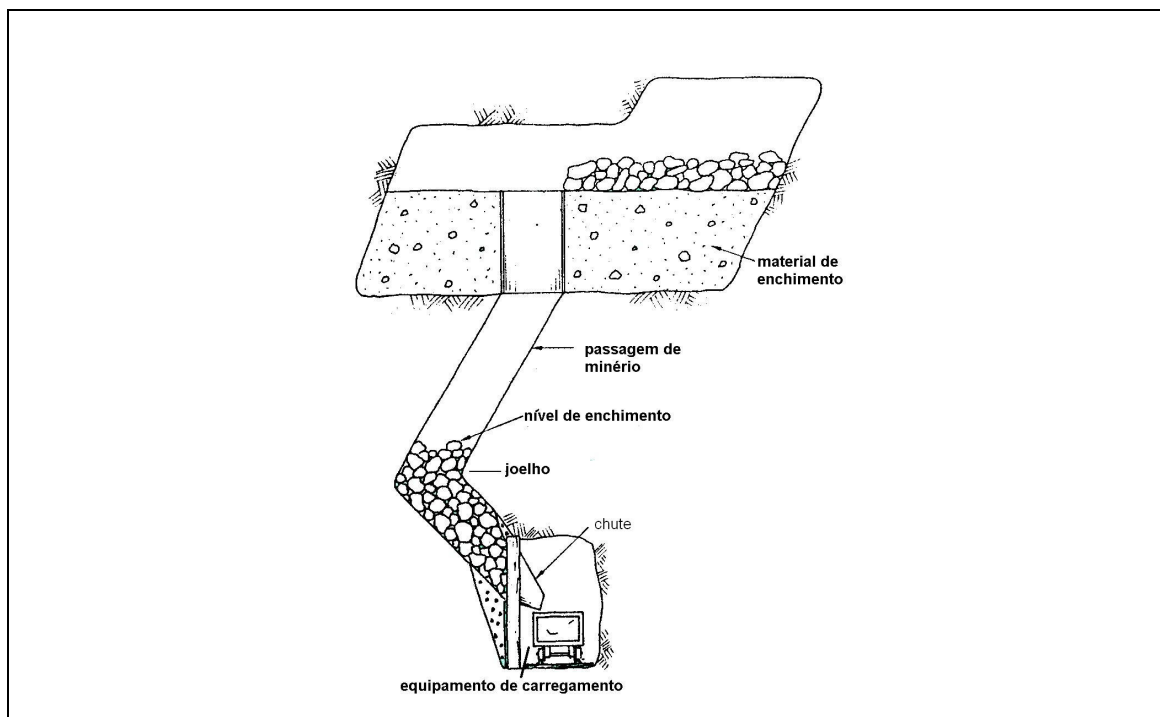


Figura 3.1 – Elementos de sistemas de passagens de minério (STACEY e SWART, 1997).

### Silos e tremonhas

Um silo é composto de duas partes: uma seção de convergência na base, cônica ou em cunha, conhecida como tremonha, moega ou funil de descarga (*hopper*) e uma seção vertical, acima da tremonha, chamada de silo (*bin*), que geralmente contém a maior parte do volume estocado.

THOMSON (1997) e MCCABE e SMITH (1956) adotam as seguintes diferenciações. *Bin* é um silo onde a altura ( $H$ ) é maior que uma vez e meia a dimensão característica da seção do silo - o diâmetro da seção circular ou a menor dimensão da seção retangular ( $D_b$ ). *Bunker* é um silo onde a altura é menor que uma vez e meia a dimensão característica da seção. *Hopper* é um reservatório que apresenta seção inclinada convergente adaptada ao fundo de um silo. Se a seção convergente se comporta como um silo independente, é denominada *bunker*. KELLY e SPOTTISWOOD (1982), GALPERIN *et al* (1982) complementam que um *hopper* é usado para estocagem provisória, antes de se alimentar o material à etapa seguinte do processo. Na figura 3.2 mostra-se seção vertical típica de um conjunto silo-tremonha e

as dimensões a serem destacadas ( $D_b$  é o dimensão característica do silo,  $H$  é altura,  $e$  é a dimensão característica da abertura de descarga,  $\theta$  é a inclinação da porção inferior em relação à horizontal; nessa ilustração igual a  $60^\circ$ ).

Os silos e tremonhas servem para a finalidade dupla de estocagem e descarga do material a uma taxa controlada. Essas unidades variam muito em dimensão, desde as tremonhas de máquinas como as de pelotização, que comportam poucos quilogramas, aos silos para materiais como minério de ferro, cimento, carvão etc, que têm capacidade para milhares de toneladas. As dimensões dos silos variam ainda em relação à operação, sendo maiores no caso de silos colocados antes de moagem ou britagem. Na estocagem a seco de reagente ou concentrado são bem menores. Todos esses recipientes ou reservatórios são carregados pelo topo, apresentando elevador e a descarga é ordinariamente pelo fundo.

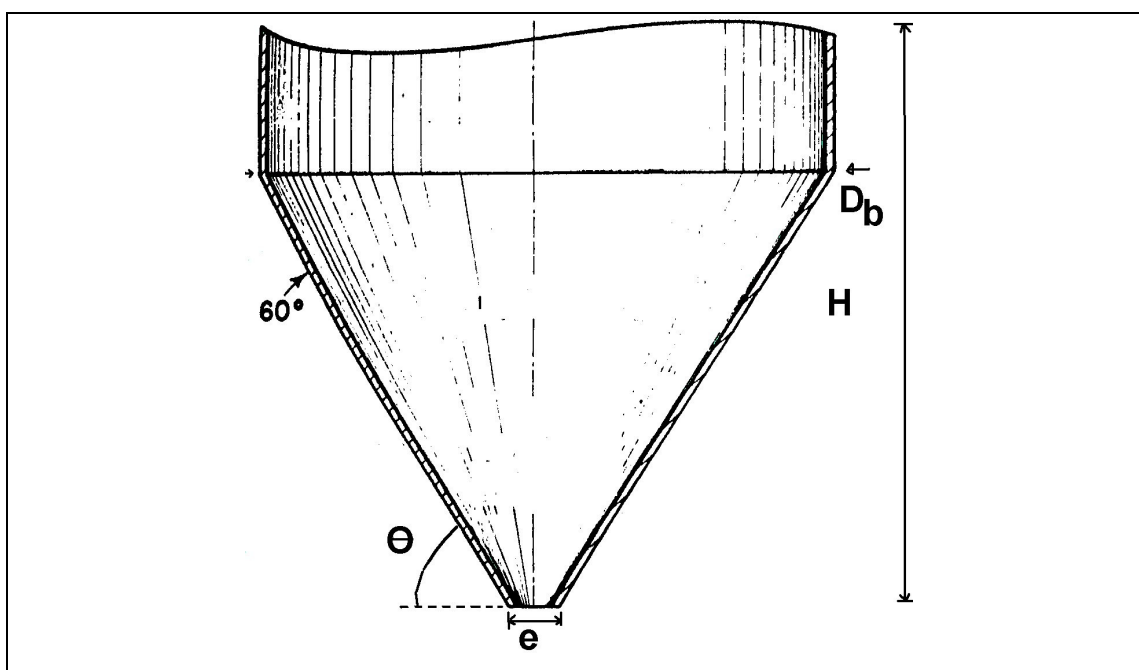


Figura 3.2 – Seção vertical típica de um conjunto silo-tremonha (JOHANSON e COLIJN, 1964).

### Pilhas

As pilhas são formadas sobre uma camada de concreto ou de terra, sendo ocasionalmente cobertas por um teto. Vários são os métodos de formação. São

usadas para propiciar: estocagem de material fragmentado; capacidade de regularização de fluxo (“pulmão”) entre duas operações; homogeneização; blendagem. A blendagem é a mistura de materiais de várias procedências para se atingir uma determinada composição definida. A estocagem para regularização (“pulmão”) visa evitar o fenômeno prejudicial da variação cíclica na alimentação ou na produção em um dado processo industrial; esse fenômeno é conhecido como *surging*.

Um dos principais problemas na estocagem é a segregação. Durante a transferência a partir de um transportador de correia, especialmente no derramamento sobre uma pilha, as partículas de maior dimensão tendem a rolar sobre a superfície de deposição. Isso não acontece com as partículas finas, que só se movem por escorregamento. Construindo-se uma pilha sem precauções, ao final, os fragmentos mais grossos estarão concentrados junto à base e as partículas mais finas no centro. A segregação é um fenômeno que produz alteração no grau de homogeneidade do material granular em relação a alguma propriedade, se manifesta devido à existência de variações nas propriedades do sólido granular, aparece principalmente quando esse se encontra em estado seco e em movimento. A segregação que interessa ao fluxo de material em escavações de lavra é a segregação de tamanho.

A distinção entre partículas finas e grosseiras é algo arbitrária. JENIKE (1964) sugere que as partículas menores que 0,01” (0,25mm) sejam consideradas como finas. KVAPIL (1965 a) considera como partículas grosseiras as maiores que 20cm, destacando ainda os *lumps*, fragmentos maiores que 40cm. GOMIDE (1983) apresenta cinco tipos de materiais granulares: pós, com partículas de 1µm até 0,5mm; materiais granulares, partículas de 0,5 a 10mm; blocos pequenos, de 1 a 5cm; blocos médios, 5 a 15cm; blocos grandes, maiores que 15cm. Para BEUS *et alii* (2001), finos são partículas de tamanho inferior a 0,072mm (malha 200 Tyler). VALADARES e LUZ (2004) consideram finos partículas abaixo de 0,053mm.

Outros dispositivos que compõem sistemas de fluxo de material são o alimentador (*feeder*), dispositivo de controle da taxa de descarga de material fragmentado de um reservatório (silo ou outro); a grelha (*grizzly*), dispositivo de graduação, constituído geralmente de barras metálicas paralelas, cujas aberturas se destinam ao controle da dimensão do material fragmentado que se destinará ao silo ou à escavação. O

rompedor (*breaker*) é um martelo usado para desmontar blocos de material maiores que a abertura da grelha (NBR 10182/1988).

### **3.2. Materiais fragmentados**

De acordo com BEUS *et alii* (2001), o material transportado pela passagem é um material de engenharia com propriedades físicas a serem consideradas no projeto para a ocorrência do fluxo e para a estabilidade da passagem.

#### **3.2.1. Tamanho de partícula**

De todos os parâmetros dos sólidos, o mais importante do ponto de vista de vários processos industriais é o tamanho de partícula. Partículas comportam-se distintamente em diferentes faixas de tamanho, sendo também regidas por diferentes leis físicas.

Partículas sólidas individuais são caracterizadas pelo seu tamanho, sua forma e sua massa específica. O tamanho e a forma são facilmente especificados para partículas regulares, mas para partículas irregulares os termos tamanho e forma não são muito claros e podem ser definidos arbitrariamente. Neste item trata-se do tamanho de partícula. No item 3.3 trata-se da forma de partícula, juntamente com outras propriedades de fluxo dos materiais fragmentados.

O tamanho de partícula é um dos fatores que mais influenciam o fluxo de um dado material. O custo de uma operação de manuseio tende a diminuir com a redução do tamanho médio dos fragmentos. Nesse caso, o estabelecimento das operações requer a obtenção de dados reais de campo das operações e requerem procedimentos especiais para essa obtenção (Just, 1980).

Definir o tamanho de uma partícula é uma tarefa complexa. Frequentemente são definidas apenas aquelas partículas pertencentes a uma faixa de tamanho que pode ser medida ou calculada. O tamanho de uma partícula isolada pode ser definido pela sua dimensão linear de maior importância (diâmetro, comprimento da aresta). As partículas que não são equidimensionais são muitas vezes caracterizadas pela sua segunda maior dimensão. Outra forma de indicar o tamanho de partícula é em termos do “diâmetro equivalente”, que é o diâmetro de uma esfera que tenha a mesma razão

entre superfície e volume que a da partícula em questão. O tamanho da partícula pode ser obtido diretamente ou com auxílio de microscópio, de peneiramento ou de outra técnica.

Para o fluxo de material granular interessa a distribuição granulométrica. No estudo de fluxo de material fragmentado, é preciso estudar a distribuição granulométrica dos fragmentos ou blocos (granulometria grosseira) e/ou partículas (granulometria fina). Distribuição granulométrica é a descrição estatística das proporções mássicas em que os constituintes de um material granular se distribuem nas diversas faixas de tamanho, chamadas classes granulométricas. Curva de distribuição granulométrica é a representação gráfica dessa distribuição.

Na mineração, trabalha-se com material grosseiro na lavra e no transporte. O material grosseiro é uma mistura de faixas granulométricas diferentes (variando de finos a blocos tamanho *lump*). JUNG *et alii* (2002) consideram dados obtidos em uma mina da região de Idaho (EUA), mostrados na tabela III.1. Os finos representam problema quando presentes em quantidade superior 20% em peso, principalmente quando a passagem de minério apresenta alteração da direção e da forma (por deslocamento).

Tabela III.1 - Distribuição de tamanho de fragmentos em passagem de minério de mina nos EUA (JUNG *et alii*, 2002).

Faixa de tamanho de partícula (mm)	Porcentagem em peso
Menor que 0,075	10
0,075 – 0,5	13,8
0,5 – 2	10,7
2 – 4,75	13,0
4,75 – 19,28	27,0
19,28 – 75	21,5
Maior que 75	4,0

Em geral, pode-se assumir que quanto maior for o tamanho de partícula e mais livre de finos estiver o material, mais fácil será o fluxo. Devido ao fato de as partículas finas possuírem grande superfície específica, as forças de superfície dominam o seu comportamento, como as forças eletrostáticas. Ao contrário, o comportamento das

partículas grosseiras é dominado pela gravidade e pelo atrito (KVAPIL, 1965 b; BEUS *et alii*, 2001).

### 3.2.2. Tipos de materiais fragmentados

KVAPIL (1965 a) divide os materiais estocados em quatro grupos principais, de acordo com suas propriedades de mobilidade e de acordo com as dificuldades de operação devidas às interações entre as partículas. Quanto à mobilidade, o autor considera que as partículas individuais de materiais soltos podem executar dois movimentos. O movimento primário acontece na direção da gravidade; os eixos imaginários das partículas se mantêm na mesma posição relativa. No movimento secundário, as partículas podem tombar ou girar, ao mesmo tempo em que seus eixos imaginários mudam de posição relativa. Na figura 3.3 são apresentados esses tipos de movimentos das partículas e na figura 3.4 a variação do movimento primário (p) e do secundário (s) para quatro tipos de materiais.

É impossível definir precisamente os limites entre os materiais dos grupos; pode-se especificar que as possibilidades de movimento primário aumentam e o inverso acontece com o movimento secundário na ordem relatada a seguir neste trabalho (A a D).

Quanto à interação entre as partículas, KVAPIL (1965 a) considera como materiais de fluxo livre (tipo A na figura 3.4), aqueles em que as partículas influenciam umas às outras apenas pelo atrito de suas superfícies; as partículas podem executar o movimento secundário sem qualquer dificuldade. Os materiais parcialmente livres (tipo B) são caracterizados pelo fato de as partículas estarem parcialmente ligadas; o movimento secundário é mais difícil de ser executado. Os materiais classificados como grosseiros (C) contêm uma porcentagem considerável de partículas finas e pó. O movimento secundário de material grosseiro é ainda mais restrito. Nos materiais não livres (D), as partículas individuais de alguma forma estão ligadas e o movimento secundário é impossível ou restrito a um mínimo.

Os materiais grosseiros são os mais comuns no fluxo por gravidade em escavações da mineração subterrânea. A figura 3.5 mostra quatro subtipos diferentes de material grosseiro: 1 – partículas grandes, de tamanho e forma aproximados; 2 – partículas de

formas diferentes, de mesmo tamanho; 3 – mistura de fragmentos grandes, fragmentos alongados e areia; 4 – mistura de fragmentos maiores, alongados, areia e partículas terrosas-argilosas. Nessa ordem, a mobilidade do material diminui.

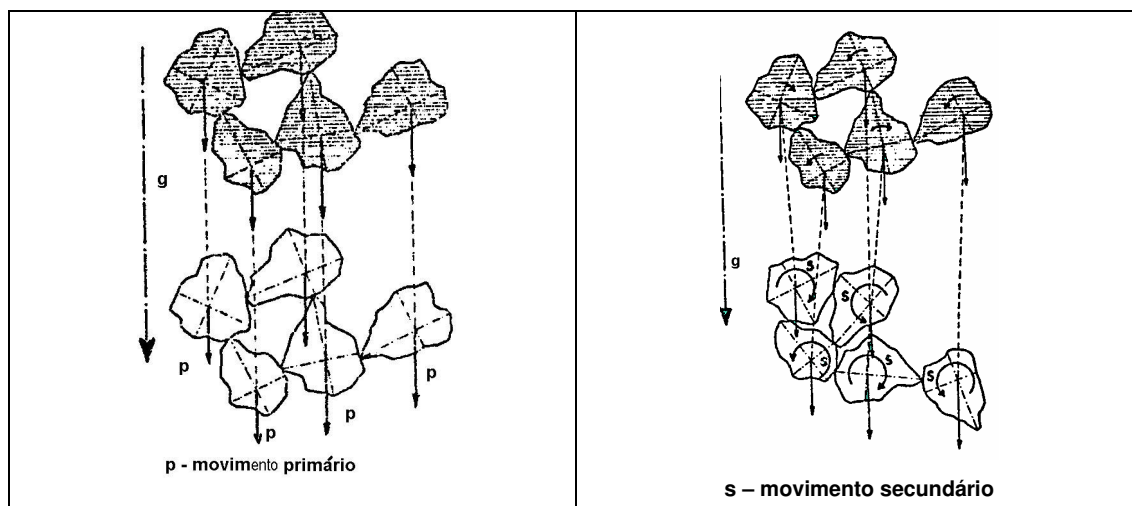


Figura 3.3 – Movimentos do material fragmentado (KVAPIL, 1965 a).

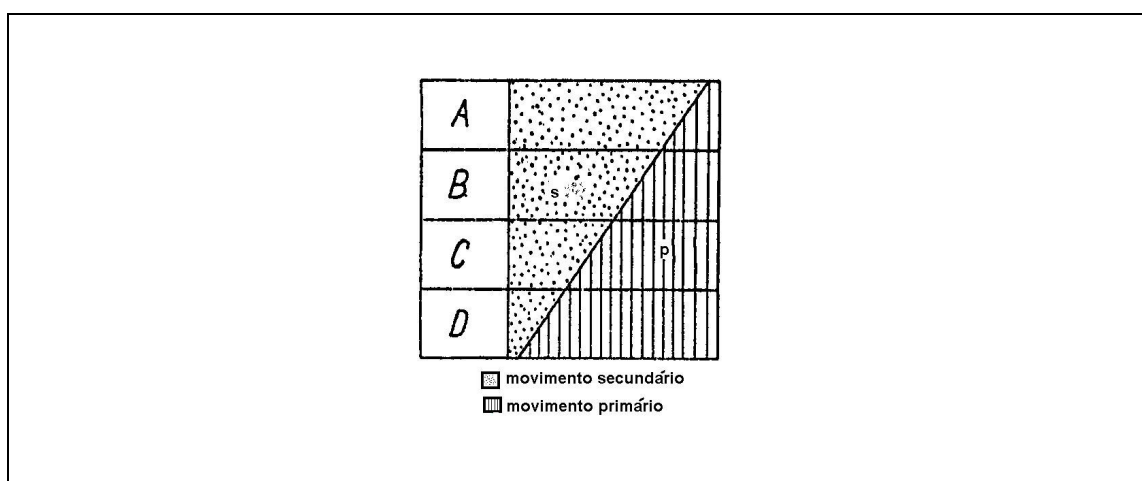


Figura 3.4 - Grupos principais de materiais estocados, em função de sua mobilidade (KVAPIL, 1965 a).

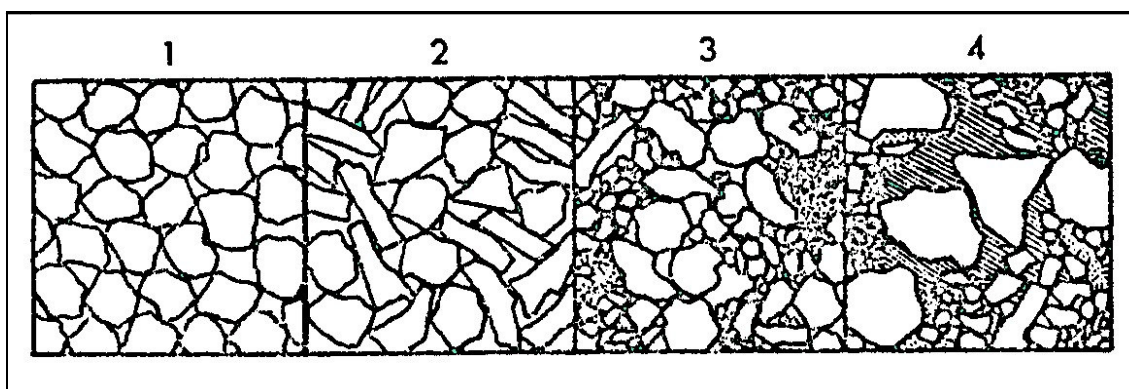


Figura 3.5 - Subtipos de material grosseiro (KVAPIL, 1965 b).

### 3.3. Fluxo em tremonhas e silos

#### 3.3.1. Introdução

Em diversas situações, o material granular é produzido por algum processo de fragmentação e a denominação material fragmentado é utilizada. Esse conjunto de partículas, com granulometria e formas variadas, pode estar em movimento devido à ação da força da gravidade; quando isso ocorre, temos um fluxo de material. Na indústria o material fragmentado é estocado ou transportado. Vários sistemas de transporte são utilizados: transporte com fluxo por gravidade, em correias transportadoras e outros meios de transporte. O fluxo por gravidade de material fragmentado é processo de transporte importante em diversas aplicações industriais.

Da mesma forma que o fluxo por gravidade, a estocagem é muito utilizada na indústria. Basicamente a estocagem de material fragmentado é usada para assegurar maior capacidade de regularização de fluxo entre duas operações ou para permitir a homogeneização do conjunto de partículas ou da massa de material fragmentado. São também comuns na mineração: silos para estocagem de materiais fragmentados; alimentadores de equipamentos; britadores; chutes de descarga; grelhas e rompedores para controle da faixa granulométrica; a formação de *pilhas-pulmão* para estocagem, com o objetivo de regularização e/ou homogeneização.

A teoria de fluxo prevê as dimensões mínimas da descarga para um fluxo livre de material fragmentado, as condições sob as quais ocorrerá a formação de canal

preferencial de fluxo (*ratholing*), o padrão de fluxo que se formará quando um dado material escoar em um dado silo e as pressões exercidas contra as paredes do canal de fluxo durante fluxo uniforme.

### **Propriedades de fluxo e manuseio de material fragmentado**

O conhecimento das propriedades de fluxo de materiais fragmentados é fundamental para o estudo de muitas operações, entre elas a estocagem. De um modo geral, as propriedades são de duas categorias: as que só dependem da natureza das partículas (como forma e massa específica) e as que se associam a todo o sistema (como massa específica aparente, permeabilidade e ângulo de repouso). Em alguns casos, essas propriedades podem ser estimadas; em outros, é necessário medi-las. A seguir apresentam-se algumas dessas propriedades.

KOLATAC (1996) denomina as condições existentes no reservatório de condições externas. Essas condições incluem as pressões de consolidação, a umidade, o tempo de estocagem, a temperatura e a coluna de material no silo (CARSON, 1983). Entende-se por consolidação o processo no qual as partículas se aproximam e conseqüentemente ocorre diminuição do volume de vazios. O material ganha resistência suficiente para se auto-suportar. O processo de consolidação depende do tamanho das partículas e ocorre principalmente quando a granulometria é fina; depende do teor de umidade presente e do tempo de estocagem sem agitação. O tempo entre descargas do material da passagem de minério permite consolidação adicional, mudança do conteúdo de umidade e aumento da coesão. O impacto de nova queda de material (a partir do ponto de carregamento) sobre o material remanescente na passagem de minério pode compactá-lo e aumentar a possibilidade de bloqueios para formar arco coesivo antes da próxima descarga. A freqüência de descargas é necessariamente dependente das condições e da experiência locais.

### **Ângulo de atrito e ângulo de repouso**

O ângulo de repouso natural ou estático de um material granular ( $\alpha_m$ ) é o ângulo segundo o qual o material, partindo do repouso, escoará. O ângulo de repouso depende da natureza do material, de sua forma geométrica e da faixa granulométrica, mas também sofre influência marcante da umidade, da pressão de compactação, da

presença de partículas argilosas, da temperatura, do tempo de estocagem e do modo de formação da pilha. Há um ângulo de repouso estático e outro dinâmico. O ângulo de repouso dinâmico é o ângulo formado pela superfície da pilha de material com a horizontal. Na tabela III.2 são mostrados alguns valores de ângulo de repouso. Esse ângulo pode ser considerado o ângulo de atrito para materiais não coesivos e é também chamado ângulo de escoamento, como observam KAIZER *et alii* (2004).

Ângulo de atrito interno é o ângulo formado com o eixo das tensões normais pela tangente à curva envoltória de Mohr, representativa das resistências ao cisalhamento da rocha, sob diferentes tensões normais (ABGE, 1976). Na tabela III.3 são mostrados alguns valores de ângulo de atrito interno. Conforme AYRES DA SILVA e HENNIES (1988), o ângulo de atrito interno é função do grau de rugosidade e angulosidade dos elementos que constituem o material. Se esses elementos são livres e separados, mas angulosos, o seu valor será de 37 a 42°. Se os fragmentos estão envolvidos por partículas de argila úmida, o ângulo não será maior que 30°. Mas se estão separados por camadas de argila, o ângulo de atrito interno não alcançará 25°.

O coeficiente de atrito pode ser obtido experimentalmente, medindo-se a tangente do menor ângulo que um plano inclinado deve fazer com a horizontal para provocar o fluxo do material. O fluxo pode acontecer com o material deslizando sobre ele mesmo (atrito interno) ou sobre uma outra superfície. Nesse último caso o ângulo é chamado de ângulo de atrito com a parede. Na tabela III.4 são mostradas faixas de valores de ângulo de atrito de materiais com a parede de reservatórios.

### **Coesão**

A presença de coesão em materiais fragmentados aumenta sua resistência ao cisalhamento. Essa coesão se deve principalmente à fração fina. Enquanto as partículas grosseiras (maiores que 20cm) resistem ao movimento por causa do atrito entre partículas, as partículas finas exibem uma resistência adicional. Uma proporção de 5 a 7% de material fino pode modificar significativamente as propriedades do material grosseiro. A coesão é uma propriedade importante para o comportamento do material descarregado em chutes.

O conteúdo de umidade também influencia na habilidade das partículas de se conectarem. No ensaio das propriedades de atrito e de coesão é recomendável aplicar-se uma faixa de teores de umidade a ser esperada em cada caso particular, pois a umidade aumenta a coesão até um dado valor. Uma quantidade suficientemente grande de água impedirá a formação de arcos coesivos em reservatórios.

### **Forma de partícula**

A forma de uma partícula individual é convenientemente expressa em termos do fator de forma, independente do tamanho de partícula. O fator de forma ou coeficiente de angularidade de partícula ( $\lambda$ ) é definido como a razão entre a superfície real e a área superficial de esferas de mesmo tamanho. As superfícies são consideradas por unidade de volume da amostra (PAITHANKAR e MISRA, 1976).

O fator de forma está relacionado à maior dimensão da partícula; para a maioria dos materiais fragmentados, seu valor está entre 1,5 e 1,7 (MCCABE e SMITH, 1956). A diminuição da uniformidade das partículas, com a introdução de partículas mais angulosas, aumenta a resistência ao fluxo e reduz as taxas de fluxo em até 28%, segundo CLEARY e SAWLEY (2002). O índice de forma, segundo a NBR 7809/1983, da ABNT, utilizando-se medição com paquímetro, é a média da razão entre o comprimento e a espessura das partículas do material, ponderada pela quantidade de partículas da cada fração granulométrica que o compõe.

Tabela III.2 – Valores de ângulo de repouso dinâmico (GOMIDE, 1983).

Material	Ângulo de repouso (°)
Areia de fundição	24
Areia úmida	27
Bauxita	20
Carvão na mina	18
Cimento	39
Coque moído	28
Limonita	40

Tabela III.3 – Valores de ângulo de atrito interno (FAÇO, 1978).

Material	Ângulo de atrito (°)
Areia	33
Carvão	33
Coque	33
Minério (finos)	33
Minério (pedaços)	38,9
Cascalho	33

Tabela III.4 – Valores de ângulo de atrito com a parede (KVAPIL, 1965 b).

Tipo de material grosseiro	Material da parede	Ângulo de atrito com a parede (°)	Coefficiente de atrito
Dolomita, Calcário, Mármore	Aço	30 - 40	0,58 – 0,84
	Concreto	33- 43	0,65 – 0,93
	Madeira	37	0,75
Granito, Grauvaca, Magnesita	Aço	31 - 42	0,60 – 0,90
	Concreto	35 - 42	0,70 – 0,90
Minério de ferro compacto	Aço	33 - 42	0,67 – 0,90
	Concreto	36 – 43	0,72 – 0,93
	Madeira	40	0,84
Evaporitos	Aço	25 – 41	0,47 – 0,87
	Concreto	30 - 42	0,58 – 0,90
Gipsita	Aço	31 – 38	0,61 – 0,78
	Concreto	32 – 41	0,62 – 0,87
Arenito	Aço	32 – 42	0,62 – 0,90
	Concreto	34 – 42	0,67 – 0,90
Xisto	Aço	28 – 40	0,53 – 0,84
	Concreto	29 – 42	0,55 – 0,90
Carvão	Aço	20 – 40	0,36 – 0,84
Coque	Aço	24 - 37	0,45 – 0,75

### **Massa específica aparente (ou volumétrica)**

A massa específica aparente (ou volumétrica) é a massa específica do conjunto de partículas (ou seja, a massa por unidade de volume do material), podendo variar bastante com fatores como o grau de compactação do conjunto, que, por sua vez, depende da granulometria, da forma e do modo como as partículas são alimentadas.

A massa específica aparente do material dentro de um recipiente diminui sob efeito da gravidade com a diminuição do diâmetro do reservatório (efeito “parede”) e com o aumento da altura da camada de partículas (efeito “almofada”). Uma maior velocidade de enchimento do reservatório proporciona uma menor massa específica aparente para partículas grosseiras; no entanto, finos coesivos com alimentação diluída, pulverizada, permanecem com um pequeno adensamento.

Partículas obtidas pela fragmentação de um sólido, como os minérios, têm massas específicas usualmente diferentes da massa específica do material (GOMIDE, 1983). A porosidade é o parâmetro que quantifica essa diferença. A porosidade aparente é definida como a razão entre a diferença das massas específicas (real e aparente) e a massa específica real. Não obstante sua grande importância, a previsibilidade da porosidade ainda é problemática (VALADARES e LUZ, 2004).

### **3.3.2. Padrões de fluxo**

Os padrões de fluxo são definidos pela maneira como os materiais fluem no silo e pelos limites entre as regiões de fluxo e sem fluxo, considerando-se a velocidade de fluxo e a geometria do reservatório. Três padrões são comuns: o fluxo em funil (*funnel flow*), o fluxo em massa (*mass flow*) e o fluxo misto (*expanded flow*), mostrados na figura 3.6. Cada um tem suas vantagens e desvantagens. É importante que os projetistas e operadores estejam cientes das características de fluxo, as quais podem ter um efeito significativo sobre o desempenho do sistema projetado.

#### **Fluxo em massa**

No fluxo em massa, o material está em movimento praticamente em todo o silo, assim que ele escoar através da saída e desliza pelas paredes da seção vertical e da

tremonha convergente. O canal de fluxo coincide com as paredes do silo e da tremonha, o que é característico de silos em que a altura ( $H$ ) é maior que uma vez e meia o diâmetro ( $D_b$ ). O comportamento do material depende da distância à interface silo-tremonha. Esse padrão de fluxo acontece quando as paredes da tremonha são suficientemente inclinadas e lisas e onde a descarga ocorre em toda a área de saída. Esse requisito se aplica ao fluxo livre e a materiais coesos. Com o silo com fluxo em massa, o primeiro material a entrar é o primeiro a sair. O material na descarga é remisturado e isso elimina os efeitos danosos da segregação.

### **Fluxo em funil**

No fluxo em funil, o material escoar através de um canal vertical que se forma dentro do silo acima da saída. Pode se formar um canal preferencial de fluxo estável quando o material alcançar resistência suficiente para permanecer no local após o canal de fluxo ser esvaziado. O material externo ao canal permanece estacionário. Isso ocorre em silos de proporções entre as dimensões diferentes daquelas necessárias para o fluxo em massa. Esse padrão, segundo THOMSON (1997), ocorre em silos de fundo plano ou pouco inclinado ou muito rugoso para permitir que os materiais deslizem ao longo das paredes durante o fluxo. O canal de fluxo usualmente tem a forma de um tronco de cone invertido, com o diâmetro inferior aproximadamente igual à maior dimensão da área ativa da saída.

Quando se projeta um silo com fluxo em funil, deve-se levar em consideração que esse padrão é propício à acumulação de material estagnado. Nesse caso, a vazão real de descarga é menor que a projetada. Apesar disso, o silo com fluxo em funil é o mais comum na indústria. Como os procedimentos para projetar silos para fluxo em massa e em funil são diferentes, o engenheiro deve decidir, num primeiro estágio, qual padrão ele deseja alcançar no final. Em diversos casos, o fluxo em massa é o preferido porque proporciona uma densidade constante de alimentação para a etapa seguinte do processo, além de volume útil maior (fortalecendo o efeito “pulmão”, isto é: sua capacidade de amortecer oscilações no circuito).

Esse padrão é vantajoso em várias situações. Por outro lado, como o fluxo em massa acontece quando as paredes da tremonha são suficientemente inclinadas, essa

geometria íngreme resulta às vezes em um conflito com fatores como a altura da câmara superior, a capacidade e o custo de capital do silo.

### Fluxo misto

O fluxo misto é resultante da combinação de uma tremonha com fluxo em massa sob um silo com fluxo em funil. A tremonha com fluxo em massa assegura um fluxo controlado, uniforme na saída. O diâmetro superior da tremonha é dimensionado de modo que se minimize a formação de canal estável na porção superior, ou seja, no silo. Esse tipo de fluxo é usado quando se deseja uma descarga uniforme, mas onde as restrições de custo ou espaço excluem um silo com fluxo em massa completo. Esse arranjo pode ser usado para modificar silos com fluxo em funil ou para corrigir problemas de fluxo. Tremonhas múltiplas com fluxo em massa são às vezes montadas sob um silo com fluxo em funil (KELLY e SPOTTISWOOD, 1982; THOMSON, 1997).

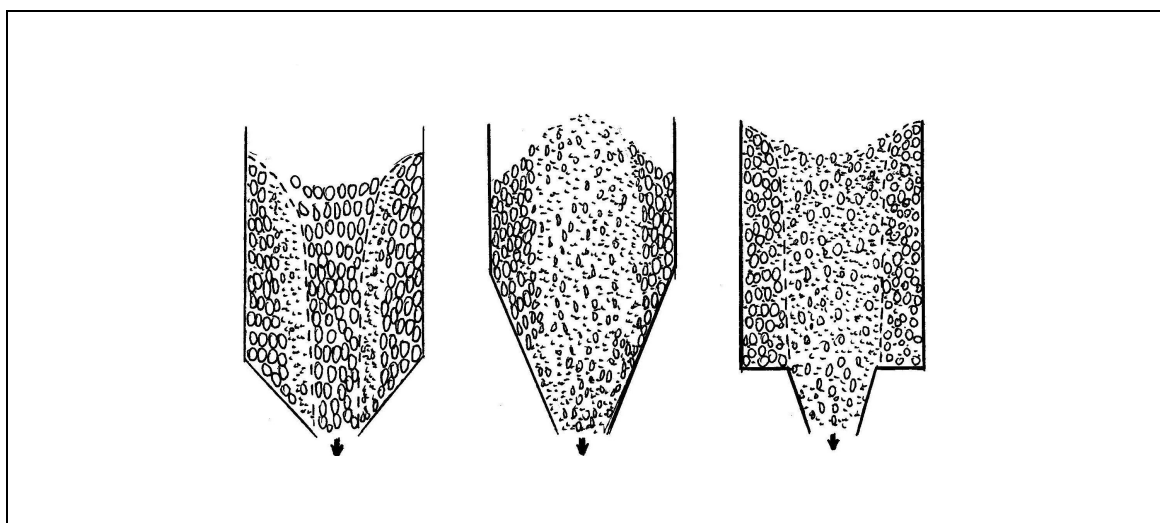


Figura 3.6 – Padrões de fluxo em silos (à esquerda – fluxo em funil, no centro – fluxo em massa e à direita – fluxo misto).

### 3.3.3. Problemas de fluxo

Existe uma grande variedade de problemas de fluxo que podem ocorrer com os materiais em silos. Entretanto, os problemas comumente identificados são: formação de arco (*arching*), formação de canal preferencial de fluxo (*ratholing* ou *piping*), segregação, degradação granulométrica, fluidização (*flushing*) e transbordo (*flooding*),

transientes de fluxo ou fluxo errático (*pulsing*), fluxo excêntrico e taxa insuficiente de fluxo. Os problemas mais graves são os que levam à suspensão de fluxo.

Para JUST (1980), os principais fatores que afetam a frequência de paradas no fluxo são a distribuição de tamanho do material, a tendência à aglomeração e as dimensões do canal de fluxo. Os trabalhos publicados admitem que as obstruções ou interrupções no fluxo de materiais são causadas basicamente pela formação de um arco (às vezes chamado de ponte ou domo), atravessando o canal de fluxo ou a abertura do silo e pela formação de um canal preferencial de fluxo (*rathole*), quando o canal de fluxo se esvazia, deixando um material circundante estagnado.

A degradação granulométrica é assim definida (CHAVES e FERREIRA, 1996): o material é esmagado sob a ação do peso das camadas sobrejacentes, sofre abrasão e impacto durante a queda e sofre abrasão mútua das partículas durante o movimento, alterando a sua distribuição granulométrica original e aumentando a porcentagem de finos. O fluxo errático (ou transientes de fluxo), segundo os mesmos autores, consiste na formação de arcos instantâneos e vazios que sofrem colapso após alguns instantes, fazendo variar a descarga do silo. Na fluidização e transbordo, a descida do material pelo funil origina uma pressão efetiva negativa. Havendo a formação momentânea de um vazio, o ar pode ser aspirado para dentro do silo, fluidizando o material granular e até jogando-o para cima.

A frações grosseiras escoam mais depressa e melhor que as frações finas. Num silo com apenas uma entrada, as partículas grossas escorregarão para a base do cone carregado e tenderão a se concentrar junto às paredes do silo, enquanto as finas se concentrarão no meio do silo, acontecendo a segregação granulométrica.

### **Formação de arco**

A formação de arco em reservatório causa a suspensão de fluxo pelo represamento de materiais acima da abertura da tremonha. O arco pode resultar do intertravamento das partículas, quando o tamanho médio das partículas é grande se comparado à abertura da tremonha e ocorre com material fragmentado grosseiro (arco mecânico). Para resolver esse problema, a experiência tem mostrado que a dimensão mínima da saída ( $D_s$ ) para o fluxo livre deve ser de 8 a 10 vezes o tamanho das maiores partículas ( $d$ ) alimentadas em silos (REED, 1991). A segunda causa pode ser a resistência adquirida

pelo material devido ao processo de consolidação durante a estocagem, que ocorre com produtos que tenham granulometria fina ou sejam passíveis de alterações químicas (arco coesivo). Os problemas de consolidação tendem a se agravar em locais sujeitos a vibrações.

A formação de arco de material grosseiro, com suspensão de fluxo, está relacionada aos vazios existentes entre os fragmentos de rocha. Essas cavidades podem ser esvaziadas ou preenchidas por diversas substâncias (fragmentos alongados, seixos, cascalho, areia, terra, argila etc). Acima das cavidades podem se formar arcos de fragmentos grosseiros (vide figura 3.7: o segmento AB mostra a região de arco).

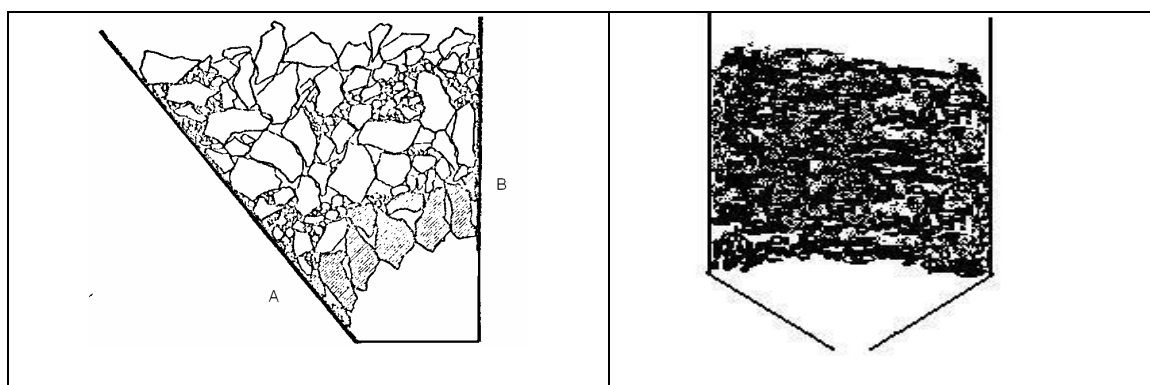


Figura 3.7 – Representação esquemática de arco mecânico e de arco coesivo.

No caso de escavações, as operações de lavra às vezes produzem *lumps* (partículas de 40 cm ou mais). Minérios com *lumps* e poucos finos tendem a formar arco mecânico. Os arcos mecânicos são também causados por mudanças abruptas na geometria da passagem, como mudanças de direção nas ramificações e de inclinação ou a diminuição da seção da passagem nos pontos de carregamento.

Não é objeto de estudo deste trabalho o efeito arco, desejável na aplicação de suporte para a estabilidade de escavações subterrâneas.

A probabilidade de formar arcos mecânicos depende da porcentagem de fragmentos grandes no material manuseado, do tamanho das partículas relativo ao tamanho da passagem e da descarga, da forma dos fragmentos e da velocidade ao longo do fluxo de minério. No fluxo através de escavações, são usadas na prevenção da formação de arcos regras empíricas baseadas na razão da dimensão da passagem ( $D$ ) pela

máxima dimensão da maior partícula ( $d$ ), conforme KELLY e SPOTTISWOOD (1982). Tais regras são baseadas na experiência de campo e em modelos experimentais.

➤ Dimensão mínima da abertura da descarga ( $e$ ) para prevenir a formação de arco: para o caso de seção quadrada ou retangular:

$$e \geq \sqrt{\frac{\sigma_y}{d_s g}} \quad (1)$$

para o caso de seção circular:

$$e \geq \sqrt{\frac{2 \sigma_y}{d_s g}} \quad (2)$$

Onde:  $e$  = largura ou o diâmetro da saída de descarga [m],

$d_s$  = massa específica volumétrica ou aparente (com o comprimento da abertura de descarga,  $L$ , maior que duas vezes e meia a largura de saída do fluxo,  $a$ ) [ $\text{kg/m}^3$ ],

$g$  = aceleração da gravidade [ $\text{m/s}^2$ ],

$\sigma_y$  = resistência ao cisalhamento do material não confinado [ $\text{N/m}^2$ ].

O minério que contém uma grande quantidade de finos tende a formar arco coesivo. A formação desse arco depende do vão da escavação. Se essa é suficientemente larga, as forças da gravidade excederão as forças coesivas e de atrito e o arco não se formará. Para prevenir arcos coesivos, é necessário conhecer as propriedades de atrito e coesão das partículas finas. A medição de propriedades de fluxo, como do ângulo de atrito interno e da coesão, é feita através do ensaio de cisalhamento direto da fração fina. Os arcos coesivos podem ser removidos por meio de jatos de água.

### **Formação de canal preferencial de fluxo**

Quando ocorre a formação de canal preferencial de fluxo, o fluxo fica restrito a um canal vertical acima da abertura de descarga. Apenas o material que ocupa esse canal é removido, ou seja, apenas o material que ocupa esse canal participa do fluxo por gravidade. Isso tem como consequência uma redução significativa da capacidade efetiva do silo (vide figura 3.8).

No que diz respeito a escavações, esse problema pode ser controlado pela modificação do chute de descarga da passagem de minério. É uma questão que deve ser discutida na fase do projeto de engenharia.

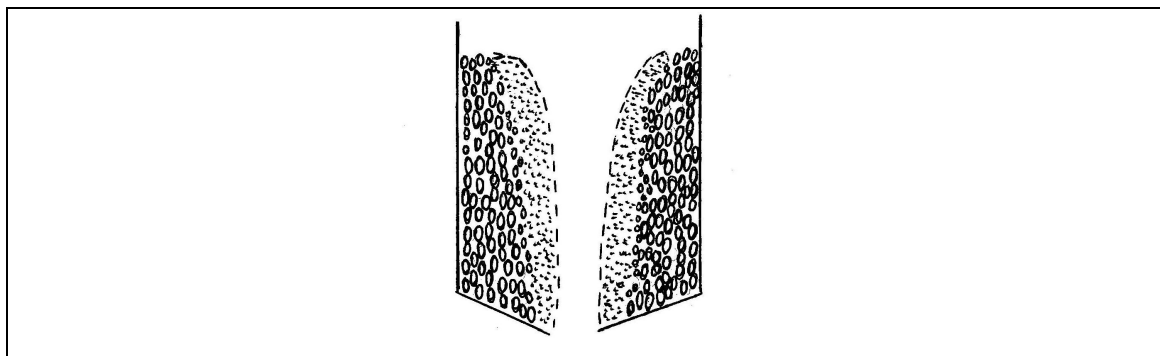


Figura 3.8 – Representação esquemática da formação do canal preferencial de fluxo.

- Dimensão mínima da abertura de descarga ( $e$ ) para prevenir formação de canal preferencial de fluxo, conforme KELLY e SPOTTISWOOD (1982):

$$e \geq \frac{4\sigma_y}{d_s g K_p} \quad (3)$$

Onde:  $e$  = diâmetro ou a diagonal da seção da abertura de descarga do silo [m],

$K_p$  = fator de formação de canal (função do ângulo de atrito interno) [-].

Abertura quadrada de lado  $l$ :

$$l \geq \sqrt{5 e^2 K_s} \quad (4)$$

Abertura circular de diâmetro  $D$ :

$$D \geq \sqrt{0,85 \times \frac{1}{0,785} \times 5 e^2 K_s} \quad (5)$$

onde:

$e$  = dimensão característica da seção (menor dimensão para abertura retangular) [m];

$K_s$  = coeficiente determinado utilizando-se o ábaco da figura 3.9 (varia de 0,6 a 1,4) [-].

A forma de utilização do diagrama está indicada na figura pelas setas. Segundo os autores citados, existem fórmulas mais acuradas, mas para finalidades práticas estas produzem previsões seguras. O diagrama contém as frações de tamanho principais que constituem o material grosseiro. O material tipo *lump* (blocos de tamanho superior a 40 cm) está colocado no fator I, com percentagens de 25 a 100% e sua forma característica (arredondado, angular e alongado) é indicada ao longo das linhas do diagrama. O fator II representa partículas de tamanho médio (seixos), III representa frações finas (cascalho, areia) e IV, os constituintes coesivos (alumina, argila).

#### **3.3.4. Fluxo em silos**

NGUYEN *et al* (1974-1980 apud THOMSON, 1997) estudaram o fluxo de areia seca, de esferas de vidro, poliestireno e de arroz em modelos cônicos e tremonhas em forma de cunha e mostraram que a altura livre da superfície do material no silo (parte vertical) pode ter um efeito significativo no padrão de fluxo. Esses estudos mostraram que os limites do fluxo em funil não podem ainda ser previstos com certeza. Esses limites são uma função não apenas da geometria da tremonha, mas também da altura da coluna de material, do ângulo de atrito do material, sendo ainda o material sensível a mudanças de massa específica causadas por mudanças nas pressões de consolidação durante o enchimento e a descarga.

A descarga contínua de material solto depende de uma abertura de descarga suficientemente larga para prevenir a formação de arco acima da mesma, ou a obturação da abertura. O material granular tende a fluir através de qualquer abertura próxima ao fundo de um silo, mas é mais bem descarregado através de uma abertura no fundo. A pressão em uma saída lateral é menor que a pressão vertical no mesmo nível. A saída no fundo minimiza a probabilidade de obstrução e a ocorrência de pressões excepcionalmente altas sobre a parede em qualquer ponto. A abertura de descarga deve ser pequena o suficiente para ser facilmente fechada quando o material estiver fluindo sem ser tão pequena que seja bloqueada. Como critério de projeto, por outro lado, a abertura de descarga deve ser grande o suficiente para a passagem do fluxo completo desejado quando estiver com a metade aberta (MCCABE e SMITH, 1956).

KVAPIL (1965 a) analisa a simultaneidade da alimentação com a descarga de silos. No caso em que na primeira fase o silo já está carregado e é descarregado na segunda fase, as zonas passivas vão se tornando gradualmente menores assim que a superfície de material solto vai abaixando. Através da descarga sucessiva do material

livre, a zona passiva no silo é gradualmente eliminada. As condições se alteram, entretanto, quando o material solto é alimentado continuamente simultaneamente à descarga. Quando a descarga é aberta, o elipsóide de movimento é formado e vai se tornando cada vez maior. Como o silo é carregado, é formado um fluxo móvel que se torna estabilizado após um certo tempo. O material solto escoar apenas através da zona ativa, enquanto o material da zona passiva não se move por inteiro, permanecendo por longo tempo e podendo se deteriorar.

O fluxo em tubo a partir de reservatório foi estudado por PARBERY e ROBERTS (1986), SARKAR *et alii* (1991) e HERMANN *et alii* (1998). Alguns efeitos no fluxo parecem decorrer da incapacidade do material granular de formar um estado híbrido entre fluido e sólido. Quando a massa específica excede um certo valor, chamado dilatância crítica, o material resiste ao cisalhamento como os sólidos, enquanto abaixo desse valor, se fluidizará. POULIQUEN e CHEVOIR (2002) observam que, para cada inclinação de deslizamento do material ( $\alpha$ ), há uma espessura mínima da camada (próxima às paredes) que sofre cisalhamento, abaixo da qual não há fluxo uniforme. A espessura crítica é menor para maiores inclinações e tende a infinito quando a inclinação se aproxima do ângulo de repouso do material. Isso parece resultar da condição-limite imposta pela rugosidade do plano. Acima desse valor de espessura crítica das zonas de cisalhamento, se desenvolve um fluxo uniforme.

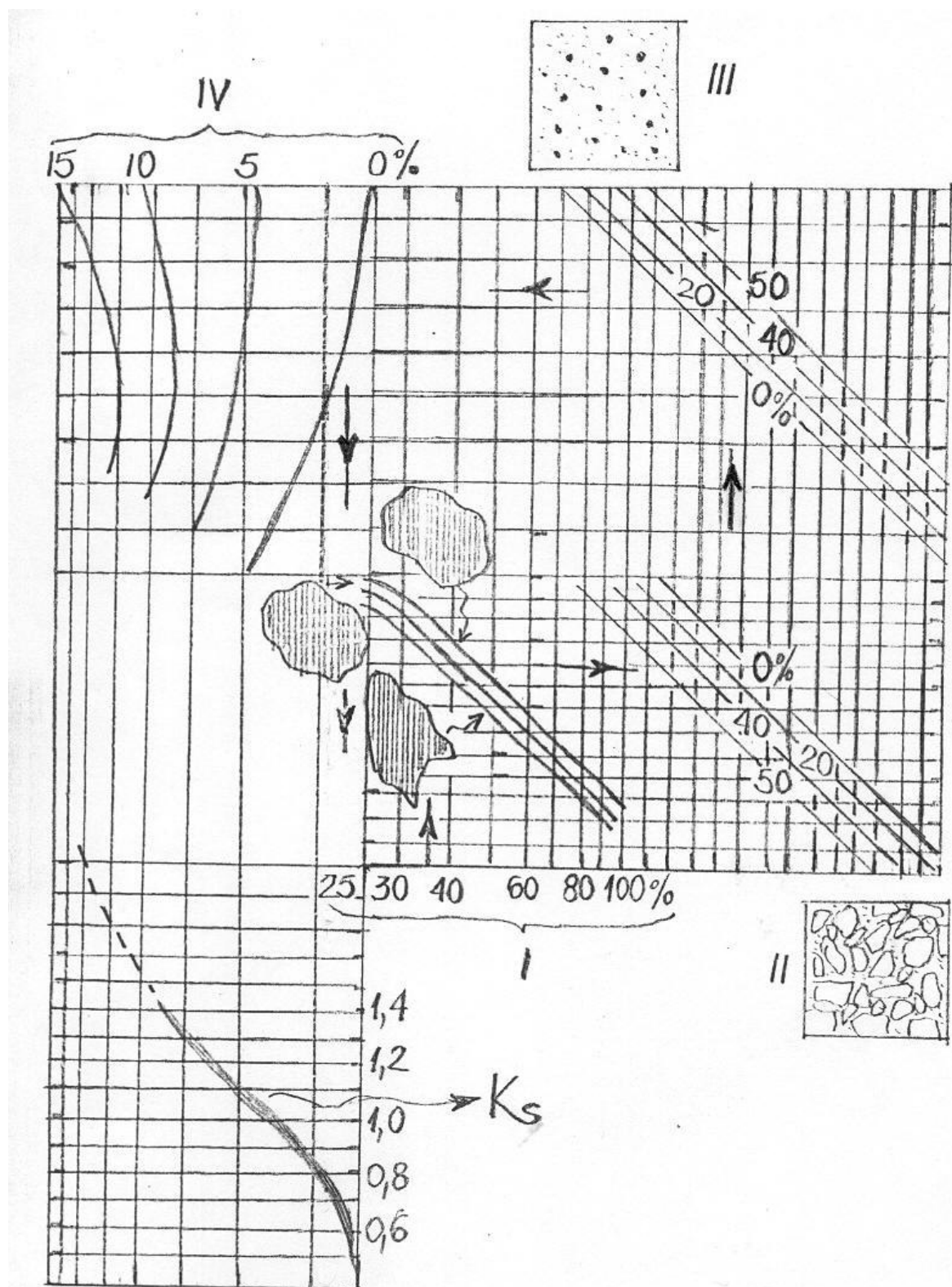


Figura 3.9 – Diagrama para determinação do coeficiente  $K_s$  da equação (4) ou (5), de KVAPIL (1965 b).

### 3.3.5. Projeto de fluxo em silos

O projeto de silo deve atender ao seguinte requisito: a taxa de fluxo em operação (vazão) deve corresponder à estabelecida no projeto. A variação deve ser pequena ou nenhuma para efeito prático de produção. Quando o fluxo por gravidade de material fragmentado em um silo apresenta estas características é denominado fluxo confiável.

As variáveis que afetam a vazão de descarga de material são muitas. As variáveis relativas ao material fragmentado são: distribuição de tamanho da alimentação; forma das partículas; resistência ao cisalhamento do material fragmentado; coesão; altura da coluna de material fragmentado; coeficiente de atrito do material; teor de umidade do material. As variáveis relativas ao reservatório ou à escavação são: resistência mecânica das paredes do reservatório; coeficiente de atrito do material fragmentado com o material da parede do reservatório; capacidade de estocagem desejada; tempo de estocagem; espaçamento entre as paredes do reservatório; abertura de descarga; inclinação da tremonha.

O desempenho do conjunto silo-tremonha é função da geometria da estrutura, da constituição da estrutura e do comportamento do material. Entre os parâmetros mais relevantes para o projeto de silos está a abertura da descarga. As dimensões da abertura de descarga são determinadas de tal modo que o material não resista às forças da gravidade e escoe para a descarga.

É, portanto, necessário conhecer as propriedades do material antes de se projetar um silo. Estas propriedades podem ser determinadas em ensaios de laboratório como aqueles realizados em laboratórios de solos, da engenharia civil, como o ensaio de resistência ao cisalhamento.

A principal dificuldade no projeto é estabelecer uma descarga satisfatória. São freqüentes na indústria relatos a respeito de dificuldades de fluxo de material fragmentado em tremonhas e silos. A ausência de um fluxo adequado requer muitas vezes alteração de forma de tremonhas e de silos, adoção de dispositivos para promover o fluxo ou uso de operações visando o desbloqueio do material retido. Através da aplicação de determinadas técnicas, os problemas relacionados ao fluxo podem ser eliminados ou minimizados, no estágio de projeto das instalações. Diversos autores discutem técnicas que possam ser aplicadas ao projeto, à revisão de

projeto de silos e a modificações de silos em operação de forma que o investimento de capital em estocagem e nos equipamentos de manuseio associados seja minimizado.

#### **3.3.5.1. Etapas do projeto do sistema de fluxo**

Consideradas as variáveis que afetam a vazão de descarga de material, podem ser consideradas quatro etapas para elaboração do projeto de silos:

- determinação das propriedades de fluxo do material;
- determinação da geometria do silo;
- avaliação da carga exercida sobre as paredes do silo e do alimentador em condições operacionais;
- projeto e detalhamento da estrutura do silo e do alimentador, levando-se em conta as etapas anteriores.

#### **Determinação das propriedades de fluxo do material**

Muitos dos problemas de fluxo podem ser eliminados através de uma especificação adequada e acurada das características do material. Para DICK e CARSON (1989), a caracterização das propriedades de fluxo de materiais fragmentados envolve:

- o ensaio de cisalhamento de material com partículas maiores;
- o ensaio de atrito para simular uma faixa ampla de condições de fluxo;
- a medição da taxa de desgaste de revestimentos em silos, alimentadores etc;
- a medição do nível de finos (potencial de cominuição e efeitos das medidas de controle).

Conhecidas as propriedades de fluxo do material, segundo KELLY e SPOTTISWOOD (1982), podem ser estabelecidas as condições críticas para o fluxo em massa, para a formação de arco ou de canal preferencial de fluxo. É possível determinar a forma desejada da seção da tremonha para permitir tanto fluxo em funil como fluxo em massa adequado. As características de resistência ao fluxo de muitos materiais coesos determinam uma dimensão crítica da abertura da tremonha. Se a abertura é maior que essa dimensão, será obtido um fluxo adequado.

## Determinação da geometria do silo

Entre os fatores que influenciam a vazão de descarga de um silo, destaca-se a geometria do reservatório. A definição da geometria do conjunto silo-tremonha, incluindo-se a dimensão de descarga, é uma etapa muito importante do projeto de fluxo, pois dela dependem: o desempenho do conjunto, a vazão de descarga, o comportamento do fluxo do material e as tensões atuantes nas paredes do silo ou da escavação. No caso de escavações e de silos subterrâneos as paredes geralmente são o próprio maciço rochoso.

Constata-se que a seleção das dimensões da descarga de silos é uma tarefa essencialmente baseada em experiências anteriores. É ainda uma prática comum a extrapolação a partir do comportamento de um material fragmentado que tenha sido manuseado anteriormente para prever o comportamento de outro material para o qual não haja experiência prévia. Tais extrapolações podem ser muito perigosas. KVAPIL (1965 b) propõe relações empíricas para o dimensionamento da seção da abertura de descarga para as geometrias circular, quadrada e retangular, bem como um estudo da utilização da abertura em fenda.

O projeto da tremonha não é uma tarefa das mais simples, pois depende das propriedades mecânicas do material armazenado. O modelo mais simples é o fundo plano com uma abertura. O material sai pela abertura deixando uma zona morta, de acordo com o ângulo de atrito do material. O ângulo de saída de um silo deve ser maior que o ângulo de repouso do material, pois, em caso contrário, o material não será descarregado. Deve-se levar em conta também que esse ângulo varia, sendo necessário trabalhar-se com grande margem de segurança a fim de garantir a descarga do silo em qualquer situação.

Se a tremonha for cônica ou piramidal, a inclinação das paredes em relação à horizontal ( $\theta$ ) deverá ser aproximadamente igual ao ângulo de atrito ( $\varphi$ ). JOHANSON (1968) enfatiza que a limitação mais séria de projeto no uso de cones de fluxo em massa é que eles devem ser muito inclinados (tipicamente maior que  $65^\circ$ ). Um maior atrito superficial do material contra as paredes da tremonha requer cones mais inclinados. Por conseguinte, é desejável se ter um ângulo de atrito com as paredes da

tremonha o menor possível. Isso também torna menor o custo de construção do reservatório para uma dada capacidade (PITTMAN *et alii*, 2000).

O trabalho de JENIKE (1961), segundo PERRY e GREEN (1984), resultou na identificação de critérios que afetam o fluxo de material em reservatórios de estocagem. O autor citado estabeleceu as equações que definem o fluxo granular e os coeficientes que afetam o fluxo, posteriormente verificou esses critérios e, em 1964, estabeleceu os fatores de fluxo para diversos projetos de silo-tremonha, bem como as especificações para se determinar experimentalmente as características de materiais fragmentados que afetam o fluxo e a estocagem. O autor citado produziu um método de aplicação que inclui equações e medições físicas de características dos materiais.

Reduzindo-se a análise à determinação da abertura de saída do silo ( $e$ ), PERRY e GREEN (1984) consideram que o método de JENIKE (1961) propicia uma forma prática de medir e interpretar a resistência dos sólidos granulares como função da pressão de consolidação. Para desenvolver essa relação, Jenike produziu um aparelho para ensaio de resistência ao cisalhamento que fornece um fator de fluxo ( $f_f$ ). Uma aproximação útil, segundo os citados autores, é dada pela expressão seguinte.

$$e = \frac{22 f}{d_s} \quad (6)$$

Onde:  $f$  = resistência do arco [ $\text{N/m}^2$ ];

$\gamma$  = peso específico do material estocado [ $\text{N/m}^3$ ].

### **Carga exercida sobre as paredes do silo e do alimentador**

O campo de tensões entre as paredes do silo e o material estocado é pouco compreendido, sendo dependente da localização do ponto de alimentação, da configuração do canal de fluxo, da geometria do silo e das variações dessa geometria devidas ao processo construtivo. O conhecimento dos padrões de fluxo que ocorrem em um silo é fundamental para o entendimento das forças que agem no material ou nas paredes do silo. Sabe-se que as forças de atrito causadas pelo deslizamento dos materiais e os padrões de fluxo que se desenvolvem durante a alimentação e a descarga originam pressões nas paredes dos reservatórios. Foram desenvolvidas

teorias para se estabelecer uma descrição adequada do mecanismo de fluxo. Essas teorias propiciaram um método de estimativa das pressões nas paredes da estrutura, desde que as considerações estruturais e de reforço possam ser avaliadas. Essas teorias permitem a avaliação prévia dos problemas relacionados ao fluxo.

A maior parte das informações publicadas a respeito das tensões sobre as paredes trata da alimentação e descarga assimétricas de um silo. Admite-se que essas tensões são maiores nessas situações e requerem consideração especial. A equação de Janssen, confirmada experimentalmente diversas vezes (Cain, 1916; Ketchum, 1919; Taylor, 1948, ambos citados por GOMIDE, 1983), permite concluir que a pressão exercida pelo material na base de um silo não aumenta linearmente com a altura de material estocado como aconteceria para um líquido. A forma geral da equação é (MCCABE e SMITH, 1956):

$$pb = \frac{r_s d_s g \left[ 1 - e^{-2 \mu' K \frac{Z_r}{r_s}} \right]}{2 \mu' K} \quad (7)$$

Onde:  $p_b$  = pressão vertical na base do silo [ $N/m^2$ ],

$r_s$  = raio interno do silo [m],

$d_s$  = massa específica volumétrica (ou aparente) do material [ $kg/m^3$ ],

$g$  = aceleração da gravidade [ $m/s^2$ ],

$\mu'$  = coeficiente de atrito na parede do silo [-],

$K$  = razão entre a pressão lateral e a pressão vertical no silo [-],

$Z_r$  = coluna de material do silo [m]

BLIGHT e HAAK (1994) aplicaram a equação ao caso do impacto de material sobre o portão de controle de uma passagem de minério. Os procedimentos e resultados estão descritos no item 3.7.3 deste trabalho.

MCCABE e SMITH (1956) mostram que, quando o material fragmentado está estocado em silos ou tremonhas, a pressão lateral exercida nas paredes em qualquer ponto é menor que a prevista a partir da coluna de material acima daquele ponto. Além disso, existe usualmente atrito entre a parede e os materiais e, por causa do intertravamento de partículas, o efeito desse atrito é transmitido através do material.

Essa força de atrito tende a diminuir o efeito do peso e reduzir a pressão exercida pelo material sobre o fundo do recipiente. No caso extremo essa força causa a formação de um arco ou ponte de modo que o material não cai, mesmo quando o material situado abaixo é removido. Segundo os mesmos autores, para vários materiais, quando a altura da coluna de material no silo atinge 3 vezes o seu diâmetro, o material adicional não tem efeito sobre a pressão na base do reservatório.

### **Detalhamento da estrutura e revisão de projeto**

Silo, tremonha e alimentador devem ser tratados como uma unidade. O tamanho do alimentador deve exceder as dimensões críticas definidas para o silo e para a tremonha. A taxa de desgaste medida em ensaios é usada para projetar a espessura dos revestimentos ou para estimar a vida útil de equipamentos como silos, tremonhas, alimentadores e chutes. Para minimizar o desgaste no silo é comum utilizarem-se “zonas mortas”, regiões onde o conhecimento do ângulo de repouso é usado para se acumular parte do material, de modo que o fluxo ocorra com atrito entre as partículas do material. Isso equivale a se ter paredes confinantes do próprio material estocado.

A ausência de um fluxo adequado requer muitas vezes a alteração de forma de tremonhas e silos ou a adoção de dispositivos como os vibradores, introduzidos na tentativa de promover o fluxo. Em geral, esses dispositivos funcionam por meio da modificação da composição ou da geometria do silo para mudar os padrões de fluxo, da quebra ou destruição das regiões de material estagnado ou da mudança das características de fluxo do material. Isso às vezes leva a revisões de projeto caras ou a modificações *in loco*, com prejuízo devido a paradas.

Conforme DICK e CARSON (1989), os dispositivos que foram desenvolvidos para melhorar a confiabilidade do fluxo de materiais tiveram por objetivo assegurar a mistura dos materiais em silos ou uma descarga completamente não segregada, propiciando fluxo em massa. Em uma visão rápida, segundo REED (1991), é possível descobrir na literatura uma grande variedade desses dispositivos para promover o fluxo em tremonhas e auxiliar a descarga.

### 3.4. Escavações subterrâneas

#### 3.4.1. Introdução

A lavra subterrânea compreende uma seqüência de operações: o desmonte do minério, o seu carregamento e o seu transporte à superfície para o posterior tratamento e/ou comercialização. Existem vários métodos de extração do minério. Esses são chamados métodos de lavra, cada um com um conjunto complexo de características. Em uma mesma mina pode ser utilizado mais de um método. Assim como os métodos numa dada mina podem mudar ao longo dos anos. Na mineração subterrânea, o transporte de material fragmentado é necessário inicialmente a partir da frente de lavra. São usados caminhões, locomotivas, carregadeiras, correias transportadoras, esquipas (*skips*) e o fluxo por gravidade. As operações de desmonte, carregamento e transporte são realizadas também para a remoção do estéril.

Três situações podem ser aplicadas às escavações resultantes das operações citadas: são mantidas vazias, com ou sem utilização de suporte (princípio do “abandono de pilares”); são preenchidas com material da própria mina, material estéril ou rejeito proveniente da usina de beneficiamento (princípio do “enchimento”); são preenchidas pela rocha encaixante que sofre abatimento (princípio do “abatimento controlado”).

Das situações que podem ser aplicadas às escavações resultantes das operações mineiras, nos desmontes com abatimento do teto, o avanço da frente de lavra se processa, mas, em vez da sustentação do teto, provoca-se seu desabamento, a uma distância controlada da frente, dissipando-se parte da energia armazenada no maciço. Além disto, a rocha desabada empola, o que inibe a propagação do abatimento, a partir do momento em que os blocos começam a exercer reações apreciáveis sobre o teto, favorecendo sua sustentação.

Na mineração são realizadas diversas operações de desmonte e/ou cominuição nas quais a rocha sofre algum processo de ruptura que resulta na sua fragmentação. Os materiais (minério e estéril), fragmentados pelo desmonte por explosivos ou por máquinas de corte, são transportados através de diversas escavações. As escavações onde acontece o fluxo de material fragmentado por gravidade são as passagens, que são escavações inclinadas ou verticais. Essa escavação faz parte de um conjunto, que

envolve, além das operações unitárias de lavra, as operações auxiliares de ventilação, drenagem e as passagens de pessoal e de equipamentos.

As passagens às vezes conduzem a um silo subterrâneo, empregado para prover capacidade de regularização do fluxo de minério. Por sua vez, o minério é normalmente retirado do fundo do silo por um chute. As passagens são também usadas para estocagem temporária de minério.

Para DE LA VERGNE (2000), as passagens de minério e de estéril fornecem um meio de baixo custo para a movimentação de minério. JUST (1980) pondera que os sistemas de passagens envolvem grande dispêndio de capital (custos de desenvolvimento mais de aquisição de equipamentos), o que leva à necessidade de um sistema de grande vida útil para amortização desses investimentos. Adicionando-se a natureza integrada do sistema, torna-se um sistema com pouca flexibilidade. Exceto em métodos de corte e enchimento, quando se pode utilizar a opção da construção gradual das passagens com quadros ou tubos partidos, a vida útil projetada para a passagem é geralmente igual à da mina.

Em diversos métodos de lavra subterrânea acontece o fluxo por gravidade. A maioria dos sistemas de passagens de minério está nos métodos de abatimento e na lavra de alargamento em subníveis. Também nas minas trabalhadas simultaneamente em vários níveis que têm corpos de minério inclinados. Nos corpos mais planos, são muitas vezes usados em conjunto com sistemas de transporte.

#### **3.4.2. Métodos de Lavra Subterrânea**

O fluxo por gravidade de material fragmentado é muito empregado em diversas operações, em diversos métodos de lavra subterrânea. A seguir são apresentados os principais métodos em termos da utilização desse fluxo e são descritos alguns arranjos típicos do transporte em minas subterrâneas. Os métodos de abatimento controlado apresentam os maiores índices de segurança no trabalho em minas subterrâneas e vem crescendo em aplicação (HARTMAN, 1987).

O método de abatimento em subníveis (*sublevel caving*) é um dos métodos de lavra subterrânea caracterizados pelo fluxo de material fragmentado de granulometria grosseira, que é o fator mais importante na aplicação do método. Esse método é aplicável a corpos de minério de grande mergulho (acima de 45°) e/ou outros de grandes dimensões verticais, de grande ou pequena resistência (CUMMINS *et al*, 1973). As condições superficiais devem admitir a subsidência. Para se obter maior recuperação de minério, minimizar a contaminação com estéril (a diluição pode alcançar até 40%) e as perdas de minério, é necessário determinar os parâmetros ótimos de projeto. O método tem sido utilizado em diversas minas em todo o mundo (Suécia, Austrália, Finlândia, Zaire, Rodésia, Canadá). No Brasil é utilizado na Mina de Ipueira, da FERBASA, em Andorinhas (BA), já tendo sido utilizado na Mina de Fazenda Brasileiro, em Teofilândia (BA). Na figura 3.10 é mostrado um arranjo típico da lavra por abatimento em subníveis.

JANELID e KVAPIL (1966) planejaram a Mina de Kiruna, na Suécia, quando estudaram o fluxo de material com tamanho médio acima de 40 cm. Nessa mina, os subníveis estão distanciados de 7,6 a 12,2m, com 60m de internível; as passagens estão espaçadas de 25m, têm 3m de diâmetro, 300m de comprimento, inclinação de 69° em relação à horizontal (ZABLOCKI, 1997; [www.mining-technology.com](http://www.mining-technology.com)).

O método de abatimento em blocos (*block caving*) constitui-se em um método aplicável a corpos de minério largos e maciços, de grande mergulho (acima de 45°), de grande espessura (de 30 a 200m); baixo teor (ex. cobre e molibdênio), com características de abatibilidade; que não devem aglomerar-se ou oxidar-se. O método exige um grande tempo de desenvolvimento para a lavra dos blocos, que têm cerca de 1000m<sup>2</sup>. A necessidade de perfuração e detonação, no caso geral, é mínima. Os blocos de minério são solapados e sofrem abatimento controlado (vide figura 3.11). O método tem sido utilizado em minas nos EUA, Canadá, Chile, Suécia, Indonésia, Filipinas e África do Sul (DE LA VERGNE, 2000).

Na lavra de alargamento em subníveis (*sublevel stoping*), são desmontadas tiras verticais de minério, escoando-se o material desmontado pelos chutes e travessas de produção. O processo de extração depende da largura da galeria e do fluxo. A Mina de Baltar, da Mineração Santa Helena, Grupo Votorantim, em Votorantim (SP), a Mina de Fazenda Brasileiro e a Mina de Tanguá (RJ), mina de fluorita da EMITANG, utilizam

esse método. O mesmo foi utilizado na Mina de Cuiabá, da Mineração Morro Velho, em Sabará-MG (vide figura 3.12). O arranjo da Mina do Baltar tem um alargamento de 110m altura, 40m largura, 100 m comprimento, com pilares de 32 a 40m de largura.

O método de recalque (*shrinkage stoping*) é um método de lavra ascendente, em que o minério desmontado é acumulado no alargamento, servindo de plataforma para os operadores e de suporte para as paredes do alargamento. O material desmontado exerce função de enchimento provisório até sua completa remoção. Após a retirada de todo o minério, pela ação da gravidade, o alargamento fica vazio, sendo então abatido ou preenchido com estéril. Nesse método, a retirada do material fragmentado é regulada em função do avanço do desmonte, de tal modo que fique um espaço livre de 1,8m a 2,2m de altura, necessário ao trabalho de perfuração do corpo de minério. Para garantir a horizontalidade do minério desmontado, os chutes de descarga devem ser convenientemente espaçados. Os corpos de minério têm largura de 3 a 30m, subníveis de 30 a 75m, travessas de 3 a 10m de extensão, espaçamento dos chutes de 5 a 15m (HUSTRULID, 1982). Esse método foi aplicado nas minerações de tungstênio, no Norte do Brasil; na mina de fluorita, Panelas (PE); na mina de cobre de Camaquã, Caçapava do Sul (RS); na Mina Grande, da Mineração Morro Velho, Nova Lima (MG) e na Mina São Bento, da São Bento Mineração/Eldorado, Santa Bárbara (MG).

Nos métodos com abandono de pilares, como o método de câmaras e pilares (*room and pillar mining*), o desmonte é feito com o avanço de várias aberturas paralelas, convenientemente espaçadas, deixando-se porções do minério para formar pilares, de dimensões e formas adequadas, que limitam os vãos das aberturas e promovem a sustentação do teto. Esse método é aplicado na Mina de Morro da Usina, da Companhia Mineira de Metais (CMM), em Vazante (MG), na Mina de Morro Agudo, também da CMM, em Paracatu (MG), na Mina de Taquari-Vassouras (SE), da Companhia Vale do Rio Doce (CVRD), na Mina de Morro do Urucum (MS), também da CVRD, entre outras. Foi utilizado na Mina da Passagem, em Mariana (MG).

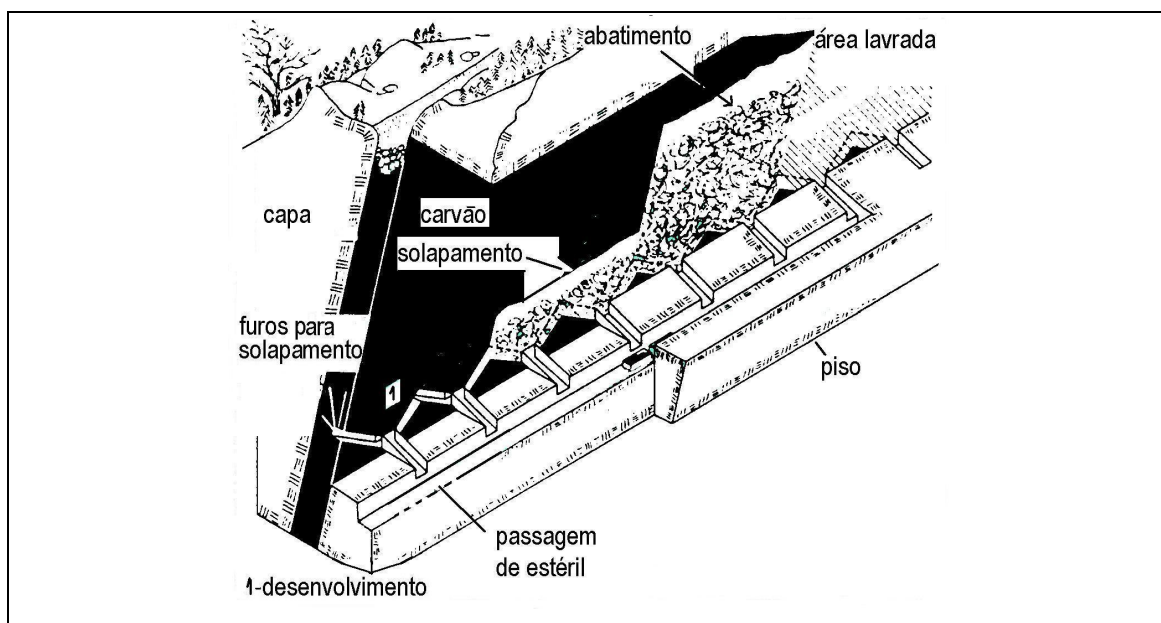


Figura 3.10 - Arranjo típico da lavra por abatimento em subníveis (CUMMINS e GIVEN, 1973).

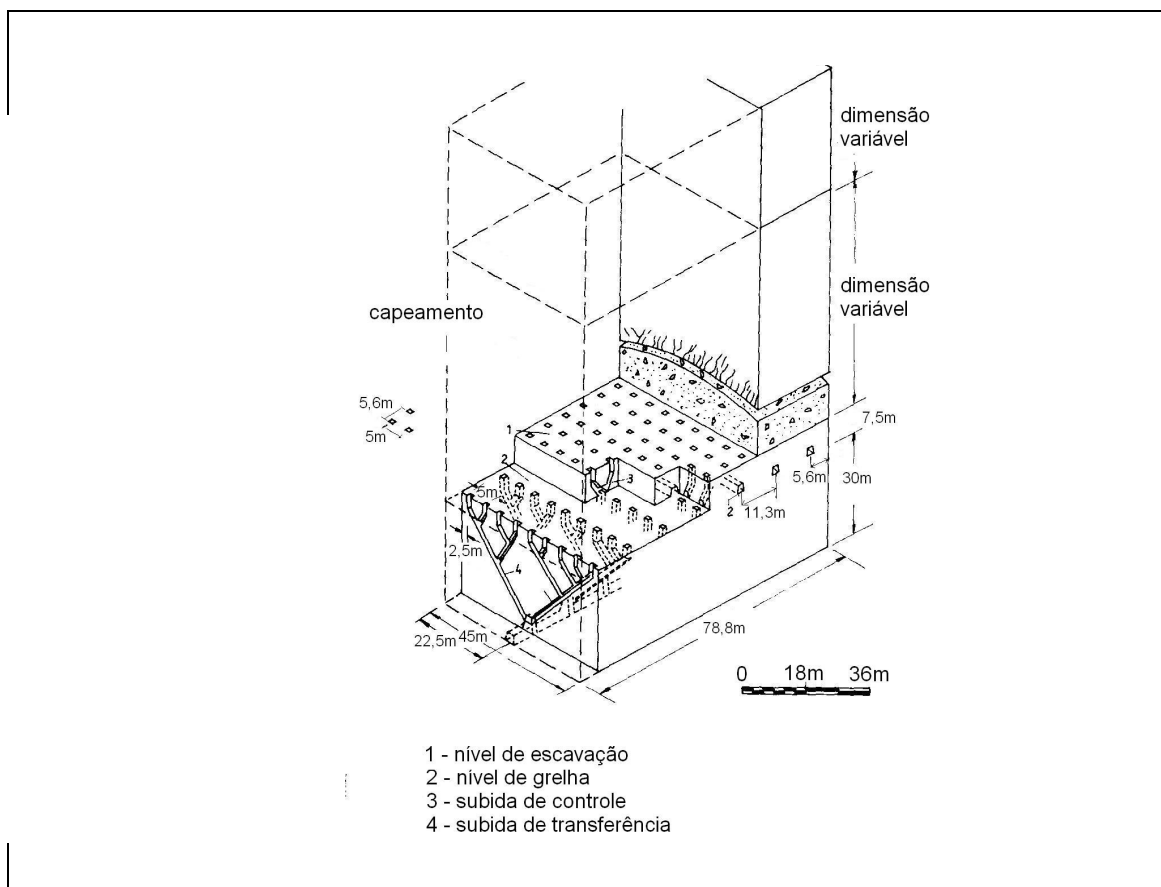


Figura 3.11 - Arranjo típico da lavra por abatimento em blocos (NOVITZKY, 1975).

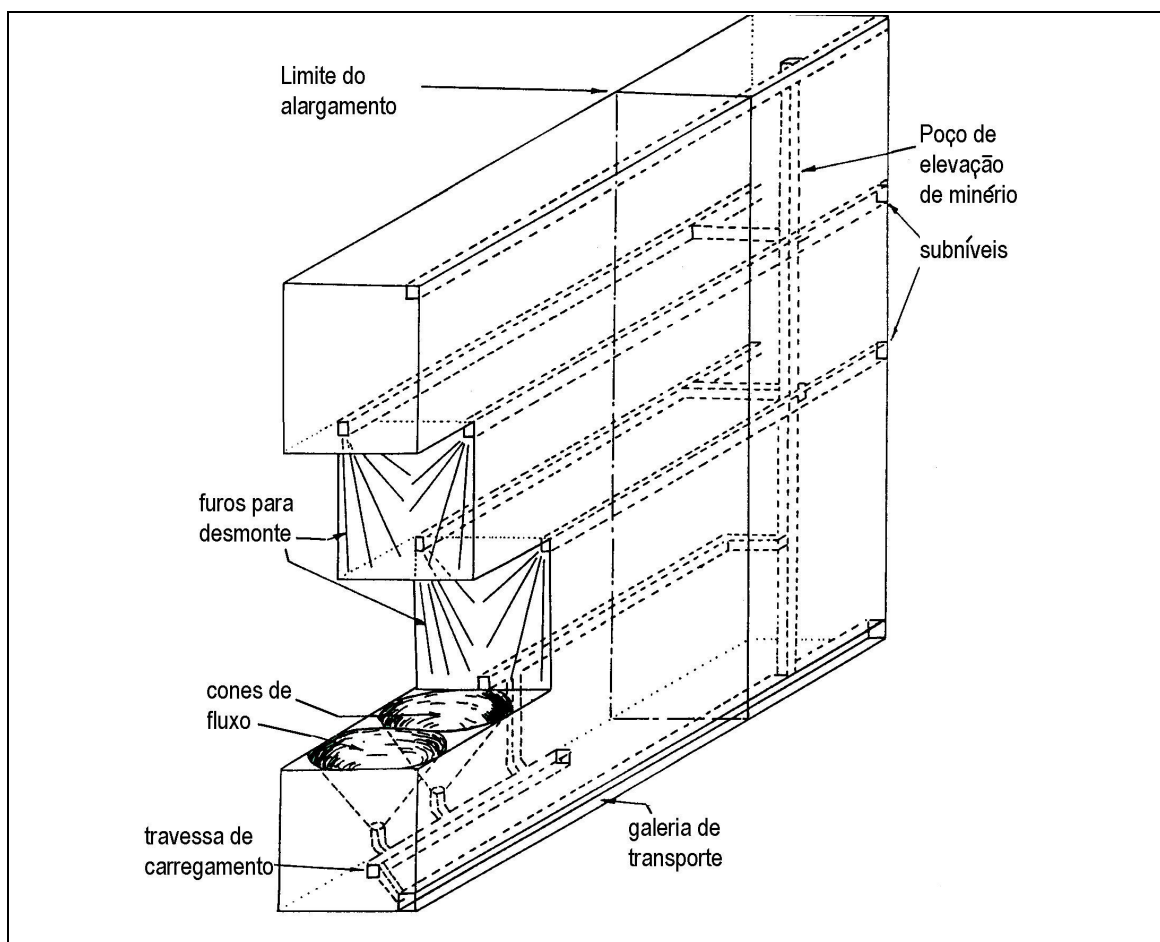


Figura 3.12 - Arranjo típico da lavra de alargamento em subníveis (CUMMINS e GIVEN, 1973).

No método de corte e enchimento (*cut and fill mining*), o minério é completamente removido e o material de enchimento suporta as paredes e fornece piso para a lavra da próxima fatia de minério. Oferece como vantagem a seletividade e permite alta mecanização. O material de enchimento pode consistir de rocha estéril distribuída mecanicamente (a seco), mas a prática mais moderna é a utilização de enchimento hidráulico (*back fill*). São comuns nos arranjos de lavra por enchimento as passagens de minério, de estéril e de enchimento. Esse método é aplicado na Mina de Cuiabá, da AngloGold, Sabará (MG), na Mina de São Bento, da Eldorado/São Bento, Santa Bárbara (MG), na Mineração Serra Grande, Crixás (GO), da AngloGold, entre outras. Foi utilizado na Mina de Morro da Fumaça, de fluorita, no Paraná.

### 3.4.3. Sistemas de fluxo de material em minas subterrâneas

Em um levantamento, com informações de GERMANI (2002), DE LA VERGNE (2000), PFLEIDER *et al* (1968), abrangendo 50 minas (33 minas estrangeiras e 17 minas brasileiras), 6 métodos de lavra, de 8 países, com profundidades de 540 a 1500m, compreendendo 10 tipos de minério, conclui-se que cerca de 60% das minas usam (ou usaram) passagens de minério e/ou silos de estocagem.

A preocupação em relação ao fluxo de material fragmentado vem desde o início do século XX, se intensificando na década de 60. A comparação tradicional entre sistemas de transporte é realizada entre o transporte por caminhões em rampa, o transporte por vagões diretamente à superfície e o transporte por passagens combinado com esquipas (NILSSON, 2001; PFLEIDER *et al*, 1968). Projetos de sistemas de transporte de material, descritos por PFLEIDER *et al* (1968), figuras 3.13 a 3.20, mostram exemplos de sistemas de passagens em minas de diversos países, descritos a seguir.

Na Mina de Kiruna (Suécia), lavra de minério-de-ferro, utilizam-se carregadeiras LHD de controle remoto, caminhões de 22t, passagens de minério e trens (vagões de 35 a 40t) para o transporte de material fragmentado de 10 a 14". As passagens têm diâmetro de 3m, inclinação de 60°, sendo escavadas em duas etapas de 120m cada. As passagens têm porta de fechamento na descarga, controladas a distância. Uma vez que se tenha a quantidade de material para realizar o carregamento de uma composição de vagões (500t), a descarga é acionada (QUINTEIRO, 2003).

Na Mina Spruce (Minnesota, EUA), o material fragmentado é transportado por caminhão ao britador (abertura 3 ½"), localizado antes da entrada da passagem de minério (vertical, seção quadrada de 3m de lado, 30m de extensão). Da passagem, é descarregado no alimentador da correia transportadora, com capacidade para 750t/h, com 1500m de comprimento, sendo levado até a superfície. Conforme PFLEIDER *et al* (1968), a Mina de Sullivan (Canadá), de chumbo, zinco e prata, também apresentava passagem de minério inclinada, com joelho e transporte do material por trens até a superfície.

Na Mina de Susquehanna (Minnesota, EUA), o material fragmentado é transportado por caminhões de 22t, é descarregado em uma grelha, passando por alimentador, peneira vibratória, britador (abertura de 3 ½”), alimentador da correia (3º de inclinação, 129m de comprimento), por outra correia horizontal (120m de comprimento). O material é estocado para içamento por esquipas (que transferem de 2t a 8t), em balanço, no poço até a superfície. A escavação das passagens de minério é realizada por perfuratriz *raise borer*.

Na Mina de Algoma (Ontário, Canadá), mina de cobre, carregadeira e caminhão retiram o material fragmentado, transferem para passagem de minério vertical (3m x 3m), com chute de descarga, para o britador (abertura de 4”) e para correia transportadora (14,5º de inclinação, 200m de comprimento) até a superfície.

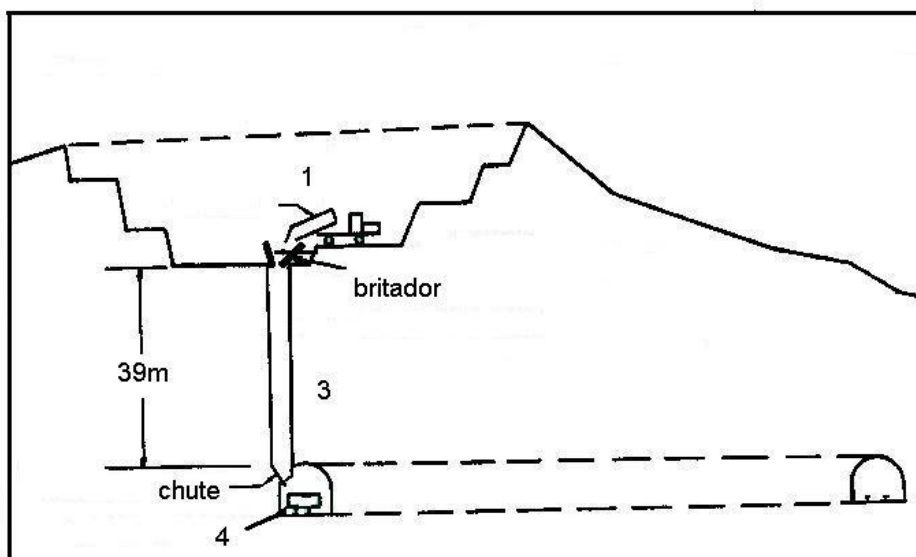
Na Mina de Caland (Ontário, Canadá), o caminhão transferia o material fragmentado para tremonha, que tinha uma grelha à entrada, o material passava para o alimentador da passagem de minério (1,5m x 1,5m), inclinada de 68º, depois era carregado por chute em correia (174m de comprimento), em esquipas (10t de capacidade, vazão de 800t/h) e era transportado por poço e correia (17º de inclinação) até a superfície.

Na Mina Consolidated (Georgia, EUA), o material fragmentado é transferido por carregadeira e caminhão para grelha (abertura de 4”), à entrada da passagem de minério (inclinada de 60º, 147m de extensão, seção de 3,0m x 4,8m), com abertura de inspeção e portão de controle de descarga; da passagem, o material é transferido à superfície.

Na Mina United Verde (Arizona, EUA), mina de cobre, o material fragmentado é transportado por caminhão para passagem de minério de dois estágios (o primeiro trecho vertical, o segundo sub-vertical), com grelha; da passagem é estocado e transferido à superfície por trens.

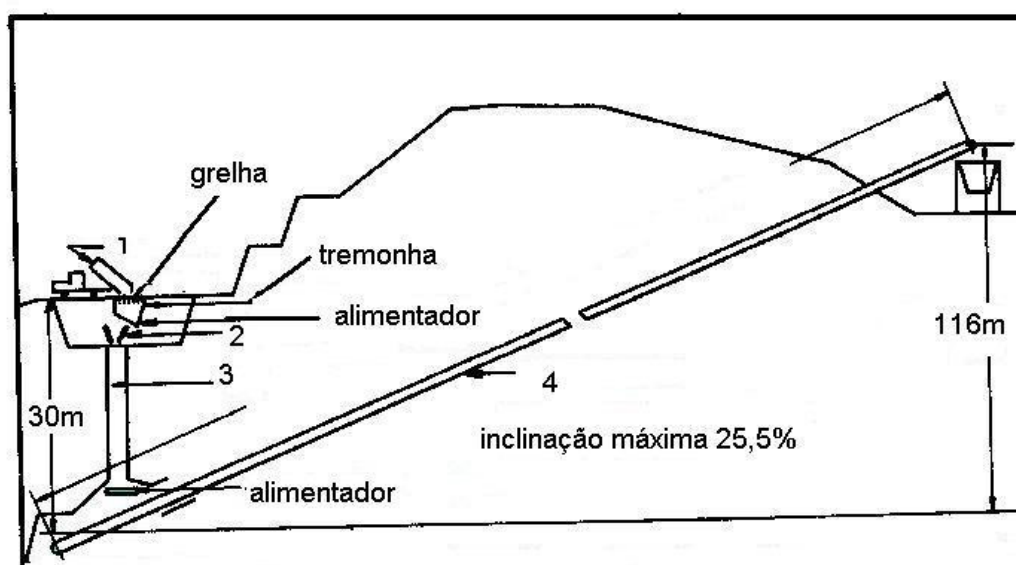
No projeto da Mina Carol (Canadá), mina de minério-de-ferro, a carregadeira (com capacidade de 8J<sup>3</sup> a 10J<sup>3</sup>) transfere o material fragmentado para caminhão (60t a 90t), para passagem com grelha à entrada, de abertura 1,5m. O sistema com passagens apresentou o menor custo unitário em relação às outras opções tradicionais e foi iniciado em 1964. A passagem tem 0,9m de diâmetro e portão de controle de

descarga, o material é descarregado em alimentador de trens para o transporte em adito por cerca de 5 km até o exterior.



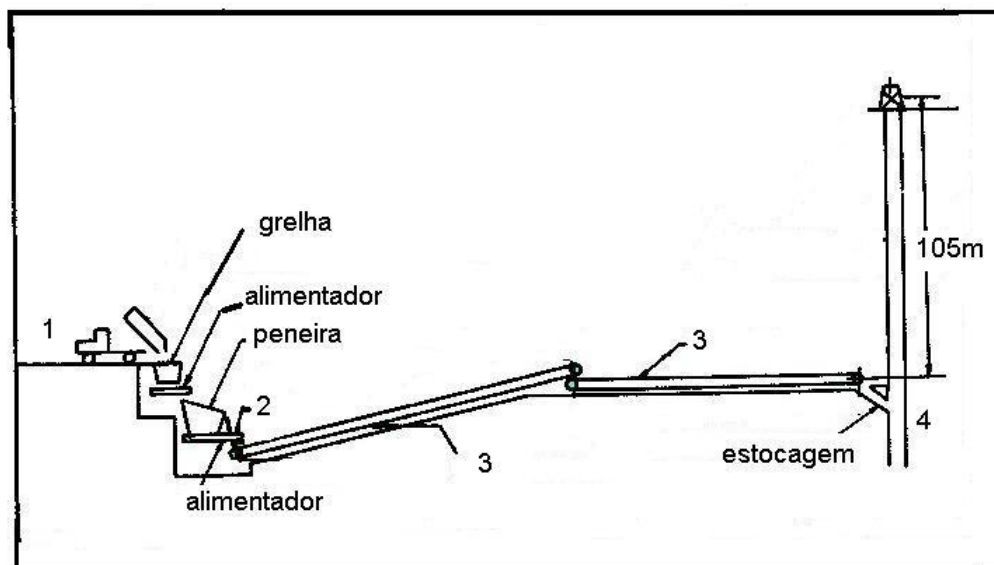
1. caminhão; 2. britador; 3. passagem de minério; 4. vagões

Figura 3.13 – Sistema de transporte de material fragmentado na Mina de Kiruna (Suécia), conforme PFLEIDER *et al* (1968).



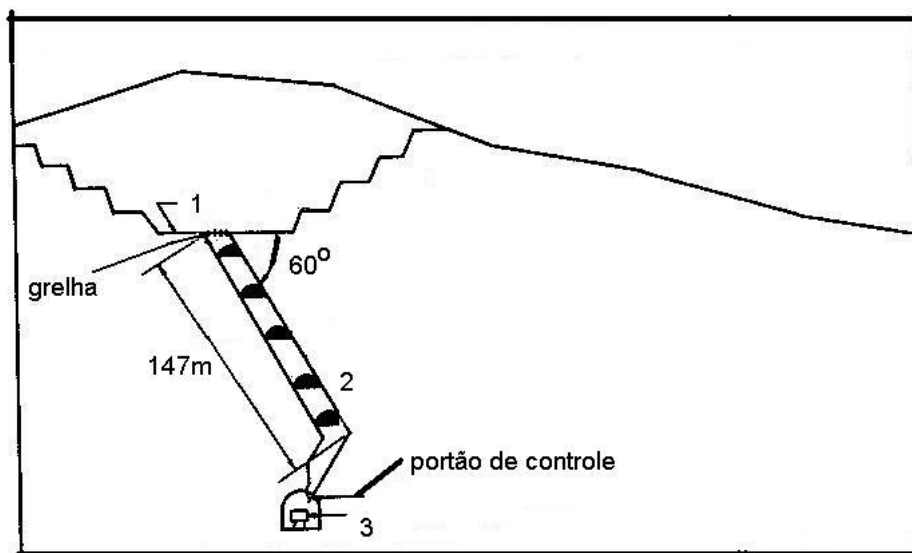
1. caminhão; 2. britador; 3. passagem de minério; 4. correia transportadora

Figura 3.14 – Sistema de transporte de material fragmentado na Mina de Spruce (EUA), conforme PFLEIDER *et al* (1968).



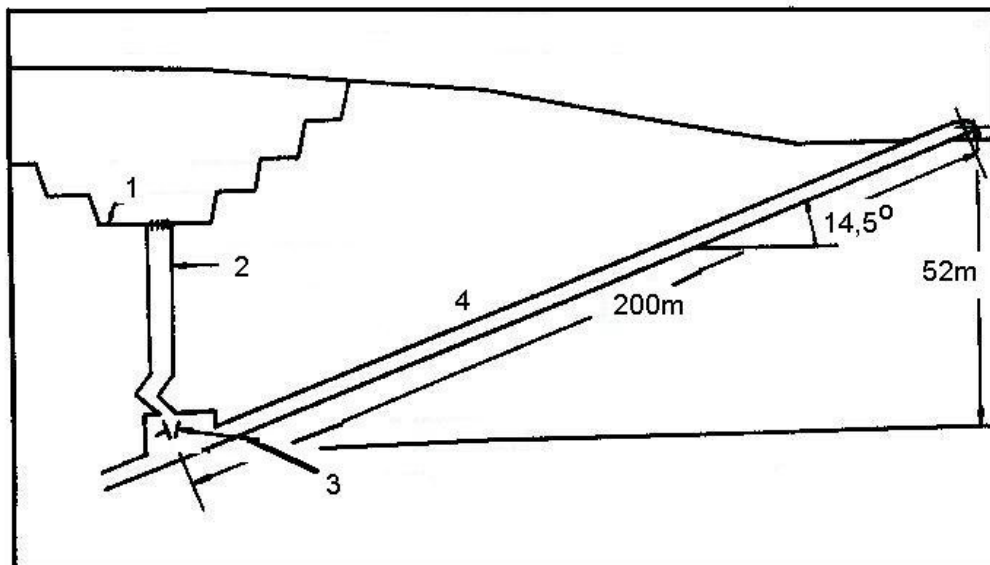
1. caminhão; 2. britador; 3. correia; 4. poço vertical

Figura 3.15 – Sistema de transporte de material fragmentado na Mina de Susquehanna (EUA), conforme PFLEIDER *et al* (1968).



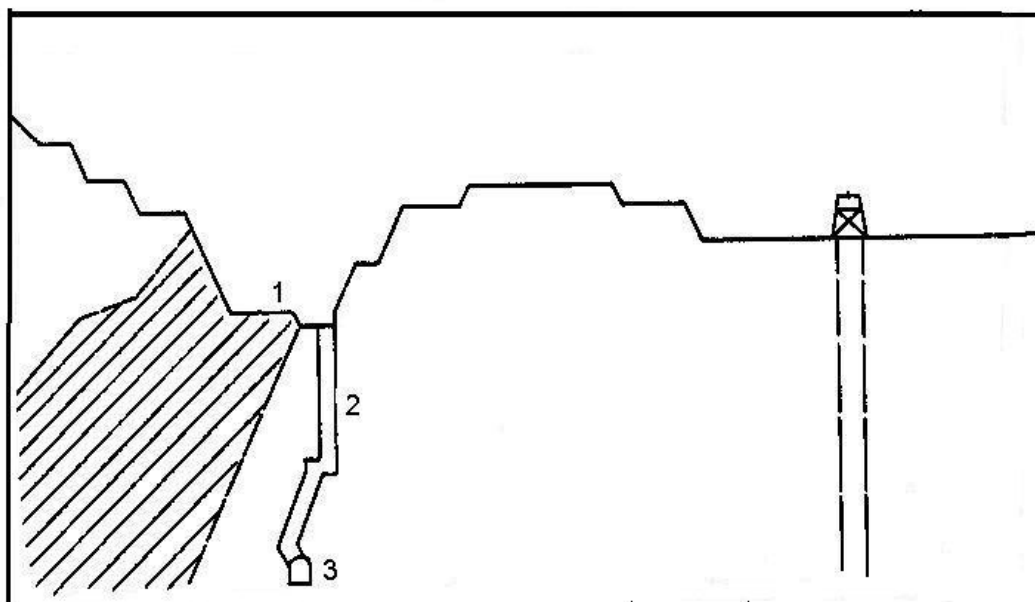
1. caminhão; 2. passagem de minério e inspeção; 3. vagões

Figura 3.16 – Sistema de transporte de material fragmentado na Mina Consolidated (EUA), conforme PFLEIDER *et al* (1968).



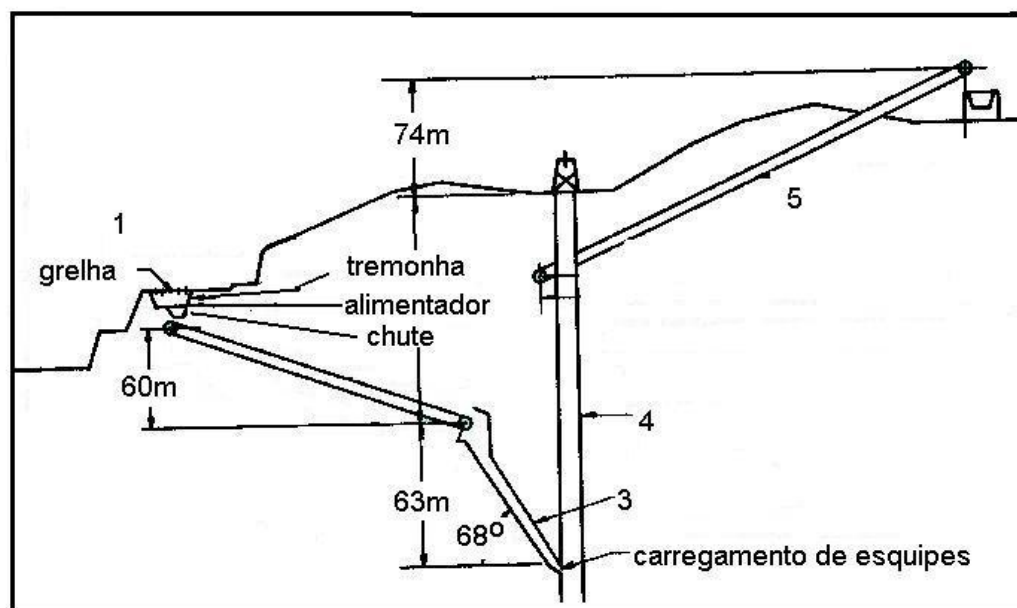
1. caminhão; 2. passagem de minério; 3. britador; 4. correia transportadora

Figura 3.17 – Sistema de transporte de material fragmentado na Mina Algoma (Canadá), conforme PFLEIDER *et al* (1968).



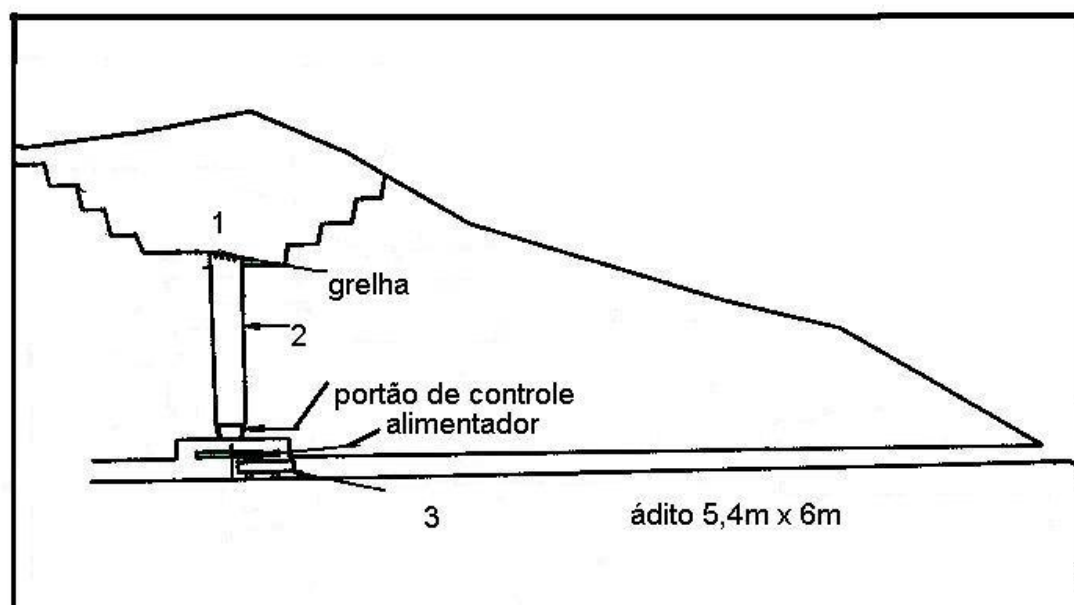
1. caminhão; 2. passagem de minério; 3. vagões

Figura 3.18 – Sistema de transporte de material fragmentado na Mina de United Verde (EUA), conforme PFLEIDER *et al* (1968).



1. caminhão; 2. correia; 3. passagem de minério; 4. poço; 5. correia

Figura 3.19 – Sistema de transporte de material fragmentado na Mina de Caland (Canadá), conforme PFLEIDER *et al* (1968).



1. caminhão-carregadeira; 2. passagem de minério; 3. composição de vagões

Figura 3.20 – Sistema de transporte de material fragmentado na Mina de Carol (Canadá), conforme PFLEIDER *et al* (1968).

Em minas brasileiras, entre as lavradas pelo método de câmaras e pilares, na Mina de Morro Agudo, de zinco e chumbo, da CMM, o transporte de minério e de estéril é feito por caminhões em rampa, até a passagem, que descarrega em silos, de onde são içados em esquipas; na Mina de Taquari Vassouras, de potássio, da CVRD, utilizam-se esquipas e carregadeiras LHD; na Mina de Piteira, da Belmont, lavra de esmeralda, Itabira (MG), o material é estocado em um silo, transferido para uma passagem, após ser transportado por plano inclinado, através de rastelo.

Entre as minas lavradas pelo método de corte e enchimento, na Mina de Cuiabá, de ouro, da AngloGold, Sabará (MG), utilizam-se caminhões, carregadeiras LHD e esquipas para o transporte de minério fragmentado; na Mina de Morro da Usina, de zinco, da CMM, Vazante (MG), o corpo de minério tem altura média de 15m e largura de 10 a 30m, o transporte era realizado por carregadeiras LHD e caminhões que transferiam o material para as passagens, dessas para o silo da câmara de britagem e finalmente era içado por esquipas. Recentemente o método de lavra foi alterado para o VRM (*Vertical Retreat Mining*), variante do alargamento em subníveis. A mina de fluorita, da Cia Nitroquímica/Votorantim, em SC, utiliza passagens de minério verticais de dois estágios, com grelha de malha quadrada (PINTO, 2004). A Mina de São Bento, da São Bento Mineração/Eldorado, lavra de ouro, utilizou o fluxo por gravidade de material fragmentado por passagens. A Mina de Raposos, de ouro, da AngloGold, Raposos (MG), utilizava passagens no transporte vertical de minério e de material de enchimento (MENDES, 1995).

Na Mina de Ipueira, da FERBASA, lavrada por abatimento em subníveis, o minério é transportado por carregadeiras LHD para as passagens de minério, que têm diâmetro de 3m (AMORIM, 2004). Na Mina de Fazenda Brasileiro, lavra de ouro, da Mineração Fazenda Brasileiro/Yamana, quando executada por abatimento em subníveis, utilizavam-se passagens, esquipas, carregadeiras LHD e caminhões em rampa.

Entre as minas lavradas por alargamento em subníveis, na Mina de Caraíba, da Mineração Caraíba, de cobre, lavrada por alargamento em subníveis, o transporte utiliza carregadeiras LHD, caminhões rebaixados e esquipas (ANDRADE e SÁ, 2002); na Mina do Baltar, da Mineração Santa Helena, em Votorantim (SP), na lavra de calcário por alargamento em subníveis, o minério fragmentado é transportado por caminhões, é estocado em silo de 2200t e há a transferência do minério por meio de

correia transportadora até a superfície; na Mina de Jacobina, lavra de ouro por alargamento em subníveis, conforme SILVA (1993), utilizavam-se passagens de minério, carregadeiras LHD e trens ou esquipas. Na Mina de Tanguá (RJ), mina de fluorita da EMITANG, a lavra é por subníveis em recuo; o material fragmentado, correspondente a um subnível de 20m, é transferido para passagens de minério e de estéril (1,5m de diâmetro, vertical, comprimento de 17 a 22m), sendo colocado em vagonetas e içado à superfície (MATTA, 2005).

#### **3.4.4. Segurança em escavações com fluxo por gravidade**

Organismos de países com tradição na mineração como o NIOSHI (*National Institute for Occupational Safety and Health*), dos Estados Unidos (antigo *Bureau of Mines*), o JKRCM (*Julius Kruttschnitt Mineral Research Center*), da Universidade de Queensland, Austrália e o SIMRAC (*Safety in Mines Research Advisory Committee*), da África do Sul se dedicam a estudar questões de segurança no trabalho em mineração. No Brasil, o IBRAM (Instituto Brasileiro de Mineração) manteve durante os anos 80, do século XX, um grupo de trabalho de Segurança em Mineração.

Vários fatores justificam o estudo de fluxo por gravidade de material. As operações que envolvem o fluxo de material fragmentado são as operações potencialmente mais arriscadas em mineração subterrânea (BEUS *et alii*, 1997). Os colapsos em passagens reforçaram a necessidade de se melhorar métodos de projeto, padrões e métodos de monitoramento e técnicas de prevenção e remoção de bloqueios.

As estatísticas de acidentes pessoais por empresa existem, mas são sigilosas e dificilmente disponibilizadas. Os dados da mineração não são facilmente obtidos, pois, muitas das vezes, não estão individualizados, sendo abrangidos pela indústria extrativa como um todo. Outra característica é que se estima que cerca de metade dos acidentes não são informados ou, quando informados, apresentam erros no preenchimento dos dados, o que classifica o evento em outra atividade econômica.

IVERSON e BEUS (2003) relatam pesquisa do NIOSHI, com objetivo de reduzir a frequência de eventos e fatalidades relacionados com estocagem e com transporte de material fragmentado na mineração. Segundo os autores, em estruturas como silos, o impacto da queda de partículas pode causar danos e ruptura em paredes e comportas

de descarga. A formação de arco de material e as rupturas estruturais em silos, tremonhas e passagens causam acidentes nas indústrias.

No transporte por gravidade de material fragmentado em passagens, são muitos os problemas de fluxo, como as causas apontadas para estas dificuldades e para os acidentes. Os dados disponíveis revelam fatalidades relacionadas com o manuseio e com a estocagem em silos e tremonhas. De 1992 a 1998, os dados do *Bureau of Labor Statistics* revelaram 229 acidentes ocupacionais fatais relacionados com o trabalho de estocagem de material granular nos EUA (IVERSON e BEUS, 2003).

Estatísticas abrangendo vinte anos, do *U. S. Mine Safety and Health Administration* (MSHA), mostraram que, nos EUA, 75% dos acidentes em minas subterrâneas, entre 1975 e 1995, estavam relacionados com problemas operacionais em chutes de passagens de minério, ao uso de ferramentas nas passagens de minério, com quedas de rocha fragmentada e rupturas estruturais de chutes ou portões, com o treinamento e com ruptura das paredes de passagens de minério (BEUS *et alii*, 1997). O NIOSHI investiga riscos nas operações em passagens em minas de rochas resistentes e estuda critérios de projeto para passagens de minério.

De acordo com STACEY e SWART (1997), entre 1988 e 1995, na África do Sul, de 651 acidentes registrados em onze minas subterrâneas pouco profundas (de platina e cromo), relacionados com operações de fluxo de minério por gravidade, 53 deles foram fatais.

No Peru (MAGALHÃES, 2003, dados do Ministério de Energia e Minas), em 2002, baseado em empresas com mais de 500.000 horas-homem trabalhadas (60 minas), houve uma freqüência média de 6,3 acidentes /  $10^6$  horas-homem trabalhadas.

São gastos no Brasil cerca de US\$ 20 bilhões/ano com acidentes de trabalho nas diversas atividades. De acordo com GERMANI (2002), será necessário reverter o quadro por meio de maior atenção dos profissionais, especialmente analisando as situações de maior risco potencial. São poucas operações mecanizadas; em algumas minas co-existe certa produção semimecanizada e o padrão tecnológico operacional apresenta alguma homogeneidade, havendo maior desenvolvimento em uma ou outra área em determinada empresa ou mina, conforme as dificuldades locais.

A mineração liderou em 2002 os índices de acidentes de trabalho, quando comparado com outras atividades econômicas, com 29 casos em cada cem mil acidentes, com a maioria deles ligados à mineração subterrânea (Rede Globo, julho/2002). De acordo com GERMANI (2002), a indústria mineral brasileira apresentou também nos períodos de 1995 a 1997 o mais alto coeficiente de mortalidade.

Na distribuição entre atividades brasileiras, a indústria extrativa se posiciona, nos últimos anos, entre o 9º. e o 12º. lugares (com 1 a 2% dos acidentes). Em 2000, considerando-se dados dos maiores estados mineradores, a indústria mineral teve cerca de 33 acidentes fatais/100 mil trabalhadores. Segundo ANGLOGOLD (2000), o índice de frequência médio de acidentes em suas minas, entre 1990 e 2000, foi de 84/10<sup>6</sup> horas-homem trabalhadas. A tabela III.5 mostra uma diminuição dos óbitos na mineração no Brasil.

O estabelecimento das estatísticas de acidentes e as visitas de campo para caracterizar e quantificar os problemas de projeto de passagens resultou na identificação e quantificação de numerosas relações de causa e efeito. Por exemplo, os bloqueios e problemas estruturais podem continuar com o avanço da lavra por causa de mudanças nas propriedades de fluxo dos materiais durante a vida da mina (como exemplo com mudanças na forma das passagens como resultados das tensões atuantes nas paredes), de desgaste, do desmonte por explosivos e do fraturamento (BEUS et *alii*, 1997). Por causa da complexidade da questão, é útil estabelecer-se um diagrama que evidencia os grupos de fatores para a ruptura em passagens de minério, conforme destacado na figura 3.21. Esses fatores seriam aqueles relacionados com as condições geomecânicas, com o fluxo de material, com o treinamento e com a geometria/localização das escavações.

Tabela III.5 - Dados de fatalidades na mineração no Brasil - 1970/2002 (Ministério do Trabalho e do Emprego do Brasil, 2004).

Período	Óbitos	Acidentes	Empregados
Anos 70	30	13.696	12.428.828
Anos 80	22	5.388	21.077.804
Anos 90	17	1.998	23.648.000

Para STACEY e SWART (1997), os principais tipos de acidentes associados com sistemas de manuseio de rocha são queda, rolamento e deslizamento de material. As maiores causas de acidentes são as rupturas associadas aos padrões de trabalho e à ausência de prevenção. As questões principais que levam aos acidentes na região de pontos de carregamento, gavetas, passagens e chutes são de projeto, procedimento, treinamento e gestão de manuseio. Acredita-se que a área mais crítica para mudança seja o desenvolvimento de treinamento para os trabalhadores das minas.

Outra questão está relacionada com a formação diversificada dos profissionais que cuidam do manuseio de materiais. O sucesso do projeto e da operação de passagens de minério e de silos depende de duas ciências diferentes. A integridade das paredes e pilares de proteção é uma função da engenharia de rochas, enquanto especialistas em manuseio de materiais são treinados para lidar com as características de fluxo da rocha fragmentada. A maioria das minas não tem técnicos em manuseio em seus quadros; portanto, as responsabilidades ficam para o setor de engenharia de rochas.

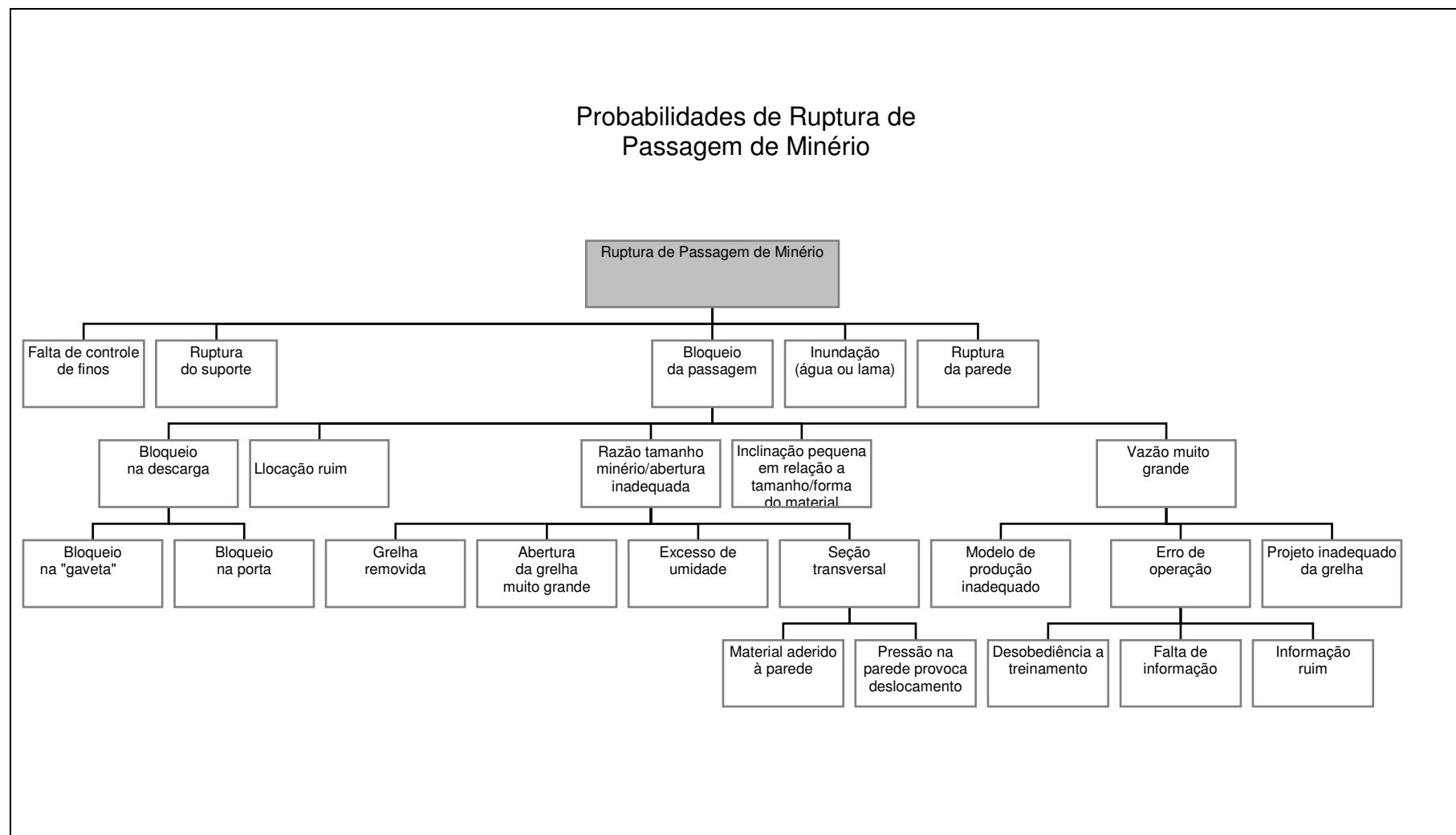


Figura 3.21 – Diagrama parcial de fatores para a ruptura em passagens de minério (BEUS *et alii*, 1997).

### **3.5. Padrão de fluxo em escavações subterrâneas**

#### **3.5.1. Comportamento mecânico do material granular**

Os materiais granulares são comuns na natureza e na indústria (de petróleo, plásticos, papel, química, tintas, mineração, dentre outras), de modo que os problemas relacionados ao fluxo desses materiais são amplamente discutidos em vários campos da engenharia e são foco de várias pesquisas na Engenharia e também na Física. O fluxo de material granular depende de parâmetros, como: rugosidade e tensões na parede confinante, geometria do fluxo, taxa de fluxo, forma e tamanho das partículas, interação com o fluido intersticial.

O estudo de fluxo de materiais tem se subdividido no estudo do escoamento de fluidos e do escoamento de sólidos, sendo o entendimento desse último bem mais limitado. Apesar da simplicidade aparente do sistema, o comportamento de material granular é complexo, englobando propriedades de sólidos e comportamento semelhante ao de gases, dependendo do regime de fluxo.

O comportamento mecânico do material granular apresenta ainda diversas questões sem resposta. Reologia significa, etimologicamente, o estudo de deformação e fluxo de matéria. Entretanto, no uso comum, é um termo geral que cobre o comportamento dos materiais em relação às tensões sofridas e as deformações resultantes e também as propriedades de fluxo.

De acordo com MCCABE e SMITH (1956), massas de partículas sólidas não aglomerantes, têm várias das propriedades de um fluido, com pressão nas laterais e nas paredes do reservatório e fluxo através de aberturas ou chutes de descarga. Os autores fazem uma analogia entre o fluxo de material granular e o fluxo de fluidos não-newtonianos. Quando são impostas ao material deformações lentas, ele se comporta como um sólido. Esse limite quase-estático é descrito pela plasticidade e tem sido estudado pela mecânica dos solos. Noutro extremo, quando o material granular é submetido a forte agitação, o meio é diluído e as partículas interagem através de colisões binárias, podendo-se fazer uma analogia à cinética dos gases. Entretanto o fluxo é usualmente denso, devido à dissipação (atrito, colisões) e ao confinamento. O material nesse regime é similar a um líquido, mas com reologia mais complexa.

Uma característica importante do material granular é a sua pequena resistência a forças de contato. A utilização de modelos de pilhas granulares mostrou que a distribuição de forças de contato nelas é altamente desordenada, observando-se uma distribuição com regiões de grandes forças aplicadas, circundando regiões que suportam cargas relativamente pequenas, conforme DRESSCHLER e JOSSELIN (1972), citados por ODA *et al* (1999). SMID (1975) e REIMBERT e REIMBERT (1959) entre outros autores que tratam das pressões nas paredes dos silos, discutiram a determinação, a partir das pressões, da espessura da parede de reservatórios (HERMANN *et alii*, 1998).

Há duas abordagens complementares no estudo da reologia: a mecânica do contínuo e a microfísica (RANALLI, 1995). Um objetivo perseguido no estudo da mecânica de materiais granulares é formular o modelo de seu macro-comportamento em termos de propriedades microscópicas. Para SHINOHARA e TUZUN (2002), não existe um entendimento consumado dos efeitos das propriedades individuais de partículas no comportamento quando em fluxo e no campo de tensões. O comportamento micromecânico desses materiais é inerentemente descontínuo e heterogêneo. O comportamento macroscópico de materiais granulares é determinado não somente pela forma como as partículas estão arranjadas espacialmente, mas também por quais tipos de interações estão acontecendo entre elas.

Ainda é um problema entender-se como essa distribuição de forças afeta grandezas macroscópicas como tensões e deformações. Os experimentos realizados na última década estudaram como a distribuição de forças de contato em um material granular varia espacialmente (HERMANN *et alii*, 1998).

Segundo STAGG *et al* (1968), o conceito de meio contínuo ideal não se aplica aos meios granulares. Para ODA *et al* (1999), mesmo na mecânica de materiais granulares, alguns conceitos da mecânica do contínuo são necessários para explicar fenômenos de maneira consistente, já que o número de graus de liberdade de forças de contato e movimentos em nível de partícula se torna muito grande. Para BEUS *et alii* (1997), as partículas contidas em uma passagem são uma combinação de sólidos adequada para análise pela mecânica do contínuo. A análise do material resultante requer a identificação de fragmentos de rocha bem como uma consideração do comportamento coletivo de finos e interação entre as partículas.

Em sistemas granulares as forças de contato entre partículas adjacentes geram deformação, que por sua vez ocasiona aumento da área de contato entre elas. O rearranjo ocorre quando a força de cisalhamento supera a resistência no contato, resultando no deslizamento. A deformação total de uma massa de material granular é parcialmente dada pelas deformações unitárias de partículas e parcialmente pelo deslizamento relativo entre partículas. Ela é não linear e irreversível, uma vez que é controlada principalmente pelo deslizamento e pelo rearranjo espacial de partículas.

DRAKE (1990) e AZANZA (1998), ambos citados por POULIQUEN e CHEVOIR (2002), caracterizam o fluxo denso em que são formados agregados de partículas, mas que são rapidamente quebrados pelo cisalhamento. Acontece uma dinâmica de formação de arco e de quebra de forças em cadeia. Conforme BEUS *et alii* (2001), o fluxo granular é mesmo essencialmente um processo de contínua ruptura por cisalhamento de material, governado pela gravidade contra o atrito e a coesão.

Boa parte do estudo de solo ou material granular concentra-se no atrito e na adesão entre os elementos, com base em medições experimentais.

O material granular é algumas vezes idealizado como um conjunto de partículas rígidas. O movimento relativo de partículas rígidas, que leva à macro-deformação, acontece como resultado de deslizamento e rolamento nos pontos de contato.

Se não existe o atrito nos contatos, o material granular não pode suportar as forças cisalhantes aplicadas. A resistência geral à força aplicada é gerada pelo chamado intertravamento de partículas, se o atrito atuar nos pontos de contato. Para ODA *et al* (1999), o atrito tem um papel dominante no controle da macro-deformação e na resistência de materiais granulares. O mesmo autor argumenta que o ângulo de atrito interno não é uma constante física. Ele depende da taxa de vazios, do arranjo partículas-vazios (*fábrica*) e do estado de tensões. Um meio granular deve, portanto, ser mais que um material sujeito ao atrito. O ângulo de atrito do material consiste de vários componentes, não simplesmente do coeficiente de atrito entre partículas. O termo *fábrica*, cuja etimologia latina significa estrutura, é usado para se referir ao arranjo espacial de partículas e vazios associados.

### 3.5.2. Regras básicas do fluxo por gravidade

As deduções básicas das regras do fluxo de material fragmentado, conforme JANELID e KVAPIL (1966), podem ser explicadas mais simplesmente pelo movimento de material granular num recipiente. O volume em movimento tem forma de um elipsóide de revolução alongado, conforme a figura 3.22. O movimento das partículas quando acontece o fluxo por gravidade obedece a certas regras. Os estudos através de modelos experimentais mostraram que o material que escoar através de uma abertura de descarga é originário de uma região que tem a forma de um elipsóide, localizado acima dessa abertura.

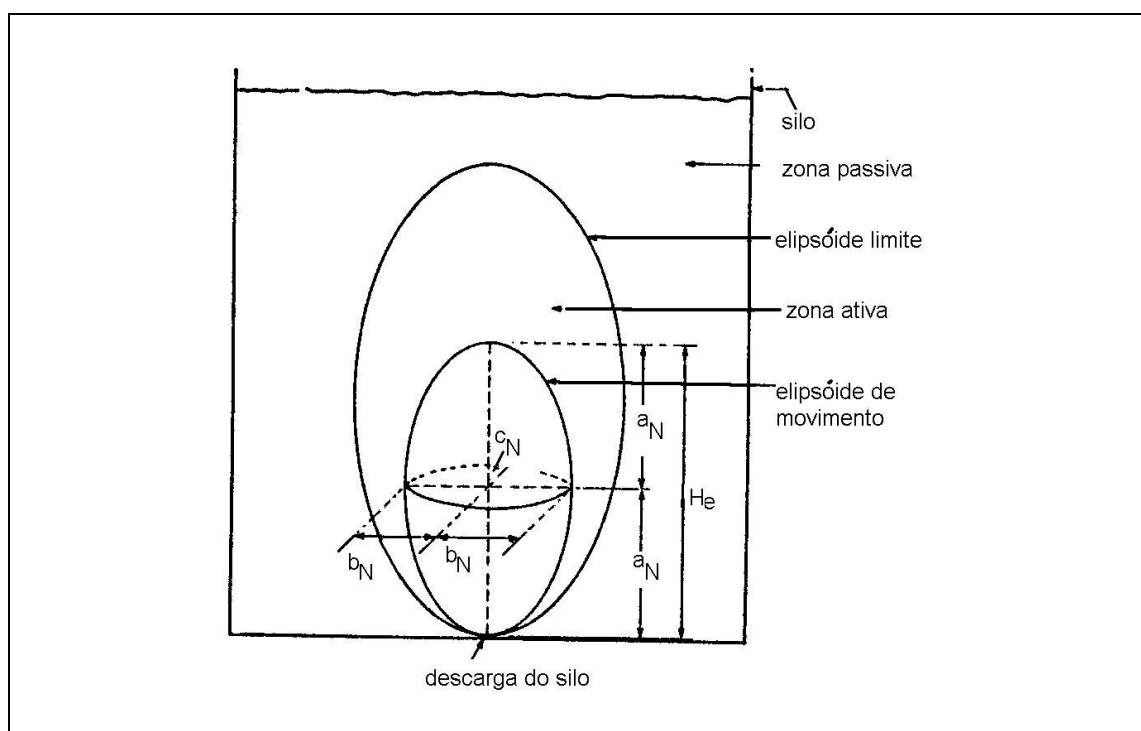


Figura 3.22 – Elipsóide de movimento (TROTTER e GODDARD, 1981).

Considerando-se um ponto N que está a uma altura  $H_N$  no eixo vertical da abertura de descarga, no plano horizontal n formado pela interface de materiais (figura 3.23-a), quando a descarga é aberta, o material começa a escoar e o ponto N avança para a descarga. O plano originalmente retilíneo da interface se curva para baixo devido à descarga de material (figura 3.23-b). No momento em que o ponto N alcança o plano da abertura de descarga, um certo volume  $V_N$  de material granular já deixou o reservatório (figura 3.23-c). Esse volume não é aleatório, mas vem exatamente da

zona já descrita, muito similar a um elipsóide de revolução alongado. Por essa razão, é chamado de elipsóide de movimento  $E_N$  (figura 3.24). A deflexão do plano inicial vai gerar um funil, representado pelo funil  $K_N$ , cujo diâmetro é  $H_N$  e o ápex corresponde ao ponto de descarga. O volume esvaziado é  $V_N$ . Os volumes  $V_N$ ,  $E_N$  e  $K_N$  são aproximadamente iguais.

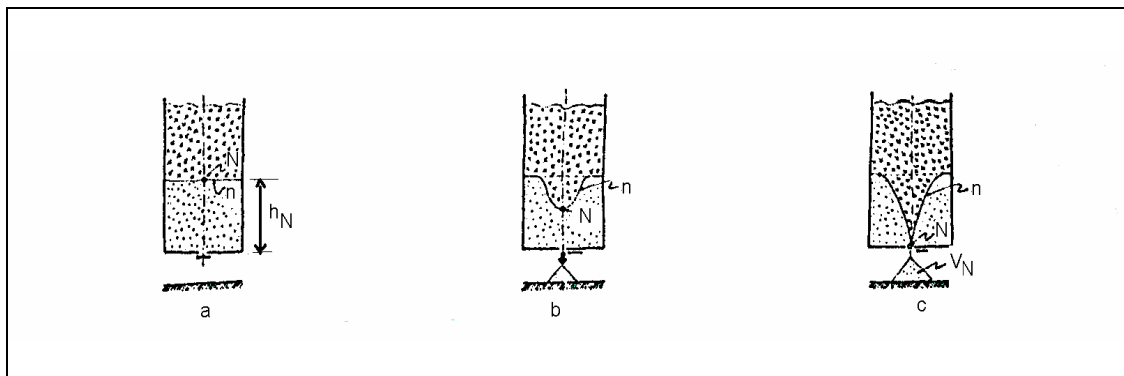


Figura 3.23 – Processo de fluxo de material (JANELID e KVAPIL, 1966).

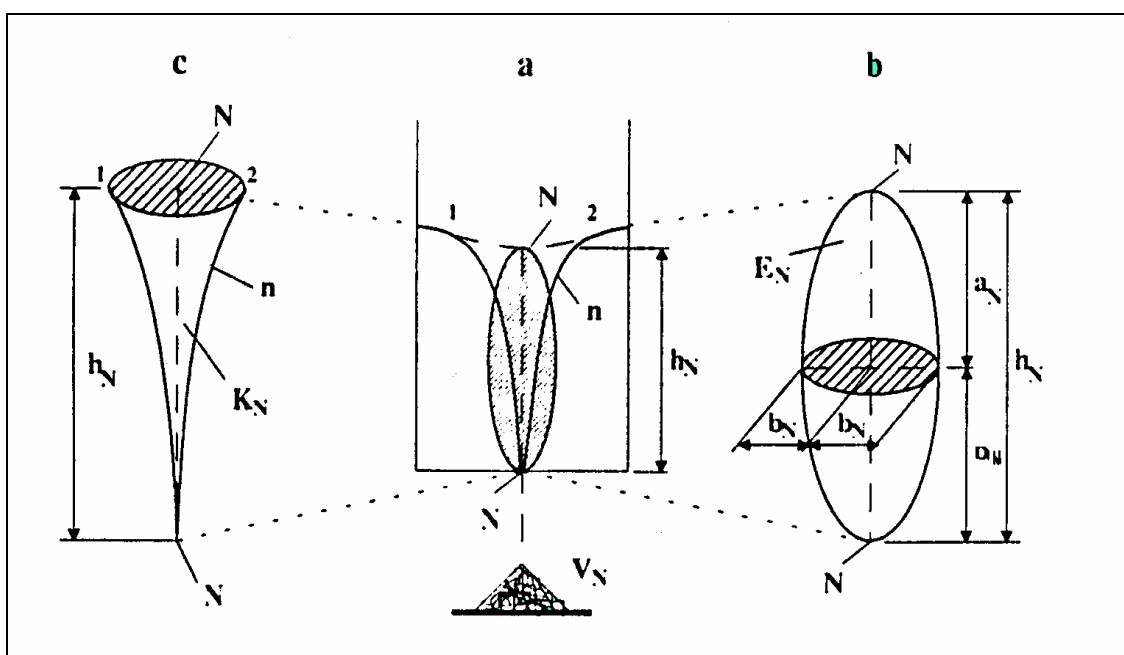


Figura 3.24 – Zonas de movimento durante o processo de fluxo de material (JANELID e KVAPIL, 1966).

Podem ser distintos no elipsóide seu semi-eixo maior  $a_N$  e seus semi-eixos menores ( $b_N$  e  $c_N$ ), que podem ser determinados a partir do conhecimento da excentricidade e da altura do ponto N em questão.

O volume do elipsóide de movimento depende da excentricidade ( $\epsilon$ ). A excentricidade é também governada pelo efeito dos fatores: forma das partículas, propriedades mecânicas do material, umidade contida, rugosidade das paredes, do fenômeno de afrouxamento (inverso à compactação) e de forças externas. A forma do elipsóide é definida pela sua excentricidade ( $\epsilon$ ):

$$\epsilon = \frac{1}{h_e} \sqrt{h_e^2 - 4b_N^2} \quad (8)$$

Onde:  $b_N$  = semi-eixo menor do elipsóide de movimento [m],

$h_e$  = altura do elipsóide de movimento [m].

Considerando o volume do elipsóide ( $V_e$ ) e seu semi-eixo maior ( $a_N$ ),

$$V_e = \frac{1}{3} (4\pi a_N b_N^2) \quad ; \quad a_N = \frac{h_e}{2} \quad ;$$

obtemos a expressão do semi-eixo menor como:

$$b_N = \frac{\sqrt{3 V_e}}{\sqrt{4 \pi a_N}} \quad ; \quad b_N = \frac{\sqrt{6 V_e}}{\sqrt{4 \pi h_e}} \quad ; \quad \text{e, finalmente:}$$

$$b_N = \frac{\sqrt{V_e}}{\sqrt{2,094 h_e}} \quad (9)$$

JANELID e KVAPIL (1966) apresentam ainda um resumo dos resultados obtidos por cálculos teóricos, experimentos em modelos e ensaios em larga escala, relativos a problemas no método de lavra subterrânea de abatimento em subníveis. Os autores afirmam a existência de um elipsóide de fluxo limite  $E_g$  e que não há movimento no limite desse elipsóide. Considerando uma partícula no ápex do elipsóide, ela percorre em um certo tempo uma distância  $x$ . A altura inicial do elipsóide de velocidade reduz-se para  $h_e - x$ . Como o ápex se move, todas as partículas nos contornos do elipsóide de mesma velocidade o fazem com a mesma velocidade.

Durante esse processo o centro desse elipsóide de velocidades  $E_v$  também muda. Isso significa que, no mesmo tempo em que as partículas percorrem a distância  $x$ , o elipsóide de “isovelocidade” percorre  $x$  e seu centro percorreu cerca de  $x/2$ .

As regras em relação ao fluxo por gravidade de materiais granulares não sofrem quaisquer mudanças básicas sempre que o fluxo se mantém simetricamente ao eixo vertical. Se a abertura de descarga não se situa no centro da base do silo, mas na sua lateral, a linha central do fluxo se desvia da perpendicular de um ângulo que se torna maior quando o atrito ao longo das paredes aumenta. O elipsóide se modifica. É o que acontece na lavra por abatimento.

JANELID e KVAPIL (1966) concluem que, com relação à distribuição de velocidade no fluxo por gravidade, as condições estabelecidas anteriormente se aplicam a esses casos.

A altura do elipsóide ( $h_e$ ) pode ser expressa numa forma simplificada pela razão da largura de saída ( $e$ ) pela largura de entrada ( $w$ ) do fluxo. A figura 3.25 mostra estas dimensões. No caso de materiais em fluxo livre,  $e$  é muito menor que  $w$ . O fluxo por gravidade é mais estreito (mais paralelo) quando a razão  $e/w$  se aproxima de 1,0. Quando  $e/w = 1,0$ , o fluxo é completamente paralelo.

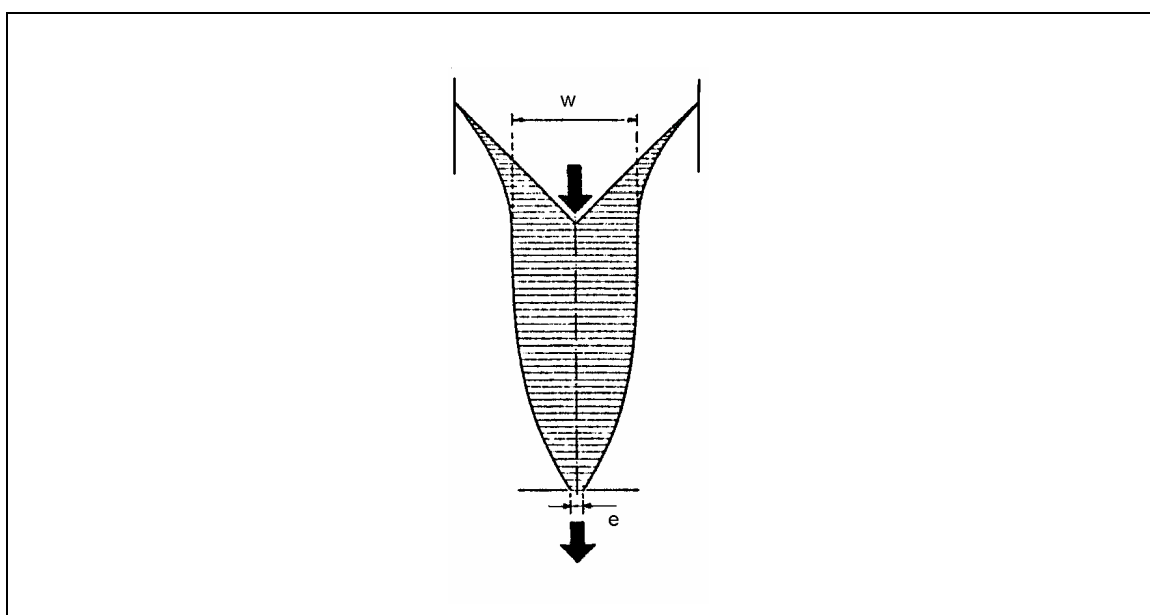


Figura 3.25 - Largura de saída ( $e$ ) e largura de entrada ( $w$ ) do fluxo (KVAPIL, 1965 a).

A forma do fluxo por gravidade depende de vários fatores inter-relacionados. A razão  $e/w$  depende das propriedades do material grosseiro, principalmente do tamanho da partícula, da altura do fluxo, da área de extração e da velocidade de percurso do material, dada pela velocidade de extração. O aumento dessas grandezas torna mais estreito o elipsóide de movimento (JANELID e KVAPIL, 1966).

A variação da largura do fluxo móvel ( $a$ ), ou seja, da largura do elipsóide de movimento, também depende da largura da abertura de descarga ( $e$ ). Uma maior largura de saída, para o mesmo material fragmentado, resulta em uma menor redução do fluxo móvel. A largura de saída crítica depende do tamanho de partícula e das propriedades do material grosseiro.

Na figura 3.26 são mostradas as características da influência da razão  $e/w$  para os tipos de materiais mostrados na figura 3.4. Mostra também a forma de silo básica como função do tipo de material e da relação  $e/w$ . Pode ser usada para determinar a forma correta do silo (quadro hachurado); mostra ainda a seleção de silos subdimensionados (quadro com linhas cruzadas) e superdimensionados (quadro em branco).

A localização dos entupimentos em reservatórios pode ser governada pela forma e pelas dimensões do canal. Os entupimentos diminuem a largura do canal de fluxo. Como a maioria dos bloqueios ocorre onde a dimensão do canal é a menor, os projetos são selecionados de modo que esse ponto ocorra próximo ao ponto de extração.

É surpreendente que vários silos tenham volumes ativos da ordem de 20 a 30%. Isso pode ser encontrado muitas vezes com silos com descarga através de várias aberturas. A razão é que a distância entre as aberturas de descarga ( $p$ ) é maior que a largura do fluxo móvel ( $a$ ). Dessa forma surgem zonas passivas entre os fluxos móveis. O ideal para limitar as zonas passivas é  $p < a$ , como mostra a figura 3.27.

Apesar das diferenças entre o fluxo em silos e em escavações, a teoria e os princípios de fluxo em um silo podem ser usados para descrever o fluxo por gravidade de material em uma lavra com abatimento em subníveis. Ele é comparado ao fluxo de

material granular em um silo em que a saída de descarga é na lateral, porque no abatimento o fluxo é cortado pela fatia de minério não desmontada.

O fluxo por gravidade nos métodos de lavra por abatimento difere do fluxo em silos, descrito no item 3.3.3, nos seguintes aspectos (TROTTER e GODDARD, 1981):

- as razões da largura do fluxo pela altura do fluxo são menores que as usuais em silos tipo *bunkers*;
- existe uma maior variação na massa específica do material fragmentado, pois acontece o fluxo de minério e o fluxo de estéril, enquanto no silo usualmente acontece o fluxo de um só material;
- acontecem maiores pressões do material sobrejacente porque os *bunkers* não são tão altos, ocasionando menor altura de material;
- a presença de uma face sólida em um lado, que é o leque ainda não desmontado, enquanto o material no silo é cercado por quatro paredes sólidas.

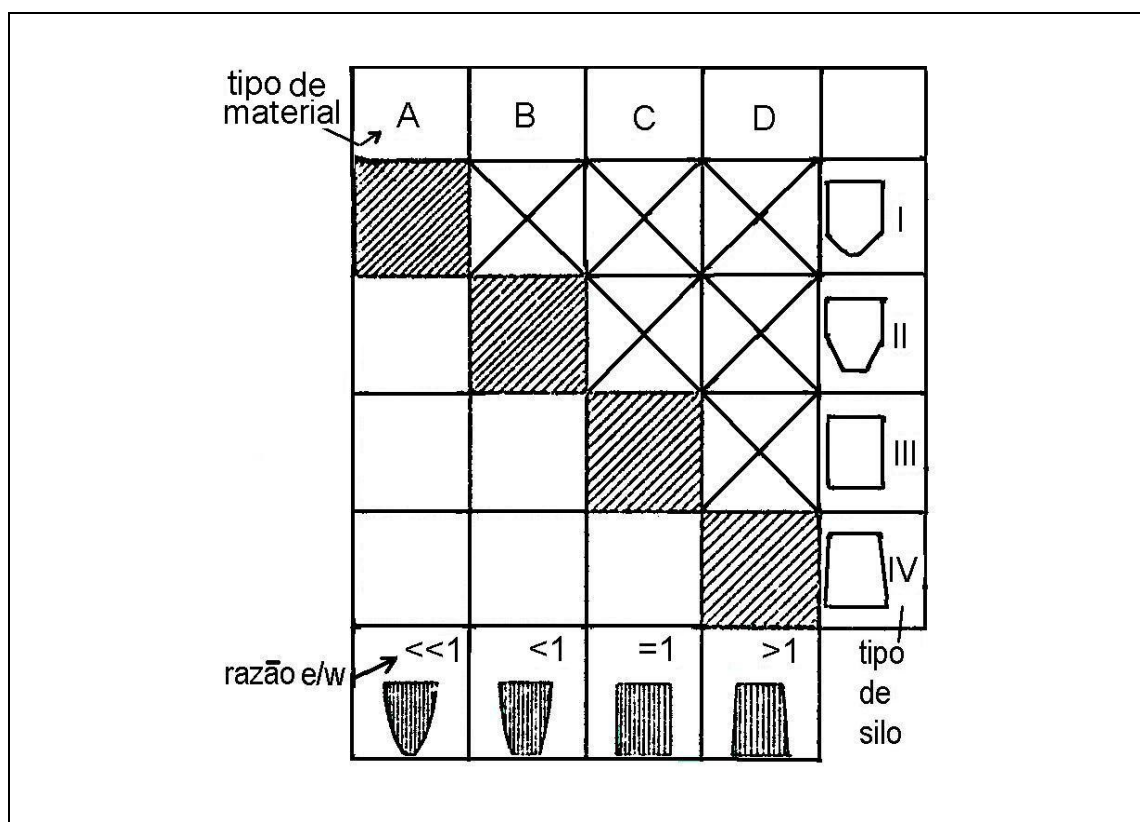


Figura 3.26 – Seleção do silo para os tipos de materiais grosseiros (KVAPIL, 1965 a).

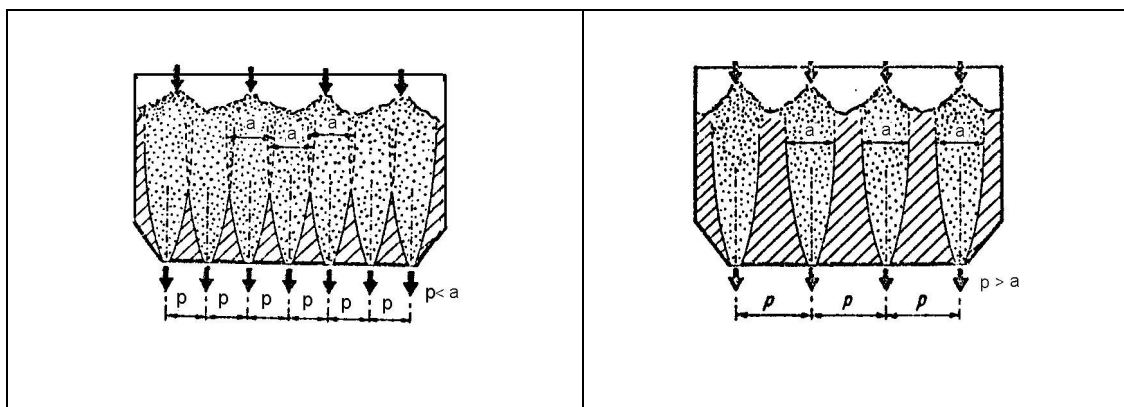


Figura 3.27 – Relação entre a largura do canal de fluxo e a distância entre as saídas de descarga (KVAPIL, 1965 a).

### 3.5.3. Problemas de fluxo por gravidade em passagens de minério

Para se movimentar todo o material na passagem, ele deve ser retirado por toda a área da seção transversal da mesma, para se evitar os problemas de fluxo. Os seguintes problemas podem afetar o desempenho em passagens de minério, segundo HAMBLEY (1987):

- 1- entupimentos devido a arcos coesivos;
- 2 - bloqueios devido a arcos mecânicos (de intertravamento) ;
- 3 - suspensão de fluxo, quando o material forma um canal de fluxo vertical estável no interior da passagem;
- 4 - desgaste do revestimento e/ou deslocamento das paredes da passagem.

As formações de arcos e de canal de fluxo foram definidas no item 3.3.3. O desgaste de paredes de passagens é altamente localizado e dependerá das propriedades físicas da rocha fragmentada, especialmente da abrasividade, e da resistência das paredes. Conforme HAMBLEY (1987), onde os entupimentos têm sido um problema, seja por arcos coesivos ou de intertravamento, as passagens são operadas tão próximos do vazio quanto o possível. A coluna de material ( $H_m$ ) recomendada é:

$$H_m = \frac{1}{2} \left[ (D - D_o) \tan \left( 45 + \frac{\phi}{2} \right) \right] \quad (10)$$

## **3.6. Projeto de fluxo por gravidade em sistemas de passagens de minério**

### **3.6.1. Introdução**

O projeto de passagens de minério tem componentes estruturais e operacionais interdependentes. Os componentes estruturais estão associados principalmente à estabilidade das paredes das escavações, ao revestimento e aos chutes ou portões de controle. O projeto operacional está relacionado ao fluxo ou aos bloqueios de material fragmentado (BEUS *et alii*, 1997).

Os padrões de projeto existentes para passagens são regras essencialmente baseadas em análises de equilíbrio, experimentos em modelos, observações empíricas e na experiência. As indicações das estatísticas de acidentes não são suficientes. Os desenvolvimentos analíticos correntes tendem a ditar altos fatores de segurança para estruturas do portão e do chute de modo que suportem grandes cargas dinâmicas e mantenham as relações da abertura da passagem ( $D$ ) e do tamanho máximo do material ( $d$ ) para prevenir bloqueios (CUNDALL e STRACK, 1979).

### **3.6.2. Fatores de projeto**

Os fatores importantes a serem considerados no projeto de passagens de minério ou de estéril incluem:

- ❖ a distribuição de tamanho do material fragmentado;
- ❖ os problemas de formação de arco, formação de canal preferencial de fluxo e de segregação de tamanho de partículas no material fragmentado;
- ❖ a resistência ao cisalhamento do material fragmentado;
- ❖ a altura de queda na passagem de minério, relacionada com a tendência do material a se compactar ou autocominuir;
- ❖ as características de resistência mecânica das paredes da passagem (tendência a formar placas ou blocos, resistência à abrasão);
- ❖ a taxa de fluxo e a capacidade de estocagem desejada;
- ❖ as condições climáticas e/ou ambientais.

O projeto deve levar em consideração ainda o custo de escavação, de revestimento e de manutenção da passagem de minério.

AYTAMAN (1960), citado por COATES (1981), destaca como parâmetros importantes a serem determinados no projeto do fluxo em passagens de minério:

- ❖ o espaçamento e as dimensões dos pontos de carregamento;
- ❖ as dimensões dos chutes;
- ❖ as dimensões dos alimentadores;
- ❖ a inclinação das passagens;
- ❖ as ramificações e suas inclinações;
- ❖ o suporte e o critério de colocação;
- ❖ o dimensionamento de grelhas.

Dentre os diversos parâmetros das passagens, a inclinação, o comprimento, a forma, a dimensão da seção e a orientação da passagem com relação às tensões *in situ* são fatores importantes.

### **3.6.3. Tipos de passagens de minério**

Segundo JUNG *et alii* (2002), existem quatro tipos de passagem para se optar no projeto do chute:

- passagem vertical (para simples deslizamento de rocha);
- passagem com menor inclinação, com retomada por equipamento móvel;
- passagem com mudança de direção (nesse caso, o joelho age como uma almofada para queda do minério e protege o alimentador);
- o último projeto é a combinação de silo de regularização com a passagem, que permite que a passagem seja mantida cheia, reduzindo a chance de que o regime de queda possa formar qualquer arco ou domo, evitando o fenômeno conhecido como *surging*.

RUPPRECHT (2001) estudou a quantidade, o comprimento e o posicionamento das passagens de minério. Segundo o autor, as razões para esse estudo são a probabilidade de que essas escavações venham a se romper em profundidade, o

custo e o tempo de abertura envolvidos, a dificuldade de instalação de reservatório e o risco de não conciliar com novos projetos de reservatório, a presença de água e de mistura de rocha, o conflito entre o manuseio de rocha, passagem de pessoal e manuseio de materiais na galeria, a ruptura de ramificações.

#### **3.6.4. Seções de passagens de minério**

A forma da passagem governa a concentração de tensões (JUNG *et alii*, 2002). Em regiões de altas tensões, as passagens podem ficar sujeitas a deslocamentos, rupturas e desgaste excessivo das paredes. São necessários revestimentos com concreto projetado (*shotcrete*) ou com chapas de aço.

Diversos autores, entre eles JANELID e KVAPIL (1966), STEWART (1981), HAMBLEY (1987) e JUST (1980), citado por DE LA VERGNE (2000), relatam a respeito de relações dimensionais entre a dimensão característica da seção da passagem de minério (D) e a dimensão máxima do material (d). Uma pesquisa na literatura indica que o domínio de fluxo livre é geralmente limitado pela linha que representa uma dimensão da escavação (D) da ordem de 4 a 6 vezes o tamanho máximo de partícula em fluxo (d). Diversos trabalhos, citados por BEUS *et alii* (2001), definiram a razão D/d mínima para o fluxo livre: 3 (PEELE, 1947); 4,2 (AYTAMAN, 1960); 4 a 6 (ZENZ e OTHMER, 1960); 5 (JENIKE, 1961); 3,6 a 4,5 (KVAPIL, 1965); 4 a 6 (LI *et alii*, 1980).

A zona de fluxo provável ocorre para escavações de tamanho entre 2 e 4 vezes o tamanho máximo do maior bloco. Nessa zona tanto o fluxo quanto o bloqueio podem ocorrer. Nenhum fluxo irá ocorrer para escavações menores que cerca de duas vezes o tamanho das partículas. Essa é a razão fundamental para a existência de uma grelha ou peneira na alimentação da passagem de minério para limitar o tamanho das partículas que entram na passagem. É um método prático de assegurar a relação D/d. Devem ainda ser retirados elementos estranhos ao fluxo, como madeira, tela e ancoragens (BEUS *et alii*, 2001). A ausência de medidas para prevenir a ocorrência de bloqueios pode aumentar sua freqüência, aumentar os custos operacionais e dificultar a própria eliminação do bloqueio.

É de se esperar que as curvas que mostram o limite de fluxo possam variar com a natureza do material fragmentado. Na tabela III.6 são apresentados os limites

propostos por HAMBLEY (1987), como exemplo, com as evidências empíricas para se projetar, evitando a formação de arco de intertravamento, em termos da razão  $D/d$  e da frequência de formação de arco.

Para Driver (1972 apud JUST, 1980), informações mais precisas relacionadas ao regime de fluxo intermitente podem ser obtidas da análise do número de interrupções expressa em termos da frequência por unidade de massa do material. Esse é um método mais adequado de representação para fins de projeto, segundo esse autor.

Tabela III.6 – Relações dimensionais entre a dimensão da passagem e tamanho máximo de bloco (Hambley *et al*, 1983 apud HAMBLEY, 1987).

Razão $D/d$	Frequência relativa de intertravamentos	Descrição do fluxo
$D/d > 5$	Muito baixa	Fluxo ocorre geralmente sem grandes problemas
$5 > D/d > 3$	Frequente	Fluxo incerto
$D/d < 3$	Muito alta	Certamente ocorrerá bloqueio do material

Para maximizar a distância de transporte e minimizar bloqueios, existem diferentes geometrias utilizadas em passagens, incluindo combinações de seções. O eixo pode ser inclinado ou vertical, retilíneo ou com mudanças de direção.

A redução da seção de descarga relativamente à seção de entrada dos reservatórios (silos ou passagens) aumenta a velocidade do material.

### 3.6.5. Direção de passagens e de chutes

Para PFLEIDER *et al* (1968), existe ocasionalmente uma razão para se ter a direção da passagem próxima à normal ao mergulho das camadas de forma a diminuir o desgaste e o deslocamento das paredes. A máxima estabilidade da passagem é obtida quando o eixo longitudinal da passagem é orientado paralelamente à direção de tensão principal máxima (JUNG *et alii*, 2002).

O projeto do chute envolve considerações geométricas para acomodar mudanças de forma e de direção, prevenção de bloqueios e danos a elementos estruturais.

### **3.6.6. Inclinação de passagens e de chutes**

A figura 3.28 mostra um levantamento do campo de aplicação para o fluxo de material grosseiro. O principal fator a ser observado é a relação entre a natureza do material e a inclinação de transporte. KVAPIL (1965 b) destaca que até 40° de inclinação, os materiais fragmentados são transportados por sistemas usuais de transporte por caminhões, carregadeiras, composições de vagões e correias transportadoras. A partir de 40° ocorre o fluxo por gravidade em escavações e através do içamento em esquipas.

É indicada também na figura 3.28 a inclinação mínima para os subgrupos de materiais grosseiros destacados na figura 3.5. A nomenclatura é a seguinte: A - passagens com chutes (sendo AI - passagens com chutes não revestidos e AII – passagens com chutes revestidos), B - passagens de minério (sendo BI – passagens de minério inclinadas e BII – passagens de minério verticais);  $\beta$  é a inclinação do chute ou da passagem. Deve-se acrescentar que as passagens com inclinação inferior a 75° devem ser usadas apenas para os materiais dos grupos 1 e 2 da figura 3.28.

Observa-se que KVAPIL (1965 b) denomina de chute a passagem de minério que apresenta dispositivo de controle do fluxo, enquanto outros autores reservam a denominação de chute especificamente para o dispositivo de controle de descarga.

Uma operação que atende ao sistema projetado só pode ser alcançada se a inclinação das escavações é adequada às propriedades do material. A inclinação necessária depende também do atrito ao longo das paredes laterais.

Deve-se enfatizar que nem todo material grosseiro é adequado para o transporte por passagens de minério com chutes. Conforme KVAPIL (1965 b), o material adequado à passagem com chute é caracterizado por ser composto de fragmentos menores que 8” (20 cm) e pela ausência de finos e de constituintes terrosos, de modo que não possa ocorrer a aglomeração. A condição é a inclinação da passagem ( $\beta$ ) menor que o ângulo de atrito do material com a parede. Se essa condição é satisfeita, a passagem

pode permanecer sem revestimento. A inclinação mais adequada da passagem deve ser estabelecida por testes práticos.

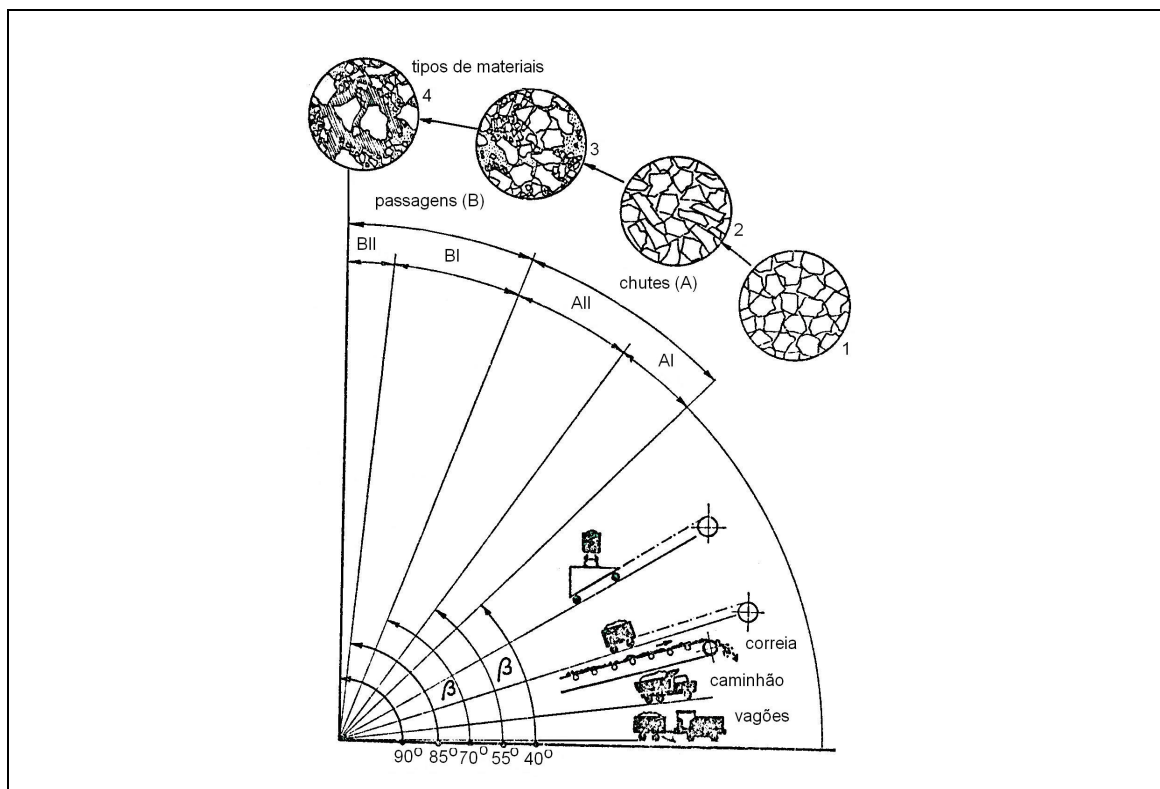


Figura 3.28 – Campo de aplicação do sistema de transferência de material na lava subterrânea (KVAPIL, 1965 b).

O aumento da porcentagem de finos e da umidade implica o uso de passagens com inclinações superiores a  $70^\circ$ . Isso se aplica ao material do grupo 3 da figura 3.28. Para tais materiais, a inclinação da passagem deve ser maior que o ângulo de atrito do material ( $\varphi$ ). Considerações de segurança tornam aconselhável o revestimento da passagem.

As propriedades dos materiais contidos no grupo 4 (considerável proporção de finos, terrosos e argilosos e de umidade) os tornam inadequados ao transporte por passagens com chutes. Teremos, nesse caso, passagens de minério com inclinações entre  $85$  e  $90^\circ$ .

As passagens verticais resultam nas maiores cargas estáticas e dinâmicas no portão comparado com passagens inclinadas (JUNG *et alii*, 2002). PFLEIDER *et al* (1968)

relatam que as argumentações dos que acreditam que através de uma passagem inclinada o material escoar melhor que em uma passagem vertical de iguais dimensões são que a componente de forças do peso do material consegue quebrar o arco no lado superior, enquanto as forças simétricas desenvolvidas em uma transferência vertical resultam em uma situação mais favorável à formação de arco, principalmente se as paredes são mais rugosas. Entretanto, por razão semelhante, o minério tem grande tendência de compactar e aderir na parede inferior de uma abertura inclinada.

### **3.6.7. Comprimento das passagens**

Uma parte importante do projeto de uma mina subterrânea é decidir qual a dimensão do primeiro avanço da passagem, que deve implicar menores extensões de rampas, passagens e poços, ajuste mais fácil de poços e passagens para corpos irregulares, menores conexões entre pilhas e passagens, entre outros fatores (NILSSON, 2001). Para STACEY e SWART (1997), entre outros fatores, em passagens muito compridas, aumenta a dificuldade de acesso para a reabilitação da passagem, na ocorrência de um bloqueio ou entupimento. A maioria das passagens sem registros de problemas tem menos de 50m de comprimento.

### **3.6.8. Ramificações, curvas e joelhos**

As ramificações permitem que uma única passagem de minério ou subida de transferência sirva a vários níveis ou frentes de trabalho adjacentes. Como a seção principal da passagem, a inclinação das ramificações deve ser maior que 60°. As seções transversais das ramificações serão selecionadas da seguinte forma, segundo STACEY e SWART (1997):

- se todas as ramificações na junção são usadas concorrentemente, elas devem ser de mesma seção, mas cada uma de seção menor que a seção da passagem posterior à junção; o comprimento de cada uma deve ser suficiente para evitar bloqueios;
- se apenas uma ramificação é usada de cada vez, ela deve ter a mesma seção que a da passagem posterior à junção.

As curvas e joelhos são às vezes usadas na base de passagens de minério para permitir proteção contra o impacto sobre o portão e para controle do fluxo. As curvas

podem ser também usadas para contornar uma zona de rocha de menor resistência ou para interceptá-la em um ângulo mais favorável. A inclinação das curvas deve ser maior que 60°. No caso de joelhos, uma inclinação de 45° é comumente usada para as partes anterior e posterior ao joelho. Entretanto, para assegurar o fluxo o ângulo deve ser maior que 60°.

### 3.6.9. Dispositivos de transferência

Assegurado o fluxo de material, é preciso considerar-se o mecanismo de transferência. Chutes ou alimentadores podem ser usados, sendo os primeiros predominantes nas minas subterrâneas.

Os chutes são instalados geralmente nas paredes do reservatório (da passagem ou da saída do britador) e perpendicularmente à abertura de descarga, mas ocasionalmente paralelos e centrados na abertura. Em ambos os casos, a sua largura deve ser compatível com as dimensões dos equipamentos (como caminhões e vagonetas) nos quais o material é descarregado. A condição é (BEUS *et alii*, 2001):

$$D_o \geq 3d \quad (11)$$

onde:  $D_o$  = largura do chute [m],  
 $d$  = maior dimensão do maior bloco [m].

Um exame dos diagramas de Tillson (1938 apud HAMBLEY, 1987) fornece diretrizes para o comprimento do chute ( $H_o$ ) e para a inclinação ( $\beta$ ) dos chutes:

$$H_o \cong 0,8 D_o \quad (12)$$

Onde:  $H_o$  = comprimento do chute [m],  
 $D_o$  = dimensão característica da seção do chute [m].

A inclinação do chute varia de 30 a 45°. Entretanto, considerando que os chutes usados nessa época eram operados manualmente, as inclinações eram necessariamente menores que as inclinações da prática atual, onde inclinações de 40 a 45° são mais comuns.

Uma consideração importante no projeto de chutes é o tipo de portão de controle de descarga. A escolha muitas vezes se baseará na distribuição de tamanho do material, particularmente na quantidade de finos (HAMBLEY, 1987). O controle pneumático ou hidráulico do portão é a forma mais comum. As formas em arco ou guilhotina são largamente utilizadas.

O controle de fluxo é fator importante, tratado por HARTMAN (1987). O controle de fluxo com chutes evita o transbordo dos pontos de extração com minério fragmentado, mas o alto custo de sua construção é uma desvantagem. O controle no ponto de carregamento custa menos, mas requer o uso de equipamentos de carregamento. O aumento da abertura do chute implica a redução da frequência de entupimentos, mas também pode induzir a redução da estabilidade do maciço rochoso e a necessidade de instalação de sistemas de suporte mais caros (JUST, 1980).

Os alimentadores são dispositivos de transferência usados geralmente para remover materiais fragmentados de unidades de estocagem como silos e tremonhas. Para materiais grosseiros, como o minério vindo direto da mina (*run of mine*), os melhores tipos são os de esteiras e de barras, segundo Reisner e Eisenhart-Rothe (1971 apud HAMBLEY, 1987). Sua capacidade é adequada às escalas de taxas de material encontradas nas minas subterrâneas.

### **3.6.10. Pressão em portões de descarga**

Existem dois pontos principais de preocupação no projeto do portão de fechamento de uma passagem de minério: as cargas estáticas e as cargas dinâmicas sobre os portões de descarga. Várias pesquisas são conduzidas, como a do *International Caving Study* (desde 1998), de JUNG *et alii* (2002), de BLIGHT e HAAK (1994) e de BEUS *et alii* (1997).

O problema de se projetar a pressão estática a que o portão deve resistir é semelhante ao da estimativa de pressão sobre o fundo de um silo. Uma passagem de minério tem usualmente uma grande razão comprimento/diâmetro ( $h_p/D$ ). Entretanto, podem ser verticais ou subverticais, e às vezes incluem um joelho (*dog-leg*). Pelo motivo das suas paredes serem usualmente muito rugosas, a teoria de Janssen para silos é apropriada.

O minério consiste de rocha fragmentada que está usualmente úmida ou aglomerante e às vezes contém finas partículas que podem ser argilosas. Como resultado, os bloqueios de minério em passagens ocorrem freqüentemente. O minério acima do bloqueio então cai e se choca com o portão. O portão obviamente tem de ser projetado para resistir bem à pressão dinâmica resultante.

Para encontrar respostas a questões como a efetividade do joelho para reduzir o impacto sobre o portão, o efeito do ângulo da passagem e do joelho, qual inclinação permite ao minério escoar e causar o impacto mínimo sobre o portão na hipótese de se destruir um bloqueio, BLIGHT e HAAK (1994) realizaram ensaios em um modelo em escala reduzida de passagem de minério, mostrado no item 3.7.3, e também em escala real em uma mina subterrânea. O ensaio no modelo apresentou resultados satisfatórios.

Os resultados, segundo BEUS *et alii* (1997), mostraram que existe uma mudança mínima quando a coluna de material excede 1m acima do portão (que representa 4% do comprimento da passagem); que a presença de um joelho tem pouco efeito na carga estática no portão; que a equação de Janssen (MCCABE e SMITH, 1956) pode ser usada para a previsão das cargas.

### 3.6.11. Equação de Janssen para uma passagem de minério inclinada

A carga estática sobre o fundo de um reservatório tem uma dependência amortecida da altura da coluna de material; parte dessa carga é transferida para as laterais por atrito. A base da equação de Janssen, modificada por Pariseau (BEUS *et alii*, 1991; BLIGHT e HAAK, 1994) é mostrada na figura 3.29. A passagem tem um ângulo  $\beta$  em relação à horizontal, seção transversal  $A_s$  e perímetro  $P$ . O raio hidráulico é  $R = A_s/P$  e o ângulo de atrito entre o minério e a parede é  $\delta$ . Para o equilíbrio, o acréscimo de pressão devido a um elemento é:

$$d\sigma_n = \gamma \operatorname{sen} \beta dz - \left( K \tan \delta \frac{\sigma_n}{R} \right) dz \quad (13)$$

Então a pressão normal é:

$$\sigma_n = \sigma_{n\max} \left( 1 - e^{\frac{-\gamma z \sin \beta}{\sigma_{n\max}}} \right) \quad ; \text{ e, então:}$$

$$\sigma_{n\max} = \frac{\gamma R \sin \beta}{K \tan \delta} \quad (14)$$

Onde:  $\gamma$  = peso específico [N/m<sup>3</sup>];

K= razão entre as tensões laterais e normais ( $\sigma_L/\sigma_N$ ) [-].

A utilização do raio hidráulico traz como favorecimento a determinação da resistência entre partículas e destas com a parede do conduto. É necessário, nesse caso, que o modelo em estudo ofereça a possibilidade de determinação do nível de material contido (por exemplo, através da utilização de sensores de nível).

A figura 3.30 mostra os valores obtidos para as pressões sobre o portão de controle de descarga para vários valores da inclinação  $\beta$ . Deve-se notar que, sendo o mesmo valor para a inclinação antes e depois do Joelho (conforme recomendam JUNG *et alii*, 2002), a teoria ignora a presença de um Joelho na passagem. Caso existam ângulos diferentes, devem ser feitos cálculos em etapas: acima e abaixo do Joelho (BLIGHT e HAAK, 1994).

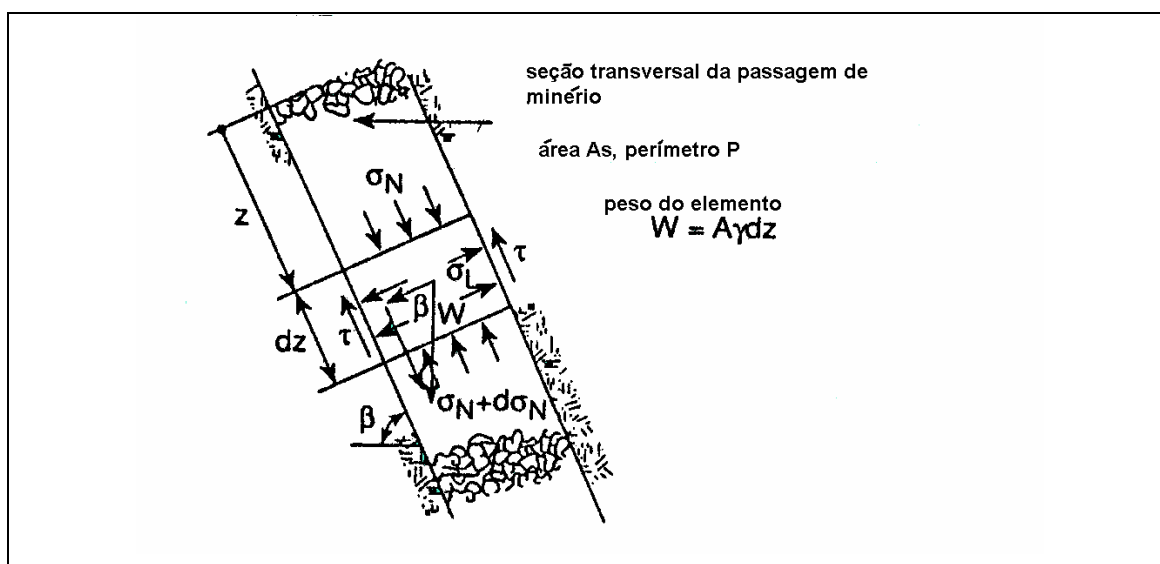


Figura 3.29 - Base teórica dos ensaios de BLIGHT e HAAK (1994).

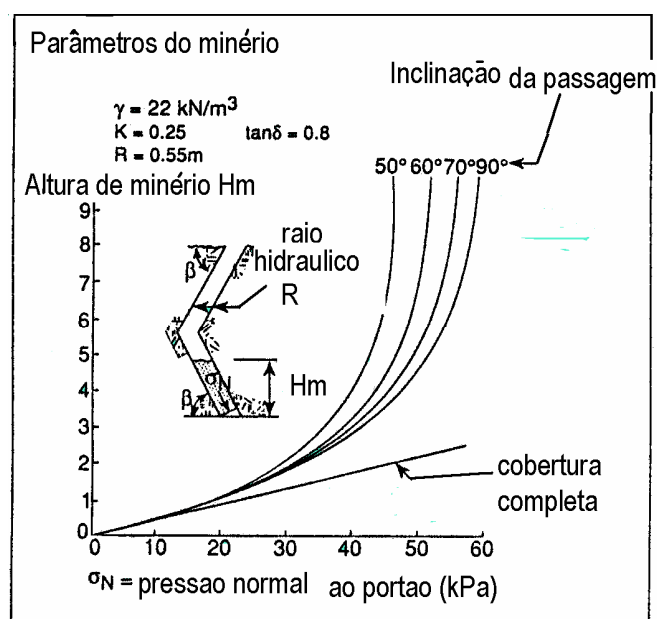


Figura 3.30 – Curvas obtidas da pressão sobre o portão para várias inclinações da passagem (BLIGHT e HAAK, 1994).

Os resultados indicaram que existe uma razoável concordância em todos os casos entre os valores medidos com as pressões calculadas pela Equação de Janssen. Pode ser visto ainda que a posição do joelho parece não afetar a relação pressão versus altura, que se espera da equação.

As cargas dinâmicas aparecem no material situado no topo do reservatório, são transferidas para as paredes e para o chute ou portão de controle. Aparecem também na eventual remoção de um bloqueio. Estas cargas são difíceis de se estimar, sendo muitas vezes consideradas como um múltiplo da carga estática.

De acordo com BEUS *et alii* (2001), o efeito do impacto diminui exponencialmente com a profundidade, o que permite quantificar o conceito de deixar uma “almofada” de material fragmentado para proteger a carga direta sobre o chute (a menos de materiais oxidáveis, por exemplo). Com a colocação usual do chute em uma lateral da passagem de minério, os efeitos de impacto podem ser reduzidos. Curvas e ramificações servem para a mesma finalidade.

Os ensaios de BLIGHT e HAAK (1994) mostraram que a presença de um joelho junto com uma redução da inclinação reduz o impacto da queda do material após a queda de um bloqueio. Com uma inclinação relativamente suave ( $50^\circ$ ) o impacto não é muito notado, enquanto na passagem vertical, o fator de impacto pode exceder a 4.

### **3.6.12. Projeto de pontos de carregamento de material**

O projeto de ponto de carregamento de material fragmentado (ou de saída de descarga) é crucial para uma operação tranqüila do sistema de manuseio, porque o ponto de carregamento transfere o material alimentado na passagem para outro componente do sistema de manuseio, que pode consistir de um esquipe em um poço de içamento, de um caminhão ou uma composição sobre trilhos em um nível de coleta ou transporte, de uma correia transportadora ou de um britador. Se a passagem é operada com sucesso, os requisitos de tempo de estocagem e ligação devem ser conhecidos. Para isto, o ponto de carregamento deve ser projetado para minimizar a possibilidade de bloqueios e de formação de canais preferenciais de fluxo.

A distância entre passagens é determinada pela cadência de lavra, pelo tipo de equipamento que fará o carregamento na galeria de extração e pelo sistema de carregamento. O espaçamento é resultado da distribuição de fragmentação da rocha, da dimensão do ponto de carregamento, dos parâmetros geotécnicos como resistência, ângulo de atrito, coesão, ângulo de repouso. As questões relativas ao fluxo de material no processo de abatimento não estão no escopo deste trabalho.

## **3.7. Abordagens no estudo de fluxo por gravidade de material fragmentado**

### **3.7.1. Introdução: utilização de modelos**

A Mecânica das Rochas desenvolveu-se, sobretudo nas últimas três décadas, com ampla repercussão na concepção, projeto e execução de trabalhos em que seja necessário levar em consideração o comportamento dos maciços rochosos: fundações, túneis, taludes, poços etc. Esse desenvolvimento tem sido estimulado sobretudo pelas preocupações gerais de melhoria da economia e das condições de segurança das operações mineiras e ainda pelos problemas colocados pela crescente

profundidade atingida pelas minas. Para o estudo do comportamento dos maciços rochosos, a Mecânica de Rochas se vale de diversos métodos, empíricos ou analíticos.

As abordagens disponíveis no estudo de fluxo de material fragmentado se complementam na compreensão da questão e da determinação de variáveis de projeto. As abordagens existentes são os modelos físicos; os modelos numéricos; os estudos de campo em escala real, para determinação de propriedades de fluxo dos materiais; as relações analíticas e as relações empíricas (DUTRA, 1993). Cada abordagem tem suas vantagens e suas desvantagens. A grande preocupação no fluxo de material fragmentado em passagens de minério, além da taxa de descarga, é a respeito das cargas sobre portões de descarga.

A abordagem através de métodos analíticos se vale da utilização de modelos. Modelo é a representação de sistemas, objetos ou fenômenos para facilitar a compreensão das entidades estudadas, nos aspectos quantitativos e qualitativos, sendo diferente da apresentação natural. Os métodos analíticos envolvem as seguintes abordagens: modelo conceitual de uma estrutura para pesquisa, modelo físico, modelo matemático (soluções analíticas – *closed form solutions*), modelo numérico (técnicas de elementos finitos e outras), segundo BIENIAWSKI (1984); e também as simulações e modelos analógicos (STRACK, 1988).

A simulação com sucesso pode minimizar os custos de projeto de sistemas de fluxo. Mesmo com o crescimento do uso de modelos numéricos, vários desses foram concebidos a partir de estudos anteriores com modelos físicos, que propiciam diretrizes úteis para projeto e fornecem padrões de comportamento do material (GERTSCH e BULLOCK, 1998; HARTMAN, 1987); o que valida, portanto, o uso dessa técnica.

Os modelos físicos têm um campo de utilização bem definido ao longo dos últimos cinquenta anos, em várias áreas e em centros de pesquisa em todo o mundo. O uso de modelos físicos em Mecânica de Rochas se tornou popular especialmente na Europa. No Brasil, temos exemplos de estudos com modelos físicos nos estudos de plataformas oceânicas na Universidade Federal do Rio de Janeiro, na área de hidráulica na Universidade de Santa Maria (RS), nas áreas de hidráulica, processos

metalúrgicos e de tectônica de placas, entre outros trabalhos, na Universidade Federal de Ouro Preto (MG). Além da ampla utilização dos modelos físicos no ensino de engenharia (NOGUEIRA, 2005).

BIENIAWSKI (1984) apresenta o histórico da utilização de modelos descrito a seguir. A atividade maior ocorreu nos anos 50 e 60 do séc. XX; modelos foram estudados em Essen, Alemanha, por Everling e Jacobi. Esses modelos, grandes e caros, simularam os efeitos de vários parâmetros na estabilidade de galerias no método de lavra de carvão por *longwall*. Hobbs (1968), trabalhando no NCB (*National Coal Board*), Inglaterra, também realizou uma série extensa de experimentos tratando com galerias de minas de carvão. Barron e La Rocque (1962) trabalharam no Canadá, desenvolvendo e testando um modelo em escala real de um túnel em mina de minério de ferro. Na África do Sul, Hoek (1963), Bieniawski e Van Tonder (1969) e Krauland (1973) conduziram estudos em modelos principalmente na simulação de fratura em túneis em rocha de alta resistência e de carvão. Um modelo analógico de resistência elétrica foi desenvolvido pela Câmara de Minas da África do Sul para determinar tensões e deslocamentos em estratos circundantes a escavações em minas tabulares (Salamon e Oravec, 1970; Cook e Schumann, 1965).

Nos EUA os maiores impulsos foram direcionados ao desenvolvimento e uso da técnica de modelo físico de atrito basal (Goodman, 1969, 1981 apud BIENIAWSKI, 1984) e no projeto e construção de um modelo em escala real de túnel de mina para suporte de teto pelo *U. S. Bureau of Mines*, hoje NIOSHI. Uma série clássica de ensaios em modelos físicos de atirantamento de teto foi realizada por Panek (1962 apud BIENIAWSKI, 1984), do *Bureau of Mines*, que investigou os mecanismos de reforço por atrito e por suspensão com parafusos tensionados. Ele combinou análise dimensional com os resultados dos ensaios em modelos e estabeleceu fórmulas quantitativas para o projeto de padrões de atirantamento.

Mark (1982 apud BIENIAWSKI, 1984) mostrou que a técnica de atrito basal pode ser usada com sucesso para modelar condições de teto em minas de carvão altamente descontínuas, com várias fraturas orientadas a 30° com a horizontal. O mecanismo de suporte dos parafusos ancorados com resina também foi observado nos modelos de atrito basal. Isso reforça estudos da cinemática geral do comportamento do teto úteis no entendimento dos mecanismos de suporte.

Tanto a utilização de modelo físico quanto a de modelo numérico têm vantagens e desvantagens quando se tenta prever o comportamento de um corpo de minério quando lavrado. O custo de construção e as restrições relativas às necessidades imediatas de uma mina em atividade às vezes limitam a utilidade de um modelo físico. Com o desenvolvimento da informática, em especial dos modelos matemáticos numéricos, cresceu de modo fabuloso a utilização dos modelos matemáticos. Esse crescimento não elimina, porém, a necessidade de utilização de outras abordagens.

### **3.7.2. Modelos físicos**

Os projetos e construções de modelos, em escala real ou reduzida, de passagens de minério, chutes e portões de controle têm sido realizados. Os ensaios de laboratório já validaram estratégias para monitoramento de campo. O desenvolvimento está agora sendo feito para se obter respostas reais a cargas dinâmicas e estáticas nas passagens.

Vários autores estudaram o fluxo de material fragmentado em mineração, utilizando modelos físicos. Podem ser citados trabalhos objetivando estabelecer equações para a vazão de descarga, como o de ROSE e TANAKA (1959); comparações entre modelo físico e escala real, evidenciando a formação do elipsóide de fluxo, como os de JANELID (1972 e 1981); para modelar fisicamente as zonas ativas de um silo, como os de YENGE (1981) e de MALAKHOV (sd, citado por SHEVYAKOV, sd); para determinar as tensões e o impacto sobre o portão de descarga, como o de BLIGHT e HAAK (1994); para avaliar a segregação nas operações de manuseio, estocagem e transferência de areia quartzosa (PORTO, 1995); para a construção de modelo numérico, como os de BEUS e RUFF (1996, conforme BEUS *et alii*, 2001), BEUS *et alii* (1997), MCNEARNY e BARKER (1998), o *International Caving Study* (desde 1998, conforme MUSTOE, 2002), JUNG *et alii* (2002), entre outros trabalhos. Apresentam-se a seguir, alguns desses modelos físicos, em seqüência histórica, alguns deles associados a modelos numéricos.

#### **Modelo de ROSE e TANAKA (1959)**

ROSE e TANAKA (1959) investigaram a taxa mássica de descarga de materiais granulares em modelos de silos, com tremonhas cilíndricas de bases cônicas, através

de abertura circular. Várias séries foram feitas com ângulo de inclinação constante e variando-se a razão do diâmetro de entrada pelo diâmetro de saída do silo ( $w/e$ ). As variações nos outros parâmetros do problema foram obtidas pelo uso de materiais de diferentes naturezas, formas e tamanhos. Através de uma curva de correlação simples, os resultados foram estendidos para cobrir o caso de aberturas não circulares. Os autores consideraram que a equação deduzida permite o cálculo da taxa de descarga da maioria dos materiais a partir de silos e tremonhas convencionais, com acurácia suficiente para as finalidades mais práticas.

### **Modelo de JANELID (1972)**

JANELID (1972) relata pesquisa em que estudou o fluxo por gravidade no carregamento de rocha desmontada e a influência do fator de escala na comparação de ensaios em modelos físicos (escala 1:20), com ensaios em escala real na Mina de Grängesberg (Suécia). Nesse trabalho ficou estabelecido:

- que o material descarregado através de uma escavação circular na base de um silo vem de uma região do material solto que lembra um elipsóide de revolução;
- que, em um silo, a relação entre o eixo vertical e os dois eixos horizontais do elipsóide depende do ângulo de atrito interno do material;
- que o fluxo por gravidade sob condições assimétricas em modelos de abatimento em subníveis, com tamanhos de partículas variáveis do material, segue claramente os princípios do movimento em um silo.

A grande diferença entre modelos e a escala real, segundo o citado autor, está na massa específica e no grau de compactação da rocha desmontada, na fragmentação e na presença de matacões e num movimento consideravelmente mais regular do material em um modelo. Os ensaios deram informações importantes e concordantes com a forma do volume de movimento no abatimento em subníveis.

### **Modelo de BLIGHT e HAAK (1994)**

BLIGHT e HAAK (1994) descrevem os resultados de ensaios em um modelo de passagem que foi projetado para investigar as cargas em portões de passagens. Os

resultados dos ensaios foram confirmados parcialmente por ensaios nos portões de passagens trabalhando em escala real. Os autores realizaram ensaios no modelo de passagem mostrado na figura 3.31, com três lados construídos em madeira e o quarto lado feito de *perspex*, de modo que o minério possa ser visto dentro do modelo. O portão na extremidade inferior foi articulado de um lado e uma célula de pressão foi colocada para se medir a pressão normal ao portão. Foram feitas seções contendo joelhos com ângulos de 90, 70, 60 e 50° com a horizontal. Para os ensaios, o minério foi simulado por um quartzito britado, de tamanho 18mm, peso específico 14kN/m<sup>3</sup>, ângulo de atrito 37°, ângulo de atrito com a parede 24°, em condições de razão entre as pressões lateral e vertical (K) igual a 0,25.

Uma série de medições de pressão no portão versus altura de minério acima do portão foi feita para esses valores de inclinação. Nesses ensaios o minério foi despejado no topo da passagem e a medição de pressão foi feita a cada incremento de altura de minério. Os resultados estão sumarizados na figura 3.32. As curvas teóricas foram calculadas assumindo-se um valor de K igual ao coeficiente de empuxo ativo de Rankine ( $K_A$ ), que é a razão das pressões horizontal e vertical em um material granular em ruptura. Pelo motivo de o minério na passagem em escala real sofrer repetidos bloqueios, as tentativas de repetir as medições de pressão no portão versus altura de minério não obtiveram sucesso.

O efeito da queda de material bloqueado foi simulado incluindo-se uma porta de alçapão articulada 30cm abaixo do topo do modelo. Com a porta fechada, uma coluna de minério de 30cm foi colocada acima do alçapão. A saída da célula de pressão foi conectada a um registrador gráfico e foi aberto o alçapão. A coluna de minério caiu então pela passagem e bateu primeiramente na lateral acima do joelho e então sobre o portão no fundo.

Pode ser visto que existe uma razoável concordância, em todos os casos, dos valores medidos com as pressões calculadas pela Equação de Janssen (figura 3.32). Pode ser visto ainda que a posição do joelho parece não afetar a relação pressão x altura, que se espera da Equação de Janssen, dada a mesma inclinação antes e depois do joelho. A partir dos resultados mostrados na figura 3.32, os autores acreditam que as pressões no portão da passagem de minério podem ser previstas pela Equação de Janssen para um silo inclinado. Para o projeto do portão, preocupado com a pressão

máxima, os resultados mostram que valores razoáveis da pressão estática no portão podem ser alcançados assumindo-se  $K = K_A$  (coeficiente de empuxo ativo de Rankine). Os resultados mostram ainda que a presença de um joelho junto com uma redução da inclinação reduz o impacto da queda do material após a queda de um bloqueio. Com uma inclinação relativamente suave ( $50^\circ$ ) o impacto não é muito notado, enquanto na passagem vertical o fator de impacto pode exceder a 4.

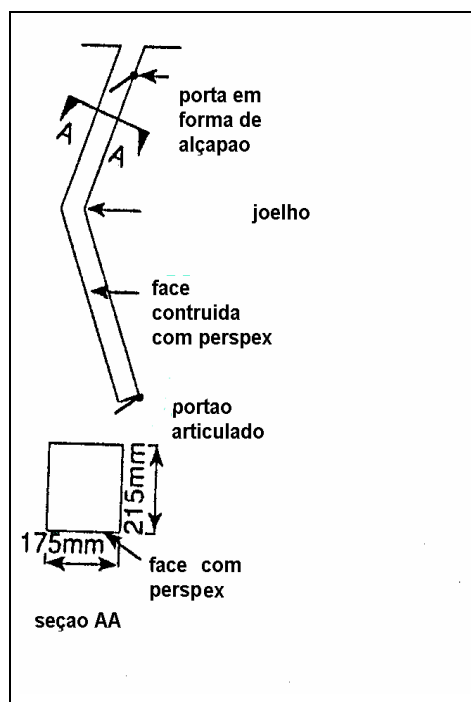


Figura 3.31 – Modelo de passagem de minério de BLIGHT e HAAK (1994).

### **Modelo do *International Caving Study* (desde 1998)**

O JKRCM, da Austrália, em colaboração com a Universidade de Utah, Colorado (EUA), iniciou em 1998 o projeto de pesquisa *International Caving Study* (ICS), que tem por objetivo o entendimento da mecânica do abatimento e desenvolvimento de técnicas e ferramentas para tornar a aplicação dos métodos de abatimento segura e eficiente. Nove empresas de vários países (Suécia, Chile, entre outros) financiam a pesquisa. O objetivo específico desse projeto é reduzir o número de acidentes que ocorrem durante a operação e manutenção de sistemas de passagem de minério. A questão de segurança principal envolve situações em que ocorre entupimento nas passagens de minério. A figura 3.33 mostra o modelo físico utilizado na pesquisa.

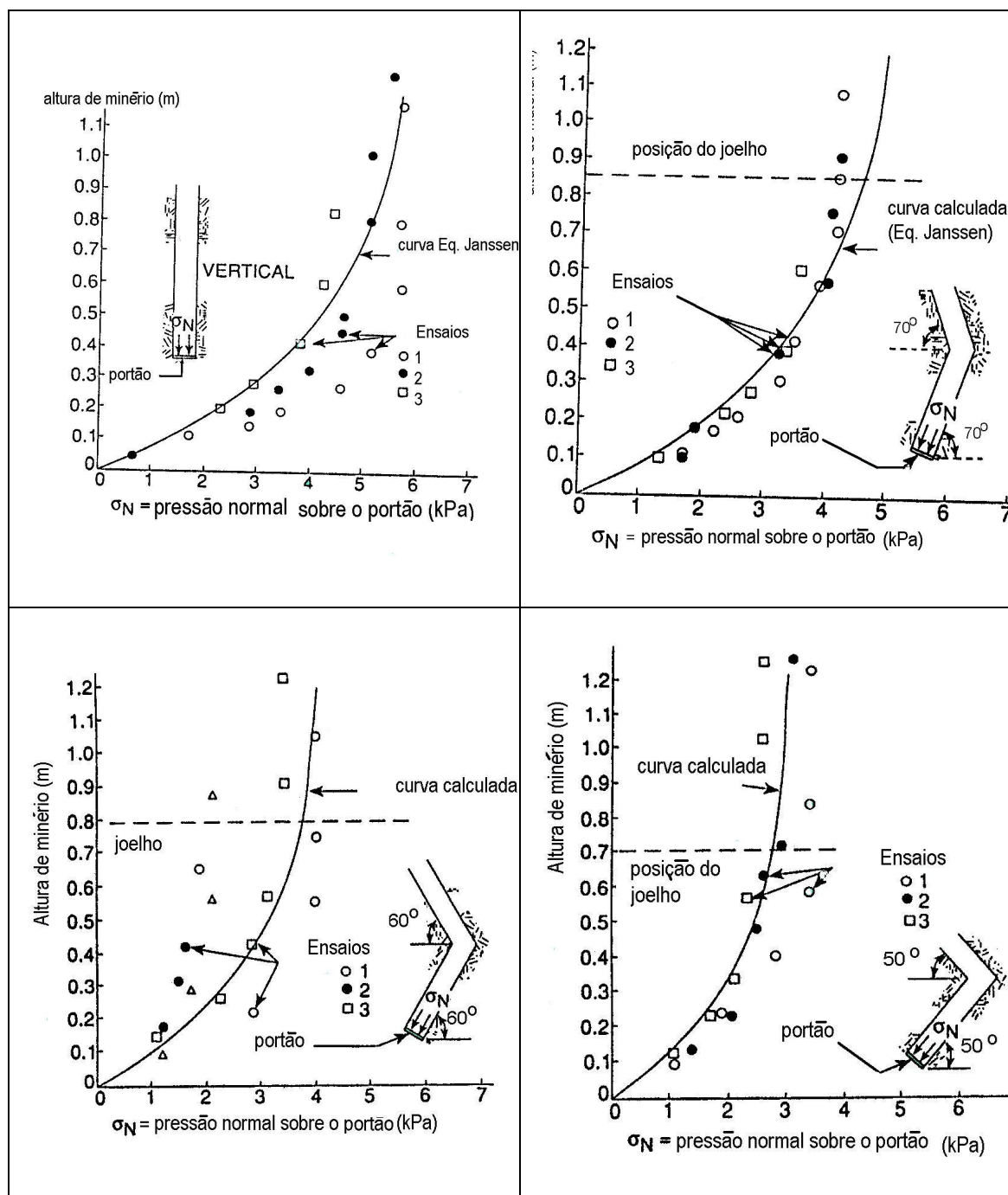


Figura 3.32 – Pressão no portão da passagem versus altura de minério, respectivamente para as inclinações de 90°, 70°, 60° e 50° (BLIGHT e HAAK, 1994).

Em 2001 e 2002, no ICS foi desenvolvido um módulo em 3D que define a geometria das paredes da passagem e do chute para uma simulação por método de elementos distintos (DEM). Foi desenvolvido um modelo de passagem, com altura total de 30m, com uma derivação ou joelho (*dog leg*). As seções inferior e superior são inclinadas respectivamente de 45 e 60° e o diâmetro da passagem é de 3m.

Duas situações foram consideradas: a descarga múltipla e a destruição de um bloqueio localizado na porção superior. Na primeira delas, foram feitas descargas com o portão inferior da passagem fechado e considerados dois valores de coeficiente de atrito com a parede: 0,1 e 0,5. Na segunda situação, foram realizadas duas etapas: o preenchimento da seção superior da passagem com minério e a retirada do mesmo, com determinação do impacto dinâmico no portão da base da passagem.

Nessas simulações o minério foi modelado com elipsóides de diversos valores de semi-eixo, semelhante a trabalho do NIOSHI, em 3D, com partículas esféricas. Nesse trabalho do NIOSHI, em que foi desenvolvido modelo da passagem de minério da *Hecla Mining Company*, Mina *Luck Friday*, Idaho (EUA), de prata e chumbo, lavrada por corte e enchimento, está sendo utilizado um modelo de descarga maior, comparando-se as forças medidas com as previstas pelo modelo computacional (MUSTOE, 2002).

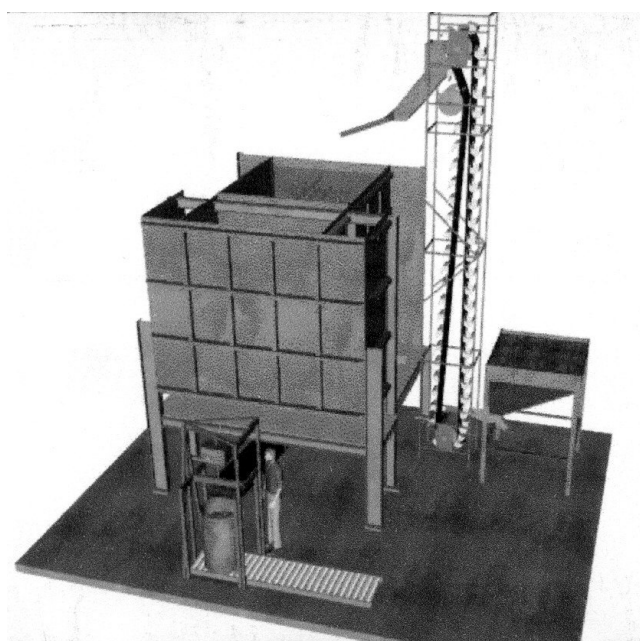


Figura 3.33 – Modelo físico do trabalho de pesquisa no ICS (MUSTOE, 2002).

### 3.7.3. Modelos numéricos

Os modelos matemáticos (ou simbólicos) se dividem em modelos analíticos e numéricos. De acordo com STRACK (1988), os modelos analíticos são representados por expressão matemática bem definida e produzem solução por si só para a questão. Os modelos numéricos são uma boa alternativa quando não se têm modelos analíticos para solução do problema. Os métodos numéricos têm uma vantagem sobre os modelos físicos em termos de custo e tempo. Entretanto, deve ser tomado um grande cuidado para assegurar que o modelo numérico é um reflexo acurado da realidade física.

MCNEARNY e BARKER (1998) descrevem uma comparação a duas dimensões entre um programa de elementos distintos, o *Particle Flow Code* (PFC) e um modelo físico real. Os modelos físicos que foram selecionados para a comparação foram especialmente adequados para esse tipo de estudo, assim como a construção e subsequente remoção do material dos modelos foram cuidadosamente controladas.

As simulações numéricas são conduzidas para avaliar os problemas de fluxo de partículas, o potencial de bloqueios e das forças estáticas e dinâmicas em chutes, usando algoritmos de fluxo bidimensional e tridimensional de partículas (BEUS *et alii*, 1997). O caráter discreto do meio granular resulta em um comportamento complexo sob condições de carregamento e descarregamento.

O método de elementos distintos (MED) é capaz de manusear partículas de qualquer forma e foi desenvolvido por Cundall (1971-1974 apud GHABOUSSI e BARBOSA, 1990) para a análise de problemas de Mecânica de Rochas. Os modelos baseados no método de elementos distintos (MED), segundo CLEARY e SAWLEY (2002), são hábeis para prever problemas importantes como a formação de arco e de canal preferencial de fluxo. O método é baseado no uso de um arcabouço numérico em que as interações das partículas são monitoradas contato por contato e o movimento das partículas é modelado partícula por partícula. Para CUNDALL e STRACK (1979), possivelmente a técnica mais poderosa de modelos de discos e esferas seja a de modelos numéricos, por ser mais flexível. Como exemplos de modelos baseados no MED, podem ser citados os aplicativos BALL ou Particle Flow Code – PFC (CUNDALL

e STRACK, 1979; BEUS *et alii*, 1997), BLOCKS (GHABOUSSI e BARBOSA, 1990) e *Working Model* (JUNG *et alii*, 2002).

Sugere-se que os fatores de descarga, a rigidez normal e ao cisalhamento e as características de atrito do material têm um efeito significativo sobre o fluxo de partículas e as cargas de impacto resultantes. Isso é verificado com o uso de ensaios de laboratório e de campo e análises de fluxo de partículas.

### **Modelo de BEUS et alii (1997)**

A finalidade dos ensaios em laboratório realizados por BEUS *et alii* (1997) foi avaliar a resposta de uma estrutura típica de chute a dadas condições de carregamento e, portanto, a forças sobre o portão de controle de descarga. Foi construído em escala real um modelo típico de chute e de estrutura de suporte (figura 3.34). A estrutura real do portão é suspensa sobre vigas de aço, ligadas a parafusos.

Os ensaios consistiram em aplicação de carga através de uma placa de distribuição, com área próxima do valor da área da seção transversal do portão real. As cargas estáticas e dinâmicas foram medidas em laboratório usando-se uma simulação em escala reduzida de uma passagem. Os ensaios de campo se iniciaram em passagens na mina para se determinar as cargas estáticas e dinâmicas. Os dados dos ensaios seriam comparados com os dados de mina para caracterizar o comportamento real.

O modelo computacional, com uso de soluções analíticas, análises por elementos finitos e um novo código de fluxo de partículas desenvolvido, prevê as cargas a partir do fluxo e do impacto de minério e estéril na passagem. Os resultados preliminares indicaram que os impactos dinâmicos desses materiais podem ser consideravelmente maiores que o esperado. A carga estática total é substancialmente menor que a tipicamente usada para o projeto estrutural dos elementos de suporte de chute e de portão.

### **Modelo de MCNEARNY e BARKER (1998)**

Entre 1986 e 1990, quatro modelos físicos foram construídos na Colorado School of Mines por McNearny e Abel para simular o abatimento de massas de rocha fraturada,

no método de lavra de abatimento em blocos. Esses modelos tinham 4,6m de altura, 6,1m de largura, até 0,9m espessura. As descontinuidades no corpo de minério foram simuladas nos modelos por camadas de tijolos compactados. O nível de solapamento foi simulado com cascalho britado e classificado por tamanho. O capeamento foi simulado com uma camada do mesmo cascalho. Os pontos de carregamento foram construídos na base do modelo para permitir a remoção controlada do material, semelhante ao método real. Tijolos e fragmentos de rocha numerados foram introduzidos em locais conhecidos para os quais o modelo permitisse a monitoração visual do fluxo.

Os citados autores realizaram um estudo para comparar modelos físicos e numéricos do método de lavra de abatimento em blocos. No trabalho de MCNEARNY e BARKER (1998), admitiu-se uma componente de deformação para as esferas. Os resultados da análise numérica simularam com grande aproximação o comportamento dos blocos do modelo físico, incluindo a formação de arco e intertravamento do corpo de minério simulado durante o fluxo. Os padrões de fluxo e a taxa de fluxo desenvolvidos durante a realização dos modelos numéricos também se aproximaram muito dos modelos físicos.

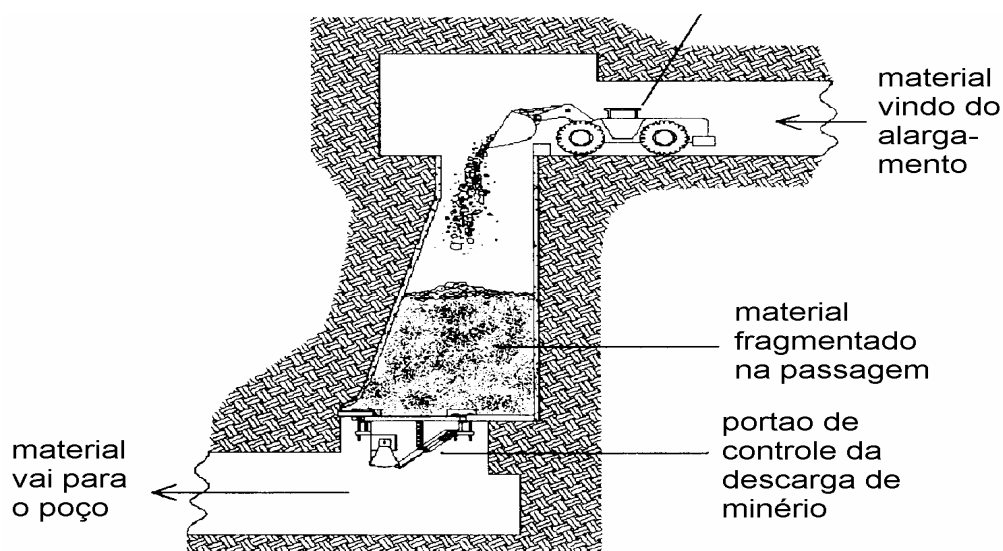


Figura 3.34 - Modelo físico em escala real, simulando o chute e sua estrutura de suporte, utilizado por BEUS *et alii* (1997).

### 3.7.4. Outras abordagens

#### Expressões analíticas

A abordagem analítica do fluxo granular é importante, mas ainda limitada. Para CUNDALL e STRACK (1979), nenhum conjunto de relações constitutivas satisfatório foi estabelecido. O re-exame dos dados experimentais, com aplicação da física dos meios granulares e experimentos físicos revistos por análises apropriadas, são importantes. Apesar das regras fundamentais da Física se aplicarem independentemente de escala, novas ferramentas analíticas se fazem necessárias.

MOLODTSOF e OULD-DRIS (1993) mostram uma abordagem teórica da descarga de tremonhas bidimensionais, examinando o efeito sobre a taxa de descarga de parâmetros do material granular, incluindo-se a coesão de finos. O trabalho assume que o fluxo de partículas em um cone de descarga é estritamente radial e restrito a uma cunha e conclui que a taxa de descarga independe da coluna de material, que o quadrado da taxa de descarga varia linearmente com a abertura de saída e que o ângulo mínimo do cone para a descarga através de uma saída tipo fenda é de 48,4°.

#### Equações empíricas

A equação empírica seguinte tem sido preconizada para cálculo da vazão mássica de silo com fundo cônico, fluxo por gravidade (modificada de MCCABE e SMITH, 1956), sem especificar a faixa de tamanho. O expoente  $n$  depende da morfologia das partículas (para partículas irregulares,  $n = 2,8$ , para esferas,  $n = 3,1$ ).

$$Q_m = \frac{1,2 \times 10^{-5} \times \rho_p \times (39,37 \times e)^n}{[6,288 \times \text{tg}(\varphi) + 23,16] \times (d_m + 0,048) - 1,1405} \quad (15)$$

onde:

$Q_m$  = vazão mássica [kg/s];

$e$  = diâmetro da abertura de saída [m];

$\varphi$  = ângulo de atrito interno do material [°];

$\rho_p$  = massa específica das partículas [kg/m<sup>3</sup>];

$d_m$  = diâmetro médio das partículas [m].

Além dos trabalhos já descritos (ROSE e TANAKA, 1959; MCCABE e SMITH, 1956, de determinação de equações empíricas, a partir de ensaios em modelos físicos; BLIGHT e HAAK, 1994, de validação da equação de Janssen para silos, na previsão de tensões em passagens), programas extensivos de ensaios são necessários para desenvolver novas relações ou validar algumas existentes (CUNDALL e STRACK, 1979).

### **Ensaio em plena escala**

O conhecimento das propriedades de fluxo do material fragmentado é fundamental para o estudo da estocagem. Para JUST *et alii* (1973), tendo em vista as imperfeições dos modelos e a inexatidão dos resultados de ensaios em laboratório, os ensaios em plena escala são requeridos na fase de produção na mineração.

A pesquisa para o entendimento da forma do elipsóide de extração no método de abatimento em subníveis tem sido executada em dois tipos de ensaios de campo. O primeiro baseia-se na utilização de grande número de traçadores, colocados nos furos de sonda na fatia de minério antes do desmonte. Depois do desmonte, os traçadores estão dispersos no material entulhado e sua nova localização não é conhecida exatamente. O segundo tipo é baseado na colocação de traçadores no minério fragmentado. Esse método é difícil, trabalhoso e caro; por conseguinte, apenas um pouco de traçadores podem ser colocados com segurança.

Com a melhoria do monitoramento, a tecnologia de controle em engenharia e os procedimentos de segurança, tornar-se-á menor a exposição a locais perigosos dentro da infra-estrutura de uma passagem (BEUS *et alii*, 1997). A combinação de modelos numéricos e da simulação, ensaios em escalas real e reduzida traz novos e importantes dados a respeito das características do fluxo de rocha em passagens e das cargas envolvidas na ruptura de portões de controle e ainda a explicação para os bloqueios das passagens.

### **3.8. A prática em mineração a respeito do fluxo de material fragmentado por gravidade**

#### **3.8.1. Introdução**

Existe uma preocupação mundial com o comportamento mecânico do material granular. Essa preocupação leva à realização de pesquisas, eventos, projetos e estudos apoiados por empresas e por órgãos governamentais.

Na mineração subterrânea, no que diz respeito ao fluxo de material fragmentado, a literatura disponível é muito diversificada, não existe uma linguagem uniformizada, de aceitação geral, nem padronização de parâmetros e conseqüentemente não há estatísticas disponíveis, nem sistematização dos trabalhos já realizados. Nas minas brasileiras, a preocupação em registrar eventos (problemas de fluxo e acidentes) relacionados à operação de passagens de minério inexistente.

Os problemas comuns encontrados em instalações onde ocorre o fluxo por gravidade de material grosseiro, como passagens, são a formação de arcos e o deslocamento (ou desgaste) das paredes das passagens de minério.

A prática corrente mostra algumas ações preventivas. É comum a limitação na faixa granulométrica admissível no desmonte por explosivos, relativamente à quantidade de finos produzida. Também é comum o uso de rompedores, pneumáticos ou hidráulicos, instalados em alguns pontos, antes das passagens, para reduzir o tamanho de fragmentos de minério que sejam muito grandes para passar através de grelhas para os pontos de carregamento e/ou de britadores. Para minimizar os finos, antes que sejam descarregados na passagem, podem ser usados equipamentos de graduação, mas introduz-se o custo adicional do manuseio em separado de finos (JUNG *et alii*, 2002). Podem ser usadas peneiras inclinadas, mas o mais comum é uma grelha.

Conforme DE LA VERGNE (2000), em minas de rocha mais resistente, os rompedores mecânicos são usados para classificar os blocos (*lumps*) em substituição ao desmonte secundário. O tamanho padrão de grelha de 16" x 18" é normalmente empregado para classificar minério para o içamento e às vezes estéril a ser carregado em correia, vindo de uma estação de poço. Uma abertura maior é empregada na alimentação de

britador (a dimensão típica da grelha é 80% da abertura do britador). Os rompedores hidráulicos são invariavelmente selecionados para novas instalações. Embora representem maior custo de capital, têm maior capacidade e custo operacional significativamente menor.

O primeiro problema na eliminação de um bloqueio é sua localização. Isso pode ser facilitado se há como visualizar o entupimento através de um local de acesso (figura 3.35). Como a largura do chute é geralmente menor que a abertura de alimentação da passagem, a probabilidade de ocorrência de bloqueios próximos a essa região é maior. BEUS *et alii* (2001) citam a inspeção visual, a utilização de sensores ou de câmera introduzida a partir da entrada da passagem para delinear o nível de material e os vazios.

O método usual de destruir um bloqueio é inserir explosivo na passagem através de um furo, realizado com essa finalidade, acima do portão. Então, com o portão fechado, o explosivo é iniciado e o bloqueio é destruído. Se existe o acesso, isso pode facilitar o dimensionamento da carga explosiva utilizada na remoção. Uma vez localizado o bloqueio, existem outras formas de remoção, com dispositivos mecânicos ou com ferramentas manuais (STACEY e SWART, 1997; BEUS *et alii*, 2001).

Outras ações corretivas do fluxo por gravidade na mineração subterrânea são a injeção de ar sob pressão ou de água em chutes e passagens, a alteração da abertura de grelhas ou até a mudança do sistema de manuseio dos materiais. Além da própria queda de rocha solta, os riscos na injeção de água são de ocorrência de avalanches de lama represada. A injeção de ar sob pressão pode ser mais efetiva para arcos coesivos, pois a detonação pode compactar o material.

Parte da produção de minério em minas subterrâneas brasileiras, já é executada abaixo do nível do poço vertical, o que implica a utilização de mais de um sistema de transferência do minério na mesma mina. Geralmente a solução para esses locais é o transporte através de caminhões em rampas e a descarga do material em um chute, juntamente com o material que vem das passagens de minério, para o carregamento dos esquipas (*skips*) para içamento à superfície.

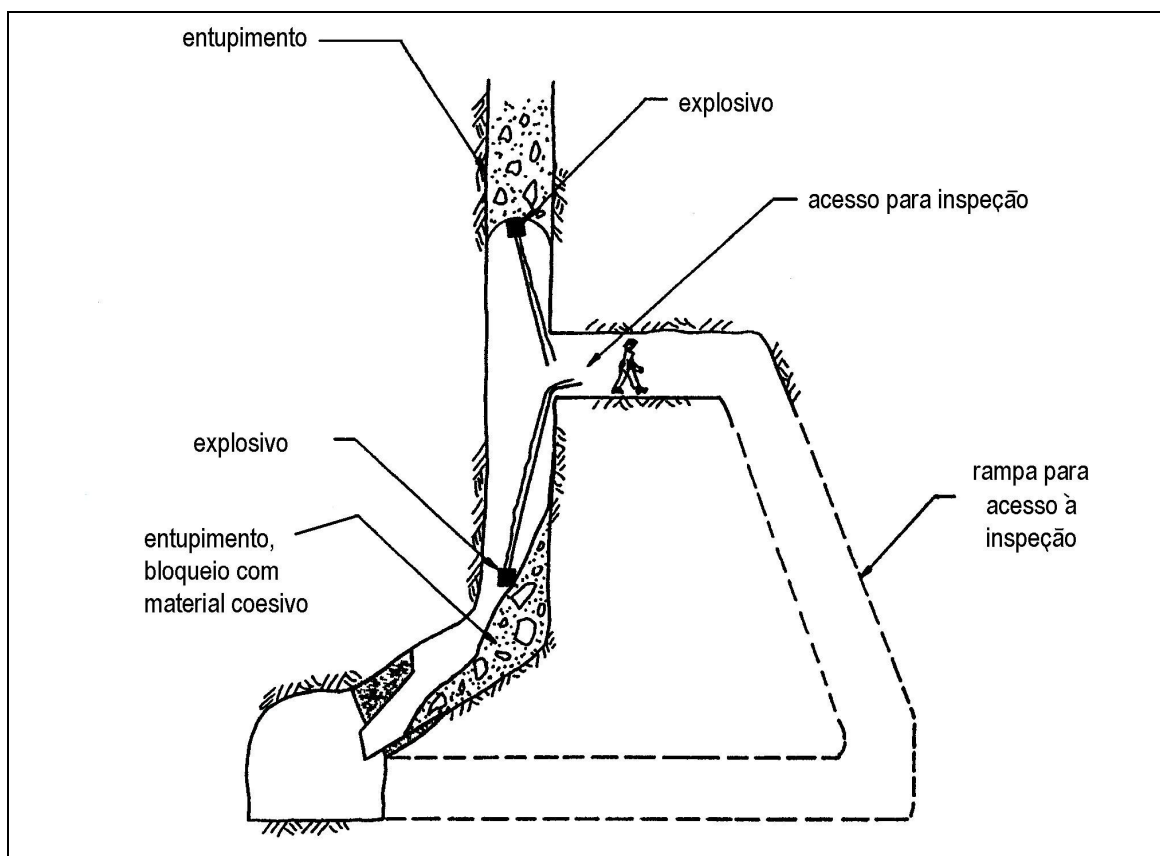


Figura 3.35 – Formas usuais de desobstrução de entupimentos nas passagens (STACEY e SWART, 1997).

### 3.8.2. Recomendações ou regras práticas (*rules of thumb*)

Dadas as dificuldades na utilização de modelos e determinação de expressões analíticas, os fatores que influenciam o fluxo por gravidade e os requisitos para a determinação confiável de propriedades de fluxo através de ensaios, é comum o uso de regras práticas para adoção dos parâmetros do fluxo e da geometria do método de extração em mineração (KVAPIL, 1998). Diversas recomendações práticas (*rules of thumb*) são listadas na literatura. Estas recomendações dizem respeito às dimensões, à inclinação e ao espaçamento das passagens, à granulometria do material e à presença de finos e são citadas a seguir.

A melhor inclinação para uma passagem em minas com rocha de grande resistência é  $70^\circ$  com a horizontal. A inclinação mínima recomendada para o bom fluxo de material

fragmentado no método de abatimento em subníveis é de  $60^\circ$ . Na lavra por corte e enchimento são comuns escavações inclinadas a partir de  $54^\circ$ .

O regime de fluxo em uma passagem é determinado com base no maior tamanho de partícula. Por exemplo, se uma passagem feita com perfuratriz *raise borer* tem diâmetro  $D = 2\text{m}$ , partículas de  $d = 0,5\text{m}$  de diâmetro escoarão livremente (razão  $D/d$  mínima de 4/1 a 6/1, variável de autor para autor), partículas maiores que 1m não escoarão (razão 2/1) e tamanhos intermediários produzirão bloqueios ocasionais, conforme mostra a figura 3.36.

Outras diretrizes: a rocha desmontada contendo cerca de 10% de finos, passantes em uma peneira de malha 20 Tyler, apresenta grande probabilidade de ocorrência de bloqueio ao atravessar uma passagem, pela formação de arco coesivo (KVAPIL, 1965 apud DE LA VERGNE, 2000); passagens de minério devem ser espaçadas em intervalos inferiores a 150m; passagens de estéril, não mais que 225m ao longo da galeria de carregamento, com extração por carregadeira tipo LHD (DE LA VERGNE, 2000).

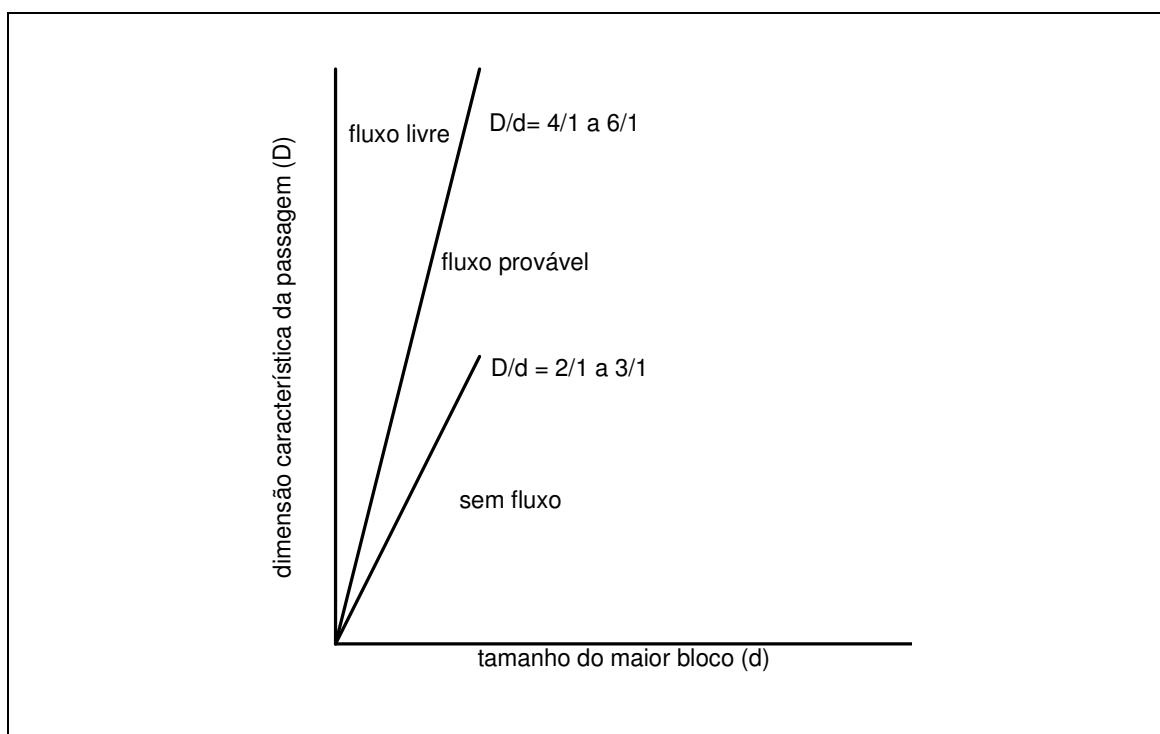


Figura 3.36 – Relações dimensionais entre a dimensão característica da seção da passagem de minério e a granulometria do material.

DURRHEIM (2000) relata a respeito de um programa de pesquisa, o DEEPMINE, desenvolvido entre 1998 e 1999, na África do Sul, financiado por três empresas, mais a Câmara de Minas, apoiado pelo CSIR (agência de tecnologia e inovação da África do Sul) e pela Universidade de Witswatersrand, com o objetivo de produzir recursos humanos e tecnológicos para tornar minas de ouro mais seguras e lucrativas em profundidades de 3km a 5km.

Entre as categorias de parâmetros críticos identificados, estava o transporte de material fragmentado, de pessoal e de materiais diversos, envolvendo o sistema de manuseio, a prática corrente em operações com passagens de minério e o transporte hidráulico. Os objetivos foram identificar e desenvolver as tecnologias que assegurem o transporte seguro e rápido de pessoal e o transporte eficiente de materiais e de rocha fragmentada entre a superfície e o local de trabalho.

Nesse projeto, foi realizado o levantamento da literatura, a identificação dos sistemas usuais de transporte (trens, transportadores, veículos autopropulsores sobre rodas, por cabo sem fim, bombeamento) e foram estabelecidos critérios. Para o citado autor, o sistema com trens representa a melhor opção, incluindo-se as melhorias necessárias.

No tocante à avaliação das práticas correntes no projeto, suporte e manutenção sistemática de passagens de minério, várias visitas a minas foram realizadas. As melhores práticas para passagens de rocha fragmentada foram identificadas. Foi definido que passagem de minério em profundidades de 3000 a 5000m deve estar em rocha competente, deve ter uma razão adequada  $D/d$ , deve ser escavada com perfuratriz *raise borer*, deve ser inclinada entre 60 e 70°, deve ser mantida cheia, regularmente monitorada e com manutenção.

A prática corrente mostra, portanto, algumas ações preventivas e outras corretivas. A pesquisa deve conduzir a mudanças de diretrizes para projeto de passagens e sistemas similares de estocagem e de transporte por gravidade de material nas minas e a melhoria significativa da segurança.

#### 4 – METODOLOGIA

O principal objetivo deste trabalho foi o estudo, com o uso de modelos físicos, do fluxo por gravidade de material fragmentado, através de escavações que compõem a infraestrutura da mina subterrânea. O trabalho foi dividido nas fases descritas a seguir e ilustradas na figura 4.1. Todas as fases foram documentadas (cerca de 450 imagens).

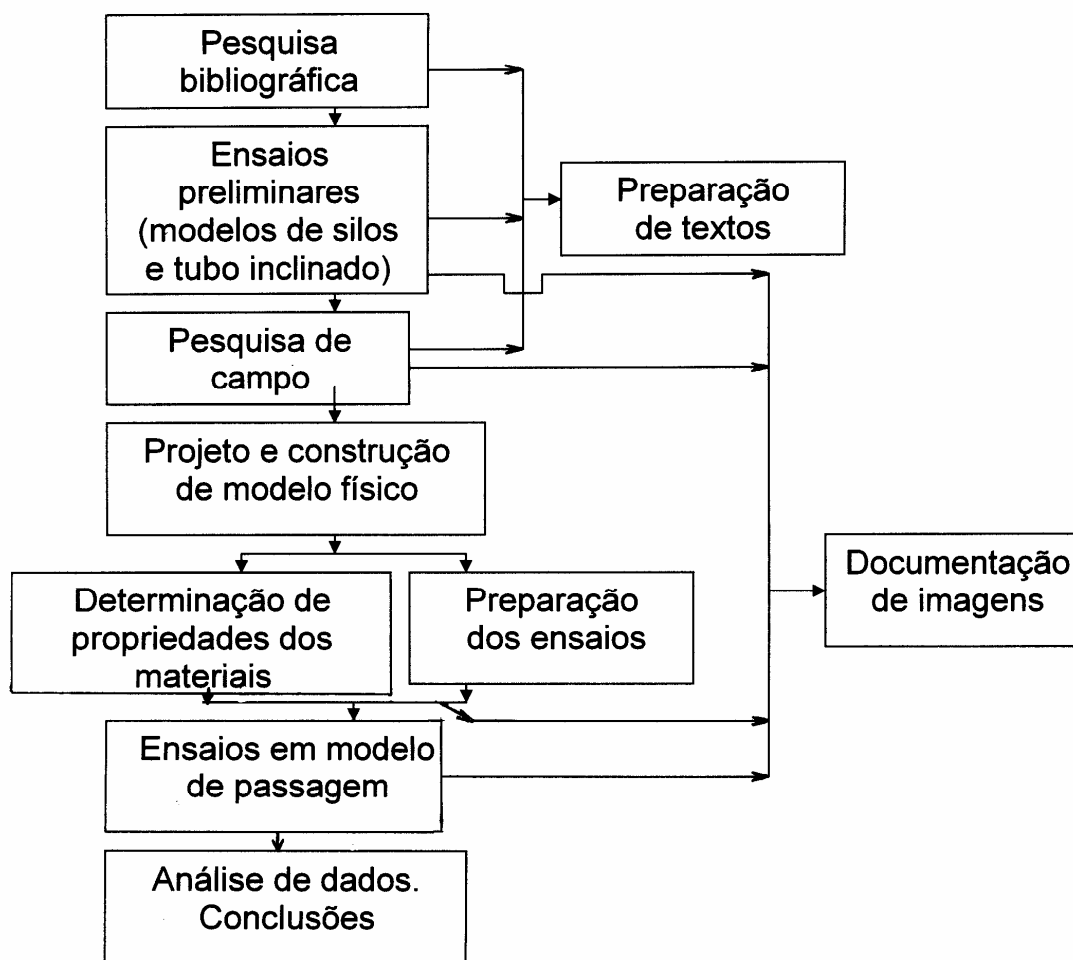


Figura 4.1. Fases do trabalho de estudo do fluxo de material fragmentado em mineração subterrânea.

##### Primeira Fase

Realização de ampla pesquisa bibliográfica, com compilação dos dados obtidos de livros clássicos, artigos publicados em periódicos e em eventos nacionais e internacionais, relatórios e informações disponibilizadas pelas empresas mineradoras,

consultas aos profissionais atuais e anteriores, relatórios de projetos de pesquisa, contatos em congressos, contatos telefônicos, correio eletrônico, trabalhos finais de graduação, entre outros, de modo a subsidiar as fases seguintes e pesquisas futuras.

#### Segunda Fase

Preparação e realização de uma etapa de 200 ensaios com o objetivo de estudar o fluxo de material fragmentado em sistemas mais simples, verificando-se as leis que regem este fluxo. Nos itens 4.2 e 4.3 são detalhadas as metodologias desses ensaios. Os resultados dos ensaios são mostrados nos itens 5.1 e 5.2 deste trabalho.

#### Terceira Fase

Preparação e desenvolvimento de texto básico, com base em dados obtidos na pesquisa bibliográfica, apresentando as leis de fluxo de material fragmentado. Estudo do fluxo de material fragmentado em passagens de minério, de estéril e de material de enchimento. Estudo do fluxo de material fragmentado em escavações utilizadas nos métodos de lavra, principalmente lavra por abatimento em subníveis, lavra de alargamento em subníveis e lavra por recalque.

#### Quarta Fase

Pesquisa de dados do trabalho com fluxo de material fragmentado nas mineradoras do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. O relatório dos dados levantados das minas subterrâneas inclui a descrição geral da situação verificada: arranjos, dimensões, distribuição granulométrica dos materiais, dificuldades, bem como dados para o projeto de modelos físicos para melhoria da compreensão do problema. Os resultados obtidos são mostrados no item 5.3.

#### Quinta Fase

Estudo, projeto, cotação e construção de modelos físicos para estudo do fluxo de material fragmentado na extração em mina subterrânea. O modelo utilizado nos ensaios descritos é mostrado no item 4.5, nas figuras 4.7 e 4.8.

#### Sexta Fase

Determinação de propriedades de materiais (cerca de 1600 medições).

Realização de 511 ensaios em modelo físico de passagem, em escala reduzida, para estudo do fluxo de material fragmentado em mina subterrânea. Nos itens 4.1 e 4.5.3

são detalhadas as metodologias desses ensaios. Os resultados dos ensaios são mostrados nos itens 5.4 e 5.5 deste trabalho.

### Sétima Fase

Análise e interpretação dos dados obtidos.

Atualização das informações, elaboração da tese e apresentação.

## **4.1. Materiais e métodos utilizados na determinação de propriedades de fluxo de materiais**

Detalham-se neste item os métodos de determinação das propriedades de fluxo dos materiais utilizados nos diversos ensaios. Para as diversas variáveis medidas, os valores apresentados consideram apenas os algarismos significativos definidos na medição (segundo normas de trabalho) ou no próprio cálculo da grandeza. Foram determinados: a distribuição granulométrica, o ângulo de repouso natural, o ângulo de atrito com a parede, as massas específicas real e aparente, o índice de forma e o módulo de finura dos materiais utilizados nos ensaios. Os resultados de determinações destas propriedades são mostrados nos itens 5.1 e 5.4.

O tamanho máximo de partícula ( $d$ ) foi determinado pela classificação por peneiramento e pelo aplicativo de fotoanálise denominado *WipFrag*, considerando-se o  $D_{90}$  (tamanho da abertura em que passa 90% do material alimentado). A determinação da distribuição granulométrica foi realizada das seguintes formas:

- nos ensaios preliminares, em silos e em tubos e nos ensaios com areia e brita 0 de dolomita, no modelo de passagem de minério: peneiramento convencional, com determinação de frações passantes em cada superfície de peneiramento, segundo as NBR's 5734, 7211, 7216 e 7217;
- nos ensaios com demais britas, no modelo de passagem de minério: peneiramento convencional e também através do aplicativo *WipFrag*.

O aplicativo *WipFrag* é um sistema de análise de fragmentação que utiliza as técnicas de fotoanálise para determinar a distribuição granulométrica de rocha fragmentada ou de outras partículas. A entrada de dados é realizada a partir de imagens de fotografias de câmeras comuns, digitais, de vídeo e de diapositivos de 35mm. Na utilização do

aplicativo, aplica-se malha sobre a amostra e são contabilizados blocos. O aplicativo fornece histograma e curva de distribuição de tamanho acumulado (WipFrag, 1996).

Na determinação da massa específica dos materiais, utilizou-se uma porção de material de massa conhecida, introduzido em volume conhecido de água; medindo-se o volume de líquido deslocado, determinou-se a razão entre a massa do material e seu volume.

Na determinação da massa específica aparente, utilizou-se uma proveta para separação de um volume conhecido de material granular, fez-se a medição da massa dessa porção de material em balança digital e o cálculo da massa específica. Para as misturas de britas, argila e água, essa determinação ocorreu considerando-se o volume ocupado no próprio modelo físico de passagem.

Na determinação do ângulo de repouso, fez-se o fluxo de porção do material granular, formando uma pilha sobre superfície horizontal; fez-se a medição da altura e do perímetro da base dessa pilha, determinando-se o ângulo através de relações geométricas.

Na determinação do ângulo de atrito com a parede do reservatório foi separada uma amostra do material e fixada em porção de fita adesiva, para evitar o rolamento das partículas. Deste conjunto foi apoiada a face com material em superfície de papelão (o mesmo de que foi construído modelo estático piramidal de silo). Variou-se a inclinação da superfície até o escorregamento da fita com material, determinando-se o ângulo de atrito com a parede.

A determinação da umidade constou de medição da massa do material úmido e da massa do material seco e determinação da relação entre a massa de água contida e a massa total do material.

O índice de forma das partículas foi determinado segundo a NBR 7809/1983, utilizando-se medição com paquímetro digital, com precisão de 0,01mm. Para efeito da norma, índice de forma é a média da relação entre comprimento e espessura das partículas do material, ponderada pela quantidade de partículas da cada fração granulométrica que o compõe. As etapas de trabalho são amostragem, secagem,

peneiramento, determinação do número de fragmentos por faixa granulométrica, quarteamento, medição das dimensões das partículas e determinação do índice de forma (Vide algumas dessas etapas nas figuras 4.2 a 4.4). Na amostragem, a massa inicial mínima de amostra é definida, conforme a NBR 7216, nas quantidades da tabela IV.1. No peneiramento, as peneiras são indicadas pela NBR 5734 e a determinação da composição granulométrica é feita segundo a NBR 7217.

Tabela IV. 1 – Massa mínima de amostra inicial para determinação de distribuição granulométrica, segundo a NBR 7216.

Tamanho dos fragmentos	Massa mínima da amostra inicial (kg)
Entre 9,5 e 19 mm	08
Entre 19 e 25mm	16
Entre 25 e 38mm	24
Acima de 38mm	32

O módulo de finura de cada material testado no modelo de passagem de minério também foi determinado.

Módulo de finura é um parâmetro empírico (ABRAMS, 1918 apud PIZARRO, publicação da década de 60, séc. XX), definido como soma das porcentagens retidas acumuladas em cada uma das peneiras de uma série especificada, dividido por 100 (ABNT, NBR 7211/1983). O mesmo valor de módulo de finura pode ser obtido de diferentes distribuições de tamanho de partícula. Em geral, um valor pequeno (entre 2,00 e 4,00) indica um material fino, um valor maior (6,50 a 8,00) indica um material grosseiro. Esses valores de referência são adequados a partículas menores que 38mm. Combinações de materiais finos e grosseiros apresentam valores intermediários.

A utilização do módulo de finura é para revelar a uniformidade de distribuição de tamanho de partícula, conveniente no controle de qualidade de produtos. Para PIZARRO (sd), o módulo de finura seria sem dúvida a representação ideal da granulometria do material granular, sintetizada num número; contudo, dois materiais podem ter o mesmo módulo e apresentar proporções diferentes de elementos do mesmo tamanho.



Figura 4.2 – Formação de pilha para homogeneização na determinação do índice de forma de partículas.



Figura 4.3 - Dispositivo construído para aplicação da norma NBR 7809, de medição das dimensões de partículas para determinação do fator de forma.

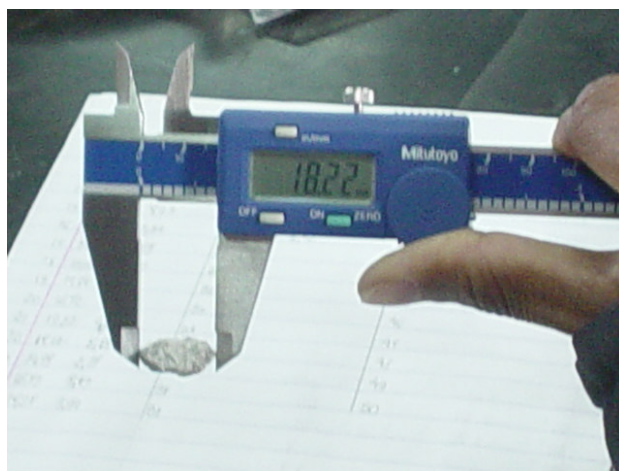


Figura 4.4 – Medição com paquímetro digital na determinação do índice de forma de partículas.

## 4.2. Metodologia utilizada em ensaios em modelos de silos

Os ensaios foram realizados em um modelo de silo vibratório (alimentador de gaveta de mesa de concentração densitária tipo Wilfley, amplitude de 3mm; velocidade angular de 264rpm, de comporta regulável) e em dois modelos de silo estático (prismático, de seção quadrada e fundo piramidal e cilíndrico, de fundo hemisférico), construídos com materiais do cotidiano (garrafa de plástico tipo *pet* e papel), apresentados esquematicamente na figura 4.5. Da esquerda para a direita estão o modelo de silo vibratório, os modelos estáticos prismático e cilíndrico (as dimensões são  $A= 95\text{mm}$ ;  $A'= 150\text{mm}$ ;  $A_1 = 150,0\text{mm}$ ;  $A_2= 61,3\text{mm}$ ;  $B= 50,2\text{mm}$ ;  $D= 96,9\text{mm}$ ;  $H_1= 340\text{mm}$ ;  $H_2 = 43\text{mm}$ ; o ângulo de inclinação da face é  $\beta= 60^\circ$ ).

No modelo de silo vibratório foi testado o fluxo de esferas de aço e de dolomita, com tamanho médio de 6,4 mm e o fluxo de esferas de vidro e de dolomita, com tamanho médio de 0,7 mm; ambos para cinco dimensões da abertura relativa de descarga. Abertura relativa é a razão entre a dimensão da saída (a altura  $h$  do vão entre a base da gaveta e a lâmina inferior da comporta) e o diâmetro médio das partículas ( $d_m$ ).

O silo cilíndrico de fundo hemisférico foi testado com abertura inferior de diâmetro igual a 6,9 mm e a 21,2 mm (relação de área igual a 9,44). O silo prismático de seção quadrada foi utilizado com abertura inferior de 11mm x 5,5mm e de 22 mm x 17mm (relação de área igual a 6,3). Nesses modelos foi testado o fluxo de esferas de vidro e de dolomita britada e bitolada, para dois tamanhos da abertura de descarga. As classes eram esferas de vidro nas seguintes especificações comerciais: 3R; AB; AC; AD; AG e AH; bem como dolomita em três faixas granulométricas diferentes. Foram variados: faixa granulométrica, forma das partículas, ângulo de inclinação e diâmetro do tubo.

Os modelos foram alimentados completamente com o material antes da abertura da descarga. Intervalos de tempo foram adotados, com a massa escoada em cada intervalo sendo coletada para a determinação da vazão. O processo era repetido até que o regime de fluxo se alterasse completamente ou terminasse a descarga do material.

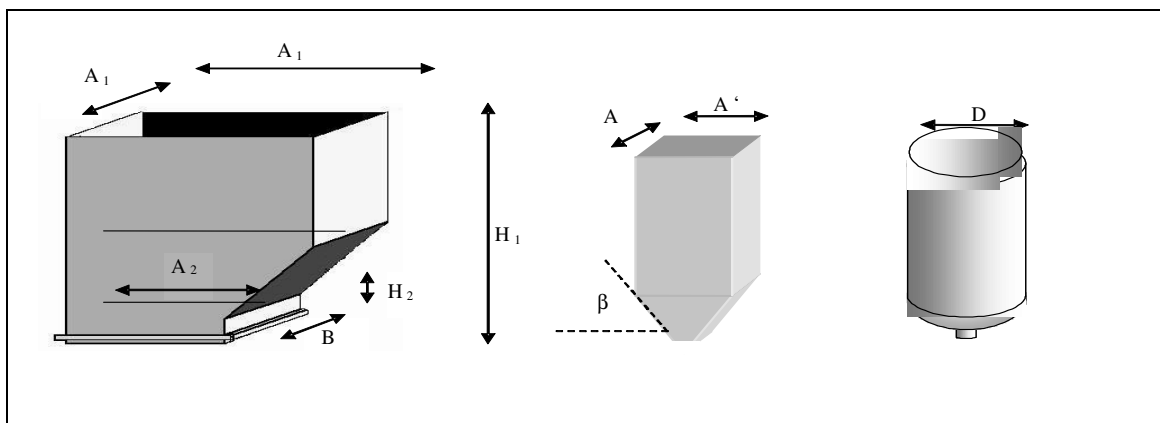


Figura 4.5 - Geometria dos modelos de silos utilizados para os ensaios de fluxo.

### 4.3. Metodologia utilizada em ensaios em tubos cilíndricos inclinados

Nesse trabalho foram realizados ensaios de fluxo de areia, de elipsóides de polietileno e de esferas de vidro em tubos inclinados, de diâmetros e de comprimentos variados. Na fase de estudo mais fundamental, utilizou-se reservatório cilíndrico de PVC perfurado na parede lateral, junto à base, por onde se inseria o tubo de vidro até que sua extremidade se posicionasse no eixo central do reservatório, sendo usada massa plástica para a vedação (figuras 4.6 e 4.7).

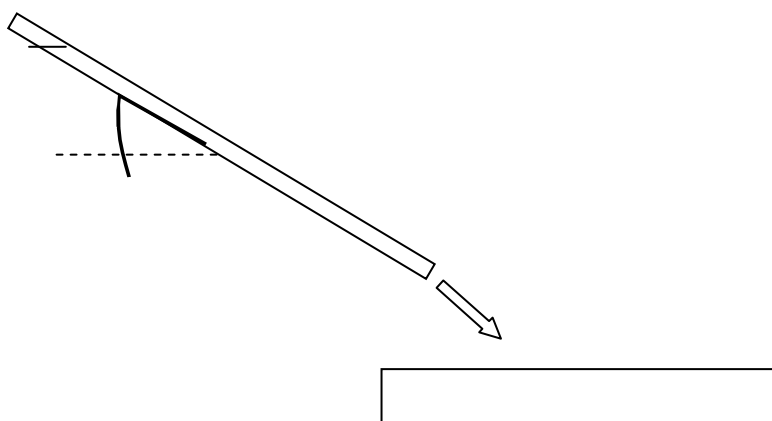


Figura 4.6 – Representação esquemática do dispositivo de ensaios de fluxo em tubos cilíndricos inclinados.



Figura 4.7 – Fotografia de ensaio de fluxo de areia em tubo inclinado.

#### 4.4. Descrição do projeto e da construção de modelo físico de passagem

A literatura apresenta trabalhos nas escalas 1:20 e 1:30 entre as dimensões dos modelos e as dimensões dos objetos reais. Após o estudo e análise dos modelos físicos existentes, da seleção de materiais e da definição da geometria ser utilizada, foi construído o seguinte modelo para esse estudo, definido a partir das dimensões do corpo de minério da Mina do Baltar, lavrado pelo método de alargamento em subníveis, arbitrando-se os valores reais dos parâmetros geométricos das escavações e do corpo de minério, escolhendo-se, a partir das escalas mais comuns encontradas na literatura, as dimensões do modelo para estudo.

As dimensões do modelo (escala 1:20) são:

- largura do corpo de minério – 2,1m (42m);
- altura do corpo de minério – 3,9 m (78m);
- seção da passagem de minério: 0,12m x 0,16m;
- espaçamento entre subníveis – 0,75m (15m);
- seção das galerias – altura de 0,275m (5,5m) por largura de 0,2m (4m).

O modelo construído é mostrado na figura 4.8, com utilização de placas de madeira na estrutura geral e partes das paredes frontais de acrílico para observação do comportamento do fluxo de material. A passagem de minério tem comprimento de 3m,

mais um Joelho removível de 0,70m; um total de 3,70m. O Joelho pode ser testado com ângulos diferentes variáveis com a horizontal. A passagem tem opção de inclinação de 60 a 90° em relação à horizontal. A seção da passagem pode também ser reduzida. Estas variações são obtidas através da introdução dos acessórios mostrados na figura 4.8. A passagem de minério com presença de ramificações e/ou Joelho pode simular os efeitos sobre o chute da queda de material, por exemplo, na remoção de um bloqueio. A alimentação pode ser realizada de três níveis diferentes para verificação do efeito desse fator. Podem ser testadas as variações de ramificações com alimentação simultânea ou não.

Considerando a escala do trabalho em modelo diferente da escala real, os materiais utilizados nos ensaios foram areia (6,3% de umidade), brita de gnaiss (tamanhos comerciais: brita 0, brita 1 e brita 2) e brita de dolomita (brita 0 e brita 1), com umidade natural, simulando o minério. Não se realizaram ensaios em dias de chuva continuada, de modo a se preservar a umidade definida para os materiais nesse estudo.

#### **4.5. Metodologia utilizada em ensaios em modelo físico de passagem**

Nos ensaios realizados em modelo físico de passagem, foram utilizados três tipos de materiais (incluindo um total de seis faixas granulométricas), foram testadas cinco variações da inclinação da passagem, três níveis da coluna de material, dois valores da seção de descarga e a presença ou ausência do Joelho. Foram observadas: a umidade, a influência da estocagem de material, a ocorrência de problemas diversos, com os ensaios sempre documentados. Foi medida a vazão aparente de descarga.

##### **4.5.1. Preparação do ensaio em modelo físico de passagem de minério**

As etapas do ensaio em modelo físico de passagem de minério são ilustradas na figura 4.10. A preparação do ensaio em modelo físico de passagem de minério constou de estabelecimento da inclinação do modelo (com determinação do ângulo com bússola e clinômetro de disco), da colocação de traçadores e da determinação de propriedades e características do material fragmentado (massa específica real e aparente, porosidade aparente, distribuição granulométrica, ângulo de repouso, índice de forma e módulo de finura).

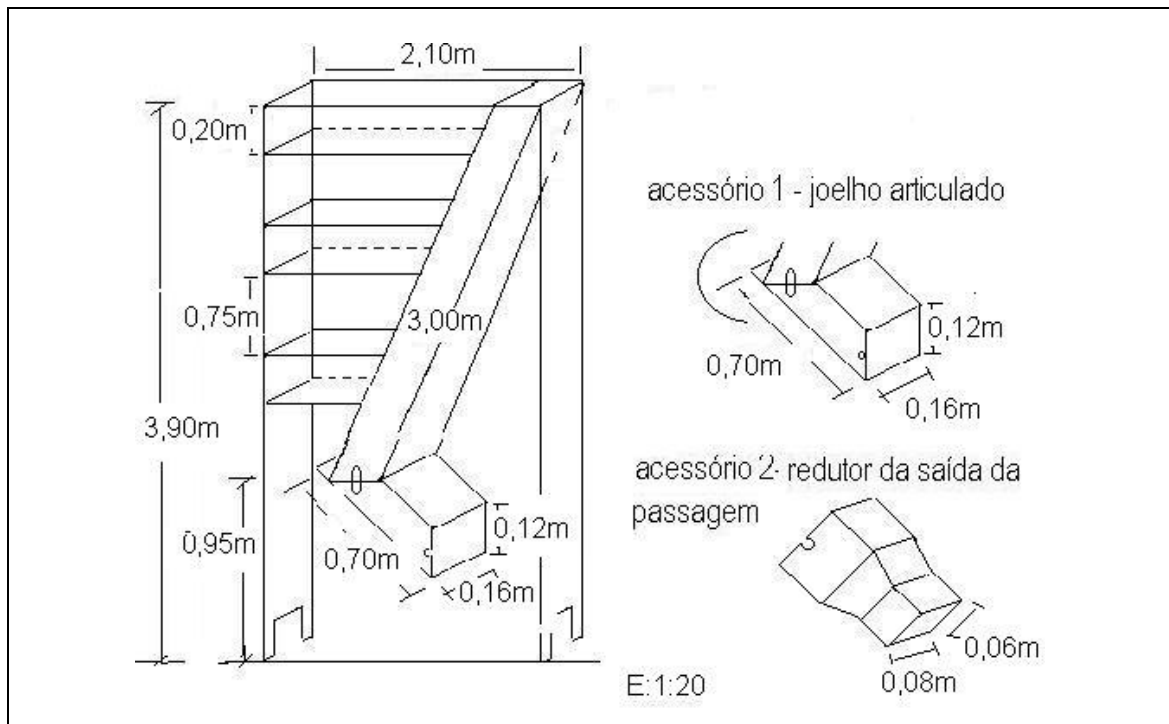


Figura 4.8 – Modelo físico de passagem de minério utilizado para o estudo do fluxo de material fragmentado.



Figura 4.9 – Fotografia do modelo físico de passagem de minério.

#### **4.5.2. Descrição dos ensaios em modelo físico de passagem de minério**

Foram realizadas séries de ensaios para observação de problemas de fluxo, até a obtenção de no mínimo três ensaios com valores de vazão validados estatisticamente. Os critérios para validação estatística foram nível de confiança mínimo de 90%, utilizando-se distribuição estatística para a determinação do intervalo de confiança. A seguinte seqüência de trabalho foi obedecida:

- 1) programação geral dos ensaios;
- 2) programação de cada ensaio, ensaio preliminar para definição dos tempos de coleta e dos dispositivos de controle de saída a utilizar;
- 3) alimentação do material no modelo;
- 4) abertura da saída;
- 5) documentação fotográfica de etapas do processo, considerando-se as alturas da coluna de material no modelo;
- 6) coleta do material passante, medição de sua massa e determinação da vazão; documentação fotográfica do material retido acima do arco (documentação da geometria formada para cada material ensaiado);
- 7) determinação da distribuição granulométrica do material, após a descarga;
- 8) determinação de índice de forma das partículas, após a descarga.

#### **4.5.3. Metodologias utilizadas nas observações durante os ensaios em modelo físico de passagem**

A determinação da vazão (taxa de fluxo) foi realizada através da medição da massa (em balança digital, com precisão de 0,02kg) e do tempo de fluxo (cronômetro digital, com precisão de 0,01s). Através de relações entre as variáveis, conhecidas a massa específica aparente do material e a seção de descarga, foram determinadas a vazão aparente de descarga e a velocidade de fluxo do material no modelo de passagem. Não foi considerado neste trabalho o raio hidráulico do modelo, comum em alguns trabalhos anteriores, uma vez que sua utilização seria consistente com a determinação, em diversas etapas do fluxo, da altura da coluna de material no modelo; o que não foi possível.

Na ocorrência de interrupção de fluxo ou formação de arco, o cronômetro era parado e acionado novamente quando o fluxo era reiniciado, após a intervenção necessária (adição de energia através de batidas desferidas na lateral do modelo).

A influência da estocagem foi verificada com ensaios com tempo de estocagem que variou de 24h a 264h. Os modelos foram alimentados completamente com o material. A abertura da descarga foi realizada, medindo-se a porcentagem de variação da vazão em situação de estocagem, em comparação com a média dos outros ensaios realizados sem estocagem de material. Esta determinação foi feita para ensaios com modelo de passagem de minério sem joelho ou com joelho acoplado.

A ocorrência de fluxo em funil foi detectada pela introdução de traçadores coloridos, colocados em regiões de fácil visualização no modelo físico, através da gravação de imagens e da observação da seqüência na descarga de material do modelo. Para traçadores foram utilizados os próprios materiais de ensaio, pintados, de modo que pudessem ser recolhidos quando o material solto era descarregado. Com base nos traçadores recuperados, pôde se determinar a formação de fluxo em funil.

A presença de finos foi detectada por observação visual e pela quantificação da porcentagem massa/massa em relação ao total de material descarregado do modelo físico. A amostragem foi aleatória. Também através da comparação da classificação granulométrica do material antes e após a série de ensaios.

Os arranjos dos fragmentos foram observados através de documentação fotográfica e da observação visual das colisões de partículas.

Os ensaios com redução da seção para 6cm x 8cm foram realizados, utilizando-se o adaptador mostrado na figura 4.8. Ensaios com misturas de materiais e acréscimo de argila bentonítica e água também foram realizados.

A primeira etapa de avaliação de parâmetros de influência consistiu em reduzir-se o número inicial de quatorze variáveis que influenciam a vazão de descarga de material em reservatórios (listadas no primeiro parágrafo do item 3.3.5), para cinco variáveis mais significativas, através das condições operacionais. Os valores dos níveis experimentais foram definidos com base na literatura disponível, nas informações das

visitas técnicas realizadas e nos testes preliminares realizados em modelos de silos. Na análise estatística de experimentos, o nível de confiança mínimo que se adotou para o trabalho foi de 90%.

Nos ensaios realizados, para os diversos materiais, foram testadas as variações da inclinação da passagem, da natureza e faixa granulométrica do material, da coluna de enchimento, da seção de descarga, da presença ou não do joelho. Essa última variável foi qualitativa.

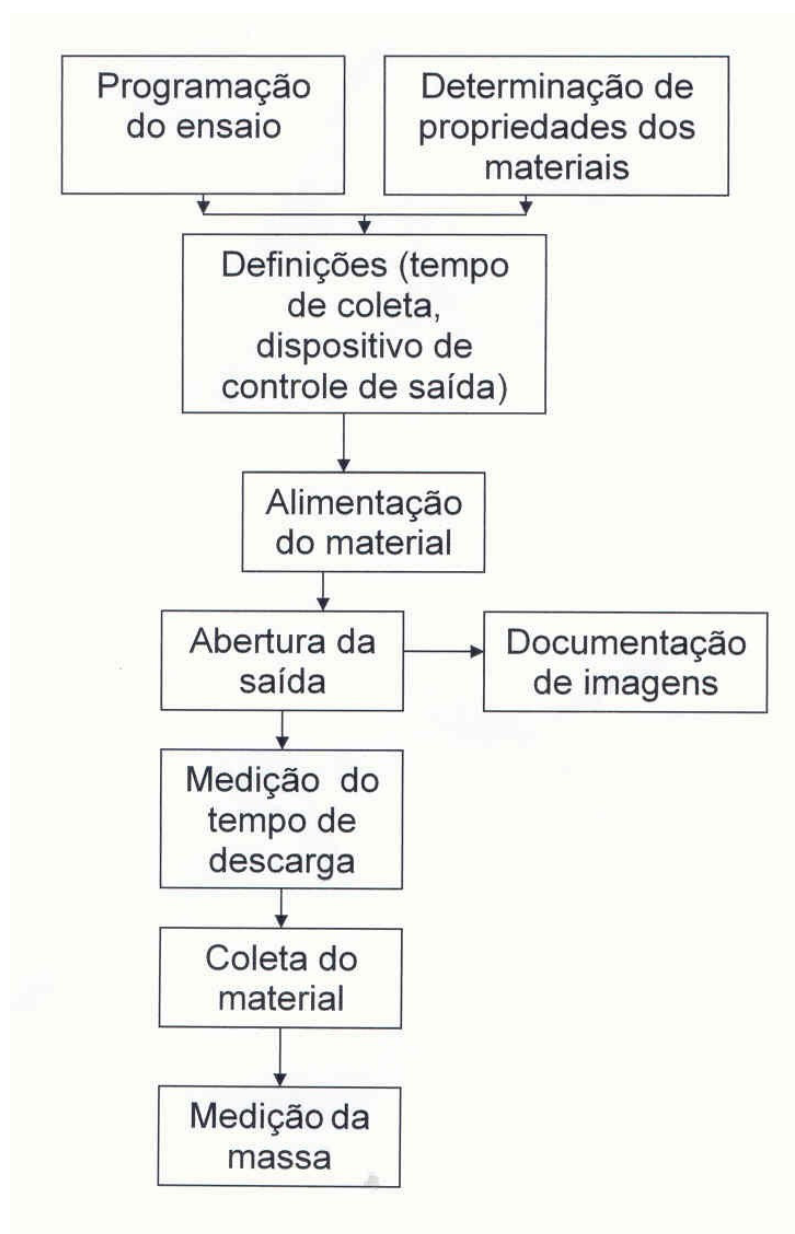


Figura 4.10 - Etapas do ensaio em modelo físico de passagem.

## 5 - RESULTADOS OBTIDOS E DISCUSSÃO

O trabalho se iniciou com a revisão bibliográfica. Com o objetivo de verificar as possibilidades de ensaios e de mecanismos de fluxo, foram realizados ensaios preliminares em modelos de silo vibratório, de silos estáticos e em tubos cilíndricos inclinados. Foi realizado levantamento da prática em minas subterrâneas. Em seguida, foi projetado e construído o modelo físico de passagem. Foram realizados, então, os ensaios. Descrevem-se nos itens seguintes os resultados obtidos em cada etapa.

### 5.1. Ensaios em modelos de silos

Este item analisa o efeito sobre o fluxo de material granular dos parâmetros: abertura relativa da descarga do silo, método de retomada de material, forma e massa específica das partículas. Em cada etapa de ensaios, foi realizada determinação de índices físicos dos materiais. Os valores médios de propriedades são mostrados na tabela V.1.

Tabela V.1 – Características e propriedades de materiais utilizados em ensaios em modelos de silos.

Material	Faixa granulométrica [10 <sup>-6</sup> m]	Massa específica [kg/m <sup>3</sup> ]	Massa específica aparente [kg/m <sup>3</sup> ]	Porosidade aparente (ε) [%]	Ângulo de Repouso	Ângulo de Atrito com a parede
Esfera de aço	7000	7330	4200	43	19,5	22,7
Dolomita	7000	2820	1560	45	16,6	39,3
Dolomita	600 a 800	2820	1440	50	24,7	37,6
Dolomita	105 a 210	2820	1440	50	30,0	27,3
Dolomita	210 a 600	2820	1440	50	23,0	31,5
Esfera de vidro 3R	600 a 800	2490	1460	43	19,5	19,7
Esfera de vidro AB	177 a 297	2490	1420	41	16,0	22,0
Esfera de vidro AC	149 a 250	2490	1420	43	21,8	18,8
Esfera de vidro AD	105 a 210	2490	1420	43	20,8	20,9
Esfera de vidro AG	53 a 105	2490	1420	43	21,7	19,3
Esfera de vidro AH	53 a 105	2490	1420	43	22,8	19,3

Notas: As esferas de vidro têm esfericidade mínima de 70% (esferas AB, AC e AD) e de 80% (AG e AH), segundo o fabricante. Dados usuais de literatura: massa específica de esfera de vidro padrão - 2448kg/m<sup>3</sup>; massa específica aparente de dolomita - 1600 kg/m<sup>3</sup> (GOMIDE, 1983).

### 5.1.1. Resultados de vazões em modelos de silos

Foram medidas vazões mássicas nos modelos de silos, vibratório e estáticos, conforme metodologia descrita no item 4. Foi definida como abertura relativa do silo a razão entre a altura da comporta do modelo de silo ( $h$ ) e o tamanho médio de material ( $d_m$ ).

#### Ensaio em modelo de silo vibratório

A figura 5.1 apresenta os resultados de vazão mássica de esferas de aço e de dolomita (forma variada), na faixa de tamanho de 6,4 mm, para diversas dimensões da abertura de descarga, em modelo de silo vibratório.

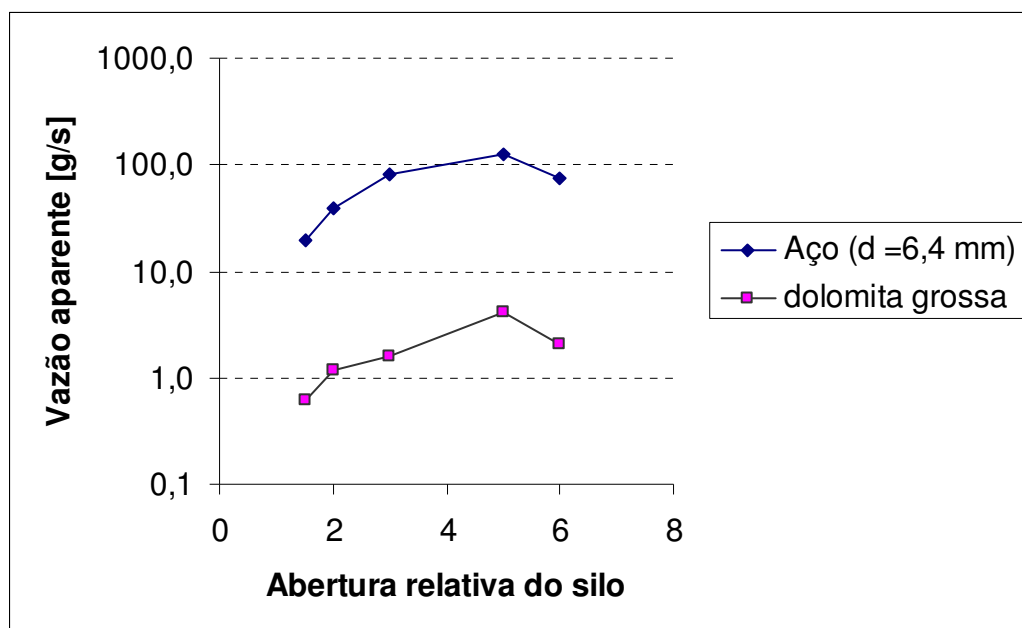


Figura 5.1 – Resultados de vazão mássica média de esferas de aço e de dolomita (tamanho médio de 6,4mm) para diversas dimensões da abertura de descarga, em modelo de silo vibratório.

No silo vibratório, a razão média de vazões aparentes entre esferas de aço e dolomita foi de 11,5, para diversas dimensões da aberturas de descarga, de tamanho médio de 6,4mm,. A mesma relação entre esferas de vidro e dolomita, na faixa de tamanho de 0,7mm, foi de 3,33. Como as massas específicas aparentes das esferas de vidro e da dolomita são muito próximas, pode-se considerar que o efeito da forma das partículas foi o único atuante para

desviar a razão do valor de 1,00. Na comparação entre esferas de aço e dolomita, além do efeito da forma das partículas também há o efeito da maior massa específica aparente do aço em relação à dolomita.

### **Ensaio em modelos de silos estáticos**

Foram utilizados modelo de silo cilíndrico, de 97 mm de diâmetro e modelo de silo prismático, de aresta horizontal do paralelepípedo superior de 95mm. A figura 5.2 apresenta os resultados de vazão mássica de esferas de vidro e de dolomita, na faixa de tamanho de 0,7 mm, para diversas dimensões da abertura de descarga, em modelo de silo vibratório.

Foram testadas partículas de tamanho médio de 6,4 e de 0,7mm, com variação das dimensões da abertura. As figuras 5.3 e 5.4 mostram os resultados das vazões mássicas médias de fluxo de esferas de vidro e de dolomita, para os silos estáticos cilíndrico e prismático, respectivamente. A comparação dos valores medidos com a literatura (MCCABE e SMITH, 1956) mostrou que os resultados apresentam divergências acentuadas (tabela V.2).

A tabela V.3 mostra vazão mássica de dolomita, de geometria variada, no modelo de silo vibratório, nas faixas granulométricas: tamanhos médios de 6,4mm e 0,7mm respectivamente. A tabela V.4 mostra vazão mássica das esferas de aço e de vidro no modelo de silo vibratório, em duas granulometrias: tamanhos médios de 6,4mm (aço) e 0,7mm (vidro) e massas específicas diferentes ( $7,33$  e  $2,49 \text{ g/cm}^3$ , respectivamente). Consideradas as aberturas relativas, a razão de vazões deveria ser constante.

Nos ensaios nos modelos de silo estático, na faixa granulométrica mais fina testada, contrariamente ao esperado, os materiais apresentaram, na maioria das vezes, vazões relativamente menores, em ambas as aberturas, mesmo possuindo mesma forma de partícula e mesma massa específica.

Considerando que, para a abertura relativa de 20, o silo vibratório apresentou uma razão entre as vazões de esferas (aço e dolomita) igual a 3,4 e que, para os silos estáticos, pode-se prever razões entre 1,24 e 2,09, segundo resultados obtidos, constata-se um efeito da forma de partícula e da modalidade de retomada (vibração), uma vez que a faixa granulométrica é a mesma e os valores das massas específicas aparentes são muito próximos.

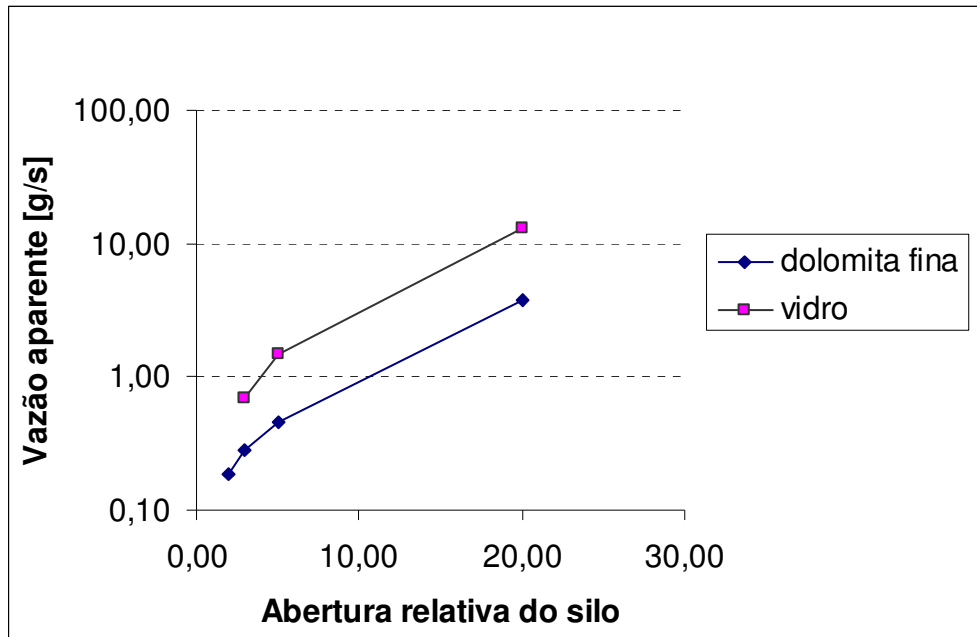


Figura 5.2 – Resultados de vazão mássica média de esferas de vidro e de dolomita (tamanho médio de 0,7mm) para diversas dimensões da abertura de descarga, em modelo de silo vibratório.

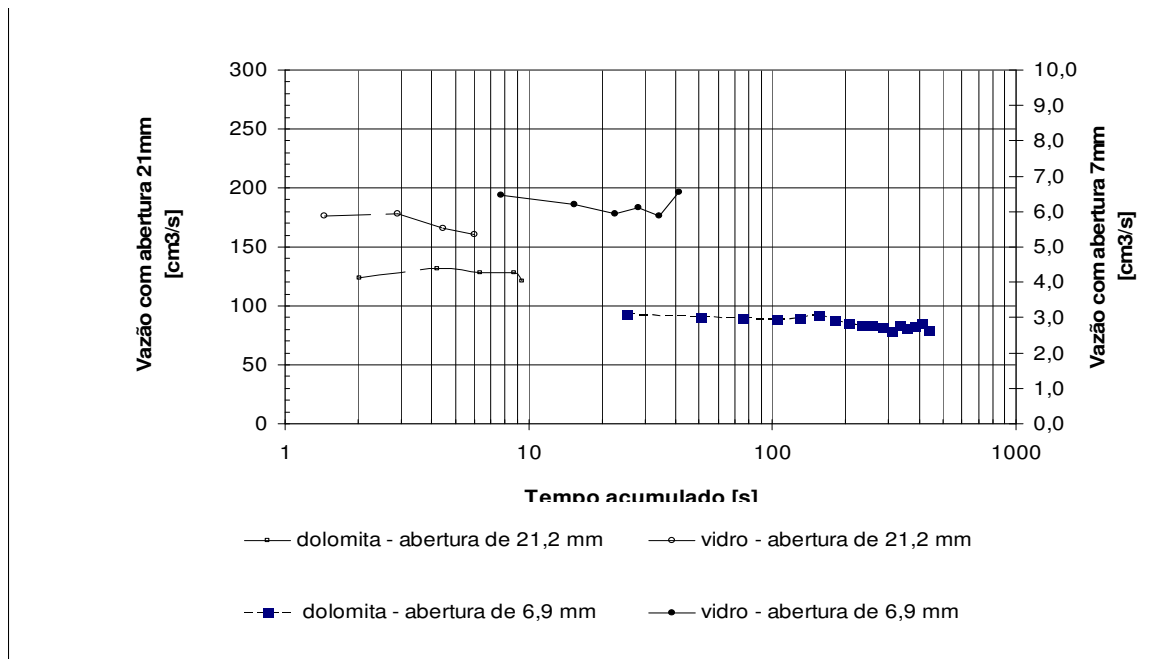


Figura 5.3 – Resultados de vazões mássicas médias de fluxo de esferas de vidro e de dolomita, para o silo estático cilíndrico.

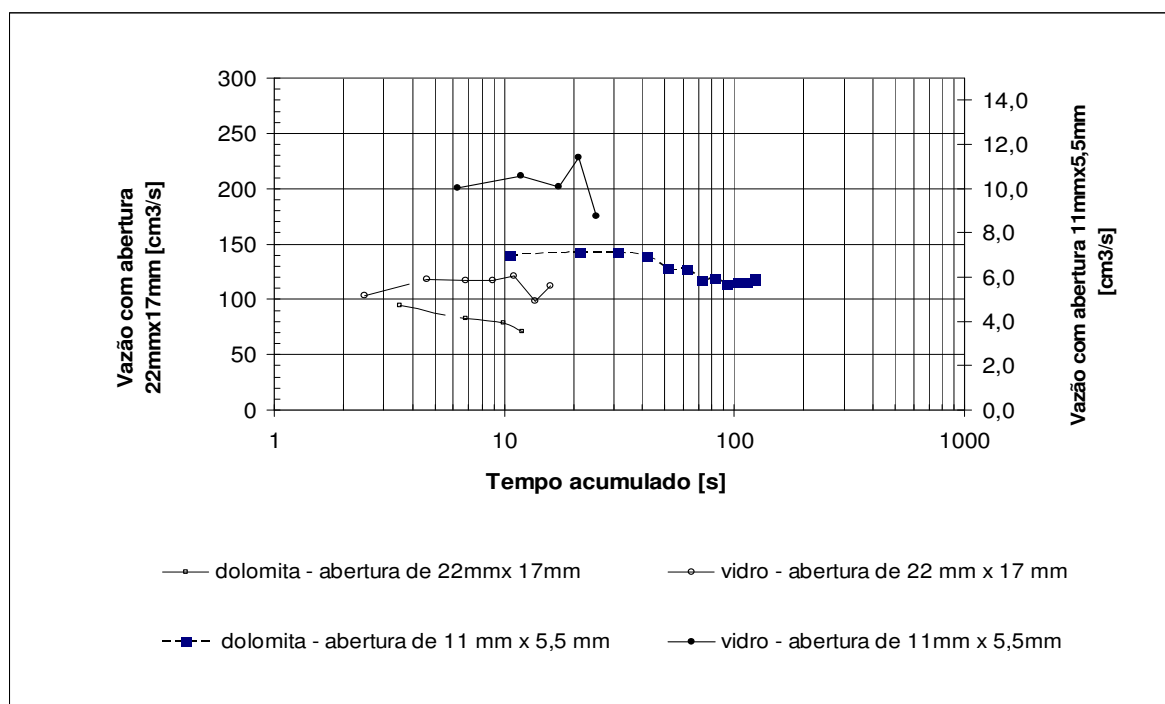


Figura 5.4 – Resultados de vazões mássicas médias de fluxo de esferas de vidro e de dolomita, para o silo estático prismático.

Tabela V.2 – Comparação entre valores previstos e valores medidos para a vazão mássica em modelos estáticos de silos.

Material	Tipo de silo/ Abertura	Vazão prevista [kg/s]	Vazão medida [kg/s]
vidro	Cilíndrico, abertura de 11mmx5,5mm	$3,69 \times 10^{-4}$	$8,70 \times 10^{-3}$
dolomita	Cilíndrico, abertura de 11mmx5,5mm	$5,83 \times 10^{-4}$	$4,11 \times 10^{-3}$
vidro	Cilíndrico, abertura de 22mmx17mm	$1,20 \times 10^{-2}$	$2,42 \times 10^{-1}$
dolomita	Cilíndrico, abertura de 22mmx17mm	$1,35 \times 10^{-2}$	$1,82 \times 10^{-1}$
vidro	Prismático, abertura de 11mmx5,5mm	$9,93 \times 10^{-1}$	$1,35 \times 10^{-2}$
dolomita	Prismático, abertura de 11mmx5,5mm	$7,30 \times 10^{-1}$	$1,10 \times 10^{-2}$
vidro	Prismático, abertura de 22mmx17mm	$1,65 \times 10^{-1}$	$1,60 \times 10^{-1}$
dolomita	Prismático, abertura de 22mmx17mm	$9,24 \times 10^0$	$1,27 \times 10^{-1}$

Tabela V.3 – Razão de vazões de dolomita em função da abertura relativa ( $h/d_m$ ) no modelo de silo vibratório.

Abertura relativa	Vazão dolomita 6,4 mm [g/s]	Vazão dolomita 0,7mm [g/s]	Razão das vazões
2	1,16	0,18	6
3	1,58	0,28	5,6
5	4,11	0,45	9

Tabela V.4 - Razão de vazões de esferas em função da abertura relativa ( $h/d_m$ ) no modelo de silo vibratório.

Abertura relativa	Vazão de esferas de aço 6,4 mm (g/s)	Vazão de esferas de vidro 0,7mm [g/s]	Razão das Vazões
3	81,11	0,70	115,9
5	123,04	1,49	82,6

Houve dificuldade de análise do efeito da modalidade de retomada, dadas as diferentes aberturas relativas analisadas para os modelos vibratório e estático. Para o modelo de silo vibratório, foram analisadas:

- na faixa de tamanho  $d_m = 6,4\text{mm}$ , foram testadas aberturas relativas: 1,5; 2, 3 e 6;
- na faixa de tamanho  $d_m = 0,7\text{mm}$ , as aberturas relativas  $h/d_m$  : 3, 5 e 20.

Para os modelos de silos estáticos, foram testadas:

- para o silo cilíndrico, na faixa de tamanho  $d_m = 0,7\text{mm}$ ,  $h/d_m$  de 10 e de 30;
- para o silo prismático, na faixa de  $d_m = 0,7\text{mm}$ ,  $h/d_m$  de 8 e de 24.

### 5.1.2. Equação da vazão específica em modelo de silo vibratório

Neste trabalho foi estabelecida, especificamente para esse modelo de silo, a expressão analítica da vazão volumétrica de material granular por metro de abertura de alimentação, através de análise de regressão dos dados obtidos em ensaios no modelo de silo vibratório, usando quatro materiais, em função da abertura relativa de descarga ( $h/d_m$ ). Os parâmetros de regressão (a, b, c) são mostrados na tabela V.5 (com coeficiente de regressão mínimo de 98%).

$$q_v = \frac{Q_v}{L} = \frac{\sqrt{a \times \left(\frac{h}{d_m} - 1\right)^2 + b \times \left(\frac{h}{d_m} - 1\right) + c} - \sqrt{c}}{0,042} \quad (16)$$

Onde:  $q_v$  = vazão volumétrica específica [ $\text{m}^3/\text{s}$  por m],

$Q_v$  = vazão volumétrica [ $\text{m}^3/\text{s}$ ],

$L$  = largura da abertura do alimentador de gaveta [m],

$h$  = altura da comporta de saída ou vão [m],

$d_m$  = diâmetro médio das partículas [m].

Tabela V.5 – Parâmetros da equação de regressão da vazão específica em modelo de silo vibratório, tipo alimentador de gaveta.

Parâmetro	Dolomita fina (700 $\mu\text{m}$ )	Vidro 3R (700 $\mu\text{m}$ )	Dolomita grossa (7mm)	Esfera de aço (7mm)
a	$1,2936 \times 10^{-7}$	$7,5380 \times 10^{-7}$	$1,27118 \times 10^{-6}$	$1,1826 \times 10^{-6}$
b	$1,6476 \times 10^{-6}$	$1,5103 \times 10^{-6}$	$5,65303 \times 10^{-6}$	$1,0932 \times 10^{-2}$
c	$6,9218 \times 10^{-5}$	$2,3772 \times 10^{-5}$	$1,10115 \times 10^{-5}$	$1,2208 \times 10^{-2}$

## 5. 2. Ensaios em tubos cilíndricos inclinados

Problemas relacionados ao fluxo por gravidade de material granular em tubos foram estudados em ensaios em modelo em escala reduzida. A tabela V.6 mostra valores médios das propriedades dos materiais e valores obtidos de vazão aparente de materiais em tubo cilíndrico de vidro (inclinação  $\alpha_t$ ), ligado lateralmente a reservatório cilíndrico de PVC. A altura da coluna no reservatório foi de 0,255 m.

O efeito da forma das partículas se acentua com o aumento da razão  $e/d_m$ . Comparando-se a vazão de esferas de vidro e a vazão de areia com mesma faixa granulométrica, temos: para  $\alpha_t = 36^\circ$ , a vazão areia foi de 38,3% da vazão de esferas, com  $e/d_m = 12,5$  e de 0,0% com  $e/d_m = 45,6$ . A atenuação desse efeito pode ser alcançada aumentando-se a inclinação: para  $\alpha_t = 42^\circ$ , a vazão de areia foi de 109,6 % da vazão de esferas, com  $e/d_m = 12,5$  e de 16,3 % com  $e/d_m = 45,6$ .

Tabela V.6 – Propriedades dos materiais e resultados de vazões em fluxo de material granular em tubos inclinados.

Material granular	Tamanho de partícula (d) [mm]	Razão (e/d <sub>m</sub> )	Diâmetro do tubo (D) [m]	Vazão Volumétrica [10 <sup>-6</sup> m <sup>3</sup> /s]	
				α <sub>t</sub> = 36 °	α <sub>t</sub> = 42 °
Elipsóide de polietileno (espessura 1,7 mm)	5,00	2,0	0,010	0,00	33,01
Areia bitolada	0,6 a 0,8	12,5	0,010	4,05	12,71
Esfera de vidro 3R	0,6 a 0,8	12,5	0,010	10,57	11,60
Esfera de vidro AG	0,053 a 0,105	95,2	0,010	20,00	23,32
Elipsóide de polietileno	5,00	7,3	0,0365	243,96	206,05
Areia bitolada	0,6 a 0,8	45,6	0,0365	0,00	184,34
Esfera de vidro 3R	0,6 a 0,8	45,6	0,0365	306,06	>1.130
Esfera de vidro AG	0,053 a 0,105	347,6	0,0365	295,49	>1.670

Nota: nos casos em que não foi possível medir a vazão, pelo motivo do tempo de fluxo ser muito pequeno, foi estimada a vazão mínima.

### 5.2.1. Equação da velocidade de fluxo normalizada

Na tabela V.6 deve ser considerado que, como os tubos atingiam o interior do material, a área efetiva da entrada deve estar entre a projeção vertical e a área nominal do tubo. Assim, normalizando a velocidade superficial de escoamento pelo co-seno da inclinação ( $v$ ) e pela velocidade máxima obtida em cada inclinação ( $v_{\max}$ ), tem-se a equação seguinte para esferas de vidro (com correlação de 89,9 %, expurgando-se um ponto aberrante). Essa equação acena para a quantificação da regra de que, à medida que  $D/d$  aumenta, diminui o efeito relativo do atrito com as paredes e, portanto, do confinamento.

$$\frac{v}{v_{\max}} = 1 - e^{-\left(\frac{D/d}{44}\right)} \quad (17)$$

### **5.3. Levantamento da prática corrente em fluxo por gravidade de material fragmentado**

Antes da realização de ensaios em modelo físico, foi realizado levantamento da prática corrente de fluxo por gravidade de material fragmentado na mineração subterrânea, principalmente em micro-estágio, visitas técnicas em minas de ouro do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais e em contatos pessoais com mineradores: MATTA (2005), AMORIM (2005), ROCHA (2004), PINTO (2004), PENNA (2004), QUINTEIRO (2003), MAGALHÃES (2002); acrescentadas informações de MENDES (1995) e de CUNHA (1994).

Na maioria das minas brasileiras, não existe a preocupação em registrar problemas de fluxo e acidentes relacionados à operação de passagens de minério. A situação é a mesma nas minas subterrâneas do Quadrilátero Ferrífero. Com relação à vazão de descarga, na prática, o ritmo de descarregamento da passagem depende da operação posterior de transporte (depende do tempo necessário para se obter quantidade necessária para carregar uma composição de vagões ou depende de paradas eventuais ocorridas na estação de carregamento de esquipas etc).

Nas minas subterrâneas não há caracterização do minério desmontado, a não ser a classificação realizada através da dimensão da abertura de uma grelha colocada no nível de lavra na entrada da passagem de minério. É comum a utilização de rompedor para a quebra de material de tamanho superior ao tamanho da abertura da grelha. Algumas das minas não utilizam mais passagens de minério no transporte vertical de material, por causa de problemas anteriores de fluxo.

Os principais problemas registrados relacionados ao sistema de fluxo são bloqueio de material fragmentado; deslocamento ou desgaste excessivo das paredes das passagens; comportamento dos finos produzidos no desmonte por explosivo, provocando formação de arco coesivo; retenção da água injetada para destruir o arco coesivo, o que pode causar problemas operacionais e de segurança para o pessoal (avalanche de lama).

Algumas vezes, dado o dano sofrido, as passagens de minério precisam ser abandonadas. Não existem dados disponíveis da vida útil destas escavações. As

passagens têm vida útil projetada em função do método de lavra aplicado, mas não se registra o tempo de utilização efetiva da passagem. Em uma mina do Quadrilátero Ferrífero aconteceu a interligação de uma passagem de estéril com uma passagem de minério e os constantes deslocamentos levaram à obstrução dos chutes na estação de carregamento. Nos demais problemas citados, há necessidade das seguintes intervenções: realização de desmonte secundário para o problema de formação de arcos mecânicos e de injeção de jatos de água ou ar para a destruição de arcos coesivos.

No controle das cavidades resultantes do deslocamento das paredes de passagens, algumas minerações brasileiras têm utilizado o sistema CMS (*Cavity Monitoring System*). O sistema consta de levantamento topográfico, com varredura a *laser*, que pode ser realizada em uma cavidade subterrânea inacessível. Desta forma obtêm-se as coordenadas reais de pontos, possibilitando a interpretação e desenho da cavidade para comparação com o vazio projetado (BEZERRA e ANDRADE, 2000; OLIVEIRA *et alii*, 2004). Os dados podem ser usados para determinar perfis detalhados de passagens de minério, de pilares, de galerias horizontais e de pontos de carregamento, além dos volumes produzidos dos realces, a diluição, os volumes de material de enchimento e outras medições na mina (MINING MAGAZINE, 2001). As unidades podem ser operadas a uma distância de até 250m, além de terem um alcance de até 350m. Na Mineração Caraíba, Jaguarari, BA, o CMS é utilizado principalmente no apoio ao monitoramento da estabilidade das escavações e ao planejamento das operações de lavra (BEZERRA e ANDRADE, 2000).

São comuns em minas brasileiras passagens de minério com seções quadradas ou circulares, na faixa de 1m a 1,5m de dimensão característica, com grelhas na faixa de 30 a 80cm de abertura. Em uma das minas visitadas, no chute que alimenta os esquipos não há problemas de arcos mecânicos, pois existe uma classificação através de uma grelha, de dimensão da abertura bastante inferior à abertura de descarga do chute. Além disso, não há armazenamento de material nas cavidades, o que minimiza as chances de ocorrerem problemas devido a arcos coesivos. O sistema de transporte do material por gravidade em passagens foi adotado nesta mina, porém, devido à alta frequência de entupimentos (principalmente intertravamentos), a prática foi abandonada.

Essa mina não tem estudo quantitativo da frequência de problemas nesse sistema, mas sabe-se que essa era muito grande. Segundo a empresa, o método de lavra e o plano de fogo adotados não aconselham o uso de passagens de minério, pois a dimensão dos blocos produzidos nos desmontes implicaria a construção de cavidades para fluxo de material com diâmetro mínimo não econômico, considerando-se uma razão mínima entre diâmetro da passagem ( $D$ ) e tamanho máximo das partículas ( $d$ ).

Os resultados atingidos nesta etapa colocaram em evidência a dificuldade de obtenção de dados, de sistematização de trabalhos realizados, a ausência de preocupação e ausência de controle a respeito de fluxo de material fragmentado em minas subterrâneas, principalmente brasileiras. Os relatos não estão documentados, não há abordagem particular da questão, não sendo suficiente para descrição ou quantificação dos problemas com fluxo em passagens.

A partir do esforço e do tempo despendidos na pesquisa, analisando-se os dados obtidos, conclui-se que não estão disponíveis dados quantitativos ou qualitativos acessíveis aos mineradores a respeito do fluxo por gravidade em passagens de minério. Os relatos do cotidiano de operadores e supervisores são esparsos e não constituem documentação passível de extração de informações ou de interpretações consistentes que auxiliem no projeto e na execução do fluxo por gravidade em passagens de minério.

#### **5.4. Determinação de propriedades de fluxo de materiais granulares**

Em seguida ao levantamento da prática mineira em fluxo por gravidade de material, foi projetado e construído modelo de passagem de minério, foi realizada a caracterização física dos materiais e foram realizados os ensaios no citado modelo.

Nos ensaios de fluxo em modelo físico de passagem de minério de seção retangular, a ocorrência de problemas como a formação de arco mecânico ou coesivo e a dispersão dos resultados obtidos são as questões essenciais. Isso pôde ser observado, juntamente com as medidas realizadas de vazão de descarga. A opção pela vazão foi devido à observação das tentativas relatadas na literatura de se estabelecerem equações de previsão da vazão de descarga de materiais granulares a partir de reservatórios. Os ensaios envolveram a documentação de problemas de fluxo e a

determinação da vazão de descarga de materiais no modelo físico de passagem (a partir da variação de sua inclinação, da coluna de material, da natureza e da distribuição de tamanho dos materiais, da seção de descarga da presença ou não de joelho acoplado ao modelo de passagem).

A caracterização física consistiu na determinação de propriedades dos materiais testados. Os resultados médios são mostrados na tabela V.7, assim como a razão entre a dimensão característica da seção da passagem (D) e a maior dimensão de bloco (d) para a seção de descarga de 12cm x 16cm. Os resultados dos ensaios para determinação do maior tamanho de partícula, através de peneiramento e do aplicativo WipFrag, são apresentados nas tabelas V.8, V.9 e V.11 e nas figuras 5.5 a 5.8. A diferença do ângulo de repouso da areia em relação aos demais materiais, mostrada na tabela V.6, se deve à presença de água (6,3% de umidade), conforme descrito na literatura. Essa influência pode ser percebida também nos ensaios com misturas de materiais (tabela V.11).

Tabela V.7 – Propriedades dos materiais utilizados em ensaios em modelo físico de passagem, seção de descarga de 12cm x 16cm.

Material	Tamanho máximo (d) [mm]	D/d	Massa específica real [kg/m <sup>3</sup> ]	Massa específica aparente (d <sub>s</sub> ) [kg/m <sup>3</sup> ]	Porosidade aparente (ε) [%]	Ângulo de repouso	Índice de forma	Módulo de finura
Areia	1,2	100	2650	1400	47	46,0	-	1,85
Brita 0 dolomita	8,7	14	2960	1680	43	32,3	-	3,41
Brita 0 gnaisse	12,0	10	2730	1420	48	33,0	2,6	4,02
Brita 1 gnaisse	18,9	6	2730	1500	45	32,0	1,7	3,65
Brita 1 dolomita	25,2	5	2860	1715	40	34,5	2,1	3,37
Brita 2 gnaisse	40,8	3	2650	1360	49	33,3	2,4	2,92

Notas: A dimensão característica da seção de descarga do modelo de passagem (D) é 120mm. A norma para índice de forma não se aplica a materiais de tamanho inferior a 9,5mm.

#### 5.4.1. Resultados de determinação de índice de forma de materiais

As tabelas V.8 e V.9 apresentam os resultados da determinação do índice de forma dos materiais. Conforme a literatura, valores de índice de forma superiores a 1,7 mostram fragmentos com forma geométrica irregular. De uma forma geral, o índice de forma diminuiu após a passagem pelo modelo de passagem.

Tabela V.8 - Resultados de ensaios para determinação do índice de forma dos materiais, antes dos ensaios em modelo de passagem.

Material	Massa inicial [kg]	Tamanho [mm]	Porcentagem Retida	Número de partículas medidas	Índice de forma da fração	Índice de Forma
Brita 0 gnaisse		9,5	25,24	50	2,6	2,6
		6,4	61,76	123	2,6	
	8	5,7	3,59	07	2,8	
		2,4	8,47	17	2,8	
		<2,4	0,94	-	-	
Brita 1 gnaisse		19,0	9,82	18	1,7	2,3
		12,7	58,87	120	2,3	
	16	9,6	23,31	46	2,6	
		8,2	7,16	-	-	
		<8,2	0,83	-	-	
Brita 1 dolomita		25,4	37,97	76	2,0	2,1
		19,0	60,93	122	2,1	
	16	12,7	0,86	01	2,6	
		<12,7	0,24	01	2,1	
Brita 2 gnaisse		38,1	12,81	26	2,1	2,4
		25,4	68,32	137	2,4	
	32	19,0	16,86	33	2,8	
		<19,0	2,01	4	2,8	

Tabela V.9 - Resultados de ensaios para determinação do índice de forma dos materiais, após os ensaios em modelo de passagem.

Material	Massa inicial [kg]	Tamanho [mm]	Porcentagem Retida	Número de partículas medidas	Índice de forma da fração	Índice de Forma
Brita 0 gnaisse		9,5	41,55	83	3,3	3,4
		6,4	48,71	97	3,5	
	8	5,7	4,66	09	3,9	
		2,4	4,98	10	3,2	
		<2,4	0,10	-	-	
Brita 1 gnaisse		19,0	11,49	22	2,1	2,1
		12,7	53,63	106	2,1	
	16	9,6	24,52	46	2,1	
		8,2	9,08	*	-	
		<8,2	1,28	*	-	
Brita 1 dolomita		25,4	21,56	42	1,6	1,8
		19,0	68,90	140	1,8	
	16	12,7	8,89	16	2,1	
		<12,7	0,65	02	1,6	
Brita 2 gnaisse		38,1	31,99	08	1,8	2,1
		25,4	83,42	166	2,1	
	32	19,0	11,92	24	2,3	
		<19,0	0,64	02	2,6	

#### 5.4.2. Determinação de módulo de finura

A partir dos resultados do peneiramento, foi calculado o módulo de finura, conforme metodologia descrita no item 4 deste trabalho e resultados apresentados na tabela V.10.

Tabela V.10 - Resultados de ensaios para determinação do módulo de finura dos materiais utilizados em ensaios em modelo de passagem.

Material	Tamanho [mm]	Antes dos ensaios		Após os ensaios	
		Porcentagem Retida	Módulo de finura	Porcentagem Retida	Módulo de finura
Areia	1,7	1,77	2,8	-	-
	0,8	3,72		-	
	0,4	23,14		-	
	0,2	37,14		-	
	0,1	17,34		-	
	<0,1	16,88		-	
Brita 0 dolomita	9,5	0,50	3,4	-	-
	6,4	3,69		-	
	5,7	63,22		-	
	2,4	2,35		-	
	<2,4	29,64		-	
Brita 0 gnaïsse	9,5	25,24	4,0	41,55	4,3
	6,4	61,76		48,71	
	5,7	3,59		4,66	
	2,4	8,47		4,98	
	<2,4	0,94		0,10	
Brita 1 gnaïsse	19,0	9,82	3,7	11,49	3,7
	12,7	58,87		53,63	
	9,6	23,31		24,52	
	8,2	7,16		9,08	
	<8,2	0,83		1,28	
Brita 1 dolomita	25,4	37,97	3,4	21,56	3,1
	19,0	60,93		68,90	
	12,7	0,86		8,89	
	<12,7	0,24		0,65	
Brita 2 gnaïsse	38,1	12,81	2,9	31,99	3,9
	25,4	68,32		83,42	
	19,0	16,86		11,92	
	<19,0	2,01		0,64	

### 5.4.3. Resultados de determinação de maior dimensão de partícula

Como valor da maior dimensão de partícula ( $d$ ) foi considerado o tamanho da abertura que deixa passar 90% do material alimentado ( $D_{90}$ ). A tabela V.11 mostra os resultados obtidos nos processos utilizados. O  $D_{90}$  da areia foi obtido, após tratamento dos dados obtidos em peneiramento, conforme mostra a figura 5.5, através da distribuição granulométrica de Rosin-Rammler e regressão em que se obteve 99,8% de correlação. Para os demais materiais, obteve-se a curva granulométrica pelos dois processos citados. Os resultados dos processos são concordantes, conforme ilustra a figura 5.6, por se tratar de material bastante bitolado. O que difere da análise de MORAIS (2004) para pilhas de hematita fragmentada. Segundo o autor, os resultados da fotoanálise apresentaram muitas restrições com relação à precisão da curva granulométrica fornecida. Se as operações de fragmentação produzem grande quantidade de finos, torna-se muito difícil o tratamento das imagens. Devido a essas restrições, torna-se difícil, segundo MORAIS (2004), para a hematita fragmentada, a comparação da curva granulométrica obtida da fotoanálise com curvas obtidas através de outros processos. As principais restrições detectadas durante o processamento das imagens através do aplicativo WipFrag pelo citado autor foram:

- Má qualidade da rede de contornos: o aplicativo não apresentou boa detecção dos contornos dos fragmentos; com a edição manual da rede de blocos, ocorreram dois casos de erro de delimitação: (a) um grupo de fragmentos é identificado como um único bloco. Isso é chamado de fusão e representa uma tendência de super-estimação do tamanho verdadeiro do fragmento; (b) um único fragmento é subdividido em dois ou mais blocos. Isso é chamado de desintegração e representa uma tendência de sub-estimação do tamanho verdadeiro do fragmento.
- Erro na detecção de finos: o aplicativo não possui boa definição para a análise de partículas finas.
- Áreas sombreadas: em algumas imagens, devido ao sombreamento, é muito difícil a detecção dos fragmentos.

- ❑ Erro associado ao ângulo de filmagem: como é difícil obter imagem da pilha de material fragmentado com um ângulo de  $90^\circ$  com relação ao plano de caimento da pilha, existe um erro associado ao ângulo de filmagem.
- ❑ Tratamento de material de coloração escura: o sistema não possui bom contraste e boa definição para a análise da fragmentação por fotoanálise.

As figuras 5.7 e 5.8 mostram etapas da determinação da distribuição granulométrica, através do aplicativo WipFrag, para materiais utilizados nos ensaios no modelo de passagem. A figura 5.7 mostra a referência de tamanho, com adição de referencial sobre a superfície da pilha de brita 0 de dolomita, para realização da fotografia (o referencial utilizado foi um retângulo metálico com as dimensões de 5cm x 11cm). A figura 5.8 mostra a curva de distribuição de tamanho obtida para a amostra de brita 0 de dolomita (N é o coeficiente de uniformidade,  $X_c$  e  $X_{max}$  os tamanhos característicos de distribuições de tamanhos).

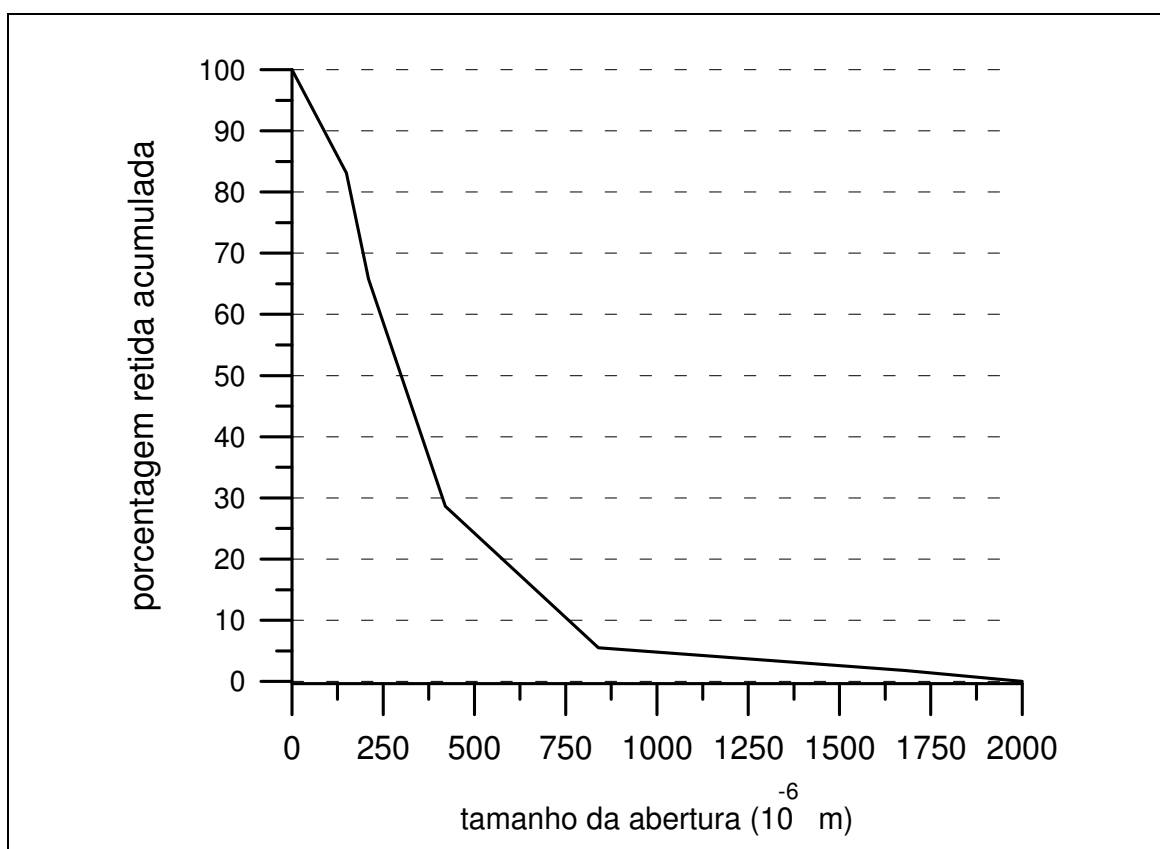


Figura 5.5 – Curva granulométrica da areia utilizada em ensaio em modelo de passagem.

Tabela V.11 – Resultados das determinações do  $D_{90}$  dos materiais.

Material	$D_{90}$ [mm]		
	Peneiramento	WipFrag	Valor Adotado
Areia (6,3% umidade)	1,2	-	1,2
Brita 0 dolomita	8,5	8,9	8,7
Brita 0 gnaise	12,0	12,0	12,0
Brita 1 gnaise	18,0	19,8	18,9
Brita 1 dolomita	26,0	24,3	25,2
Brita 2 gnaise	39,0	41,9	40,5

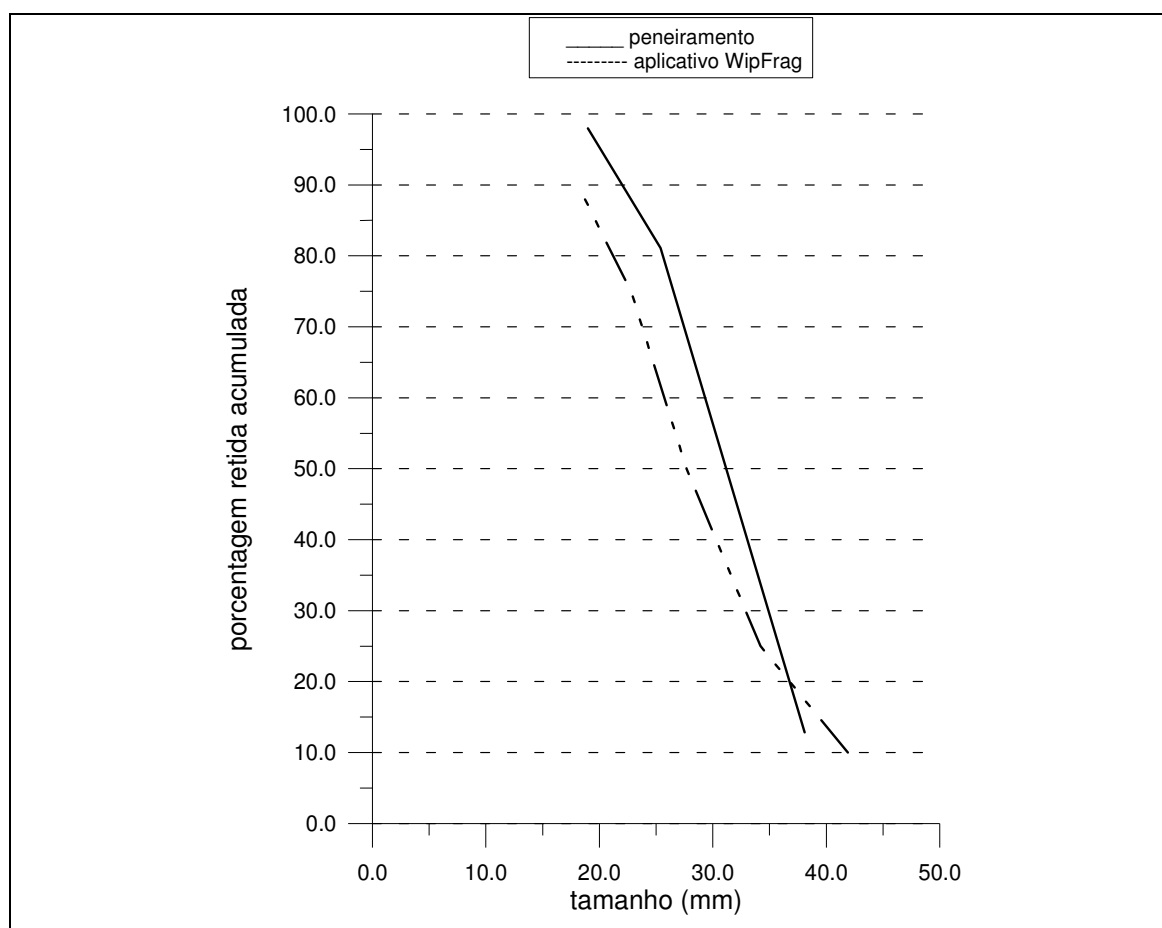


Figura 5.6 – Curvas granulométricas da brita 2 de gnaise.

A figura 5.9 mostra as curvas granulométricas obtidas para as britas 0 de dolomita e de gnaise. A figura 5.10 mostra as curvas granulométricas obtidas para as britas 1 de dolomita e de gnaise.



Figura 5.7 – Referência de tamanho para determinação de distribuição granulométrica através do aplicativo WipFrag para uma amostra de brita 0 de dolomita.

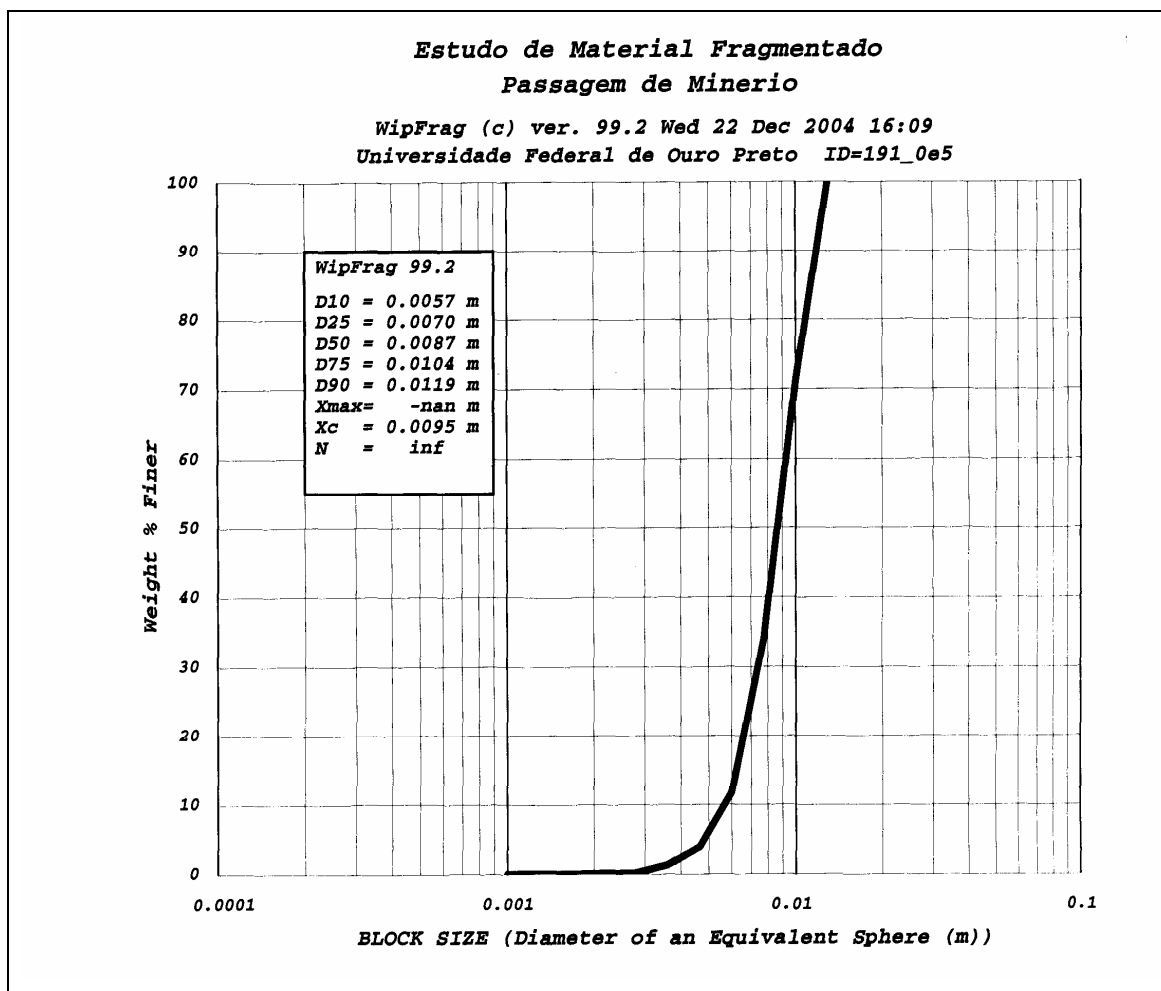


Figura 5.8 – Curva de distribuição granulométrica obtida do aplicativo WipFrag para uma amostra de brita 0 de dolomita.

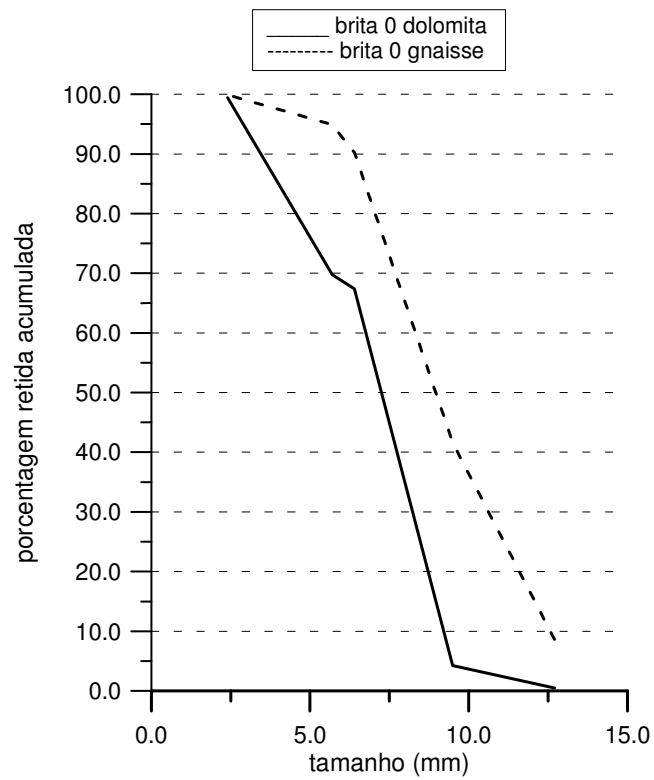


Figura 5.9 - Curvas granulométricas obtidas para as britas 0 de dolomita e de gnaisse.

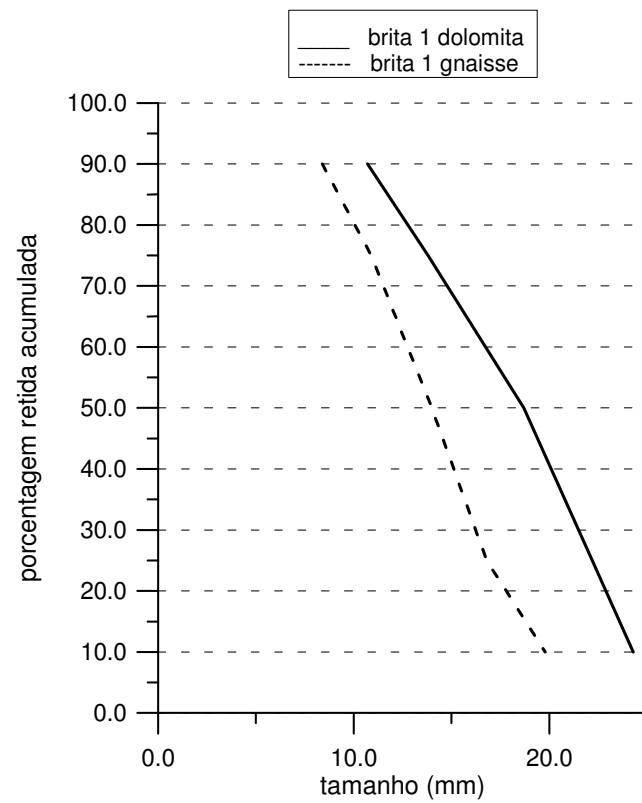


Figura 5.10 – Curvas granulométricas obtidas para as britas 1 de dolomita e de gnaisse.

## 5.5. Resultados de ensaios em modelo físico de passagem

### 5.5.1. Introdução

Nos ensaios realizados, para os diversos materiais, na determinação da vazão de fluxo foram testadas as variações da inclinação da passagem (60° a 90°), da distribuição de tamanho do material ( $D_{90}$  variando de 1,2mm a 40,5mm), da coluna de material (0,9 a 3,7m), da presença ou não do joelho, da seção de descarga (retangular, 6cm ou 12cm de dimensão característica). Os ensaios de vazão foram importantes para a observação dos problemas de fluxo ocorridos.

A seleção das variáveis de estudo levou em consideração aspectos operacionais do modelo de ensaio construído, reduzindo-se quatorze variáveis iniciais (descritas no primeiro parágrafo do item 3.3.5) para cinco variáveis significativas. O que é coerente com BRINCK *et alii* (1976) e MARTINS (2001).

A notação utilizada dos ensaios nas tabelas desse item foi a seguinte:

material; inclinação do modelo; coluna de material

Notação do material:

“a” para areia; ou o tamanho comercial da brita (0, 1 ou 2), seguido da inicial da rocha (“d” - dolomita ou “g” - gnaiss) ou ainda “m” para mistura (misturas de brita 2 de gnaiss, brita 0 de gnaiss, argila e água, conforme composição especificada na tabela V.15);

Notação da inclinação do modelo (em relação à horizontal):

inclinação da passagem / inclinação do joelho (quando houver);

Notação da coluna de material:

Desnível vertical entre a alimentação e a descarga (em metros);

Foram realizados 515 ensaios. Após a análise estatística, 478 ensaios foram validados: 332 ensaios com a passagem sem joelho (sem mudança da direção de fluxo), 146 ensaios com passagem com joelho (com mudança da direção de fluxo); 454 ensaios com a seção de descarga de 12cm x 16cm, 24 ensaios com a seção de 6cm x 8cm.

Nos testes estatísticos, foi adotado um nível de confiança mínimo de 90%. O intervalo de confiança foi definido considerando-se distribuição estatística (MARTINS, 2001; COSTA NETO, 1977). O objetivo foi atingir no mínimo três ensaios validados para cada série (ou, em outras palavras, no mínimo, duas réplicas).

Quanto aos materiais utilizados, foram validados 77 ensaios realizados com areia, 87 ensaios com brita 0 de gnaiss, 12 ensaios com brita 0 de dolomita, 107 ensaios com brita 1 de gnaiss, 80 ensaios com brita 1 de dolomita, 101 ensaios com brita 2 de gnaiss, 14 ensaios com misturas de materiais (britas 0 e 2 de gnaiss, argila e água).

Foram produzidas cerca de 450 imagens, 250 delas dos ensaios em modelo físico, 25 de ensaios de índice de forma, 20 dos ensaios preliminares, 25 das pilhas de materiais, 105 das visitas às minerações, 25 do modelo físico.

### **5.5.2. Análise dos problemas de fluxo observados**

Dos diversos problemas de fluxo observados durante os ensaios, o mais comum foi formação de arco mecânico, que ocorre geralmente quando a razão da abertura de saída da passagem ( $D$ ) pelo tamanho máximo das partículas ( $d$ ) é próxima a três, como no caso da brita 2 de gnaiss (para a seção de 12cm x 16cm) e da brita 1 de gnaiss (para a seção de 6cm x 8cm) e a formação de arco coesivo ou com presença de umidade (caso da areia) e/ou de materiais terrosos e/ou argilosos (misturas de materiais).

De uma maneira geral, 30% dos ensaios apresentaram problemas de fluxo; 86% desses relacionados à interrupção de fluxo ou fluxo estagiado, 14% relacionados à umidade ou à formação de zona passiva. O problema foi considerado interrupção de fluxo quando a descarga voltou a ocorrer sem intervenções e não se localizou precisamente a região de ocorrência do arco. O problema foi considerado como fluxo estagiado quando se observou variação na velocidade de fluxo, mas sem parada na descarga. A literatura trata essa situação de fluxo errático (transiente de fluxo).

Os ensaios com maior incidência de problemas de fluxo foram:

1. seção de descarga de 12 cm x 16cm:

- passagem com joelho: 2g; 75/75; 2,7 – a; 60/60; 3,7 e a; 75/60; 2,7 – em todos, 100% dos ensaios realizados apresentaram problemas diversos (formação de arco, retenção de material nas paredes ou fluxo estagiado);
  - passagem sem joelho: 2g;90; 3,0 – 83%, 2g; 70; 2,0 – 75%, 2g; 75; 3,0 – 60% e 2g; 75; 2,0 – em 57% dos ensaios, problemas diversos foram observados (arco, fluxo estagiado, interrupção de fluxo ou fluxo em funil); mistura 4 – 100% com formação de arcos;
2. seção de descarga de 6cm x 8cm: 1g; 60; 2,0 – 1g; 90; 2,0 – ambos com 70% de problemas observados.

Também foram observados:

- o fluxo em funil (problema detectado pela posição dos traçadores recuperados e confirmado pelas imagens gravadas);
- a presença de finos (detectada por inspeção visual, com quantificação da porcentagem massa/massa);
- a influência da umidade (pela formação de arco coesivo e pelos resultados de vazão obtidos dos ensaios com areia, com 6,3% de umidade, e com misturas de britas com argila em relação aos resultados obtidos para demais materiais);
- os arranjos das partículas e as colisões de partículas (observados através de documentação fotográfica e da própria diferença observada em medições de massa em ensaios, decorrente dos diferentes volumes de vazios).

As figuras 5.11 e 5.12 mostram traçadores coloridos feitos do próprio material de ensaio - brita 1 de dolomita e de brita 2 de gnaiss, antes da descarga em ensaios em modelo de passagem inclinado. Os traçadores possibilitaram a identificação de fluxo em funil.

A presença de finos foi detectada e foram determinadas as porcentagens massa/massa, encontrando-se uma média de 0,5%, com máximo de 1,2% num conjunto de 68 ensaios.

A influência da estocagem foi verificada com ensaios com tempo de estocagem com variação de 24h a 264h, para a seção da passagem de 12 cm x 16cm. Os valores obtidos apresentaram entre 0,4 e 7,9% (com média de 3%) de variação da vazão em situação de estocagem, comparados à ausência de estocagem, conforme figura 5.13 e

tabela V.12. Isso aconteceu tanto com modelo de passagem de minério sem joelho quanto com joelho acoplado. Esses valores não permitem uma conclusão se houve influência específica da estocagem, uma vez que a diferença de outras observações foi superior a esse valor, conforme pode ser observado nas análises e nas tabelas V.18 a V.20 deste item.

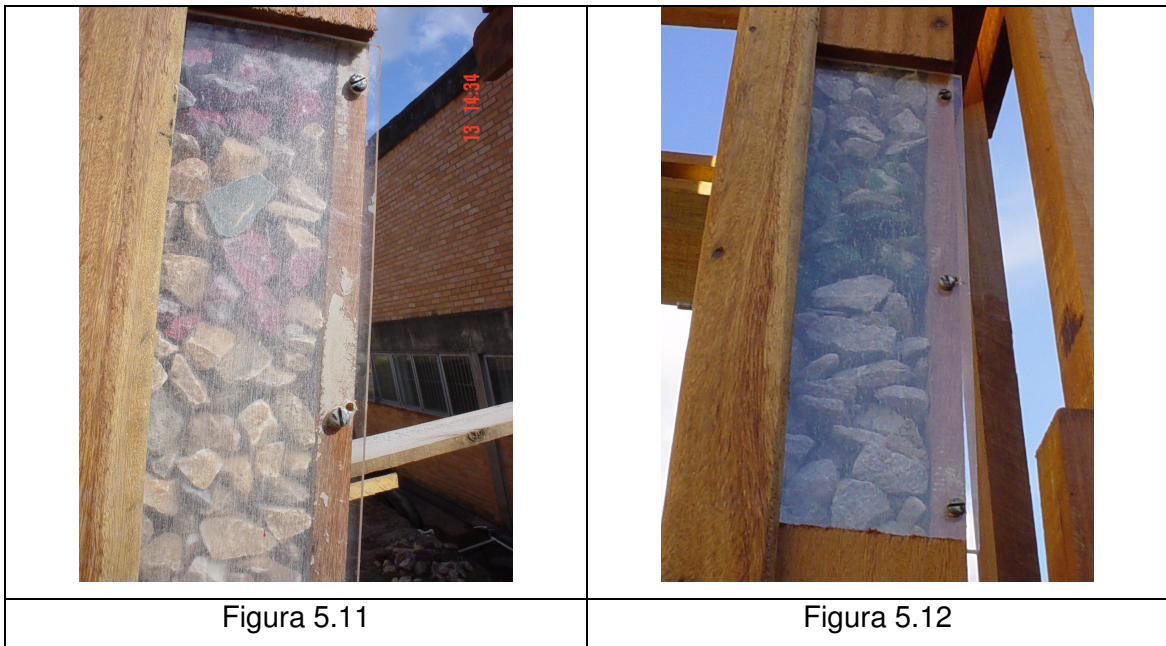


Figura 5.11 - Traçadores coloridos em vermelho, feitos do material de ensaio (brita 1 de dolomita), antes da descarga em ensaios em modelo de passagem inclinado; Figura 5.12 - Traçadores coloridos em verde, feitos do próprio material de ensaio (brita 2 de gnaisse).

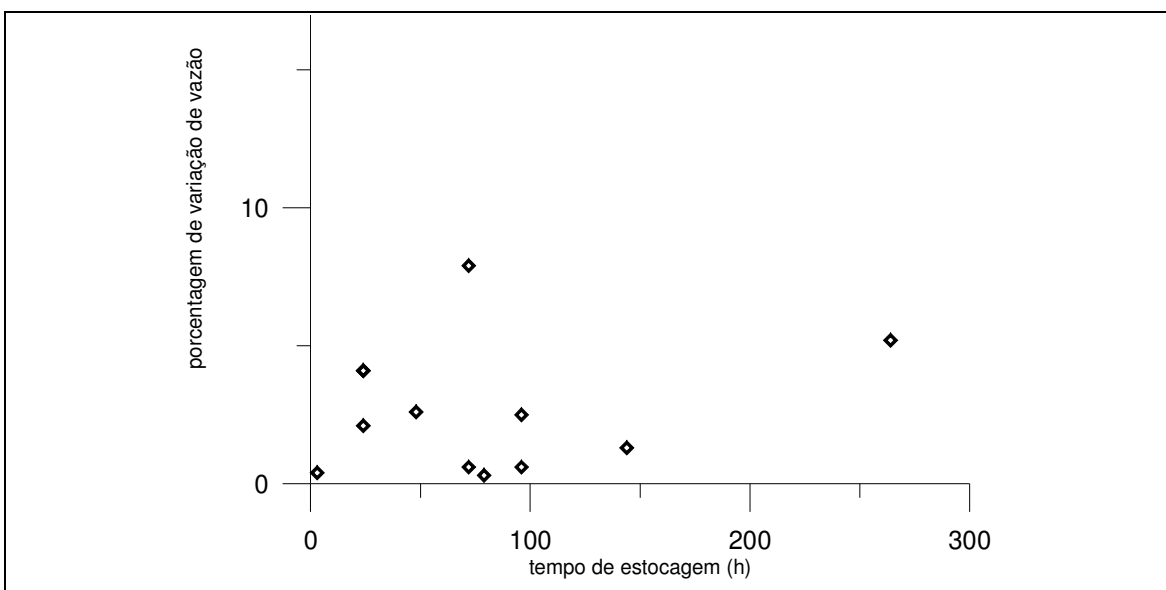


Figura 5.13 – Variação percentual da vazão em função do tempo de estocagem em ensaios em modelo físico de passagem.

Tabela V.12 – Verificação da influência da estocagem na vazão de descarga em ensaios em modelo físico de passagem, seção de descarga de 12cm x 16cm.

a) passagem sem joelho

Ensaio	Tempo de estocagem (h)	Vazão ( $10^{-6}m^3/s$ )	Média 1	Média 2	Problema de fluxo	Diferença (%)
1d;90;3,0	3	12.602	12.443	12.390	-	0,4
1d;75;2,0	72	8.274	12.079	11.128	Fluxo estagiado	7,9
2g;75;3,0	96	11.571	10.069	10.319	Arco	2,5
2g;70;3,0	264	9.043	11.176	10.643	Fluxo estagiado	5,2
1d;80;3,0	24	11.507	12.258	12.007	-	2,1
1g;80;3,0	144	16.413	15.809	16.010	-	1,3
1g;90;3,0	96	17.324	16.839	16.936	-	0,6
a;90;2,0	24	20.264	18.060	18.794	-	4,1

Observações:

- Média 1 – é a média de vazão aparente, obtida sem inclusão do valor do ensaio.
- Média 2 – é a média de vazão aparente, obtida com inclusão do valor do ensaio.
- Diferença: é a diferença entre a média 1 e a média 2, expressa em porcentagem.

b) passagem com joelho

Ensaio	Tempo de estocagem (h)	Vazão [ $10^{-6}m^3/s$ ]	Média 1	Média 2	Problema de fluxo	Diferença [%]
2g;75/60;1,6	24	16.470	14.755	15.355	-	4,1
1g;75/60;3,7	48	19.711	18.273	18.752	-	2,6
0g;75/60;2,7	72	24.026	23.620	23.755	-	0,6

### 5.5.3. Análise da determinação da vazão de fluxo

A tabela V.13 mostra resultados médios da vazão de fluxo em modelo físico de passagem de minério e o número de ensaios validados em cada série realizada, para a seção de descarga de 12cm x 16cm.

Tabela V.13 – Valores médios de vazão de fluxo aparente de areia e de britas obtidos em modelo físico de passagem, de seção retangular (12cm x 16cm).

Coluna de material [m]	Vazão volumétrica [ $10^{-6}m^3/s$ ] (no. ensaios válidos)				
	Areia (D/d =100), (d = 1,2 mm) - 6,3% de umidade				
	Inclinação da passagem				
	60	75	90		
0,9	14.347 (3)	19.252 (3)	21.540 (3)		
1,6	10.584 (3)	15.426 (3)	15.163 (3)		
2,0	12.474 (4)	15.069 (3)	18.794 (3)		
3,0	11.443 (3)	12.420 (3)	13.687 (3)		

Coluna de material [m]	Vazão volumétrica [ $10^{-6}m^3/s$ ] (no. ensaios válidos)	
	Brita zero dolomita (D/d =14), (d= 8,7 mm)	
	Inclinação da passagem	
	60	90
2,0	13.638 (2)	22.291 (2)

Coluna de material [m]	Vazão volumétrica [ $10^{-6}m^3/s$ ] (no. ensaios válidos)				
	Brita zero gnaisse (D/d =10), (d=12,0 mm)				
	Inclinação da passagem				
	60	70	75	80	90
0,9	14.077 (4)	17.975 (4)	18.514 (3)	19.362 (3)	20.776 (3)
1,6	18.593 (3)	-	21.250 (3)	-	21.414 (3)
2,0	15.409 (4)	16.810 (3)	20.295 (3)	22.883 (3)	21.213 (4)
3,0	16.267 (3)	18.437 (3)	19.655 (3)	20.508 (3)	21.237 (4)

Coluna de material [m]	Vazão volumétrica [ $10^{-6}m^3/s$ ] (no. ensaios válidos)				
	Brita 1 gnaisse (D/d =6), (d=18,9 mm)				
	Inclinação da passagem				
	60	70	75	80	90
0,9	13.193 (4)	18.426 (4)	15.310 (3)	18.609 (3)	16.973 (3)
1,6	14.712 (3)	-	17.593 (3)	-	20.388 (3)
2,0	13.282 (4)	16.221 (3)	16.047 (4)	16.678 (3)	18.533 (4)
3,0	13.612 (3)	15.765 (4)	15.905 (4)	16.010 (3)	17.241 (4)

Continuação da tabela V.13 - Valores médios de vazão de fluxo aparente de areia e de britas obtidos em modelo de passagem de seção retangular (12cm x 16cm).

Coluna de material [m]	Vazão volumétrica [ $10^{-6}m^3/s$ ] (no. ensaios válidos)				
	Brita 1 dolomita ( $D/d = 5$ ), ( $d = 25,2$ mm)				
	Inclinação da passagem				
	60	70	75	80	90
0,9	13.500 (4)	15.282 (4)	14.701 (3)	14.857 (3)	14.493 (4)
1,6	12.544 (3)	-	13.980 (3)	-	14.013 (3)
2,0	10.464 (3)	13.666 (4)	12.079 (3)	14.031 (3)	12.472 (4)
3,0	10.096 (3)	12.209 (4)	11.898 (4)	12.007 (3)	12.443 (4)

Coluna de material [m]	Vazão volumétrica [ $10^{-6}m^3/s$ ] (no. ensaios válidos)				
	Brita 2 gnaisse ( $D/d = 3$ ), ( $d = 40,8$ mm)				
	Inclinação da passagem				
	60	70	75	80	90
0,9	13.848 (5)	15.462 (3)	14.906 (3)	13.941 (3)	14.276 (3)
1,6	12.597 (3)	-	13.340 (3)	-	12.780 (3)
2,0	9.476 (4)	11.221 (3)	10.832 (4)	10.934 (3)	9.244 (5)
3,0	10.001 (3)	10.643 (4)	9.927 (4)	8.260 (4)	7.692 (4)

### **Análise da influência da coluna de material nos valores da vazão de descarga**

Analisando-se a variação da coluna de material no modelo de passagem de minério, observa-se que com o aumento da coluna de material, são menores os valores obtidos para a vazão aparente de descarga, com exceção dos valores para os ensaios com a brita 0 de gnaisse ( $D/d = 10$ , para a seção de 12cm x 16cm), que apresenta  $D/d$  muito grande. Isso pode ser observado nas tabelas V.13 e V.16. Para a análise dos dados para a passagem sem joelho, na tabela V.13, foram considerados os níveis de 1,6 a 3m, uma vez que o nível de 0,9m apresenta descarga muito rápida (tempo máximo de cerca de 1,5s) e maior dispersão de resultados, como já destacado.

Nos ensaios com brita 2 de gnaisse ( $D/d = 3$ , seção de descarga de 12cm x 16cm), 41% das vezes ocorreram arcos mecânicos, sempre relacionados com interrupção do

fluxo ou com fluxo estagiado. Nos ensaios 2g; 80; 3,0 (brita 2; passagem inclinada de 80°; 3,0m de coluna de enchimento), não foi quantificada a umidade, mas só os ensaios em condição de umidade apresentaram interrupção do fluxo. Nos ensaios com brita 1 de gnaiss (D/d = 3, seção de descarga de 6cm x 8cm), 55% das vezes ocorreram arcos mecânicos, sempre relacionados com interrupção do fluxo.

Aconteceu retenção de material por formação de arco nos ensaios com britas. Determinando-se a porcentagem de material retido em relação ao material alimentado, a variação foi de 20% a 81% (média de 52%) em massa, num conjunto de 47 ensaios.

As figuras 5.14 a 5.18 mostram vários ângulos de observação da formação de arcos em ensaios com brita 2 de gnaiss, seção de descarga de 12cm x 16cm. Esses arcos aconteceram na alimentação ou durante a descarga nos ensaios em modelo de passagem.

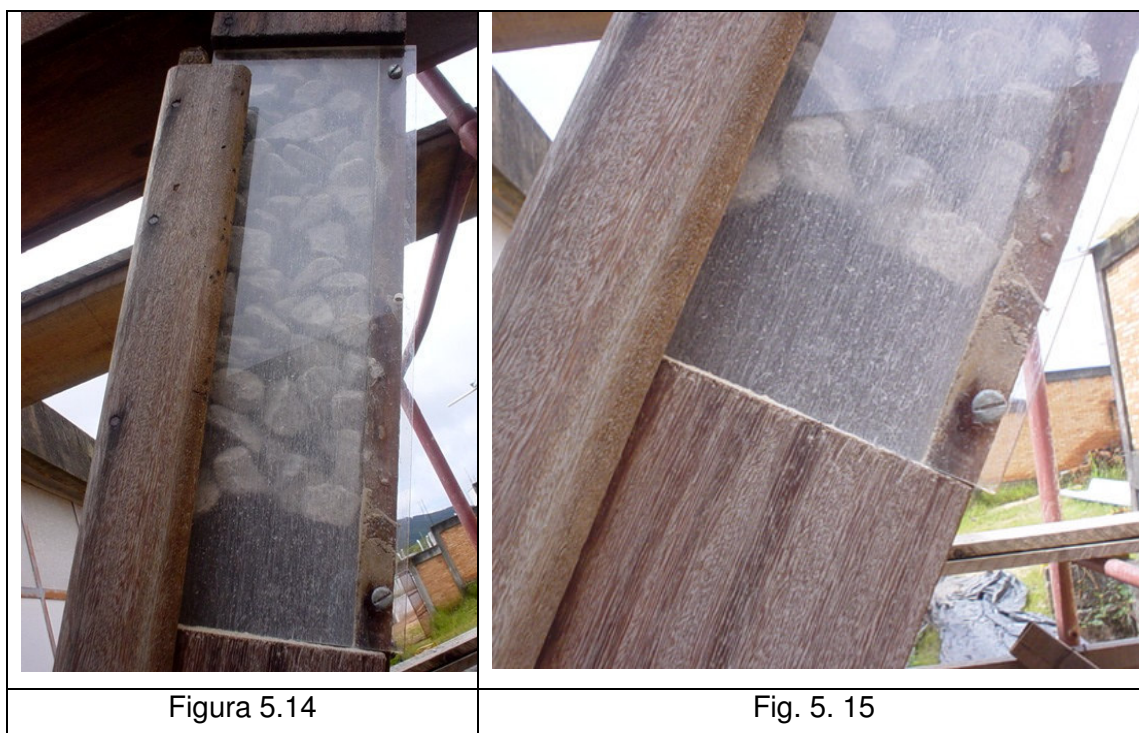


Figura 5.14 – Arco, visto de janela intermediária do modelo físico, em ensaio com brita 2 de gnaiss (D/d = 3), modelo inclinado de 60°, joelho inclinado de 60°, 3,7m de coluna de material, seção de descarga de 12cm x 16cm.

Figura 5.15 – Detalhe do arco mostrado na figura 5.14.



Figura 5.16 - Movimentação de material em ruptura de arco em ensaio com brita 2, modelo de passagem inclinado de 60°, joelho inclinado de 60°, 3,7m de coluna de material.



Figura 5.17 - Detalhe do arco formado na saída de descarga em ensaio com brita 2, modelo inclinado de 70°, sem joelho, 3,0m de coluna de material.



Figura 5.18 - Arco formado na alimentação do material em modelo físico de passagem, em ensaio com brita 2, passagem inclinada de 75°, 2m de enchimento, visto de baixo.

Tabela V.14 - Valores médios de vazão de fluxo aparente de misturas de britas e de argila obtidos em modelo físico de passagem, de seção retangular (12cm x 16cm).

Coluna de material [m]	Vazão volumétrica [ $10^{-6}m^3/s$ ] (no. ensaios válidos)		
	Mistura 1 ( $d_s = 1,55 g/cm^3$ ) ( $\alpha_R = 29,2^\circ$ ): 75% em massa de brita 2 de gnaiss, 25% de brita 0 de gnaiss		
	Inclinação da passagem		
	60	75	90
2,0	11.088 (3)	12.294 (3)	12.989 (3)

Coluna de material [m]	Vazão volumétrica [ $10^{-6}m^3/s$ ]
	Mistura 2 ( $d_s = 1,52 g/cm^3$ ) ( $\alpha_R = 35,4^\circ$ ): 60% em massa de brita 2 de gnaiss, 20% de brita 0 de gnaiss, 15% de argila, 5% de água
	Inclinação da passagem
	90
2,0	não escoou

Coluna de material [m]	Vazão volumétrica [ $10^{-6}m^3/s$ ]
	Mistura 3 ( $d_s = 2,31 g/cm^3$ ) ( $\alpha_R = 27,5^\circ$ ): 65% em massa de brita 2 de gnaiss, 20% de brita 0 de gnaiss, 10% de argila, 5% de água
	Inclinação da passagem
	60
0,9	não escoou

Coluna de material [m]	Vazão volumétrica [ $10^{-6}m^3/s$ ]		
	Mistura 4 ( $d_s = 1,44 g/cm^3$ ) ( $\alpha_R = 24,1^\circ$ ): 70% em massa de brita 2 de gnaiss, 20% de brita 0 de gnaiss, 8% de argila, 2% de água		
	Inclinação da passagem		
	60	75	90
0,9	6.157	-	7.984
2,0	8.724	11.139	-

A tabela V.15 mostra resultados de vazão e descrição de ensaios de britas e de mistura de britas e argila em modelo de passagem, quanto à frequência de problemas apresentados.

Tabela V. 15 – Resultados de vazão e descrição de ensaios de britas e de misturas em modelo de passagem, 2m de coluna de material, seção de descarga de 12cm x 16cm.

Ensaio	Vazão Brita 0 gnaisse [cm <sup>3</sup> /s]	Freq. Problemas	Vazão Mistura 1 [cm <sup>3</sup> /s]	Freq. Problemas	Vazão Brita 2 gnaisse [cm <sup>3</sup> /s]	Freq. Problemas	Vazão Mistura 4 [cm <sup>3</sup> /s]	Freq. Problemas
60; 2,0	15.409	00%	11.088	0%	9.476	25%	8.724	100% Arco
75; 2,0	20.295	67%	12.294	0%	10.832	50%	11.139	100% Arco
90; 2,0	21.237	25%	12.989	0%	7.692	40%	7.984	100% Arco

Os resultados médios das vazões aparentes de descarga, obtidos nos ensaios com modelo de passagem com introdução de variação na direção de fluxo (joelho acoplado) são mostrados na tabela V.16. Para a mesma inclinação da passagem, os resultados mostraram que um aumento da inclinação do joelho em relação à horizontal implica tendência de aumento da vazão de descarga, inclusive para a brita 2 de gnaisse ( $D/d = 3$ , para a seção de descarga de 12cm x 16cm). Essa brita tem comportamento contrário para ensaios em modelo de passagem sem joelho.

As figuras 5.19 a 5.25, 5.28, 5.30 a 5.33 e 5.35 mostram análises dos resultados dos ensaios de determinação da vazão volumétrica aparente de fluxo, para:

- passagem de seção de 12 cm x 16 cm (ensaios com passagem sem joelho; ensaios com a passagem com joelho);
- passagem de seção de 6 cm x 8 cm (passagem sem joelho).

A tabela V.17 apresenta as razões das vazões médias entre faixas granulométricas do mesmo material. Apresenta também as razões das vazões médias entre mesma faixa de tamanho para materiais diferentes, para a seção de descarga de 12 cm x 16cm.

Na tabela V.25 são apresentadas essas razões para a seção de descarga de 6cm x 8cm e na figura 5.34 são mostrados resultados das razões de tamanhos de materiais em função das razões de suas vazões do conjunto geral de ensaios.

Tabela V.16 - Resultados médios de vazão volumétrica aparente em ensaios com modelo de passagem, com joelho acoplado, seção de descarga de 12cm x 16cm.

Coluna de material [m]	Vazão aparente [ $10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ ] (no. Ensaios validados)			
	Areia (D/d=100)			
	75/60	75/75	60/60	60/75
1,6	9.613 (3)	16.717 (3)	9.846 (3)	18.143 (3)
2,7	11.885 (3)	13.973 (3)	7.743 (3)	13.253 (3)
3,7	10.810 (3)	12.436 (3)	8.298 (3)	12.275 (3)

Coluna de material [m]	Vazão aparente [ $10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ ] (no. ensaios validados)			
	Brita zero de gnaisse (D/d=10)			
	75/60	75/75		
1,6	23.692 (3)	24.566 (3)		
2,7	23.695 (3)	28.395 (3)		
3,7	22.615 (3)	21.047 (3)		

Coluna de material [m]	Vazão aparente [ $10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ ] (no. ensaios validados)			
	Brita 1 de gnaisse (D/d= 6)			
	75/60	75/75	60/60	60/75
1,6	17.305 (3)	23.266 (3)	18.406 (3)	27.634 (3)
2,7	19.425 (4)	23.582 (3)	17.461 (3)	20.599 (3)
3,7	18.752 (3)	19.267 (3)	16.636 (3)	19.600 (3)

Coluna de material [m]	Vazão aparente [ $10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ ] (no. ensaios validados)			
	Brita 1 de dolomita (D/d=5)			
	75/60	75/75		
1,6	17.179 (3)	20.427 (3)		
2,7	15.997 (3)	19.609 (3)		
3,7	15.579 (3)	15.733 (3)		

Coluna de material [m]	Vazão aparente [ $10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ ] (no. ensaios validados)			
	Brita 2 de gnaisse (D/d=3)			
	75/60	75/75	60/60	60/75
1,6	15.355 (4)	23.299 (3)	18.611 (3)	20.582 (3)
2,7	10.897 (3)	17.209 (3)	14.105 (3)	17.988 (3)
3,7	12.803 (3)	14.653 (3)	12.849 (3)	12.952 (3)

Tabela V.17 - Razões entre as vazões médias de descarga de materiais em modelo físico de passagem, seção de descarga de 12cm x 16cm.

Materiais considerados	Situação de ensaio	Razão entre tamanhos ( $R_{D90}$ )	Razão entre vazões ( $r_v$ )	Número ensaios
Britas 0	Passagem sem joelho	1,38	1,05	12
Britas 1	Passagem sem joelho	1,33	0,80	108
Britas 1	Passagem com joelho	1,33	0,90	42
Britas gnaisse (1 e 0)	Passagem sem joelho	1,58	0,95	108
Britas gnaisse (1 e 0)	Passagem com joelho	1,58	0,90	36
Britas gnaisse (2 e 1)	Passagem sem joelho	2,16	0,85	72
Britas gnaisse (2 e 1)	Passagem com joelho	2,16	0,75	108
Britas de dolomita	Passagem sem joelho	2,90	0,70	10

As figuras 5.19 a 5.21 apresentam os resultados das faixas de tamanho utilizadas para britas de gnaisse, em três níveis de coluna de material testados, com a seção de descarga da passagem de 12cm x 16cm, todos com o modelo de passagem sem joelho. Observa-se uma dispersão maior dos resultados para a menor coluna de material (0,9m), enquanto nos demais, existem faixas específicas de resultados para cada faixa granulométrica testada. A ocorrência de faixas específicas de resultados para cada faixa granulométrica testada também acontece nos ensaios com coluna de material de 2m para a seção de descarga de 6cm x 8cm (figura 5.22).

A figura 5.23 apresenta os resultados das faixas de tamanho utilizadas para britas de dolomita, com coluna de material de 2m, seção de 12cm x 16cm. Também se observa a ocorrência de faixas específicas de resultados para cada faixa granulométrica testada.

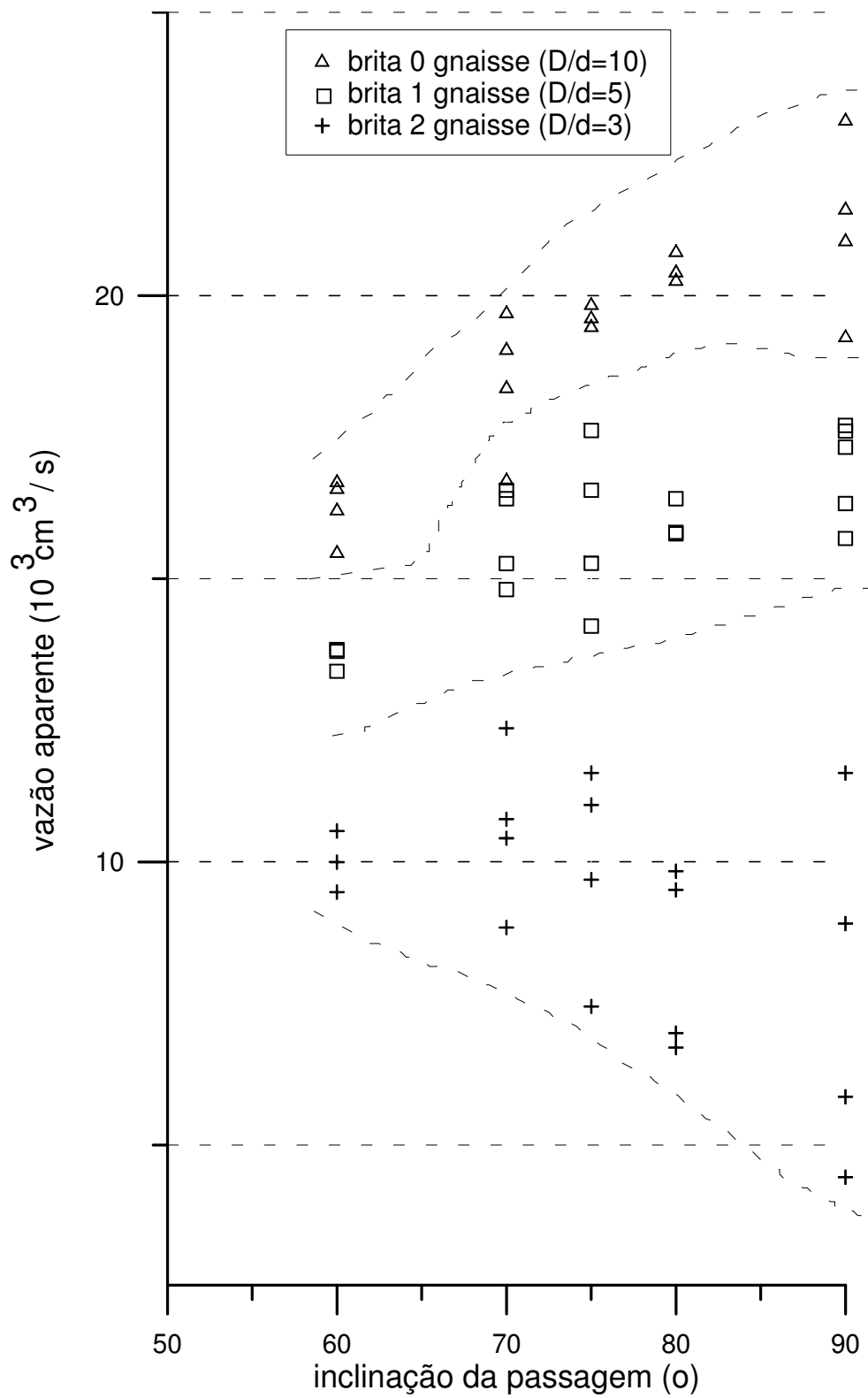


Figura 5.19 – Resultados de vazões volumétricas aparentes de britas de gnaise em modelo físico de passagem, com 3m de coluna de material, seção de 12cm x 16cm.

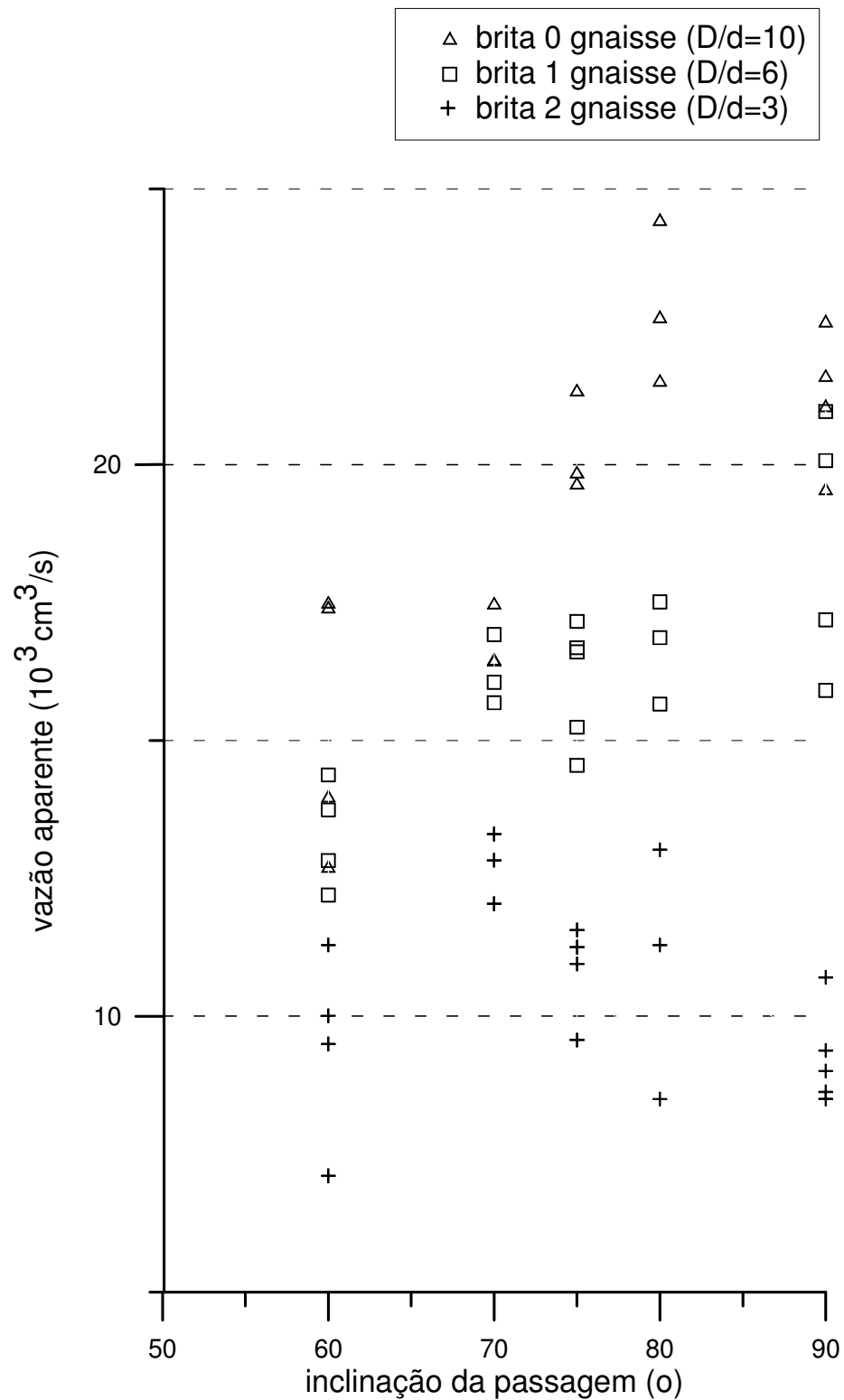


Figura 5.20 – Resultados de vazões volumétricas aparentes de britas de gnaise em modelo de passagem de minério, com 2m de coluna de material, seção de 12cm x 16cm.

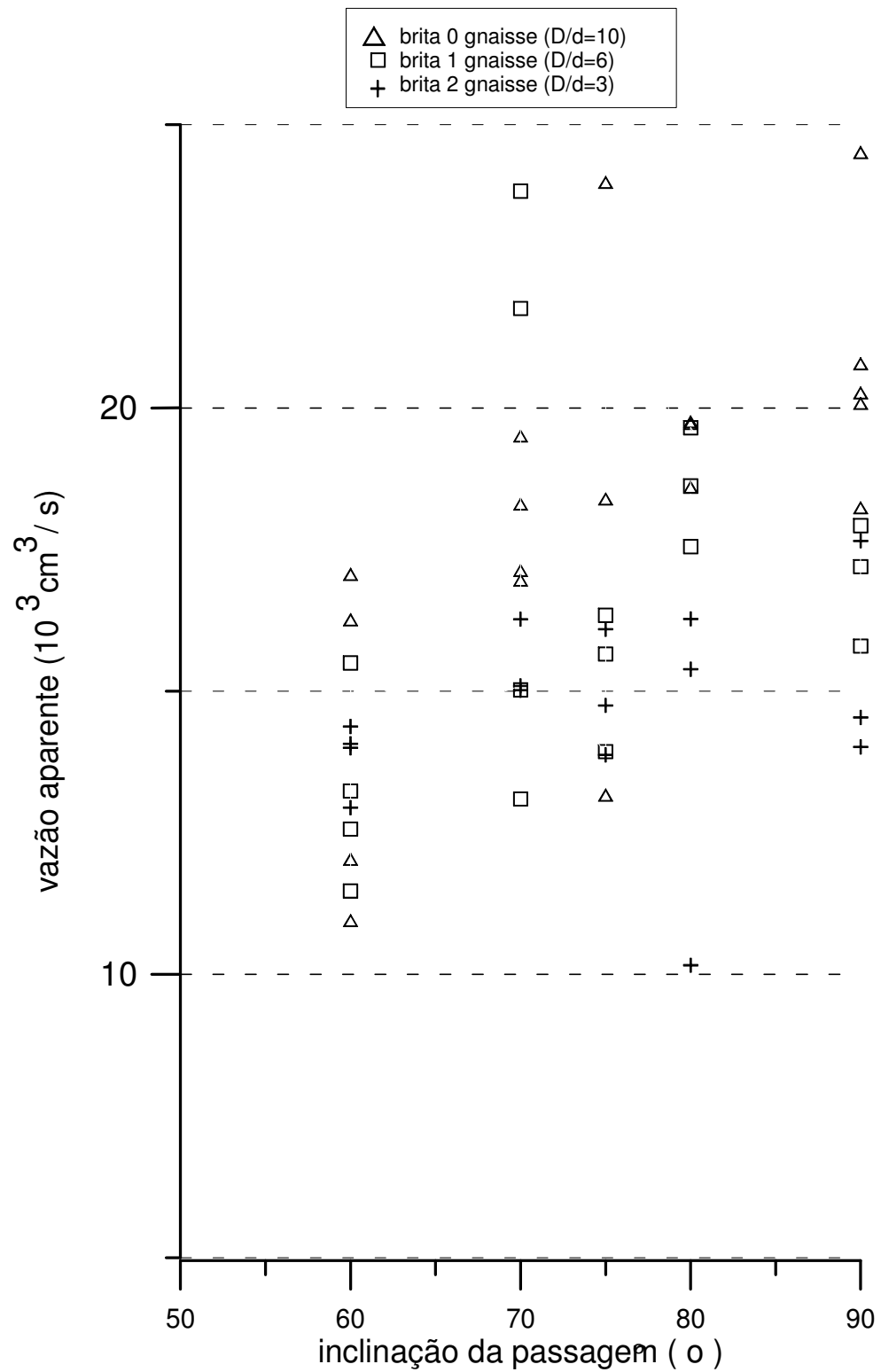


Figura 5.21 – Resultados de vazão volumétrica aparente de britas de gnaise em modelo de passagem, com 0,9m de coluna de material, seção de 12cm x 16cm.

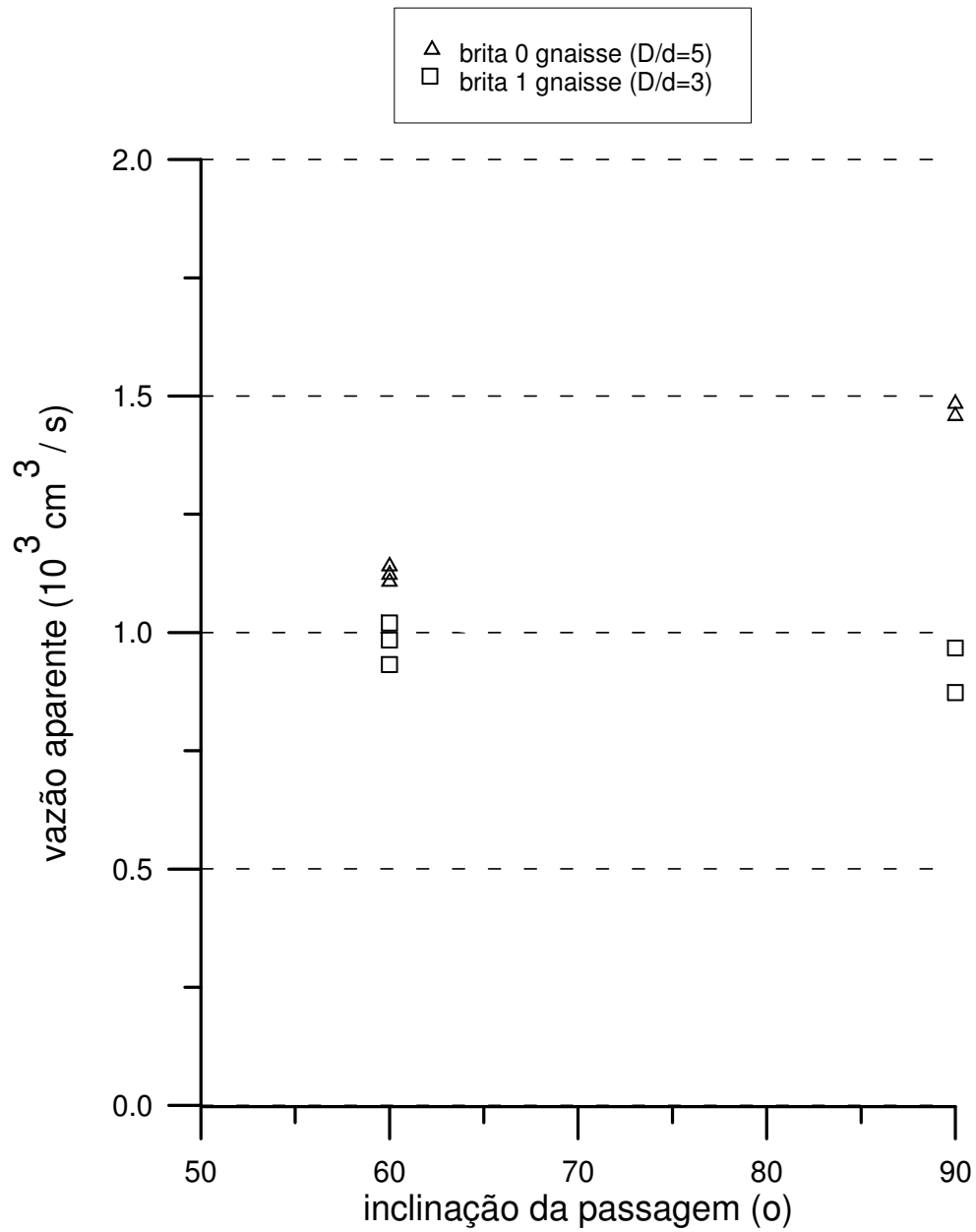


Figura 5.22 – Resultados de vazões volumétricas aparentes de britas de gnaise em modelo físico de passagem, com 2,0m de coluna de enchimento, seção de 6cm x 8cm.

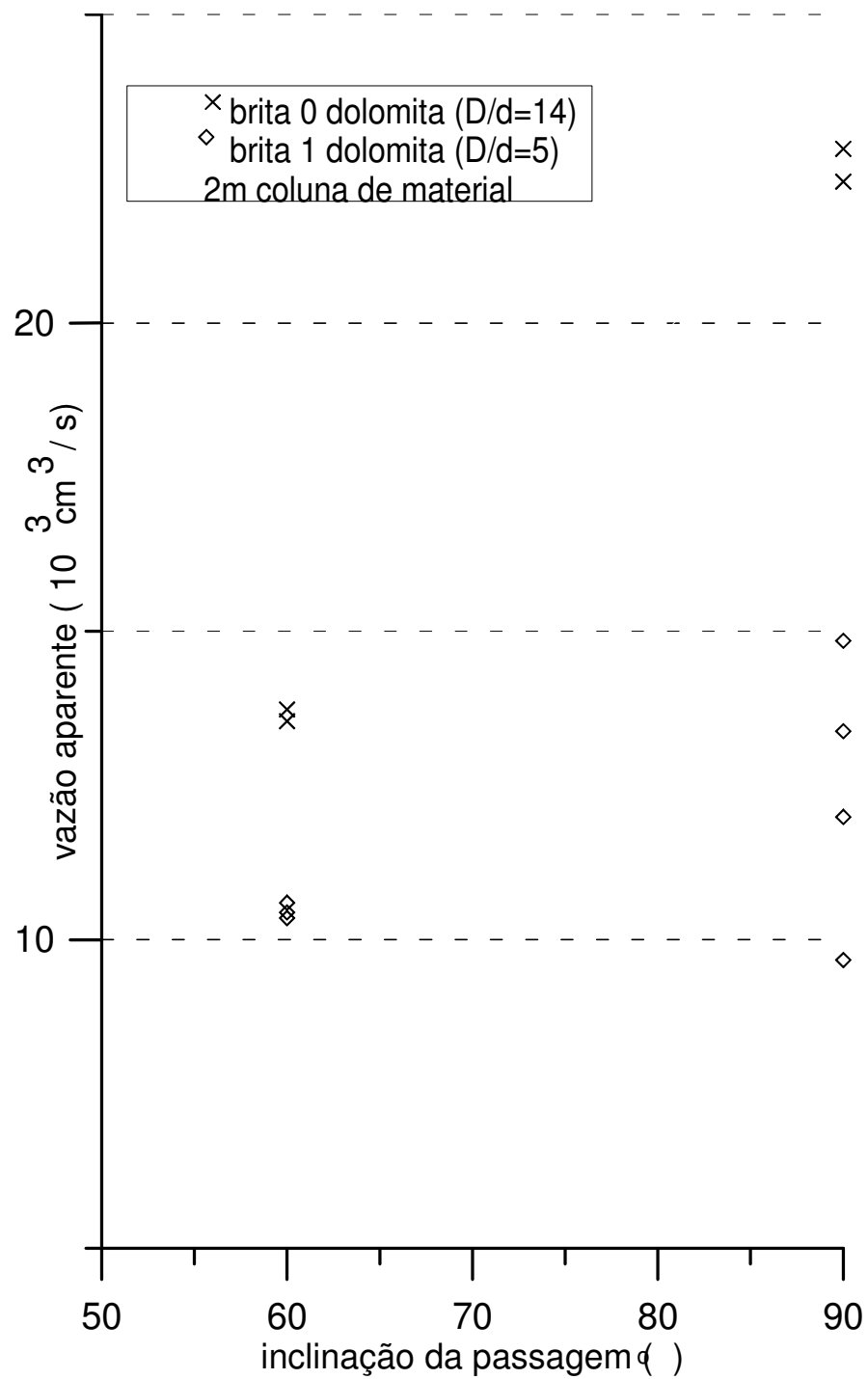


Figura 5.23 – Resultados de vazão volumétrica aparente de britas de dolomita em modelo de passagem de minério, com 2m de coluna de enchimento, seção de 12cm x 16cm.

A figura 5.24 apresenta os valores de vazão de brita 2 de gnaiss (D/d = 3) e de brita 1 de dolomita (D/d = 5), para a seção de 12cm x 16cm. A brita de dolomita não apresenta, com o aumento da inclinação do modelo, comparativamente à brita 2 de gnaiss, maiores acréscimos de velocidade (aceleração), como se esperaria. Essa brita se situa na faixa de D/d preconizada para fluxo livre, diferentemente da brita 2 (D/d = 3), que se situa na faixa de fluxo apenas provável. A massa específica aparente maior da brita de dolomita também favorece maiores valores relativos da vazão. Por outro lado, a forma mais arredondada das partículas favorece um menor volume de vazios entre as partículas e isso deve ter atenuado os valores de vazão obtidos.

A figura 5.25 mostra, em escala vertical diferente dos demais gráficos apresentados, para facilitar a visualização dos dados, os resultados de vazão obtidos para três faixas de tamanho de britas: brita 1 de gnaiss (D/d = 6), brita 1 de dolomita (D/d = 5) e brita 2 de gnaiss (D/d = 3), com 3m de coluna de material, em seção de descarga de 12cm x 16cm. A faixa de resultados de vazão da brita 1 de gnaiss é bem destacada. As faixas de resultados de brita 1 de dolomita e de brita 2 de gnaiss mostram certa superposição. Isso mostra que o parâmetro D/d não é o único determinante dos valores de vazão de descarga.

As figuras 5.26 a 5.28 mostram arranjos dos fragmentos antes da descarga em ensaios com brita 0 de gnaiss (D/d = 10) e com misturas de materiais. Os arranjos são diferentes, aleatórios, mostrando a variação de compactação do material granular. Na figura 5.27 fica claro que os vazios existentes entre os fragmentos maiores são preenchidos pelos fragmentos menores, quando acontece a mistura de materiais. A figura 5.26 mostra a mistura 2. A argila utilizada tem composição mineralógica predominante de bentonitas, é do tipo ativada para água doce, marca Drescon, N-1398.

Da mesma forma que para os modelos de silos, foram comparados valores teóricos de vazão (MCCABE e SMITH, 1956) com os valores obtidos no modelo de passagem, obtendo-se também grandes diferenças nos valores, com a mesma ordem de grandeza.

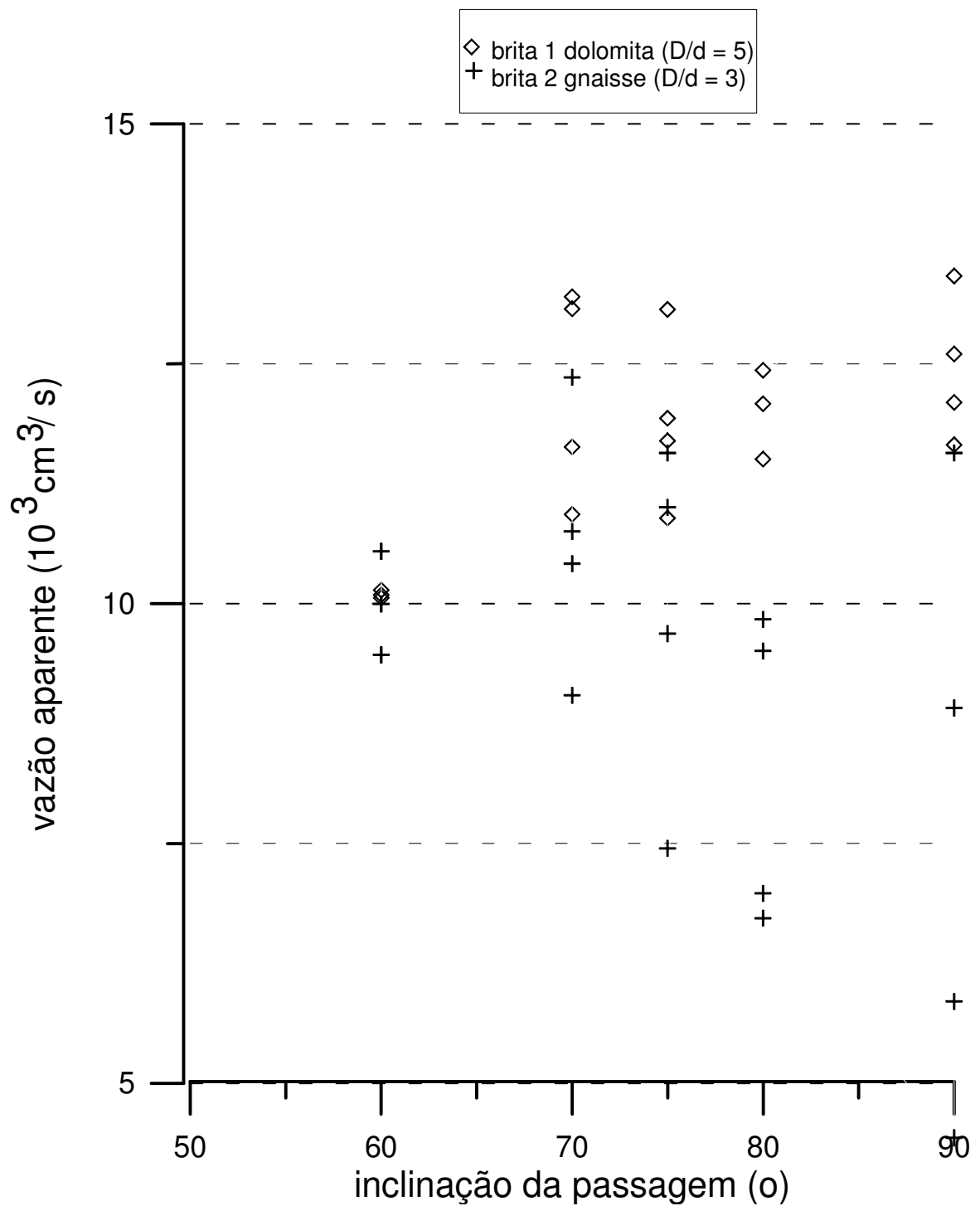


Figura 5.24 – Resultados de vazão volumétrica aparente de brita 2 de gnaisse e de brita 1 de dolomita em modelo de passagem, 3m de coluna de material, seção de descarga de 12cm x 16cm.

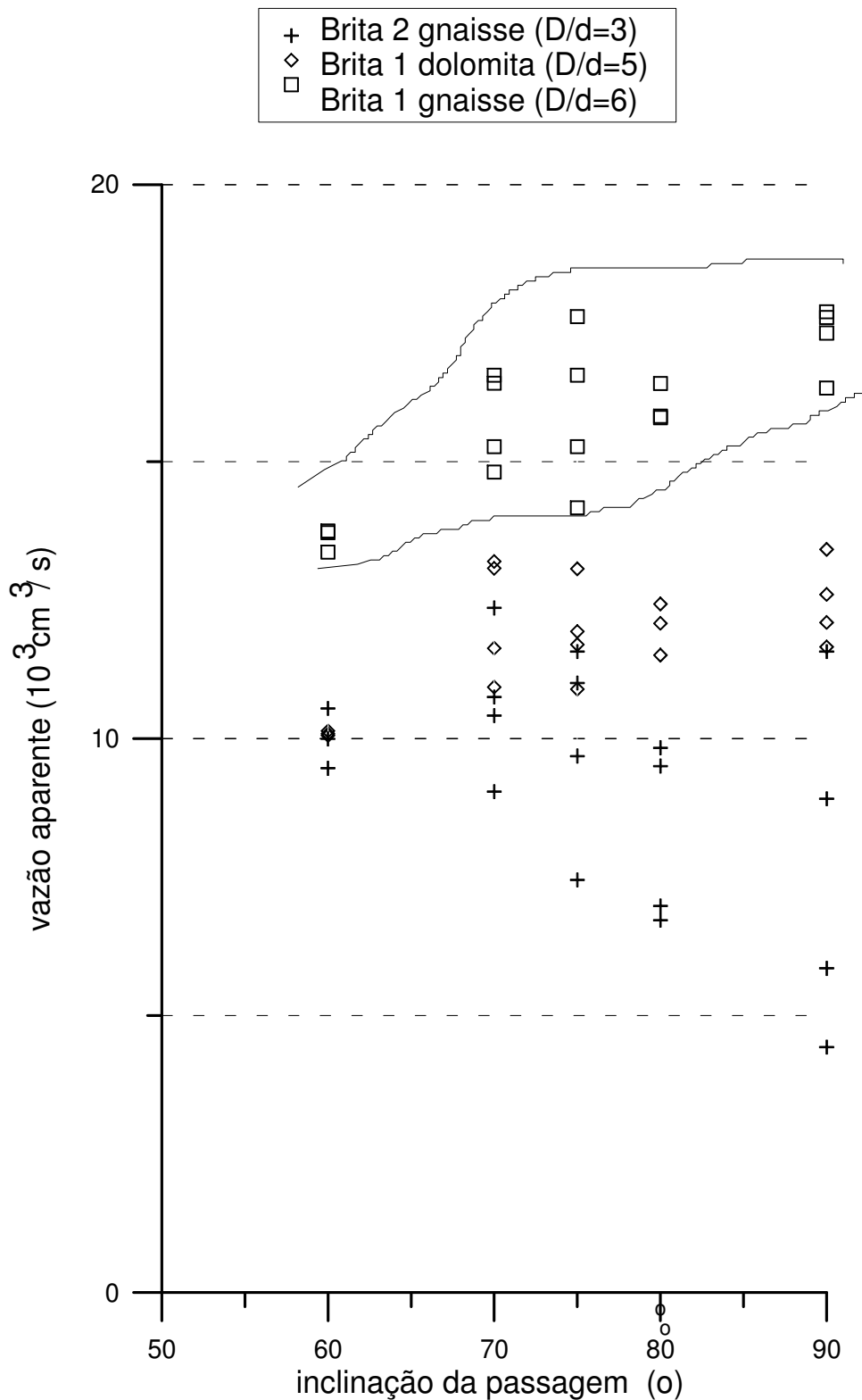


Figura 5.25 – Resultados de vazão volumétrica aparente de brita 1 de gnaise, brita 1 de dolomita e brita 2 de gnaise em modelo de passagem, 3m de coluna de material, seção de descarga de 12cm x 16cm.

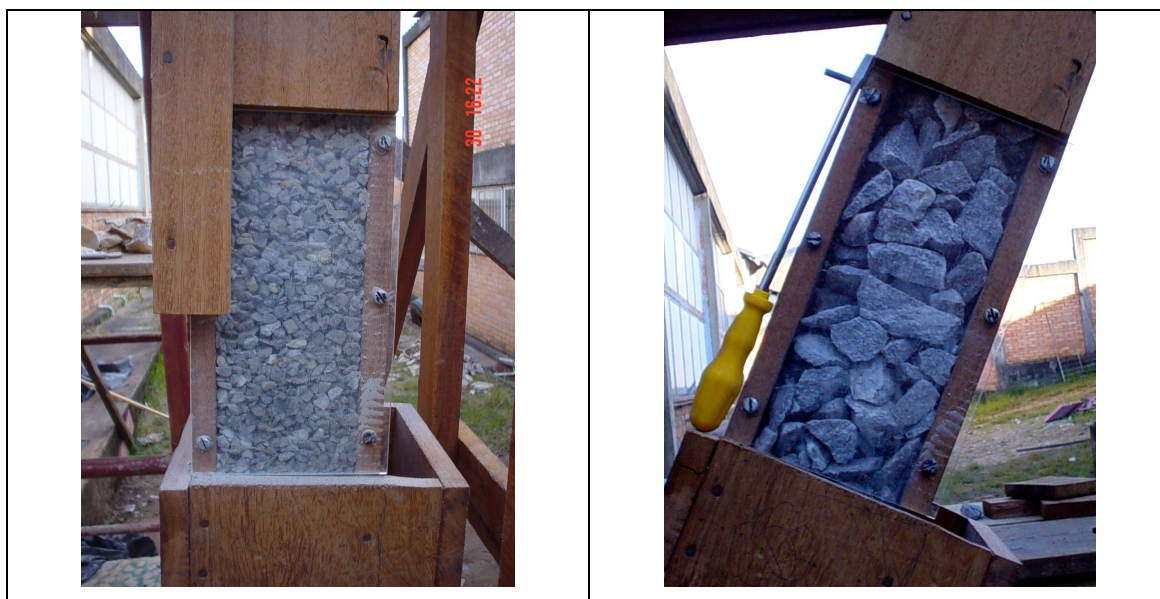


Figura 5.26 – a) Arranjo de fragmentos antes da descarga em ensaio com brita 0 de gnaiss, em ensaio com modelo inclinado de  $90^\circ$ , 3m de coluna de material; b) arranjo de fragmentos antes da descarga em ensaio com brita 2 de gnaiss, em ensaio com modelo inclinado de  $60^\circ$ , 2m de coluna de material.



Figura 5.27 – a) Detalhe do arranjo de fragmentos antes da descarga em ensaio com mistura 1 (britas 0 e 2 de gnaiss) em modelo de passagem inclinado de  $60^\circ$ , 2m de coluna de material; b) detalhe do arranjo de fragmentos antes da descarga em ensaio com mistura 2 (britas 0 e 2 de gnaiss, argila e água) em modelo de passagem inclinado de  $90^\circ$ , 2m de coluna de material.



(a)



(b)

Figura 5.28 – a) Mistura 3 (80% de britas 0 e 2 de gnaise, 20% de argila e água) após descarga em modelo de passagem, inclinada de  $60^\circ$ , 2m de coluna de material; b) arco de mistura 4 (90% de britas de gnaise, 10% de argila e água) em modelo de passagem, inclinada de  $60^\circ$ , 2m de coluna de material.

### **Análise da influência da inclinação da passagem nos valores de vazão de descarga**

Analisando-se a variação da inclinação do modelo de passagem de minério, pode-se notar que, para inclinações maiores, maiores são os valores obtidos da vazão aparente de descarga. Para mesma coluna de material e mesma razão  $D/d$ , foi observado que a vazão aumenta quando aumenta a inclinação da passagem, exceto para  $D/d$  igual a 3. Isso pode ser observado nas figuras 5.19 a 5.21, 5.23, 5.30, 5.31 e 5.33 e nas tabelas V.14, V.16 e V.23. Os valores de vazão e de velocidade de fluxo obtidos da brita 2 ( $D/d = 3$ , para a seção de descarga de 12cm x 16cm) e da brita 1 ( $D/d = 3$ , para a seção de descarga de 6cm x 8cm) são influenciados pela ocorrência de problemas de fluxo (arco na descarga ou na alimentação, fluxo em funil).

### **Análise da influência da umidade nos valores de vazão de descarga**

A influência da umidade foi observada nos ensaios com areia (6,3% de umidade), num conjunto de 72 ensaios. Em 25% dos ensaios com areia ocorreu retenção de material nas paredes do modelo, com média de 2% em massa, em conjunto de 50 ensaios (vide figura 5.29a). Em 50% dos ensaios ocorreu adicionalmente a formação de arco coesivo (vide figura 5.29b). Apenas em 25% dos casos, não ocorreram problemas de fluxo. Tanto em ensaios sem joelho acoplado, quanto com joelho acoplado ao modelo de passagem de minério. Os arcos mecânicos ou coesivos foram rompidos a partir de batidas no modelo físico, acontecendo então a descarga do material retido. Para que o fluxo ocorra nem sempre é suficiente a energia do campo gravitacional, sendo necessária a introdução de energia.

Ocorreram casos da formação de mais de um arco em um mesmo ensaio (como nos ensaios a; 75/60; 2,7 e a; 75/60; 1,6), sob ação da umidade, favorecendo a coesão. A variação de retenção de material nas paredes do modelo foi de 0,9% a 17,1% (média de 3,8%) em massa para ensaios com areia, num conjunto de 50 ensaios.

Os resultados dos ensaios com areia úmida repetiram as observações realizadas nos ensaios em modelos de silo estático, na granulometria mais fina testada. Contrariamente ao esperado, os materiais apresentaram, na maioria das vezes, vazões relativamente menores, independentemente da abertura de descarga testada.

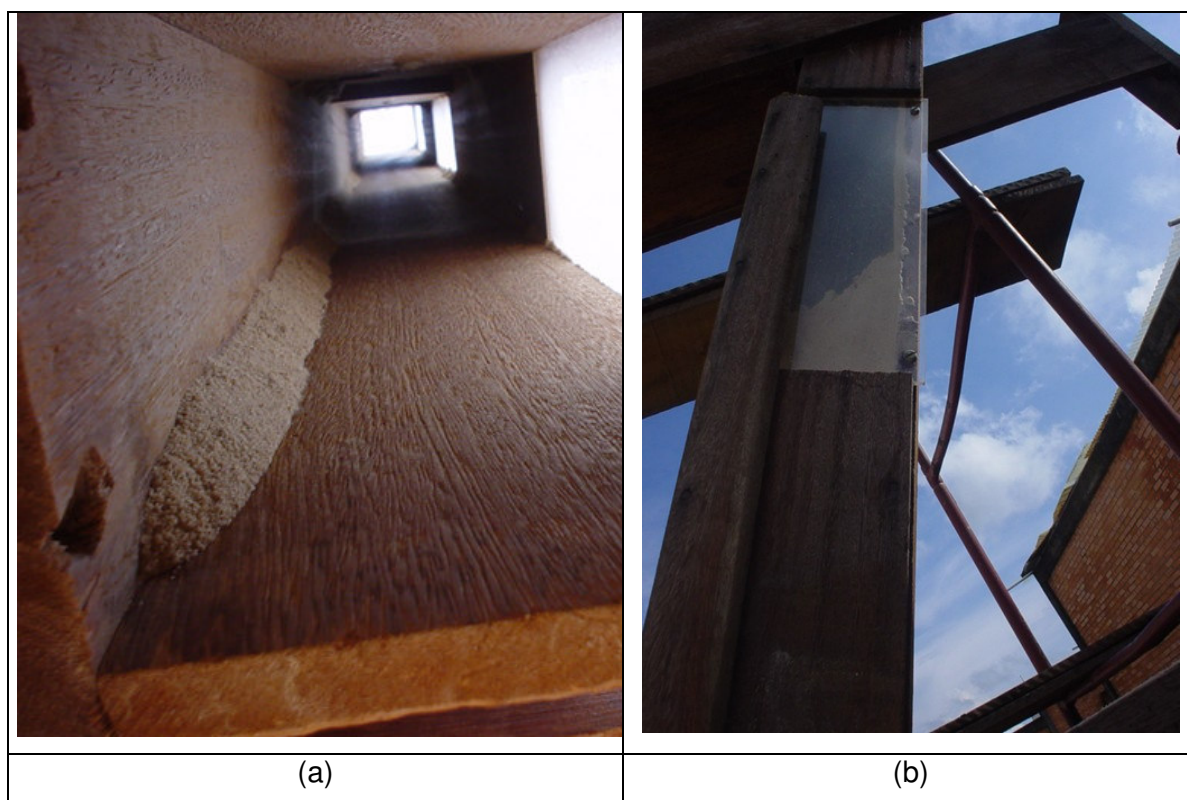


Figura 5.29 – Problemas de fluxo em ensaios com areia (6,3% de umidade): a) retenção de material nas laterais em ensaio com modelo de passagem, inclinado de 75°, sem Joelho, 3,7m de coluna de material; b) formação de arco em ensaio com areia em modelo de passagem e Joelho inclinados de 60°, 3,7m de coluna de material.

A figura 5.30 apresenta valores obtidos de vazão para todos os materiais testados em modelo de passagem sem Joelho, para a coluna de material de 3m, com a seção de descarga do modelo de 12cm x 16cm. O limite preconizado de fluxo livre é  $D/d$  entre 4 e 6. Poder-se-ia esperar, em primeira análise, que os valores de vazão da areia ( $D/d = 100$ ) seriam bem destacados. A presença de umidade reduz a vazão e a velocidade de fluxo da areia, em comparação aos valores obtidos para as britas. Para a areia são comuns problemas de formação de arco coesivo no conjunto de ensaios realizado, enquanto para a brita zero ( $D/d = 10$ ), de razão bem acima do limite de fluxo livre, não. A umidade explica esta diferença. Comparativamente, nos ensaios com areia produz-se menos poeira que em ensaios com brita 1 de dolomita, como também se verificam mais problemas como a formação de arco, comparativamente à mesma brita.

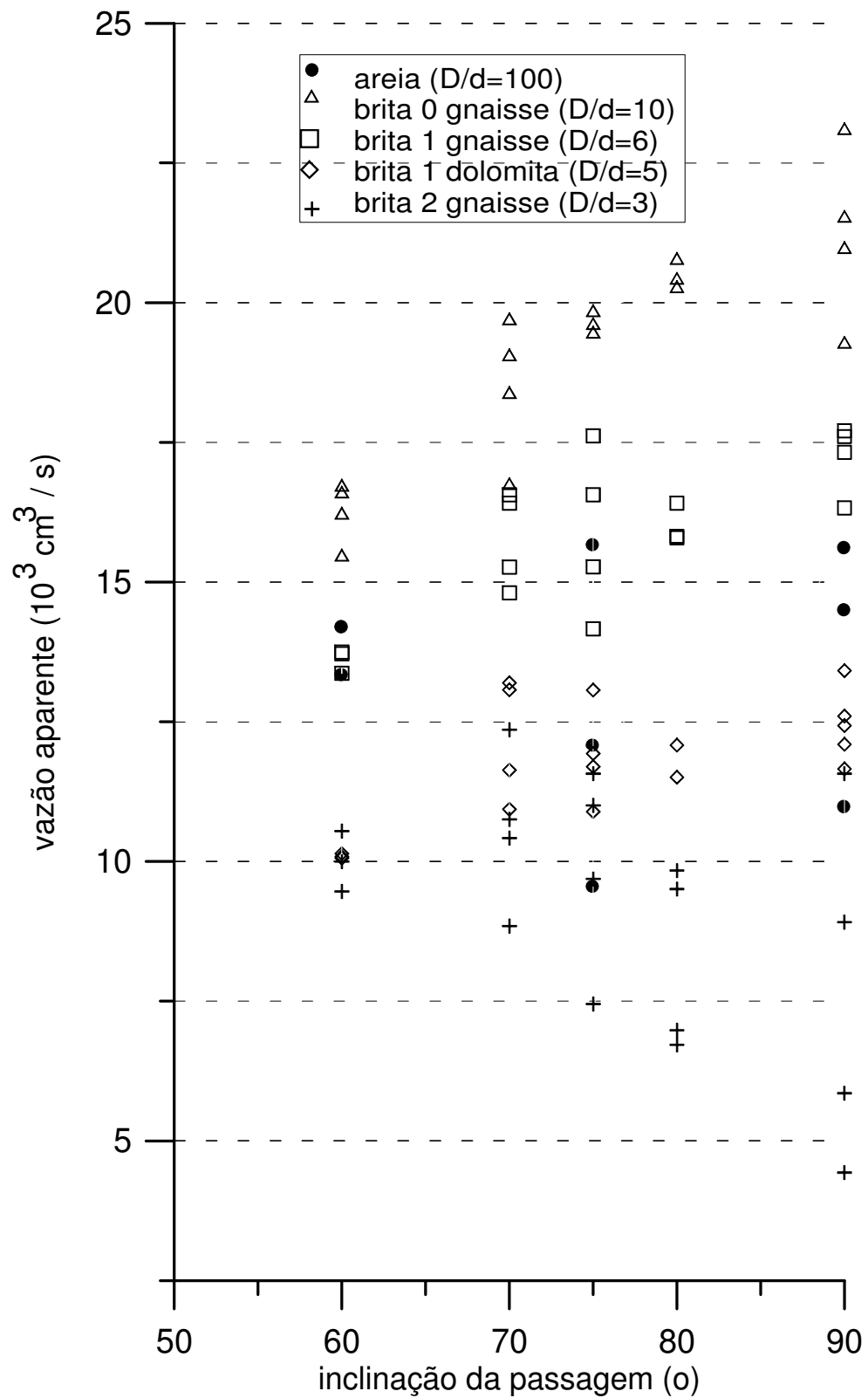


Figura 5.30 – Resultados de vazão volumétrica aparente em modelo de passagem sem joelho, coluna de material de 3m, seção de descarga de 12cm x 16cm.

A figura 5.31 mostra resultados de ensaios de vazões no modelo de passagem sem joelho e com o modelo de passagem com joelho acoplado, para a coluna de material de 1,6m, com seção da passagem de 12cm x 16cm. Observa-se um aumento da vazão com a presença de joelho, relativamente à passagem sem joelho. No caso específico da brita 2 ( $D/d = 3$ ) acontece uma inversão da tendência apresentada nos ensaios sem joelho, em relação à inclinação da passagem. Com a presença de joelho, existe uma tendência de aumento das vazões, à medida que se aumenta a inclinação do modelo de passagem de minério para todos os materiais testados, que pode ser explicada pela geometria do joelho utilizado (apresentando maior seção inicial que a da passagem – 23cm x 19cm, diminuindo no final para 16cm x 14cm -, o que deve favorecer a ruptura de arcos).

A figura 5.32 apresenta os resultados obtidos em ensaios com brita 0 de gnaïsse, brita 2 de gnaïsse e misturas de materiais, com coluna de material de 2m, com seção da passagem de 12cm x 16cm. Nos ensaios com a mistura 1, não houve problemas como a formação de arco, com resultados de vazão intermediários em relação aos resultados de seus componentes individuais. A massa específica aparente desta mistura é superior à massa específica de seus componentes individuais.

Em ensaio realizado com a mistura 2 (80% de britas e 20% de argila mais água), após aberta a descarga, nos primeiros 4s, foram descarregados apenas cerca de 7% do volume total. Somente após batidas no modelo, após aguardar cerca de 30s, foi descarregado o restante. Considerando-se o tempo máximo de descarga para os outros materiais da ordem de 8s, percebe-se a dificuldade de descarga desse tipo de material em passagens. A argila absorveu água e formou torrões. A tendência é que os torrões de argila formem arco coesivo. A modificação de pequena parte da proporção de tamanho das partículas modificou o comportamento do material. Uma etapa posterior de pesquisa poderia ser investigar a partir de qual proporção de mistura acontece esta mudança de comportamento do material. Percebe-se que à medida que se introduz energia (com as batidas no modelo) para propiciar o fluxo, essa mistura vai se compactando e cai a seguir como um todo, como descreve a literatura. A mistura 3 (85% de britas e 15% de argila mais água) também não escoou sem auxílio de energia, mas com impossibilidade prática de medição do tempo de fluxo. A mistura 4 (90% de britas e 10% de argila mais água) teve 100% de formação de arcos, também escoando somente com introdução de energia.

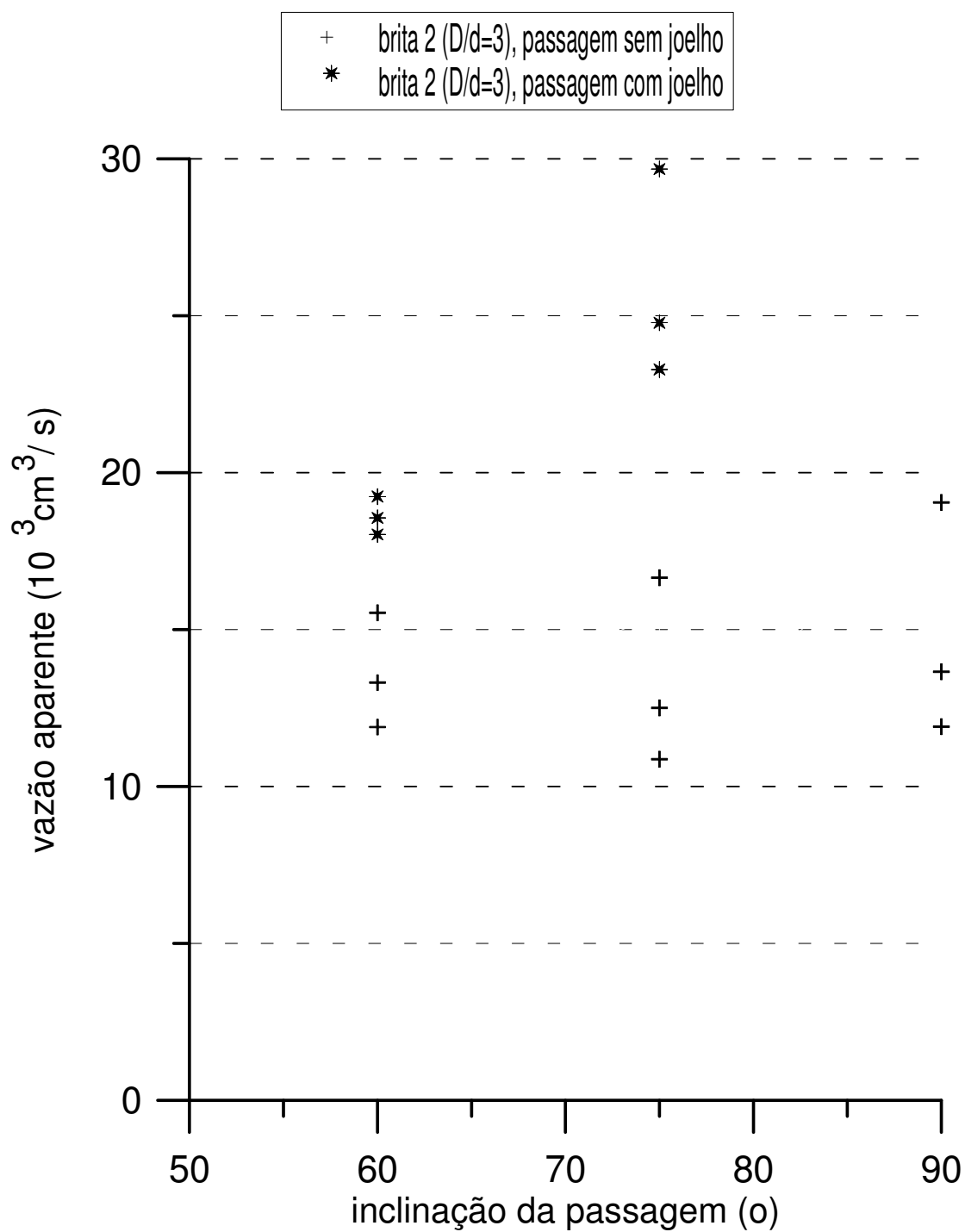


Figura 5.31 – Resultados de vazão volumétrica em ensaios com modelo de passagem sem joelho e com modelo de passagem com joelho acoplado, com 1,6m de coluna de material, seção da passagem de 12cm x 16cm.

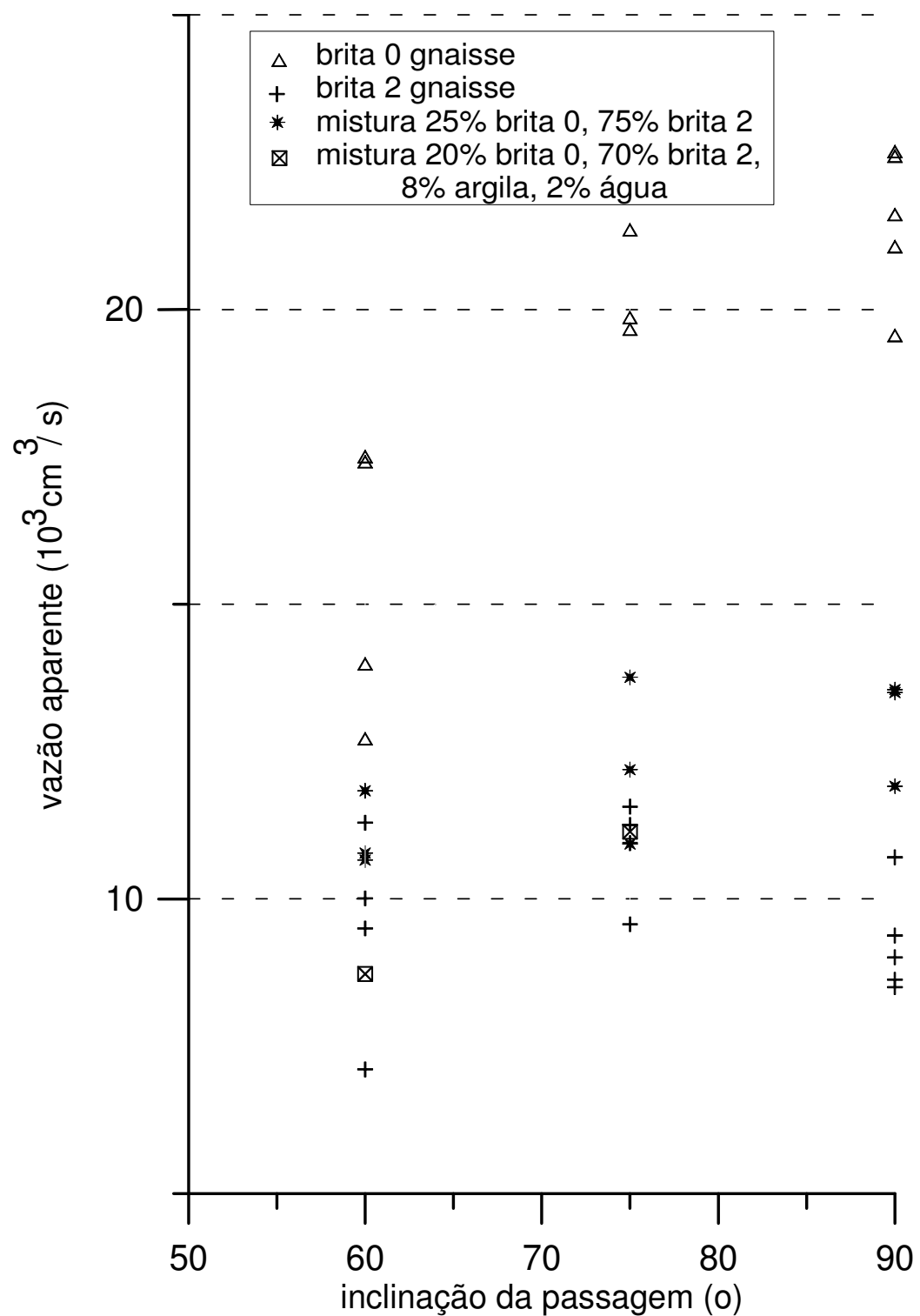


Figura 5.32 – Resultados de vazão volumétrica de ensaios com brita 0 de gnaise, brita 2 de gnaise e misturas desses materiais, com coluna de material de 2m, seção de descarga da passagem de 12cm x 16cm.

As misturas de materiais apresentaram grandes dificuldades ao seu manuseio, homogeneização e medição de suas propriedades.

### **Análise da influência de problemas de fluxo na vazão de descarga**

Pode ser analisada a influência na vazão de descarga da ocorrência do fluxo em funil ou de fluxo estagiado (com variação sensível na velocidade e/ou no padrão de fluxo), variando de 2 a 18,5% (com média 10%), conforme tabela V.18. O fluxo estagiado e a própria interrupção de fluxo são, na verdade, inerentes ao fluxo de material granular, caracterizado pela formação e quebra contínua de arcos.

Tabela V.18 – Influência na vazão de descarga da ocorrência de fluxo em funil ou fluxo em estágios em ensaios em modelo físico de passagem.

#### a) Passagem sem joelho

Ensaio	Problema	Vazão [ $10^{-6}m^3/s$ ]	Média 1	Média 2	Diferença [%]
2g;90;3,0	Fluxo em funil	593	7.692	6.272	18,5
2g;90;3,0	Fluxo em funil	4.430	8.778	7.692	12,4
2g;75;3,0	Fluxo estagiado	6.552	11.073	10.319	6,8
2g;70;3,0	Fluxo estagiado	10.752	10.540	10.752	2,0

#### b) Passagem com joelho

Ensaio	Problema	Vazão [ $10^{-6}m^3/s$ ]	Média 1	Média 2	Diferença [%]
2g;75/75;2,7	Fluxo estagiado	9.137	17.209	15.191	11,7
2g;75/75;3,7	Fluxo estagiado	13.384	15.288	14.653	4,2
2g;75/60;1,6	Fluxo estagiado	12.813	16.202	15.355	5,2

Como exemplo, na tabela V.18, no ensaio 2g; 90; 3,0 (brita 2; passagem inclinada de 90° em relação à horizontal; 3m de coluna de material), se desconsiderarmos os dois valores obtidos no ensaio, teremos uma vazão de descarga média 7% diferente da obtida com a inclusão dos dois valores obtidos, com ocorrência de problemas de fluxo. Há casos de 14% de diferença na vazão de descarga.

O material de maior incidência de problemas de fluxo, para a seção de descarga de 12cm x 16cm, conforme já citado, foi a brita 2 de gnaiss (D/d = 3), seguida da areia com 6,3% de umidade. As inclinações preferenciais de problemas foram 75 e 90° e os

ensaios com maiores colunas de material, conforme pode ser observado a seguir. Para a seção de descarga de 6cm x 8cm, foi a brita 1 de gnaiss (que apresenta  $D/d=3$  para essa seção). São mostrados exemplos de grande incidência de problemas de fluxo envolvendo ensaios com brita 2 de gnaiss ( $D/d = 3$ , para a seção de descarga de 12cm x 16cm) na tabela V.19. Observe-se a variedade de problemas de fluxo nesses ensaios, com variação da vazão de 1 a 20%.

Tabela V.19 - Análise de ensaios com grande incidência de problemas de fluxo em ensaios em modelo físico de passagem.

a) Passagem sem joelho

Ensaio 2g; 90; 3,0

Problema	Vazão [ $10^{-6}m^3/s$ ]	Média 1	Média 2	Diferença [%]
Fluxo em funil	593	7692	6272	18,5
Fluxo em funil	4.430	8.778	7.692	12,4
Interrupção de fluxo	5.852	8.778	7.692	12,4
Arco na descarga	11.571	6.398	7.692	20,2

Ensaio 2g; 75; 2,0

Problema	Vazão [ $10^{-6}m^3/s$ ]	Média 1	Média 2	Diferença [%]
Arco na alimentação	10.945	10.764	10.275	5,0
Fluxo estagiado	11.252	10.112	10.275	1,6
Interrupção de fluxo	7.339	10.764	10.275	4,5
Arco na descarga	13.042	9.814	10.275	4,7
Arco na descarga	8.212	10.619	10.275	3,2

b) Passagem com joelho

Ensaio 2g; 75/75; 2,7

Problema	Vazão [ $10^{-6}m^3/s$ ]	Média 1	Média 2	Diferença [%]
Arco na descarga	15.816	17.905	17.209	3,9
Arco na descarga	19.011	16.307	17.209	5,5
Arco na descarga	16.798	17.414	17.209	1,2
Arco na descarga	9.137	17.209	15.191	11,7

Para o conjunto geral de dados obtidos, pode ser analisada ainda a influência da formação de arco coesivo e de arco mecânico na vazão de descarga. Houve necessidade de intervenção (batidas na lateral do modelo) para remoção do material retido, com valores variando de 20 a 81% da massa alimentada (no caso das britas, com média 52%) e de 0,9 a 17,1% da massa (no caso da areia, com média 3,8%).

A tabela V.20 mostra a influência da ocorrência de arcos na vazão de descarga em ensaios em modelo de passagem de minério.

Como exemplo, nessa tabela, no ensaio 2g; 90; 2,0 (brita 2; passagem inclinada de 90° em relação à horizontal; 2,0m de coluna de material), se desconsiderarmos os dois valores obtidos no ensaio, teremos uma vazão de descarga variando de 0,2 a 20,2% (média 12%) de diferença em relação à vazão obtida com a inclusão dos dois valores obtidos, com ocorrência de problemas.

Há casos de grande diferença na vazão de descarga, além evidentemente da necessidade de intervenção para o desbloqueio do material, após a localização do bloqueio para a intervenção.

Na tabela V.21 apresentam-se resultados médios de vazão quando realizada a variação entre a direção da passagem e a direção do joelho ( $\theta$  é o ângulo entre essas direções). Observa-se que a vazão aumenta quando se aumenta o ângulo entre a direção do modelo de passagem e a direção do joelho. O que é coerente com o aumento da vazão, quando se aumenta a inclinação do modelo de passagem.

Nesses ensaios foram utilizadas as seguintes variações:

- modelo de passagem inclinado de 60° em relação à horizontal - joelho inclinado de 60° (ângulo entre as direções: 120°) e de 75° (135° entre as direções);
- modelo de passagem inclinado de 75° - joelho inclinado de 60° (135° entre as direções) e de 75° (150° entre as direções).

Tabela V.20 – Influência na vazão de descarga da ocorrência de arcos em ensaios em modelo físico de passagem.

a) passagem sem joelho

Ensaio	Problema	Vazão [10 <sup>-6</sup> m <sup>3</sup> /s]	Média 1	Média 2	Diferença [%]
0g;90;2,0	Sem fluxo	0	21.213	-	-
2g;90;2,0	Arco na descarga	3.512	9.244	8.288	10,3
2g;90;2,0	Interrupção de fluxo	8.502	9.429	8.288	12,1
2g;70;2,0	Interrupção de fluxo	13.301	10.649	11.312	6,2
2g;70;2,0	Interrupção de fluxo	12.826	10.807	11.312	4,7
2g;70;2,0	Interrupção de fluxo	12.039	11.069	11.312	2,2
2g;75;2,0	Interrupção de fluxo	11.252	10.112	10.275	1,6
2g;75;2,0	Interrupção de fluxo	7.339	10.764	10.275	4,5
2g;75;2,0	Arco na descarga	13.042	9.814	10.275	4,7
2g;75;2,0	Arco na descarga	8.212	10.619	10.275	3,2
1g;75;2,0	Interrupção de fluxo	6.471	15.888	14.005	11,9
0g;75;2,0	Interrupção de fluxo	19.865	16.203	17.423	7,5
0g;75;2,0	Interrupção de fluxo	21.355	19.766	20.295	3,2
2g;70;3,0	Interrupção de fluxo	9.043	11.176	10.643	0,1
2g;70;3,0	Interrupção de fluxo	10.416	10.544	10.593	0,5
0g;70;0,9	Interrupção de fluxo	26.408	17.975	19.661	9,4
0g;70;0,9	Interrupção de fluxo	17.131	20.294	19.661	3,1
2g;75;3,0	Interrupção de fluxo	9.686	10.446	10.319	1,2
2g;90;3,0	Interrupção de fluxo	5.852	8.778	7.692	12,4
2g;90;3,0	Arco na descarga	11.571	6.398	7.692	20,2
1g;90;2,0	Interrupção de fluxo	20.962	17.723	18.533	4,6
0g;70;2,0	Interrupção de fluxo	19.938	16.810	17.592	4,7

Continuação da tabela V.20 – Influência na vazão de descarga da ocorrência de arcos em ensaios em modelo físico de passagem.

b) passagem com joelho

Ensaio	Problema	Vazão [10 <sup>-6</sup> m <sup>3</sup> /s]	Média 1	Média 2	Diferença [%]
2g;75/75;1,6	Arco na descarga	24.778	26.487	23.299	12,0
2g;75/75;2,7	Arco na descarga	15.816	17.905	17.209	3,9
2g;75/75;2,7	Arco na descarga	19.011	16.307	17.209	5,5
2g;75/75;2,7	Arco na descarga	16.798	17.414	17.209	1,2
2g;75/75;3,7	Arco na descarga	11.847	16.056	14.653	8,7
2g;75/75;3,7	Arco na descarga	18.729	12.616	14.653	16,2
2g;75/60;3,7	Arco na descarga	11.300	13.555	12.803	5,6
2g;75/60;3,7	Arco na descarga	12.853	12.779	12.803	0,2
2g;75/60;2,7	Arco na descarga	9.831	11.430	10.897	4,7
2g;60/75;1,6	Arco na descarga	16.254	22.747	20.582	9,5
2g;60/75;3,7	Arco na descarga	13.232	12.813	12.952	1,1
2g;60/75;3,7	Arco na descarga	12.086	13.386	12.952	3,2
2g;60/60;3,7	Arco na descarga	11.267	13.640	12.848	5,8
2g;60/60;3,7	Arco na descarga	13.082	12.732	12.848	0,9
2g;60/60;2,7	Arco na descarga	11.558	15.383	14.108	8,3
a;75/60;3,7	Arco na descarga	11.396	10.642	10.893	2,4
a;75/60;3,7	Arco na descarga	11.391	10.644	10.893	2,3
a;75/60;2,7	Arco na descarga	12.053	11.802	11.885	0,7
a;75/60;2,7	Arco na descarga	11.256	12.200	11.885	2,6
a;75/60;2,7	Arco na descarga	12.347	11.655	11.885	2,0
a;75/60;1,6	Arco na descarga	9.383	9.729	9.613	1,2
a;75/60;1,6	Arco na descarga	10.122	9.359	9.613	2,7
a;60/75;2,7	Arco na descarga	12.890	13.435	13.253	1,4
a;60/75;1,6	Arco na descarga	17.573	18.429	18.143	1,6
a;60/75;1,6	Arco na descarga	17.782	18.324	18.143	1,0
a;60/60;3,7	Arco na descarga	8.636	9.129	8.298	9,1

### Análise da variação da inclinação do ângulo entre a direção da passagem e a direção do joelho

Tabela V.21 – Resultados de vazão de descarga com a variação do ângulo ( $\theta$ ) entre a direção da passagem e a direção do joelho.

a) Passagem inclinada de 75°, com joelho

Coluna de material (m)	$\theta$	Brita 2 gnaissse (D/d=3)	Brita 1 dolomita (D/d=5)	Brita 1 gnaissse (D/d=6)	Brita 0 gnaissse (D/d=10)	Areia (D/d=100)
1,6	150	23.299	20.427	23.266	24.566	16.717
	135	15.355	17.179	17.305	23.692	9.613
2,7	150	17.209	19.609	23.582	28.395	13.973
	135	10.897	15.997	19.425	23.965	11.885
3,7	150	14.653	15.733	19.267	21.047	12.436
	135	12.803	15.579	18.752	22.615	10.810

b) Passagem inclinada de 60°, com joelho

Coluna de material (m)	$\theta$	Brita 2 gnaissse (D/d=3)	Brita 1 gnaissse (D/d=6)	Areia (D/d=100)
1,6	135	20.582	27.634	18.143
	120	18.611	18.406	9.846
2,7	135	17.988	20.599	13.253
	120	14.105	17.641	7.743
3,7	135	12.952	19.600	12.275
	120	12.849	16.636	8.298

Os ensaios no modelo físico de passagem foram finalizados com introdução de redução na seção de descarga do modelo para 6cm x 8cm, sem introdução de joelho. A tabela V.22 mostra propriedades dos materiais testados para essa seção de descarga da passagem. Assim como a razão entre a dimensão característica da seção da passagem (D) e o tamanho do maior bloco (d) para essa seção. A figura 5.33 mostra resultados médios de vazões obtidos, relativamente a essa seção.

Tabela V.22 – Propriedades dos materiais utilizados em ensaios em modelo físico de passagem, seção de descarga de 6cm x 8cm.

Material	Tamanho máximo (d) [mm]	D/d	Massa específica real [kg/m <sup>3</sup> ]	Massa específica aparente [kg/m <sup>3</sup> ]	Porosidade aparente (ε) [%]	Ângulo de repouso	Módulo de Finura
Areia (6,3% umidade)	1,2	50	2650	1400	47	46,0	1,85
Brita 0 dolomita	8,7	7	2960	1680	43	32,3	3,41
Brita 0 gnaisse	12,0	5	2730	1420	48	33,0	4,02
Brita 1 gnaisse	18,9	3	2730	1500	45	32,0	3,65

Nota: A dimensão característica da seção de descarga do modelo de passagem é D=60mm.

A tabela V.23 apresenta resultados médios da vazão e o número de ensaios validados em cada série realizada, para essa seção. Nesses ensaios trabalhou-se com o mínimo de uma réplica.

A tabela V.24 mostra a média de massa de material retido na zona passiva no interior do dispositivo de redução da seção, em ensaios em modelo físico de passagem, seção de descarga de 6cm x 8cm, 60° de inclinação. Esse problema aconteceu também com a brita 0 de dolomita, nas mesmas condições de ensaio, mas não foi quantificada a massa. Não aconteceu a formação de zona passiva para a inclinação de 90°. Os resultados não permitem uma conclusão sobre a influência da coluna de material ou da faixa granulométrica do material nesses valores.

As razões das vazões médias entre faixas granulométricas do mesmo material e mesma faixa de tamanho de materiais diferentes, para a seção de descarga de 6cm x 8cm, são apresentadas na tabela V.25.

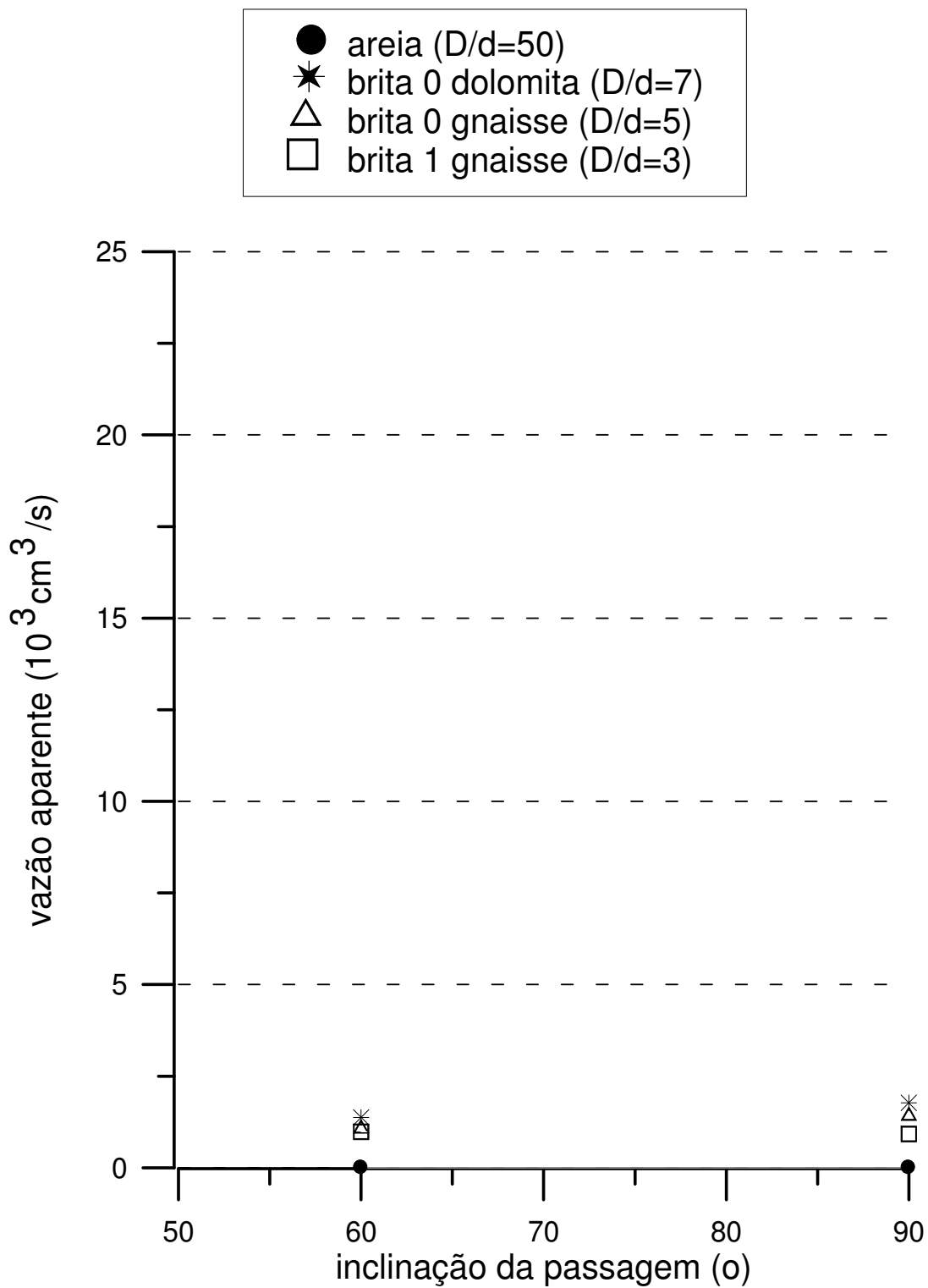


Figura 5.33 - Resultados médios de vazão volumétrica de ensaios em modelo físico de passagem, seção de descarga de 6cm x 8cm, 2m de coluna de material.

Tabela V.23 – Valores médios de vazão de fluxo aparente de areia e de britas obtidos em modelo físico de passagem, de seção retangular (6cm x 8cm).

Coluna de material [m]	Vazão volumétrica [ $10^{-6}m^3/s$ ] (no. ensaios válidos)	
	Areia ( $D/d = 50$ ), ( $d = 1,2$ mm) - 6,3% de umidade	
	Inclinação da passagem	
	60	90
0,9	-	0
2,0	0	-
Coluna de material [m]	Vazão volumétrica [ $10^{-6}m^3/s$ ] (no. ensaios válidos)	
	Brita 0 gnaiss (D/d = 5), ( $d=12,0$ mm)	
	Inclinação da passagem	
	60	90
0,9	824 (3)	-
2,0	1.129 (3)	1.471 (2)
Coluna de material [m]	Vazão volumétrica [ $10^{-6}m^3/s$ ] (no. ensaios válidos)	
	Brita 0 dolomita (D/d =7), ( $d=8,7$ mm)	
	Inclinação da passagem	
	60	90
0,9	1.190 (3)	-
2,0	1.371 (3)	1.770 (2)
Coluna de material [m]	Vazão volumétrica [ $10^{-6}m^3/s$ ] (no. ensaios válidos)	
	Brita 1 gnaiss (D/d =3), ( $d=18,9$ mm)	
	Inclinação da passagem	
	60	90
0,9	834 (3)	-
2,0	978 (3)	920 (2)

Tabela V. 24 – Massa de material na zona passiva nos ensaios em modelo físico de passagem, seção de descarga de 6cm x 8cm, inclinação 60°.

Material	Coluna de material [m]	Massa média retida [g] (% massa alimentada)	Problemas observados
Brita 0 gnaiss	2,0	2.980 (5%)	-
Brita 0 gnaiss	0,9	3.420 (12%)	-
Brita 1 gnaiss	0,9	980 (2%)	Arcos

Tabela V.25 - Razões das vazões médias de descarga em modelo físico de passagem, seção de descarga de 6cm x 8cm.

Materiais	Situação de ensaio	Razão entre tamanhos ( $R_{D90}$ )	Razão entre vazões ( $r_v$ )	Número ensaios
Britas 0	Passagem sem joelho	1,38	0,80	14
Britas gnaisse (0 e 1)	Passagem sem joelho	1,58	0,70	14

### **Análise da influência da seção de descarga**

A figura 5.34 apresenta resultados médios relativamente às seções de descarga testadas do modelo de passagem (12cm x 16cm e 6cm x 8cm). A razão entre vazões para um mesmo material variou de 10 a 20 vezes, conforme tabela V.26.

### **Análise da influência da faixa granulométrica do material**

Considerando-se os dados das tabelas V. 17 e V.25, para as seções de descarga testadas no modelo de passagem, a figura 5.35 mostra a razão entre vazões ( $r_v$ ) em função da razão entre tamanhos ( $R_{D90}$ ). Percebe-se que um aumento da faixa granulométrica do material implica uma diminuição da razão das vazões.

### **Análise da influência da inclinação do modelo e da coluna de material (seção de descarga 6cm x 8cm)**

Com o aumento da inclinação, para a seção de 6cm x 8cm, confirmou-se a tendência de aumento da vazão, exceto para a brita 1 de gnaisse ( $D/d = 3$  para essa seção). Esse comportamento é análogo ao da seção de descarga de 12cm x 16cm.

Com o aumento da coluna de material, para a seção de 6cm x 8cm, a tendência apresentada foi de aumento da vazão, para os diversos materiais testados, contrariamente ao comportamento para a seção de descarga de 12cm x 16cm.

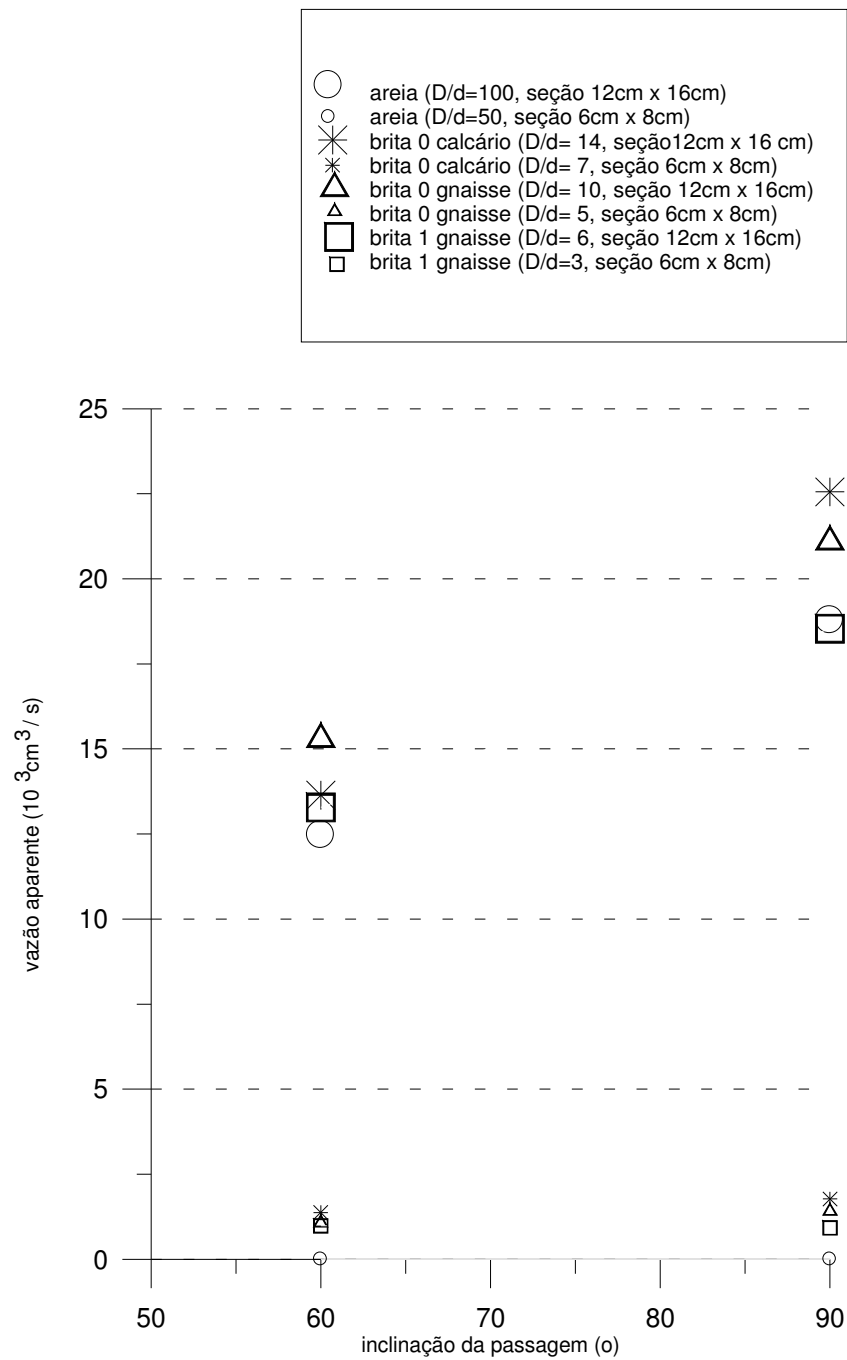


Figura 5.34 - Resultados médios de vazões volumétricas relativamente às seções de descarga testadas do modelo de passagem de minério.

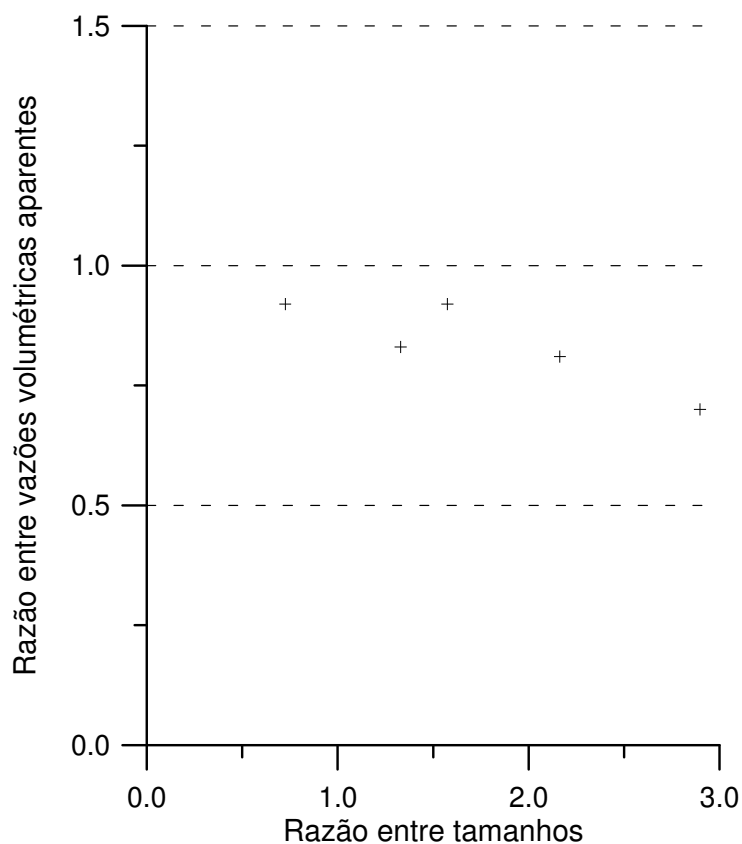


Figura 5.35 - Razão entre vazões ( $r_v$ ) em função da razão entre tamanhos ( $R_{D90}$ ) nos ensaios em modelo físico de passagem.

Tabela V.26 - Razão entre vazões para um mesmo material das seções testadas no modelo físico de passagem (12cm x 16cm e 6cm x 8cm).

Inclinação modelo [°]; coluna material [m]	Vazões aparentes de descarga [ $10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ ] (D/d)				
	Seção [cm <sup>2</sup> ]	Areia	Brita 0 dolomita	Brita 0 gnaisse	Brita 1 gnaisse
60 ; 0,9	6 x 8	0 (50)	1.190 (7)	824 (5)	834 (3)
	12 x 16	14.347 (100)	-	14.077 (10)	13.193 (6)
	razão	-	-	17	16
60 ; 2,0	6 x 8	0 (50)	1.371 (7)	1.128 (5)	979 (3)
	12 x 16	12.474 (100)	13.638 (14)	15.409 (10)	13.282 (6)
	razão	-	10	14	14
90 ; 2,0	6 x 8	0 (50)	1.770 (7)	1.476 (5)	920 (3)
	12 x 16	18.794 (100)	22.557 (14)	21.213 (10)	18.533 (6)
	razão	-	13	14	20

## 6 – CONCLUSÕES

O fluxo de materiais granulares está presente em diversas indústrias. Embora tenha recebido atenção em diversos campos, ainda há diversas questões sem resposta. O fluxo em reservatórios confinados mostra-se bastante complexo e dependente de inúmeros parâmetros, relativos ao material e ao reservatório. Esse fluxo consiste essencialmente em um processo de contínua ruptura por cisalhamento de material, governado pela gravidade contra o atrito e a coesão, sendo caracterizado pela formação e ruptura de arcos. O fluxo errático e a interrupção de fluxo são características inerentes a esse fluxo.

Embora haja uma compreensão macroscópica adequada dos problemas envolvidos, a previsão quantitativa da vazão de reservatórios de estocagem ainda apresenta problemas. Muitas das vezes ocorre a revisão de projeto para a obtenção de um fluxo adequado. Neste trabalho foram comparados valores obtidos de vazão com valores previstos por equações preconizadas pela literatura.

A formação de arco estável, ocasionando interrupção do fluxo, parada de produção e exposição a riscos, é problemática. O manuseio de material fragmentado está entre as operações com grandes índices de acidentes, merecendo atenção especial de programas de pesquisa em diversos países. Os resultados obtidos neste trabalho evidenciam a importância do tema para a mineração subterrânea, em termos de riscos de acidentes e custos com desbloqueio de material retido em reservatório.

As abordagens disponíveis para estudo do fluxo de material fragmentado se complementam na tentativa da compreensão da questão e da determinação de variáveis de projeto. A abordagem analítica é ainda limitada. Para a utilização de modelos numéricos a dificuldade é a obtenção de dados de entrada. A determinação de propriedades de fluxo encontra dificuldade no pequeno número de ensaios nos testes de campo. No projeto de reservatórios de estocagem predomina o uso de relações empíricas, de regras práticas e da experiência do minerador.

A simulação computacional é, nos últimos dez a quinze anos, a mais comum das abordagens no estudo do comportamento de material granular, mas o uso de modelos físicos mostra também sua utilidade. A partir de modelos, por exemplo, em que se

usam esferas fluindo em tubos ou fragmentos irregulares de rochas fluindo em modelo de passagem, é possível extrair critérios de projeto para sistemas reais, utilizando-se prudência nas extrapolações. A combinação de modelos físicos e numéricos produz dados importantes para a melhoria do fluxo de material fragmentado.

Vários métodos de lavra subterrânea utilizam o fluxo por gravidade em escavações. Na mineração subterrânea, o fluxo por gravidade de material fragmentado não tem linguagem unívoca. A sistematização de dados e/ou de trabalhos realizados com modelos para minas subterrâneas é precária. Não existem trabalhos em que o efeito de escala tenha sido explicitamente considerado. Os resultados são, portanto, mais qualitativos.

A geometria do fluxo tem sido discutida. Recorre-se a relações empíricas, como da razão da seção da passagem pelo tamanho máximo de bloco ( $D/d$ ) e à experiência do minerador no projeto de fluxo de material fragmentado. A distribuição de tamanho de partícula e a presença de grandes blocos têm uma influência extremamente alta no fluxo por gravidade de material fragmentado e devem ser os fatores mais importantes no planejamento do método de abatimento em subníveis.

Outra grande preocupação no fluxo de material fragmentado em passagens, além do próprio fluxo do material a uma taxa adequada, é a respeito das cargas sobre portões de controle de descarga. Resultados de ensaios em modelos físicos mostraram que existe uma mudança mínima quando a coluna de material excede 1m acima do portão de descarga do modelo (ou 4% do comprimento do modelo); que a presença de um joelho tem pouco efeito na carga estática no portão.

Os ensaios de fluxo deste trabalho foram realizados em modelo físico de passagem, em escala reduzida aproximada de um corpo de minério real, lavrado pelo método de alargamento em subníveis. A ocorrência de problemas de fluxo e a dispersão dos resultados de vazão foram questões essenciais. Os problemas de fluxo (arco mecânico e arco coesivo, fluxo em funil, fluxo errático e outros) foram observados, juntamente com as medidas de vazão realizadas. Para a medição de vazões, ocorreu a variação de parâmetros previamente definidos (inclinação da passagem, natureza e distribuição granulométrica do material, coluna de material, seção de descarga da

passagem, presença de joelho na passagem). Considerando-se o conjunto de ensaios realizados neste trabalho, podem ser destacadas as análises seguintes.

Em 28% dos ensaios aconteceram problemas de fluxo, 86% deles relacionados com a formação de arco. Os ensaios com materiais com razão  $D/d = 3$  (dentro da faixa-limite preconizada na literatura) apresentaram grande ocorrência de problemas. Cerca de 94% dos problemas estão relacionados com a formação de arco. Os problemas observados influenciam no valor da vazão de descarga, mas sempre com diferença inferior a 20% da vazão medida.

O fluxo se mostrou mais fácil para 0,9m de coluna de material. Para esse valor há maior dispersão dos resultados de vazões em relação aos demais níveis testados (entre 1,6m e 3,7m).

A vazão volumétrica em passagens depende de vários fatores: do arranjo espacial das partículas, das dimensões do material, do sistema de manuseio (inclinação, presença ou não de ramificações, de chute), das dimensões da passagem, da altura da coluna de material, da presença de finos, da umidade, do tempo de estocagem, entre outros. Esse conjunto de observações e resultados evidenciou a importância da umidade, da presença de finos e de materiais terrosos e/ou argilosos, da razão entre abertura de saída da passagem ( $D$ ) e o tamanho máximo das partículas ( $d$ ) como diretrizes de projeto do fluxo por gravidade de material fragmentado.

A partir do conjunto de ensaios realizados, ficou claro que o teor de umidade é um dos fatores mais importantes no controle das propriedades de fluxo de materiais granulares, invertendo tendências de valores relativos de vazão entre os materiais. E que a presença de argila modifica o ângulo e atrito interno do material. Notadamente nesse trabalho essas influências se refletiram, respectivamente, nos valores obtidos de vazão de descarga de areia (6,3% de umidade) e de misturas de materiais (britas e argila).

Como descrito na literatura e observado no conjunto de ensaios realizados, a energia da força da gravidade pode não ser suficiente para a ocorrência do fluxo, havendo necessidade de intervenção, com introdução de energia, quando não acontece a descarga do material.

O tempo de estocagem é um fator importante no fluxo de material fragmentado e deve ser estudado de acordo com as condições de cada mina. O primeiro passo para seu estudo é a documentação criteriosa e detalhada dos problemas de fluxo observados. Os valores obtidos neste trabalho foram de diferença de 3% da vazão de descarga no modelo de passagem de minério em situação de estocagem, comparativamente à não realização de estocagem. Esses valores não permitem uma conclusão se houve influência específica da estocagem, uma vez que a diferença de outras observações foi superior a esse valor.

O aumento do ângulo entre a direção da passagem e a direção do joelho implicou tendência de aumento da vazão para todos os materiais testados, o que é coerente com o aumento da vazão com o aumento da inclinação da passagem.

Não há, neste trabalho, condições de analisar a similitude entre o modelo físico e o objeto real, em função dos parâmetros utilizados na abordagem experimental utilizada.

Nos ensaios realizados com misturas de materiais (britas, argila e água), o tempo de descarga, aliado à necessidade de introdução de energia (batidas no modelo), demonstra a dificuldade de descarga desse tipo de material em passagens; o que é coerente com a literatura.

A prática corrente no fluxo por gravidade de material fragmentado em minas subterrâneas mostra algumas ações preventivas e outras corretivas. Há necessidade de continuação das atividades de pesquisa para procurar respostas para as questões, com melhoria dos dados disponíveis para um projeto de fluxo confiável. A pesquisa deve conduzir a mudanças de diretrizes para o projeto de passagens e de sistemas similares de estocagem e de transporte de material nas minas e à melhoria significativa da segurança.

Para a construção da abordagem mais apropriada para o tema em questão, deve ser elaborada uma metodologia de documentação criteriosa e detalhada dos problemas de fluxo por gravidade de material nas minas subterrâneas.

## **7- CONTRIBUIÇÕES ORIGINAIS AO CONHECIMENTO**

Os estudos de fluxo de materiais, com uso de modelos físicos, em escala real ou reduzida, são comuns há pelo menos cinco décadas. A contribuição original do presente trabalho se evidencia em três pontos.

A principal contribuição é a obtenção de dados de fluxo de material fragmentado em modelo físico de passagem de minério, em escala reduzida. É importante a documentação de problemas diversos de fluxo (formação de arco, de canal preferencial de fluxo, fluxo estagiado, entre outros). Também podem ser destacados os valores de vazão obtidos com variação da natureza e da distribuição granulométrica dos materiais alimentados, com variação da razão entre a dimensão da seção de descarga e o tamanho dos materiais, com variação da seção de descarga e com a utilização de misturas de materiais.

Outra contribuição relevante é o levantamento da prática corrente nas minas subterrâneas a respeito de operações que envolvem o fluxo por gravidade de material fragmentado, envolvendo ações preventivas e ações corretivas, constatando-se as deficiências relativas à linguagem, à disponibilidade e sistematização de dados, à literatura.

Conhecendo a incidência de problemas diversos (paradas, acidentes, comprometimentos da produção) relacionados com o fluxo de material fragmentado, consideramos essencial o estabelecimento de um centro de estudos nessa área. Este trabalho foi o primeiro passo lógico neste sentido.

## **8- RELEVÂNCIA DOS RESULTADOS**

A mineração brasileira apresentará cada vez mais a tendência de abertura de minas subterrâneas, com o emprego crescente dos métodos de lavra próprios da mineração subterrânea, dada a progressiva exaustão das reservas acessíveis à lavra a céu aberto e as restrições ambientais à mesma. Em particular, o estado de Minas Gerais apresenta a entrada em operação nos próximos dois anos de no mínimo duas minas subterrâneas, além do aprofundamento de minas já existentes, com aumento da produção.

Os resultados deste trabalho propõem aos mineradores uma reflexão da necessidade de implementar uma metodologia de levantamento de dados e de ocorrências relativas ao fluxo de material fragmentado por gravidade em minas subterrâneas, de acordo com as condições específicas de cada mina, para a melhoria do sistema de transferência de material. Com a realização deste projeto, apresentados os pontos de dificuldades, as necessidades reais de novos estudos vão ser determinadas com mais facilidade e pertinência.

O Brasil tem a mineração como indústria básica e fator de desenvolvimento, com grande participação no PIB (Produto Interno Bruto), atingindo cerca de 8%. Os ganhos em pesquisas, que tragam como resultados redução de custos e/ou melhoria de processos, têm grande efeito multiplicador para a mineração. O Estado de Minas Gerais, em particular, é o maior produtor mineral do país, respondendo por cerca de um terço da produção nacional do setor, com investimentos estimados pela Secretaria de Minas e Energia da ordem de R\$ 8 bilhões entre 1999 e 2004.

## 9 - SUGESTÕES PARA TRABALHOS POSTERIORES

Na mineração subterrânea, o fluxo por gravidade de material fragmentado não tem linguagem unívoca, sistematização de dados nem de trabalhos realizados. É necessária a elaboração de metodologia do levantamento de dados, através de documentação criteriosa e detalhada.

Nos estudos de fluxo por gravidade de material fragmentado, com uso de modelos físicos, os resultados são mais qualitativos. Não existem trabalhos em que o efeito de escala tenha sido explicitamente considerado. É necessário que sejam desenvolvidos trabalhos com essa característica.

Em ensaios realizados com misturas de britas e de argila, houve necessidade de acréscimo de energia para o fluxo de material, devido à formação de arcos coesivos em 100% dos casos. Uma etapa posterior de pesquisa poderia ser investigar a partir de qual proporção de mistura acontece esta mudança de comportamento do material.

Além dessas observações, podem ser estabelecidas outras sugestões para trabalhos posteriores: utilização de maior variedade de condições de umidade dos materiais ou de outras misturas de materiais na alimentação do modelo de passagem, para simular diferentes condições de coesão; utilização de maior variedade de misturas para se pesquisar um valor crítico para a presença de materiais argilosos e/ou terrosos; planejamento de dispositivo que varie condições de rugosidade da parede do reservatório ou em que possa avaliado o desgaste das paredes dos reservatórios; deve ser feita análise de possíveis correlações de resultados do modelo físico de passagem com resultados de modelos numéricos, utilizando-se aplicativos como o *Particle Flow Code* (PFC).

É extremamente importante a continuação da pesquisa para definição da importância relativa dos parâmetros levantados no fluxo de material fragmentado, para diminuição da frequência de problemas, para diminuição de custos com paradas e para melhoria significativa da segurança no trabalho em mineração subterrânea.

## **PUBLICAÇÕES DO AUTOR RELACIONADAS COM O TRABALHO**

- SILVA, J. M.; GRIPP, M. F. A.; LUZ, J. A. M. Parâmetros para o projeto de fluxo por gravidade de material fragmentado. II Congresso Brasileiro de Mina Subterrânea, Belo Horizonte. IBRAM. 2002. 12p.
- SILVA, J. M.; LUZ, J. A. M. Fluxo de material particulado em sistemas confinados. XIX Encontro Nacional de Tratamento de Minérios, Recife (PE). 2002. 8p.
- DIAS, S. F. C.; SILVA, J. M. Estudo de fluxo de material fragmentado em escavações subterrâneas, com uso de modelos físicos. XI Seminário de Iniciação Científica, Ouro Preto. UFOP. 2003. 1p.
- SILVA, J. M.; LUZ, J. A. M. Aspectos reológicos do escoamento de materiais granulares. XXX Encontro Nacional de Tratamento de Minérios, Florianópolis. 2004. 5p.
- SILVA, J. M.; NEME, M. B. Aspectos de segurança na extração e no escoamento de materiais fragmentados em minas subterrâneas. I Semana Ibero-americana de Engenharia de Minas, São Paulo. 2004. 6p.
- SILVA, J. M. Abordagens no projeto de escoamento por gravidade de material fragmentado em minas subterrâneas. I Semana Ibero-americana de Engenharia de Minas, São Paulo. 2004. 9p.
- SILVA, J. M. A simulação do fluxo por gravidade de materiais fragmentados em mineração, com uso de modelos físicos. III Congresso Brasileiro de Mina Subterrânea, Belo Horizonte. 2004. 12p.

## **DADOS BIOGRÁFICOS DO AUTOR**

José Margarida da Silva nasceu em 01 de maio de 1968, em Ouro Preto (MG), filho de Milton da Silva e de Sônia Maria de Araújo Silva. Casado com Dayse da Silva Dutra e Silva, em 1994, tem duas filhas, Natália, nascida em 1997 e Laura, nascida em 2000. Graduou-se em Engenharia de Minas pela Escola de Minas/Universidade Federal de Ouro Preto em abril de 1992. Obteve o título de Mestre em Engenharia pela Escola Politécnica/Universidade de São Paulo em agosto de 1998. Desde maio de 1993, é professor do Departamento de Engenharia de Minas, da Escola de Minas da UFOP, na área de Lavra Subterrânea e de Mecânica das Rochas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABGE. Glossário de Mecânica das Rochas. Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, p. 5. 1976.

AMORIM, C. A. Comunicação pessoal. 2004.

ANDRADE, S.; SÁ, J. Desenvolvimento de galerias em condições severas de tensões. CONGRESSO BRASILEIRO DE MINA SUBTERRÂNEA, II, Belo Horizonte, 15 p. 2002.

ANGLOGOLD. Balanço Social 1999-2000, 22pp. 2000.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Rio de Janeiro, *NBR 10182*: terminologia da lavra de jazidas de minerais metálicos, não metálicos e carvão, 22p. , 1988.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Rio de Janeiro, *NBR 5734*: peneiras para ensaios – especificação, 14 p., 1989.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Rio de Janeiro, *NBR 7211*: agregados para concreto – especificação, 5 p., 1983.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Rio de Janeiro, *NBR 7216*: amostragem de agregados – método de ensaio. 1987.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Rio de Janeiro, *NBR 7217*: determinação da composição granulométrica dos agregados – método de ensaio, 3 p., 1987.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Rio de Janeiro, *NBR 7809*: determinação do índice de forma pelo método do paquímetro, 3 p., 1983.

AYTAMAN, V. Causes of hanging in ore chutes and its solution. In: *Canadian Mining Journal*, 81, pp. 77-81. 1960.

AYRES DA SILVA, L. A.; HENNIES, W. T. Abertura de Vias Subterrâneas. EPUSP. 1988.

BEUS, M. J.; IVERSON, S.; Stewart, B. Application of physical modeling and particle flow analysis to evaluate ore-pass design. In: *Transactions of Institute of Mining and Metallurgy*, 106, pp. A110-A117. 1997.

BEUS, M. J.; PARISEAU, W. G.; STEWART, M.; IVERSON, S. Design of ore passes. In: HUSTRULID, W.; BULLOCK, R. (eds). *Underground Mining Methods: Engineering Fundamentals and International Case Studies*, Littleton, CO. Society of Mining, Metallurgy and Exploration, pp. 627-634. 2001.

BEZERRA, F. N. M.; ANDRADE, S. S. O uso da instrumentação como ferramenta para a otimização da lavra de minas subterrâneas. CONGRESSO BRASILEIRO DE MINA SUBTERRÂNEA, I, Belo Horizonte, 12pp. 2000.

BIENIAWSKI, Z. T. *Rock mechanics design in mining and tunneling*. Balkema. Rotterdam, pp. 164-168. 1984.

BLIGHT, G. E.; HAAK, B. G. A test on model underground ore passes. *Bulk Solids Handling*, v. 14, n. 1, jan/mar 1994, pp. 77-81. 1994.

BRINCK, V.; HAUCK, G. A. C.; SOUSA, H. H. Curso de Planejamento e Análise Racional de Experimentos Tecnológicos. USIMINAS, 61pp. 1976.

CARSON, J. W. Design of bins and feeders for reliable minerals flow. *Mining Engineering*, march 1983, pp. 229-234. 1983.

CHAVES, A. P.; FERREIRA, F. M. Estocagem e Homogeneização. EPUSP. 1996.

CLEARY, P. W.; SAWLEY, M. L. DEM modeling of industrial granular flows: 3D case studies and the effect of particle shape on hopper discharge. *Applied Mathematical Modeling*, 26, pp. 89-111. 2002.

COATES, D. F. Rock Mechanics Principles. CANMET, Otawwa, pp. 5-1 a 5-38. 1981.

COSTA NETO, P. L. O. Estatística. São Paulo, Edgar Blücher, 1977.

CUMMINS, A. B.; GIVEN, I. A. *SME Mining Engineering Handbook*. AIME, New York. 1973.

CUNDALL, P. A.; STRACK, O. D. L. A discrete numerical model for granular assemblies. *Geotechnique*, 29, n. 1, pp. 47-65. 1979.

CUNHA, M. A. Relatório de Estágio Supervisionado, Mina III, Crixás (GO), Mineração Serra Grande, UFOP, 1994.

DE LA VERGNE, J. *Hard Rock Miner's Handbook*. McIntosh, pp. 320-328. 2000.

DICK, D. S.; CARSON, J. W. New developments help characterize and improve the flow of bulk granular solids. *Mining Engineering*, march 1989, pp. 163-165. 1989.

DURRHEIM, R. J. Rock engineering at ultra-depth: first results of the DEEPMINE program. *ISRM News Journal*, pp. 18 - 20. 2000.

DUTRA, J. I. G. *Análise da subsidência induzida pela mineração em maciços rochosos muito fracturados*. Tese apresentada à Universidade Técnica de Lisboa. 1993.

FAÇO. Manual de Transportadores Contínuos, Fábrica de Aço Paulista e Stephens-Adamson Inc, 2ed, pp. 1-51. 1978.

GALPERIN, M.; DOMBROVSKY, N.; MESTECHKIN, L. *Construction Equipment*, MIR, Moscou, pp. 193-199. 1982.

GERMANI, D. J. *A Mineração no Brasil*. Relatório ao Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento, Ministério da Ciência e Tecnologia, 59pp. 2002.

GERSTCH, R. E.; BULLOCK, R. L. *Techniques in Underground Mining*. Society for Mining, Metallurgy and Exploration, Inc., Littleton, USA, pp. 630-740. 1998.

GHABOUSSI, J.; BARBOSA, R. Three-dimensional discrete element method for granular materials. *International Journal for Numerical Analytical Methods in Geomechanics*, John Wiley & Sons, v. 14, pp. 451-472. 1990.

GOMIDE, R. *Operações com sistemas sólidos granulares. Operações Unitárias*. São Paulo. 1983.

HAMBLEY, D. F. Design of ore pass systems for underground mines. *CIM Bulletin*, 80, pp. 25-30, 1987.

HARTMAN, H. L. *Introductory Mining Engineering*. Jon Wiley and Sons. New York. 1987.

HERMANN, H. J.; HOVI, J. P.; LUDING, S. *Physics of dry granular media*. Dordrecht: Kluwer, 1998.

HUSTRULID, W. A. *Underground Mining Methods Handbook*. AIME. 1982.

IVERSON, S.; BEUS, M. Safety issues of storage and transport of bulk solids. <disponível na safety issues of storage and transport of bulk solids. htm>. Acessada em 29/10/2003.

JANELID, I. Study of the gravity flow process in sublevel caving. In: INTERNATIONAL SUBLEVEL CAVING SYMPOSIUM IN STOCKOLM. 1972.

JANELID, I.; KVAPIL, R. Sublevel Caving. In: *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, v.3, pp. 129-153. 1966.

JENIKE, A. W. Gravity flow of bulk solids. *Utah Engineering Experiments Station Bulletin*, n. 108. 1961.

JENIKE, A. W. Storage and flow of solids. *Utah Engineering Experiments Station Bulletin*, n. 123. 1964.

JOHANSON, J. R. Correlating solids flow theory with actual bin operation. *Mining Engineering*, pp. 69, may 1968.

JOHANSON, J. R.; COLIJN, H. New design criteria for hoppers and bins. *Iron Steel Engineering*, 41, pp. 85-104. 1964.

JUNG, S. I.; BISWAS, K.; LEE, H. Understanding rock flow mechanism in ore pass using Working Model 2D. NARMS-TAC 2002, Hammah (ed), pp. 1283-1287. 2002.

JUST, G. D. Rock fragmentation and the design of underground materials handling systems. *CIM Bulletin*, fev 1980, pp. 45-51. 1980.

JUST, G. D.; FREE, G. D.; BISHOP, G. A. Optimization of ringburden in sublevel caving. In: *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, v. 10, pp. 119-131, 1973.

KAIZER, M. D.; BARBIERI, R.; BARBIERI, N. Otimização de caçamba para caminhão fora-de-estrada. CONGRESSO BRASILEIRO DE MINA A CÉU ABERTO, III, Belo Horizonte, 14pp. 2004.

KELLY, E. G.; SPOTTISWOOD, D. J. Dry Solids Handling. *International to Mineral Processing*. New York. Jon Wiley, pp. 367-379. 1982.

KOLATAC. Understanding particulate solids. Disponível na < Understanding particulate solids.>. Acessada em 03/12/02.

KVAPIL, R. Gravity flow of granular materials in hoppers and bins – part I. In: *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, v. 2, pp. 35-41. 1965 a.

KVAPIL, R. Gravity flow of granular materials in hoppers and bins in mines – part II: coarse materials. In: *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, v. 2, pp. 277-304. 1965 b.

KVAPIL, R. The mechanics and the design of sublevel caving systems. In: GERTSCH, R. E. e BULLOCK, R. L. *Techniques in Underground Mining*. SME, pp. 621-653. 1998.

MAGALHÃES, I. M. Comunicação pessoal. 2002.

MARTINS, A. H. Comunicação pessoal. 2001.

MATTA, R. C. Comunicação pessoal. 2005.

MCCABE, W. L.; Smith, J. C. *Unit operations of chemical engineering*. McGraw-Hill. New York, pp. 801-808. 1956.

MCNEARNY, R. L.; BARKER, K. A. Numerical modeling of large-scale block cave physical models using PFC super 2 D. In: *Mining Engineering*, v. 50, n. 2, pp. 72-75. 1998.

MENDES, J. N. Estágio Supervisionado na Mina de Raposos, Raposos (MG), Mineração Morro Velho. UFOP. 1995.

MINING MAGAZINE, december 2001, v. 185, n.6, p. 276. 2001.

Ministério do Trabalho e do Emprego do Brasil. Estatísticas em saúde e segurança; disponível em <[www.mte.gov.br/temas/segsau/estatiticas.default.asp](http://www.mte.gov.br/temas/segsau/estatiticas.default.asp)>; acessada em 2004.

MOLODTSOF, Y.; OULD-DRIS, A. A new theoretical analysis of particle flow in a discharge cone. In: *Powder & Grains*, Thornton (ed.), Balkema, Rotterdam, pp. 453-454. 1993.

MORAIS, J. L. *Simulação da fragmentação dos desmontes de rocha por explosivos*. Tese apresentada à Universidade Federal de Minas Gerais, Área de Concentração Tecnologia Mineral, 160pp., 2004.

MUSTOE, G. A numerical and experimental study of the performance and safety issues for ore pass systems <disponível na [egweb.mines.edu/gmustoe](http://egweb.mines.edu/gmustoe)>; acessada em 17/09/2002.

NILSSON, D. Ramp haulage with electric trucks in underground mines. *MINE PLANNING AND EQUIPMENT SELECTION*, 2001, pp. 93-100. 2001.

NOGUEIRA, J. A. N. *Modelos físicos no ensino de engenharia*. Tese apresentada à Universidade Federal de Minas Gerais, Área de Concentração Tecnologia Mineral, 192pp., 2005.

NOVITZKY, A. *Metodos de explotacion subterranea y planificacion de minas*. Buenos Aires. 1975.

ODA, M.; IWASHITA, K. *Mechanics of granular materials: an introduction*. Balkema Publishers. 400 pp. 1999.

OLIVEIRA, F. F.; GOMES, E. O. C; LOOSE, A. Fatores de planejamento de mina – *stope* recuperado e diluição não planejada - Mina de Fazenda Brasileiro / Yamana Resources – Barrocas – BA. CONGRESSO BRASILEIRO DE MINA SUBTERRÂNEA, III, Belo Horizonte, 10pp. 2004.

PAITHANKAR, A. G.; MISRA, G. B. A critical appraisal of the Protodyakonov Index. In: *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*. Pergamon Press, v. 13, pp. 249-251. 1976.

PARBERY, R. D.; ROBERTS, A. W. On equivalent friction for the accelerated gravity flow of granular materials in chutes. In: *Powder Technology*, 48, pp. 75-79. 1986.

PEELE, R. *Mining Engineers' Handbook*. John Wiley and Sons, New York, 3 ed., v.1, 1941.

PENNA, L. S. T., comunicação pessoal, 2004.

PERRY, R. H.; GREEN, D. W. *Perry's Chemical Engineers' Handbook*. McGraw-Hill Book Company, six ed. 1984.

PFLEIDER, E. P.; SELLECK, D. J. Ore passes, tunnels and shafts. *Surface Mining*. AIME. New York, pp. 637-648. 1968.

PINTO, A. M. Comunicação pessoal. 2004.

PITTMAN, A. N.; BINGLEY, M.; FARNISH, R. J.; PICKERING, J. 2000. *Effects of wall material hardness on choice of wall materials for design of hoppers and silos for the discharge of hard bulk solids*. Elsevier. v 33, n. 12 , December 2000, pp. 845-853.

PIZARRO, R. A. *Exploração de pedreiras*. Irmãos Pongetti Editores, Rio de Janeiro, pp. 180-181 (sd).

PORTO, L. C. G. Ocorrência de segregação em areia nas operações industriais. *Mineração Jundu*. 1995.

POULIQUEN, O.; CHEVOIR, F. Dense flows of dry granular material. In: *Physique*, 3, pp. 163-175. 2002.

QUINTEIRO, C. R. Comunicação pessoal. 2003.

RANALLI, G. *Rheology of the Earth*. Chapman and Hall, pp. 1. 1995.

REDE GLOBO. *Jornal MGTV*, maio e julho/2002.

REED, A. R. Ensuring reliable flow from hoppers, bins and silos. In: *Mining & Quarry Annual Equipment Review*, pp. 53-55. 1991.

REIMBERT, M.; REIMBERT, A. *Silos - Traité Théoretique et Pratique*, Editions Eyrolles, Paris. 1959.

ROCHA, J. C. F. Comunicação pessoal. 2004.

ROSE, H. E.; TANAKA, T. Rate of discharge of granular materials from bins and hoppers. In: *The Engineer*, october 1959, pp. 465-469. 1959.

RUPPRECHT, S. M. Optimizing stope ore passes in ultra deep layouts. *MINE PLANNING AND EQUIPMENT SELECTION*, 2001, pp. 377-383. 2001.

SHEVYAKOV, L. *Mining of mineral deposits*. Moscow, Foreign Languages Publishing House, sd.

SHINOHARA, K.; TUZUN, U. Solids flow mechanisms and their applications. In: *Chemical Engineering Science*, v. 57, pp. 213-214. 2002.

SILVA, C. A. Relatório de Estágio Supervisionado na Mina de Jacobina. UFOP. 1993.

SMID, J. Pressure of granular material on wall of model silo. Part II. In: *Chemical Communications*, v. 40, n. 8, pp. 2424-2436. 1975.

STACEY, T. R.; SWART, A. H. Investigation into draw points, tips, ore passes and chutes. Safety in mines research advisory committee, v. 1, 105 pp. 1997.

STAGG, K.G.; ZIENKIEWICZ, O.C. *Mecânica de Rocas en la Ingeniería Practica*. Madrid: Blume, pp. 258-299. 1968.

STEWART, D. *Design and Operation of caving and sublevel stoping mines*, pp. 290-297. 1981.

STRACK, J. GPSS. Modelagem e simulação de sistemas. LTC, pp. 1-8. 1988.

THE WEBSITE FOR MINING INDUSTRY; disponível na <[www.mining-technology.com](http://www.mining-technology.com)>, 15/04/1999.

THOMSON, F. M. Storage and flow of particulate solids. In: FAYED, M. E.; OTTEN, L. *Handbook of Powder Science and Technology*, 2nd. ed., pp. 389-486. 1997.

TROTTER, D. A.; GODDARD, G. J. Design techniques for sublevel caving layouts. In: *CIM Bulletin*, jan 1981, pp. 92-100. 1981.

VALADARES, T. N.; LUZ, J. A. M. Porosidade de sistemas polidispersos compactados. ENCONTRO NACIONAL DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS, XXX, Florianópolis, 8pp. 2004.

WIPFRAG – Fragmentation Photonalysis System – WipWare Inc., 13pp. 1996.

YENGE, L. I. Analysis of bulk flow of material under gravity caving process. Part 2: Theoretical and physical modeling of gravity flow of broken rock. In: *Colorado School of Mines Quarterly*, v. 76, n. 3, 67 pp. 1981.

ZABLOCKI, A. Minería subterránea en roca dura hacia el siglo XXI. In: *Minería Chilena*, n. 187, pp. 57-65. 1997.