

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**ESTUDO DA FORMAÇÃO DE PRAIAS EM BARRAGENS
DE REJEITOS POR MEIO DE SIMULAÇÕES EM
TANQUE DE PROVA**

Ernesto Massayoshi Sumi

Orientador: Prof. Dr. Lindolfo Soares

MONOGRAFIA DE TRABALHO DE FORMATURA
(TF-2005/13)

TF
S955
EM.e

SÃO PAULO
2005

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS**

DEDALUS - Acervo - IGC



30900018052

**Estudo da Formação de Praias em Barragens de
Rejeito Através de Simulações em Tanque de
Prova**

Ernesto Massayoshi Sumi



Monografia de Trabalho de Formatura

Banca Examinadora

Prof. Dr. Lindolfo Soares

Prof. Dr. Wilson Shoji Yiomasa

Prof. Dr. Ginaldo Ademar da Cruz Campanha

São Paulo

2005

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO - USP
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

ESTUDO DA FORMAÇÃO DE PRAIAS EM BARRAGENS DE
REJEITOS POR MEIO DE SIMULAÇÕES EM TANQUE DE
PROVA



Aluno: Ernesto Massayoshi Sumi
Orientador: Prof. Dr. Lindolfo Soares

Monografia de Formatura
(TF-2005 N° 13)

SÃO PAULO
2005

TF
SASS
EM.2

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO - USP
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

ESTUDO DA FORMAÇÃO DE FAIXAS EM BARRAGENS DE
REJEITOS POR MEIO DE SIMULAÇÕES EM TANQUE DE
PROVA



Aluno: Marcos Menezes Bani
Coleador: Prof. Dr. Clodoaldo Soares

Monografia de Graduação
(TF 2002 N. 15)

SÃO PAULO
2002

Ernesto Massayoshi Sumi

Ernesto M. Sumi

Prof. Dr. Lindolfo Soares

Lindolfo Soares

AGRADECIMENTOS

A realização desse Trabalho de Formatura, fruto de algumas boas gotas de suor, especialmente no trabalho de campo, e foi possível graças a participação e apoio de diversas pessoas e instituições.

Primeiramente a minha gratidão ao Prof. Dr. Lindolfo Soares, orientador desse trabalho, pela paciência e dedicação.

Agradeço aos Geólogos Luiz D'Agostino e Liz Zanquetta D'Agostino pela ajuda e participações ao longo do projeto.

Ao Prof. Dr. Carlos Loretto Ramos, diretor do Centro Tecnológico de Hidráulica da Escola Politécnica – USP, onde foram realizadas as simulações, pela forma solícita em permitir a utilização do laboratório.

Ao Engenheiro Sr. Antônio Barbosa, responsável pelas questões ambientais da mineradora Bunge de Araxá por nos acompanhar na visita e fornecer informações sobre a barragem.

A mineradora Bunge de Araxá, por ter permitido a visita a barragem de rejeito e permitir a retirada de material para a pesquisa.

Gostaria de agradecer a todos do Laboratório de Caracterização Tecnológica (LCT) do Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo da Escola Politécnica – USP, pelas sugestões e estímulos.

Ao pessoal do Laboratório de Tratamento de Minério (LTM) do Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo da Escola Politécnica – USP, por permitir o acesso ao laboratório.

Agradeço a todos do Centro Tecnológico de Hidráulica (CTH) da Escola Politécnica – USP, em especial ao Ademar e todos os técnicos, cujo apoio prestado, sob as formas mais diversas, foi de grande importância para o desenvolvimento da pesquisa.

SUMÁRIO

RESUMO	6
ABSTRACT	7
1 – INTRODUÇÃO	8
1.1 - JUSTIFICATIVA	9
1.2 – REJEITOS.....	10
1.2.1 - Classificação	10
1.2.2 – Granulometria.....	11
1.2.3 – Segregação	11
1.2.4 - Consolidação ou Adensamento.....	11
1.2.5 – Permeabilidade.....	12
1.3 – BARRAGENS DE REJEITOS.....	13
1.3.1 – Método de Montante	14
1.3.2 – Método de Linha de centro	17
1.3.3– Método de Jusante	18
1.4 – MÉTODOS DE DESCARGA.....	19
1.5 - MODELOS REDUZIDOS	20
2 – METAS E OBJETIVOS	20
3 – TRABALHOS PRÉVIOS	20
4 – MATERIAIS E MÉTODOS	21
5 – DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO	22
5.1 – LOCALIZAÇÃO DA BARRAGEM DE REJEITO.....	22
5.2 – DESCRIÇÃO DA BARRAGEM E ATIVIDADES REALIZADAS	24
5.3 – ATIVIDADES REALIZADAS NO LABORATÓRIO DE TRATAMENTO DE MINÉRIO (LTM).....	28
5.4 – ATIVIDADES REALIZADAS NO LABORATÓRIO DE CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA (LCT)	32
5.5 – ATIVIDADES REALIZADAS NO CENTRO TECNOLÓGICO DE HIDRÁULICA (CTH) .	35
5.5.1 – Descrição do Equipamento Utilizado na Simulação	35
5.5.2 – Descrição do Processo de Simulação.....	40
6 – RESULTADOS OBTIDOS E INTERPRETAÇÕES PRELIMINARES	42
6.1 – TRATAMENTO DO REJEITO.....	42
6.2 - SIMULAÇÃO	466
7 – CONCLUSÃO	49
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	51

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.2.5a – VARIAÇÃO DA PERMEABILIDADE HORIZONTAL E VERTICAL EM FUNÇÃO DA DISTÂNCIA DO LOCAL DE LANÇAMENTO PARA PRAIAS DE REJEITOS BEM SEGREGADOS.	122
FIGURA 1.2.5b – VARIAÇÃO DA PERMEABILIDADE NUM DEPÓSITO DE REJEITOS EM RELAÇÃO A PONTO DE DESCARGA.....	133
FIG 1.3.1a - SEQÜÊNCIA DE ALTEAMENTO DE BARRAGENS DE REJEITO PELO MÉTODO DE MONTANTE.	155
FIGURA 1.3.1b - LINHA FREÁTICA ELEVADA.	166
FIGURA 1.3.1c - SUPERFÍCIE DE RUPTURA PASSANDO PELOS REJEITOS SEDIMENTADOS.....	166
FIGURA 1.3.1d – RISCO DE RUPTURA POR “PIPING”.....	16
FIGURA 1.3.2a – MÉTODO CONSTRUTIVO DE LINHA DE CENTRO.....	177
FIGURA 1.3.3a – MÉTODO DE JUSANTE, O CORPO DA BARRAGEM SE DESLOCA PARA A JUSANTE.	188
FIGURA 1.4a - MÉTODO DE DESCARGA PERIFÉRICA POR UM ÚNICO PONTO.	199
FIGURA 1.4b - MÉTODO DE DESCARGA PERIFÉRICA POR MÚLTIPLOS PONTOS (“SPIGOTS”).....	199
FIGURA 5.1a – LOCALIZAÇÃO DO MUNICÍPIO DE ARAXÁ E CAPITALS PRÓXIMAS.	222
FIGURA 5.1b – MAPA DAS OCORRÊNCIAS DE ROCHAS ALCALINAS E CARBONATÍTIAS SEPARADAS POR PROVÍNCIAS (ADAPTADO DE GOMES ET AL.,1990).	233
FIGURA 5.2a – COLETA DE REJEITO NA BARRAGEM DE REJEITO COM USO DE FERRAMENTA MANUAL E EMBALADO EM SACOS PLÁSTICOS.....	244
FIGURA 5.2b – VISTA GERAL DA BARRAGEM DE REJEITO DA MINERADORA BUNGE DE ARAXÁ.	255
FIGURA 5.2c – SISTEMA DE LANÇAMENTO EM VÁRIOS PONTOS SIMULTÂNEOS ‘SPIGOTS’.....	266
FIGURA 5.2d – SISTEMA DE DRENAGEM UTILIZADA NA BARRAGEM DE REJEITO BUNGE ARAXÁ.	266
FIGURA 5.2e – LANÇAMENTO DOS REJEITOS CICLONADOS ‘UNDERFLOW’ À JUSANTE DA BARRAGEM PARA O EMPREGO NA CONSTRUÇÃO DO CORPO DA BARRAGEM.	277
FIGURA 5.2f - LANÇAMENTO DOS REJEITOS CICLONADOS ‘UNDERFLOW’, IMAGEM DETALHADA DA FIGURA 5.2e.....	277

FIGURA 5.2g – LANÇAMENTO DO 'OVERFLOW' POR MEIO DE 'SPIGOTS' NA BARRAGEM DE REJEITO.	288
FIGURA 5.3a – ESTUFA UTILIZADA PARA A RETIRADA DA UMIDADE DO REJEITO.....	299
FIGURA 5.3b – PENEIRAS UTILIZADAS NA CLASSIFICAÇÃO GRANULOMÉTRICA NO AGITADOR.....	30
FIGURA 5.3c – PICNÔMETRO À DIREITA, UTILIZADO PARA O CÁLCULO DA DENSIDADE DO REJEITO.....	311
FIGURA 5.3d – QUARTEADOR JONES.....	311
FIGURA 5.4a – IMAGEM DO REJEITO UTILIZANDO MICROSCÓPIO ELETRÔNICO DE VARREDURA.....	334
FIGURA 5.4b – IMAGEM DE REJEITO COM AUMENTO DE 800 VEZES, A FOTOGRAFIA MOSTRA A HETEROGENEIDADE DAS PARTÍCULAS TANTO NO TAMANHO QUANTO NA FORMA.	344
FIGURA 5.4c – IMAGEM DE REJEITOS COLETADOS (A 0 METROS) NO LOCAL DO LANÇAMENTO E PENEIRADOS (ENTRE #150 E #200 TYLER).....	344
FIGURA 5.4d – IMAGEM DOS REJEITOS COLETADOS A 35 METROS DO PONTO DE LANÇAMENTO E PENEIRADOS (ENTRE #150 E #200 TYLER) E DETERMINADAS AS COMPOSIÇÕES QUÍMICAS DE ALGUMAS PARTÍCULAS.....	355
FIGURA 5.5.1a – TANQUE DE PROVA PARA A SIMULAÇÃO E O TAMBOR ONDE OCORREU A MISTURA DA POLPA.	366
FIGURA 5.5.1b – ESQUEMA DO TANQUE UTILIZADO NA SIMULAÇÃO.....	377
FIGURA 5.5.1c – EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NA SIMULAÇÃO, O TANQUE DE PROVA E O TAMBOR UTILIZADO PARA A MISTURA DA POLPA.	388
FIGURA 5.5.1d – SISTEMA DE LANÇAMENTO COM ÚNICO PONTO APOIADO NO DIQUE DE PARTIDA COM INCLINAÇÃO DE 45 GRAUS EM RELAÇÃO AO HORIZONTAL.....	399
FIGURA 5.5.1e – SISTEMA DE LANÇAMENTO UTILIZANDO VÁRIOS PONTOS.....	399
FIGURA 5.5.2a – TAMBOR COM ESCALA DE VOLUME USADO PARA MEDIR A QUANTIDADE DE ÁGUA E REJEITO PARA A PREPARAÇÃO DA POLPA, CONFORME UTILIZADO NA MINERADORA.....	40
FIGURA 5.5.2b – SISTEMA DE DRENAGEM NO TANQUE DE SIMULAÇÃO.	411
FIGURA 6.1a – GRÁFICO DA CURVA GRANULOMÉTRICA DE REJEITOS TÍPICOS DE FOSFATOS. A CURVA TRACEJADA REPRESENTA O REJEITO BUNGE ARAXÁ UTILIZADO NA EXPERIÊNCIA.....	442
FIGURA 6.1b - GRÁFICO DA CURVA GRANULOMÉTRICA DOS REJEITOS COLETADOS A 0METROS E 35METROS DO PONTO DE LANÇAMENTO.....	453
FIGURA 6.2a – DEPÓSITO FORMADO À PARTIR DA SIMULAÇÃO VISTA DE PERFIL.....	477

FIGURA 6.2b – DEPÓSITO FORMADO COM ÂNGULO DA INCLINAÇÃO DA PRAIA

FORMADA. 488

FIGURA 6.2c – GRÁFICO DO PERFIL DA PRAIA FORMADO NA SIMULAÇÃO, O EIXO HORIZONTAL REPRESENTA A DISTÂNCIA DO PONTO DE LANÇAMENTO E O EIXO VERTICAL A ALTURA DO DEPÓSITO. OS EIXOS HORIZONTAL E VERTICAL NÃO ESTÃO EM ESCALA. 488

RESUMO

O objetivo deste trabalho é comparar inclinação de praias formadas em barragens de rejeito com praias formadas a partir de simulações. Esse conhecimento tem como objetivo prever o comportamento da praia na barragem referente à sua distância com o talude, isso condiciona um melhor planejamento dos sistemas extravasores e aumenta a prevenção de transbordamentos e das percolações indesejáveis de água através do maciço da barragem. O controle das percolações aumenta o nível de segurança da barragem, uma vez que as principais causas conhecidas de acidentes com barragens de rejeito estão relacionadas direta ou indiretamente com a água. Na pesquisa foi coletado material na barragem de rejeito de fosfato em Araxá (Bunge), e analisados os aspectos como a granulometria, densidade, textura, forma, concentração da polpa (água mais rejeito) e vazão, esses fatores influenciam no comportamento da geometria da praia formada quando a polpa é lançada nas barragens. O rejeito de fosfato não apresenta valores relativamente altos de densidade, e depositam próximos ao ponto de lançamento devido aos valores menores de densidade em comparação aos rejeitos coletados a 35 metros. Essas informações indicam que os parâmetros principais para a segregação do rejeito são a forma e o tamanho dos grãos. Os parâmetros utilizados na simulação, tais como a vazão e a concentração da polpa, foram os mesmos da barragem, dado o propósito de se aproximar à realidade. Os resultados obtidos com a simulação foram satisfatórios, a inclinação da praia de rejeito formada que é o foco do trabalho foi muito semelhante ao medido na barragem de rejeito, esse resultado demonstra a validade do método para prever a geometria da praia formada.

ABSTRACT

The purpose of this research is comparing the inclination of the beach formed on tailing dams with the beach formed from simulations. This knowledge intends to foresee the beach's behavior referring to its distance to the slope, stipulating a better planning of the extra-overflow systems and increasing the prevention of overflow and undesirable filtrations of water across the dam's clump. The filtrations' control enlarges the safety level of the dam, since the main reasons of accidents on tailings dam are directly or indirectly related with the water. On this research, the material was gathered on the tailings dam of phosphate in Araxá (Bunge), and its aspects, such as granulometry, density, texture, form, concentration of the pulp (water plus tailing) and outflow, were analyzed, it follows that these factors exercise influence on the behavior of the beach's geometry, formed when the pulp is thrown in the dams. This information denoted that the main parameters for the tailing's segregation are consisted of form and size of the grains. A simulation in the hydraulic tank was accomplished, using the parameters provided by the mining company, such as outflow and pulp concentration. The obtained results on the simulation were satisfactory, the inclination of the formed beach of dam, which is this research's focus, was very similar to measured in the tailing dam, this fact demonstrates the authenticity of the method to foresee the formed beach's geometry.

1 – INTRODUÇÃO

O rejeito é parte da massa de minério produzida na atividade de mineração e descartada no beneficiamento. Em alguns casos de extração, a moagem da rocha encaixante é necessária para liberar o mineral de minério, processo chamado de cominuição, o que torna o rejeito um material fino, que precisa de um tratamento especial para o seu armazenamento. Uma das necessidades envolvida no armazenamento é que nos rejeitos pode haver bens minerais de interesse, cuja exploração depende de fatores técnicos, econômicos ou mercadológicos, dessa forma, a massa de rejeito pode ser vista como uma reserva mineral em potencial (Soares, 2004).

A maioria de resíduos proveniente dessa atividade pode conter reagentes químicos nocivos ao homem e ao meio ambiente. Para armazenar tais quantidades de materiais que necessitam de cuidados especiais, uma das melhores soluções encontradas são as barragens de rejeito. São algumas vantagens: o baixo investimento durante atividade da mina para a sua construção e manutenção e grande capacidade de armazenamento de materiais.

Quando incorretamente depositados, os rejeitos, dependendo do material poluem as suas adjacências, agredindo o terreno e comprometendo o seu uso para outras atividades tais como a agricultura e pastagem (Gregório Filho & Nieble, 1975). Outra possibilidade de agressões ao meio ambiente são os lançamentos de efluentes sem o devido tratamento em corpos de água. Nos casos em que os rejeitos contêm materiais potencialmente perigosos, tais como teores metálicos produzidos pelos minérios tipo sulfeto, o pH da água pode ser alterado deixando os rios e lagos com água inutilizada para o consumo humano, para irrigação e tornar mais hostil ou totalmente imprópria para a vida aquática (Arnez, 1999).

As barragens de rejeito são obras que chegam a superar 150m de altura, sendo consideradas as maiores estruturas construídas pelo ser humano com o objetivo de depositar grandes quantidades de rejeitos, armazenando-os com custo relativamente baixo, o que torna muito importante para a viabilidade de uma mineração (Chaves & Fujimura, 1991). Além disso, outra função da barragem é reaproveitar a água usada no beneficiamento. Construções de barragens de rejeito não podem ser comparadas com barragens comuns (armazenamento de água), pois o método construtivo, o material armazenado e os custos não são os mesmos. No processo de execução do projeto de uma barragem de rejeito, devem ser consideradas as características particulares específicas que envolvem a sua construção (Parra et al., 1991), pois envolve fatores circunstanciais tais como o material utilizado na construção e fatores

geotécnicos. Barragem de rejeito é uma peça integrante do processo de produção do produto beneficiado e precisa operar integrada em todo o projeto, e possui um aspecto essencialmente mineiro e não pode ser tratado como um projeto meramente civil (Chaves & Fujimura, 1991).

A construção das barragens de rejeito normalmente ocorre em etapas (alteamentos sucessivos) e tem como a principal vantagem o custo envolvido ser menor, e distribuído ao longo da vida útil da mina. O material usado é normalmente o próprio rejeito da mineração. No entanto, sua disposição sem a devida compactação apresentará comportamentos de resistência particulares se comparados às barragens tradicionais.

Um dos principais riscos que envolvem as barragens de rejeito são as rupturas, que levam a desastres ambientais e, em alguns casos, perdas de vidas humanas, além da paralisação da operação da mina. Segundo o *UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME* (1996), teoricamente todos os acidentes de barragens de rejeito ocorrem como resultados de percolações de água através do maciço da barragem, pelas erosões internas e *overtopping*, provocados por processos naturais tais como terremoto e chuvas intensas. Há muitos dispositivos de controle para evitar esses fenômenos, entre eles estão os sistemas extravasores da água, muito importantes para o controle de água na barragem de rejeito. Conhecidos os riscos que envolvem as barragens de rejeitos, relacionados aos materiais armazenados, pela dimensão da obra e ao processo construtivo, ainda assim são limitados os quesitos de segurança conhecidos. A ABNT (1993), conforme a Norma NBR 13028, estabelece condições construtivas para o projeto de disposição de rejeitos de beneficiamento, em barramento, em mineração, atendendo as condições de segurança, higiene, operacionalidade, economia, abandono e minimização dos impactos ambientais.

1.1 - JUSTIFICATIVA

A importância da necessidade de estudo da dinâmica do processo de alteamento das barragens de rejeitos reside no aumento da produção mundial de minério e, por consequência, a produção de rejeitos. A indústria mineira é considerada como uma das maiores responsáveis pela deterioração do meio ambiente. Criou-se a necessidade de eficientes formas de armazenamento, devidas ao potencial poluente dos rejeitos para com o meio ambiente, uma vez que pode ser espalhado pelo vento, contaminar as águas, tanto superficial quanto subterrânea, e em alguns tipos de mineração possuem alto grau de toxicidade como o de metais pesados e sulfetos.

O *UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME* (1996), informa que a quantidade de rejeito de mineração gerado ao redor do mundo é muito grande. Usando como exemplo a produção mundial de cobre que em 1995 gerou 1500 Mt de rejeito, a produção de ouro gerou 500 Mt e a quantidade de potássio minerado produziu 120 Mt de rejeito.

A mesma fonte de informação diz que os estudos concluídos consideram as barragens de rejeito um item necessário para a prática da moderna mineração. Incidentes de várias proporções ocorreram no passado e provavelmente ocorrerão no futuro. A tarefa de agora em diante é assegurar que os riscos para grandes incidentes sejam minimizados. Para isso são importantes as pesquisas relevantes ao assunto que tem como intuito aprimorar o projeto, construção e a operação de barragens de rejeitos.

1.2 – REJEITOS

Segundo Oliveira Júnior (1985), os rejeitos são resíduos sólidos provenientes da mineração, originados pelo beneficiamento, remanescentes do processo de concentração de minérios em instalações industriais. Em geral os rejeitos são partículas abaixo de 10 mesh (2 mm), angulosas e possuem bordas vivas, devido ao mecanismo de cominuição (britagem e moagem) de alta energia (Chaves & Fujimura, 1991). Deve-se destacar que a natureza dos rejeitos depende fundamentalmente do estado de alteração dos minerais originais (Soares, 2004).

1.2.1 - Classificação

O comportamento geotécnico está relacionado às características do material, natureza do depósito e na forma como o rejeito foi depositado. Pode-se dividir em duas classes distintas de materiais para os tipos de depósitos resultantes. As areias lançadas hidraulicamente e lamas depositadas por sedimentação, ou seja, uma possibilidade de classificação é por meio da granulometria do rejeito. Para Vick (1983), o critério de classificação utiliza duas variáveis, a granulometria e a plasticidade, agrupando os rejeitos em quatro categorias: os rejeitos de rochas brandas, rejeito de rochas duras, rejeitos finos e rejeitos grossos.

1.2.2 – Granulometria

A característica mais importante que condiciona o comportamento dos depósitos de rejeitos é o tamanho dos grãos. A granulometria é definida pela proporção entre resíduos grosseiros (areias) e finos (lamas), e o limite que divide essas categorias é dado pela peneira #200 (0,074mm) (Soares, 2004). O conhecimento das características relacionadas a dimensão dos rejeitos é fundamental para um bom funcionamento das barragens de rejeito, tanto em funcionalidade quanto em segurança. As principais características geotécnicas dos rejeitos estão ligadas as suas características granulométricas. Como exemplo, o índice de vazios, a permeabilidade, densidade relativa, segregação entre outras.

1.2.3 – Segregação

A segregação é um processo de classificação natural dos rejeitos lançados no reservatório, onde os rejeitos mais densos, mais grosseiros e com formas mais irregulares tendem a sedimentar mais próximo ao ponto de descarga. Este transporte seletivo de tamanho das partículas dentro de uma mistura de partículas é conhecido como segregação hidráulica (Ribeiro, 2000). A segregação influencia diretamente no projeto de construção da barragem, uma vez que determina o ângulo da inclinação da praia formada pelos rejeitos. O ângulo de inclinação por outro lado, determina a posição da lagoa de decantação e conseqüentemente o posicionamento dos sistemas extravasores, responsáveis pela retirada de água excedente nas barragens.

1.2.4 - Consolidação ou Adensamento

O adensamento além de diminuir o volume de vazios também aumenta a capacidade de armazenamento do reservatório. A sedimentação de partículas finas, sem um devido controle cria a possibilidade de camadas se depositarem sem coesão, com elevado índice de vazios; fato que pode resultar em um processo de liquefação caso o depósito sofra súbito carregamento com o conseqüente aumento de pressões neutras (Soares, 2004). Para obter informações sobre o comportamento das sedimentações das partículas a proporção de finos não é o bastante, também é necessário o coeficiente de uniformidade das partículas. Essas informações sobre o coeficiente de uniformidade refletem se o comportamento em função de sua distância do ponto de lançamento será relativamente homogêneo ou não.

Um dos fatores que determinam as formas das praias são os processos de segregação das partículas. Dependendo da proporção de líquidos e sólidos na polpa, densidade, granulometria, forma, textura superficial dos rejeitos o ângulo de deposição será maior ou menor. É importante determinar essas características para calcular a largura e inclinação da praia a fim de definir as posições dos sistemas extravasores.

1.2.5 – Permeabilidade

A permeabilidade é a maior ou menor facilidade com que a percolação d'água ocorre através de um solo. É uma das características mais importantes dos solos e intervém em grande número de problemas de engenharia, entre eles a percolação pelas fundações e pelas barragens de terra, drenagem, recalque por adensamento, etc, (Vargas, 1977).

Arnez (1999), observa que os depósitos de rejeito exibem consideráveis variações na permeabilidade entre as direções horizontal e vertical, como demonstrado na (figura 1.2.5a). Essa variação é provocada pela diferença das camadas. A relação entre a permeabilidade horizontal (K_h) e a permeabilidade vertical (K_v) está entre 2 a 10 para rejeitos arenosos e pode chegar a 100 ou até mesmo ultrapassar em rejeitos lançados no reservatório sem um devido controle.

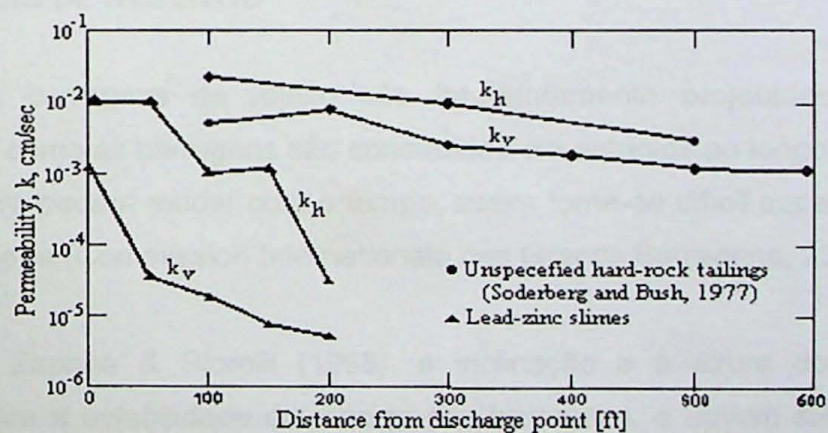
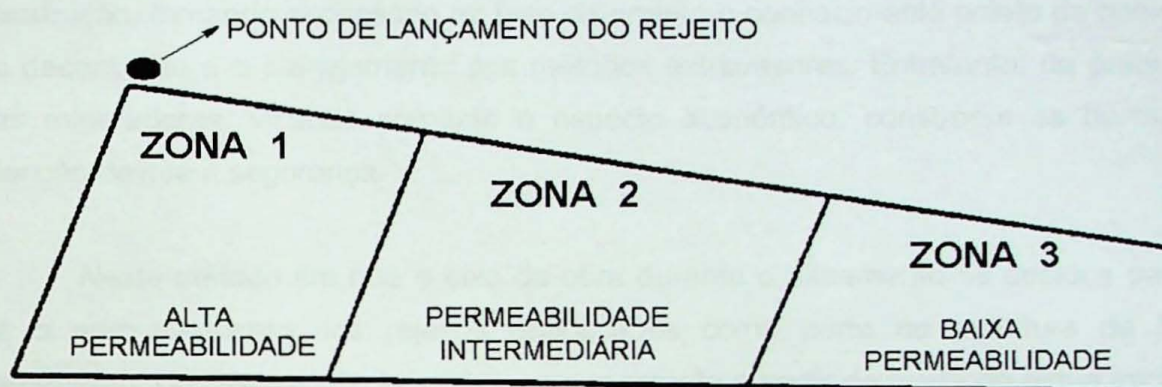


Figura 1.2.5a – Variação da permeabilidade horizontal e vertical em função da distância do local de lançamento para praias de rejeitos bem segregados.

A permeabilidade ao longo da barragem não é contínua. Próximo ao ponto de lançamento pela alta concentração de rejeitos grossos a permeabilidade é mais alta do que nos

pontos mais distantes, onde o regime de deposição é predominantemente influenciado por rejeitos de dimensões menores. Portanto, se analisarmos a permeabilidade de uma barragem em uma seção perpendicular ao talude, obteremos os valores de maior permeabilidade próximo ao maciço da barragem e diminui ao distanciar, como mostrado na (Figura 1.2.5b).



(Vick, 1983; Modificado)

Figura 1.2.5b – Variação da permeabilidade num depósito de rejeitos em relação a ponto de descarga.

1.3 – BARRAGENS DE REJEITOS

Modernas barragens de rejeito são freqüentemente projetadas por empresas de engenharia, mas como as barragens são construídas em estágios ao longo de muitos anos e as condições também podem mudar com o tempo, assim torna-se difícil supervisionar a obra com eficiência necessária (Commission Internationale des Grands Barragens, 2001).

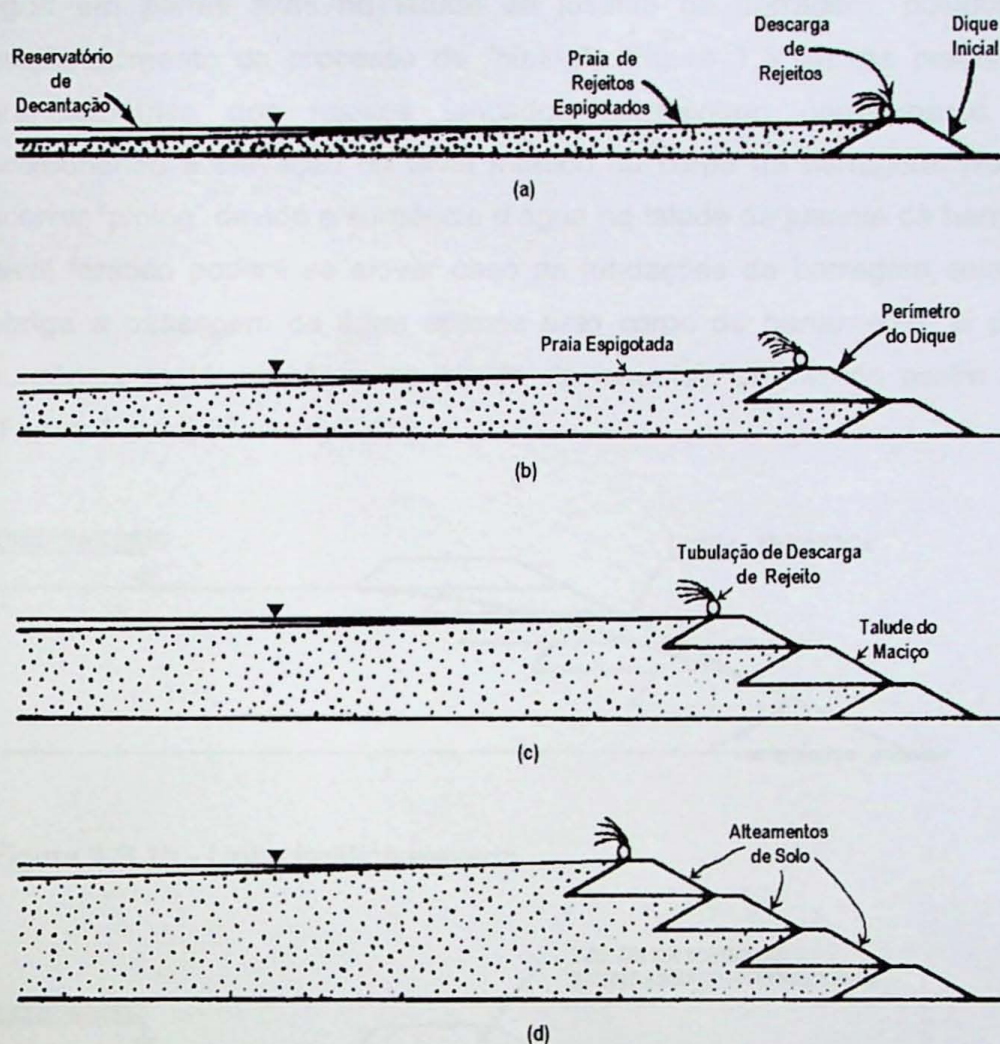
Segundo Zapana & Storolli (1998), a inclinação e a altura do talude são fatores determinantes para a estabilidade do maciço das barragens, e devem ser compatíveis com a resistência ao cisalhamento do material e com as pressões piezométricas desenvolvidas no maciço.

Os métodos de alteamento das barragens de rejeitos mais comumente usados a partir do seu tipo de construção são três: Método de Montante, Método de Jusante e o Método de Linha de Centro.

1.3.1 – Método de Montante

O Método de Montante é o mais utilizado pelas mineradoras devido a menor quantidade de material envolvido na construção, maior velocidade de alteamento, pouco uso de equipamentos de terraplanagens e por consequência um menor custo na construção. Em contra partida os riscos envolvidos nesse tipo de construção são os mais altos entre os métodos construtivos de barragens citados anteriormente e é o que mais requer cuidados na sua construção, tornando necessário na fase de projeto o conhecimento prévio da posição da lagoa de decantação e o planejamento dos métodos extravasores. Entretanto, na prática, a maioria das mineradoras, visando somente o aspecto econômico, constroem as barragens sem a atenção devida à segurança.

Neste método em que o eixo da obra durante o alteamento se desloca para montante, há o aproveitamento dos rejeitos depositados como parte da estrutura de fundação do alteamento. Os rejeitos são lançados para montante a partir da crista do dique inicial, formando uma praia, a qual servirá como fundação para a construção do novo alteamento. A (Figura 1.3.1a), ilustra como se processa a sequência de alteamento por este método.



(Fonte: Vick, 1983; modificado)

Fig 1.3.1a - Sequência de alçamento de barragens de rejeito pelo Método de Montante.

Durante o lançamento dos rejeitos, ocorre segregação granulométrica, ficando a fração mais grosseira depositadas próximo ao maciço, sendo que as frações mais finas (lamas) fluem em direção à lagoa de decantação.

Para que o material lançado sirva de base para um novo alçamento, é necessário que os rejeitos contenham de 40 a 60% de areia e baixa densidade de polpa para que ocorra a segregação granulométrica (Soares, 2004).

A estabilidade destas obras é ditada também pelo avanço do lago de decantação, esse avanço pode elevar a superfície do nível freático no corpo da barragem, isso faz com que surja

água em partes altas no talude de jusante da barragem, possibilitando dessa forma, o estabelecimento do processo de "piping", (Figura 1.3.1b). As praias com baixa segregação granulométrica dos rejeitos lançados apresentam normalmente baixa permeabilidade, ocasionando a elevação do nível freático no corpo da barragem. Neste caso, também pode ocorrer "piping" devido a surgência d'água no talude de jusante da barragem, (Figura 1.3.1d). O nível freático poderá se elevar caso as fundações da barragem sejam impermeáveis, o que obriga a passagem da água apenas pelo corpo do barramento. É possível a ocorrência de surgência (saída de água no talude da jusante), permitindo assim a formação de "piping", (Figura 1.3.1d) (Soares, 2004).

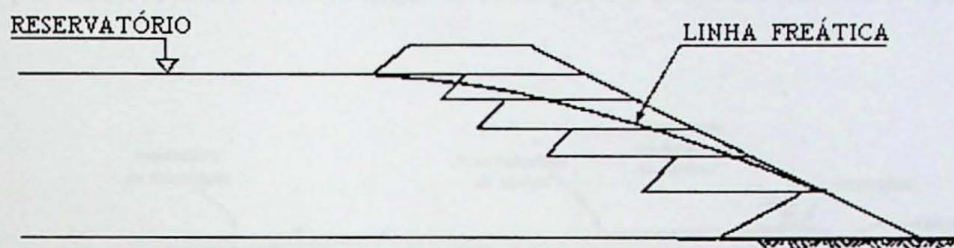


Figura 1.3.1b - Linha freática elevada.

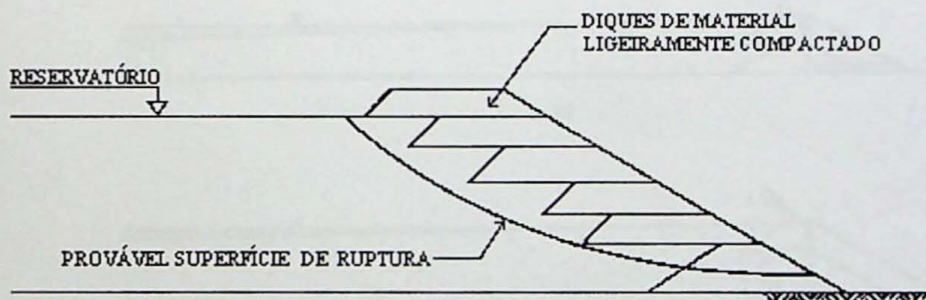


Figura 1.3.1c - Superfície de ruptura passando pelos rejeitos sedimentados.

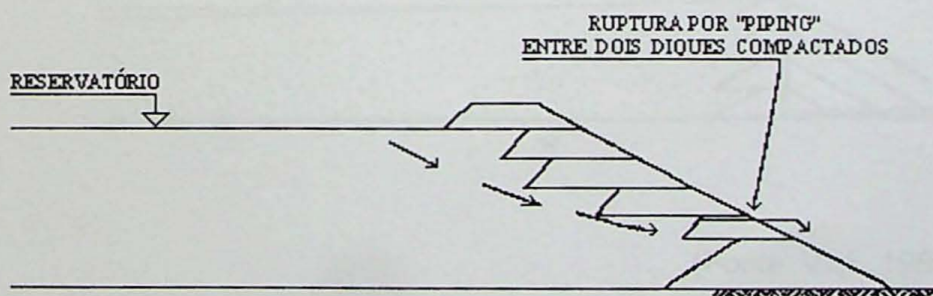


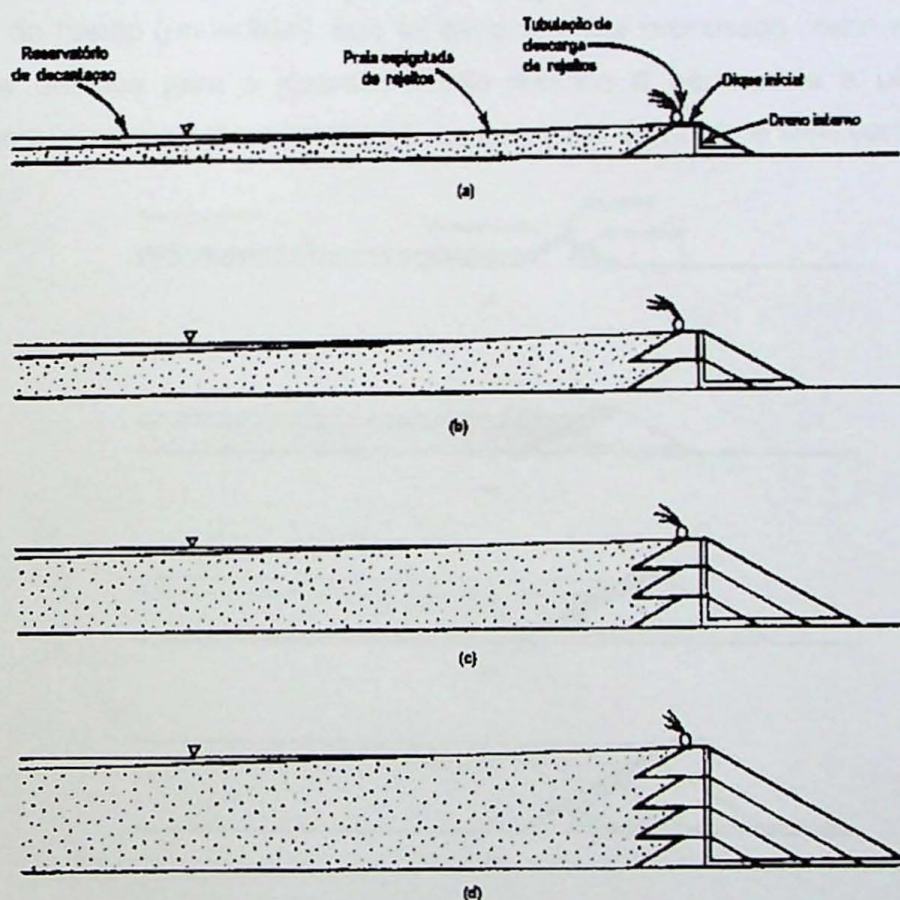
Figura 1.3.1d – Risco de ruptura por "piping".

(Fonte: Silveira e Reades, 1973)

1.3.2 – Método de Linha de centro

O Método de Linha de Centro é o intermediário entre o Método de Montante e de Jusante, inclusive nos custos envolvidos no alteamento. O material para o alteamento pode ser de áreas de empréstimo, estéril ou do “underflow” dos ciclones. O volume de material é aproximadamente o dobro do necessário em comparação ao Método de Montante.

Nesse método, inicialmente é construído um dique de partida e os rejeitos são lançados a montante do dique. No processo seguinte são lançados rejeitos sobre a praia formada e sobre o talude de jusante do dique inicial. Dessa forma o eixo da crista dos diques dos alteamentos permanecem no mesmo lugar em relação ao dique de partida (Figura 1.3.2a).



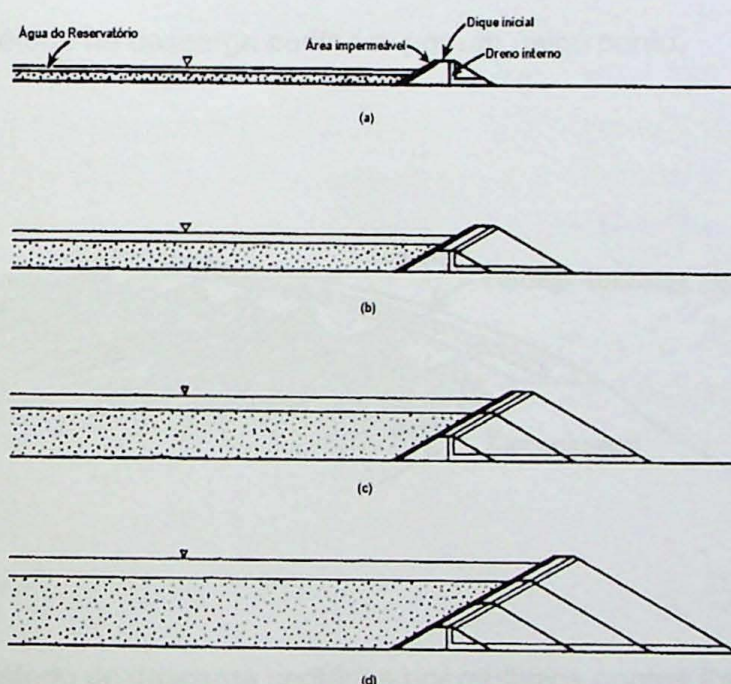
(Fonte: Vick, 1983; modificado)

Figura 1.3.2a – Método construtivo de Linha de Centro.

1.3.3– Método de Jusante

O método construtivo de jusante contrapõe-se com o método de montante em vários aspectos. É o método menos utilizado pelas empresas mineradoras devido a grande quantidade de material envolvido na sua construção, menor velocidade de alteamento, uso intensivo de equipamentos de terraplanagem e por conseqüência alto custo na sua construção. Em contrapartida os riscos envolvidos com o método de jusante são os mais baixos entre os métodos construtivos.

Inicialmente é necessário construir um dique de partida com material argiloso e impermeável, posteriormente o corpo da barragem geralmente é formado com a parte mais grossa do rejeito (underflow), que foi separado por processos como a ciclonagem e o eixo da obra se desloca para a jusante. Nesse método é necessária a utilização de sistemas de drenagem interna no dique inicial tais como tapete drenante e filtro vertical (Figura 1.3.3).

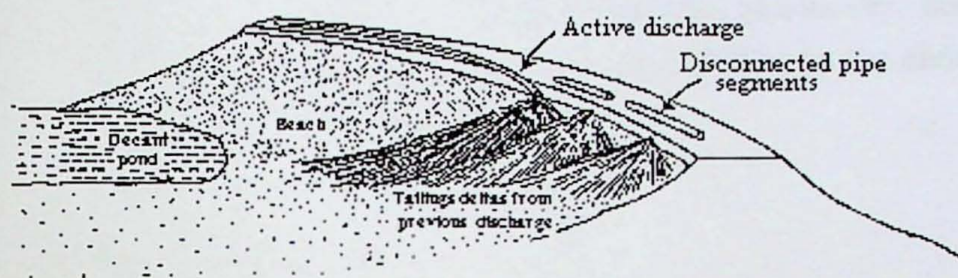


(Fonte: Vick, 1983; modificado)

Figura 1.3.3a – Método de jusante, o corpo da barragem se desloca para a jusante.

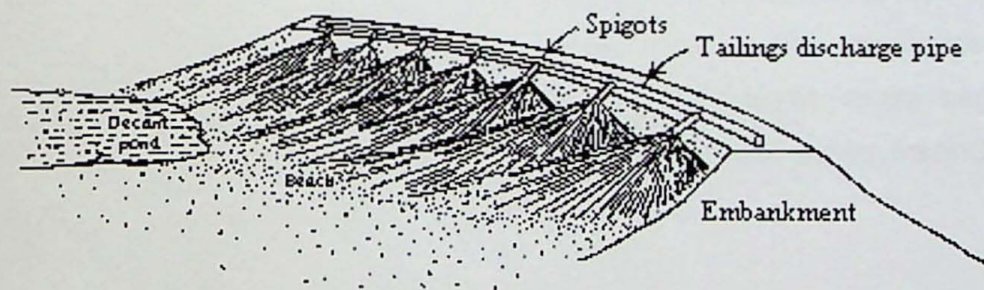
1.4 – Métodos de Descarga

A descarga é o processo de despejo do rejeito na barragem que pode ser realizada em um único ponto, (Figura 1.4a); ou em vários pontos, (Figura 1.4b). Quando é descarregada em um único ponto, a tubulação de transporte deve ser desconectada e recolocada de modo a possibilitar a formação seqüencial de depósitos adjacentes. No caso de múltiplos pontos usam-se os “spigots” posicionados ao longo da tubulação de transporte.



(Fonte: Vick, 1983)

Figura 1.4a - Método de descarga periférica por um único ponto.



(Fonte: Vick, 1983)

Figura 1.4b - Método de descarga periférica por múltiplos pontos (“spigots”).

1.5 - MODELOS REDUZIDOS

Segundo Ribeiro (2000), o modelo reduzido é um dispositivo de previsão em que o fenômeno real é reproduzido numa escala reduzida. O seu uso está relacionado a previsões de fenômenos físicos que ocorrem na natureza e devido a grande complexidade não podem ser descritos de uma forma analítica.

Modelos reduzidos podem apresentar alterações em algumas grandezas físicas e uma reprodução em escala reduzida de um fenômeno físico pode ser cientificamente válida somente quando certas condições de proporcionalidade satisfazem determinadas condições. A reprodução correta refere-se a manutenção da semelhança das características mais relevantes do fenômeno (Ribeiro, 2000).

2 – METAS E OBJETIVOS

O objetivo do presente trabalho é por meio de conhecimento das características dos rejeitos, métodos de descarga nas barragens e simulações em tanque de prova, comparar como se comporta o ângulo de inclinação das praias formado pelos rejeitos quando lançados nas barragens. Trabalho útil para preestabelecer a distância da lagoa de decantação em relação ao talude do maciço, o que ajuda no planejamento dos locais para instalações dos sistemas extravasores ainda na fase de projeto. Os resultados almejados podem trazer vantagens às empresas mineradoras e, principalmente, maior segurança à população e ao meio-ambiente, desde que os resultados alcançados sejam inseridos no empreendimento da construção da barragem de rejeito.

3 – TRABALHOS PRÉVIOS

ARNEZ, F.I.V. Avaliação das principais causas de acidentes em barragens de contenção de rejeitos devido a fatores geológicos e geotécnicos. São Paulo, SP. 83p + anexo. (Dissertação) – Mestrado. Departamento de Engenharia de Minas, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 1999.

CHAVES, A.P.; FUJIMURA, F. Utilização de barragens de rejeitos na indústria minero-metalúrgica. In: Seminário sobre Recuperação de Rejeitos na Indústria Metalúrgica. Anais... ABM/COREME. Pp.153-172. São Paulo. 1991.

SOARES, L. Barragens de Rejeitos: Metodologia de Implantação, Operação e Manutenção. São Paulo, Departamento de Engenharia de Minas, Escola Politécnica da USP, 2004. (Apostila do curso).

RIBEIRO, L. F. M. Simulação física do processo de formação dos aterros hidráulicos aplicado a barragens de rejeitos. Brasília, DF. 229p. (Tese) – Doutorado. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, 2000.

VICK, S.G. Planning, Design and Analysis of Tailing Dams. John Wiley & Sons. New York. 1983.

4 – MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais utilizados no presente trabalho de pesquisa foram os rejeitos coletados na mineradora de fosfato Bunge Araxá, MG, no dia 24 de Junho de 2005, o rejeito foi coletado no ponto de descarga e a 35 metros. Na etapa seguinte foram realizadas análises de caracterização quanto a granulometria e densidade no Laboratório de Tratamento de Minério (LTM). E no Laboratório de Caracterização Tecnológica (LCT) foram obtidas imagens dos rejeitos para a identificação da forma e textura superficial. Ambos os laboratórios são do Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo – EPUSP. Realizada a parte da caracterização, inicia-se a parte das simulações em tanque de prova para obter o ângulo de inclinações das praias formadas. As simulações foram realizadas no Laboratório no Centro Tecnológico de Hidráulica (CTH) da Escola Politécnica.

O método do trabalho inclui

- Pesquisa bibliográfica sobre as barragens de contenção de rejeitos;
- Pesquisa bibliográfica sobre características e comportamento dos rejeitos;
- Coleta de rejeitos e informações referentes sobre o projeto na mineradora;
- Caracterização do rejeito;
- Realizações das simulações;
- Avaliação dos resultados;
- Conclusão;
- Elaboração da monografia;

5 – DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO

5.1 – LOCALIZAÇÃO DA BARRAGEM DE REJEITO

A mineradora Bunge de Araxá está localizada na Av. Arafértil nº 5000, bairro Área Urbana no município de Araxá, MG, (Figura 5.1a) e (Figura 5.1b).



Figura 5.1a – Localização do município de Araxá e capitais próximas.

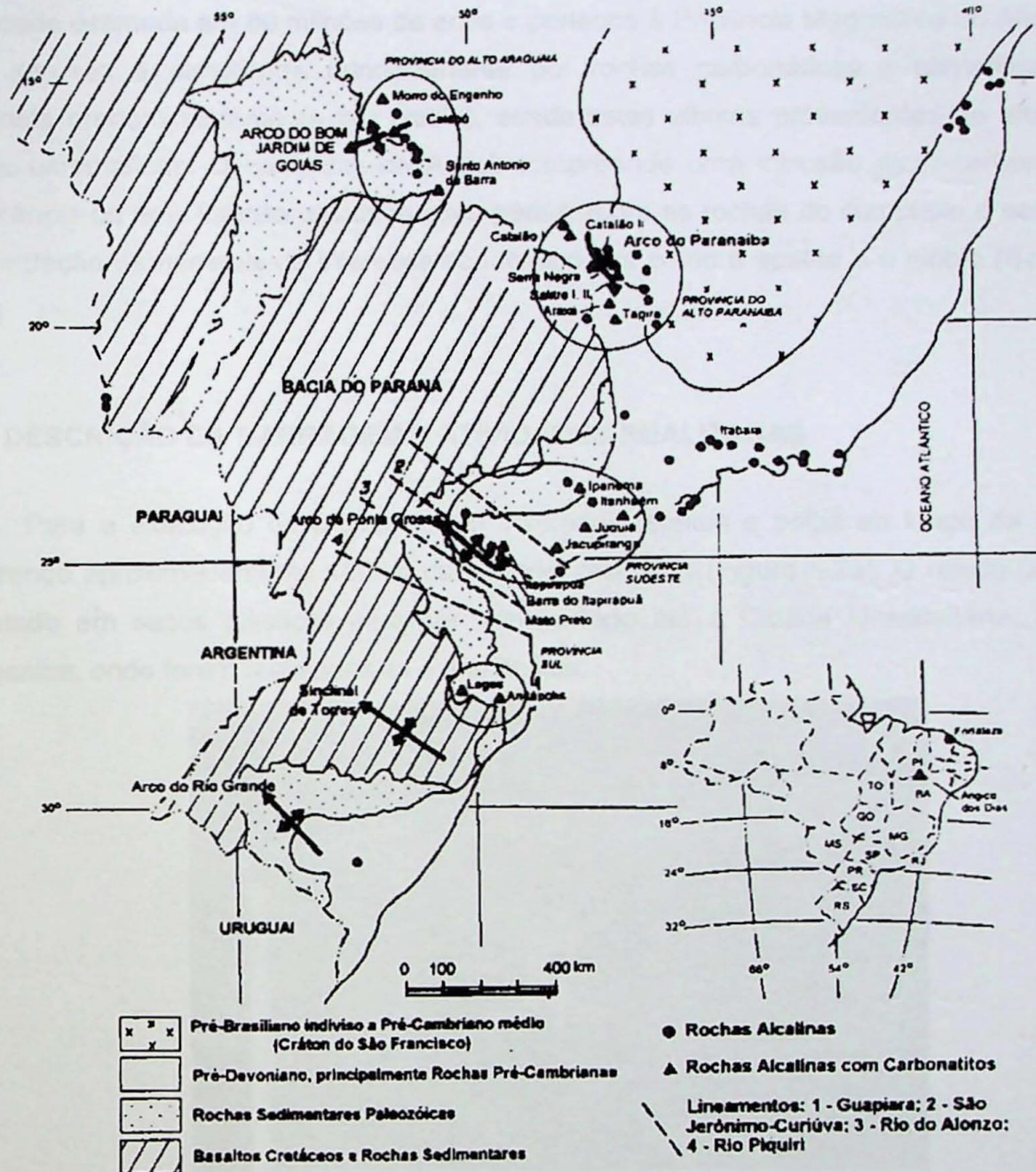


Figura 5.1b – Mapa das ocorrências de rochas alcalinas e carbonatíticas separadas por províncias (adaptado de Gomes et al., 1990).

A mineração de fosfato Bunge Araxá está localizada no complexo alcalino-carbonático do Barreiro, também conhecido como complexo de Araxá, que faz parte das ocorrências de rochas carbonatíticas e rochas alcalinas do Brasil (Figura 5.1b). Situado a 8 Km ao sul do município de Araxá, MG, a intrusão alcalina possui formas circulares com 4,5 Km de diâmetro com idade estimada em 80 milhões de anos e pertence à Província Magmática do Alto Paraíba. Essa intrusão é constituída principalmente por rochas carbonáticas e glimeríticas (rocha composta predominantemente por biotita), sendo estas ultimas provenientes da alteração de rochas ultramáficas. O complexo de Araxá compreende uma intrusão álcali-carbonática, em decorrência de uma intensa atividade intempérica sobre as rochas do complexo e ocorreu uma concentração de minerais de interesse econômico tais como a apatita e o nióbio (Sameshima, 2000).

5.2 – DESCRIÇÃO DA BARRAGEM E ATIVIDADES REALIZADAS

Para a execução do projeto foram coletados rejeitos e polpa ao longo da barragem, totalizando aproximadamente 180 kg de material recolhido (Figura 5.2a). O rejeito coletado foi embalado em sacos plásticos para ser transportado até a Cidade Universitária, na Escola Politécnica, onde foram realizadas as experiências.



Figura 5.2a – Coleta de rejeito na barragem de rejeito com uso de ferramenta manual e embalado em sacos plásticos.

As informações sobre a barragem de rejeito foram obtidas através do Sr. Barbosa, responsável pelos aspectos ambientais da mineradora, observações visuais e por medições realizadas. A estrutura da barragem possui aproximadamente 80 metros de altura construídos

pelo método de jusante. A relação de sólido e líquido da polpa é de 7% de sólido. O rejeito é separado, onde as frações mais grosseiras são utilizadas para construir o corpo da barragem e a fração fina lançado na barragem. O método de lançamento é o de múltiplos pontos "spigots". O sistema extravasor é fixo, e a água é reaproveitada no processo de beneficiamento. A inclinação da praia de rejeito apresenta um leve declínio e é mais acentuada próximo ao ponto de lançamento, diminuindo conforme se afasta deste ponto de lançamento. Os valores da medição da inclinação no campo foram de 2,5 graus, próximo ao local de lançamento. A medição foi realizada com bússola geológica, e com o auxílio de um material plano, que foi colocado na praia de rejeito, assim foi obtido o ângulo de inclinação.

A barragem de rejeito da mineração de fosfato da Bunge Araxá é construída a partir do método de Jusante com altura máxima de 80 metros (Figura 5.b). O sistema de lançamento da polpa é por 'spigots' (Figura 5.2c).



Figura 5.2b – Vista geral da barragem de rejeito da mineradora Bunge de Araxá.



Figura 5.2c – Sistema de lançamento em vários pontos simultâneos 'spigots'.

O método extravasor é do tipo fixo, e é utilizada para a recuperação da água para ser reutilizado no processo de transporte de rejeito (Figura 5.2d).



Figura 5.2d – Sistema de drenagem utilizada na barragem de rejeito Bunge Araxá.

A barragem de rejeito da mineração Bunge de Araxá utiliza o método construtivo de jusante, nesse método o corpo da barragem é deslocado à jusante (Figura 5.2e) e (Figura 5.2f), o método mais seguro dentre os citados no trabalho, em que há a separação do rejeito processada por hidrociclones. E a porção mais grosseira (underflow) é utilizada como parte do

corpo da barragem, a porção mais fina (overflow) é descartada na barragem de rejeito (Figura 5.2g).



Figura 5.2e – Lançamento dos rejeitos ciclonados 'underflow' à jusante da barragem para o emprego na construção do corpo da barragem.



Figura 5.2f - Lançamento dos rejeitos ciclonados 'underflow', imagem detalhada da Figura 5.2e.

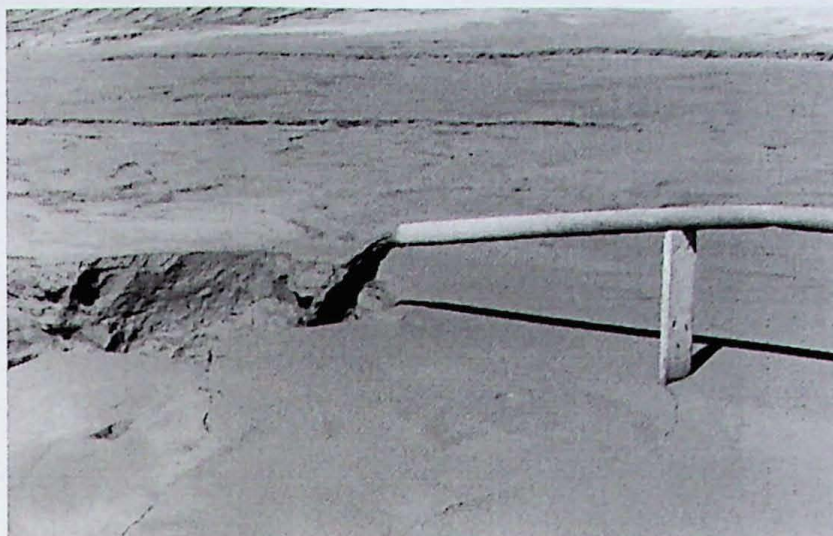


Figura 5.2g – Lançamento do 'overflow' por meio de 'spigots' na barragem de rejeito.

5.3 – ATIVIDADES REALIZADAS NO LABORATÓRIO DE TRATAMENTO DE MINÉRIO (LTM)

Os materiais coletados foram transportados para o Laboratório de Tratamento de Minério (LTM), no Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo - EPUSP. Foi realizada a secagem do rejeito em estufas (Figura 5.3a) por 48h a 100° C de temperatura, para garantir a retirada da umidade indesejável para as análises a serem realizadas. Foram realizadas medições do seu peso antes e depois da secagem, obtendo assim a razão de perda de água.



Figura 5.3a – Estufa utilizada para a retirada da umidade do rejeito.

A etapa seguinte foi a coleta de amostras homogeneizadas e representativas, para isso foi utilizado o método de pilha alongada. Esse método teoricamente assegura que em qualquer parte da pilha o material esteja distribuído de uma forma homogênea, o que valida o processo de amostragem. Para a construção da pilha, o rejeito foi continuamente despejado em um movimento de vaivém, em uma superfície adequadamente limpa para evitar contaminações. Uma vez feita a pilha, as bordas devem ser retiradas e novamente despejadas, adotando o mesmo procedimento, isso é necessário uma vez que as bordas representam a porção menos homogênea e evita a má distribuição dos rejeitos.

Foram coletadas amostras para a classificação granulométrica, densidade, textura superficial e para determinar a forma dos grãos de rejeito.

Para se obter a classificação granulométrica do rejeito foram utilizadas as peneiras com malhas 60, 100, 150, 200, 270, 325 e 400 Tyler (Figura 5.3b). A escolha das dimensões das peneiras adotadas foi baseada nas mesmas peneiras utilizadas nos trabalhos sobre classificações dos rejeitos. O tempo que as amostras ficaram no agitador foi de 20 minutos.

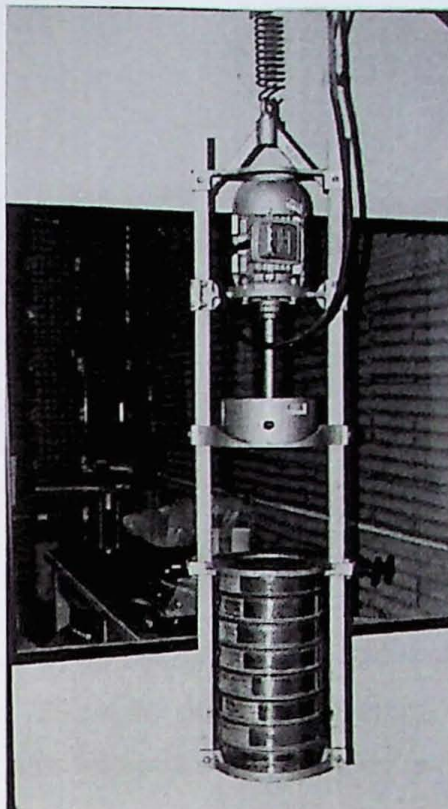


Figura 5.3b – Peneiras utilizadas na classificação granulométrica no agitador.

Os rejeitos foram divididos em dois grupos utilizando o critério da distância do ponto de lançamento na barragem. O primeiro grupo é o rejeito coletado no ponto de lançamento e o segundo grupo o rejeito coletado a 35 metros do ponto de descarga na barragem. Assim, os peneiramentos foram realizados separadamente obtendo dois grupos de resultados granulométricos. Posteriormente para obter o valor da densidade do rejeito foi utilizado o picnômetro (Figura 5.3c).

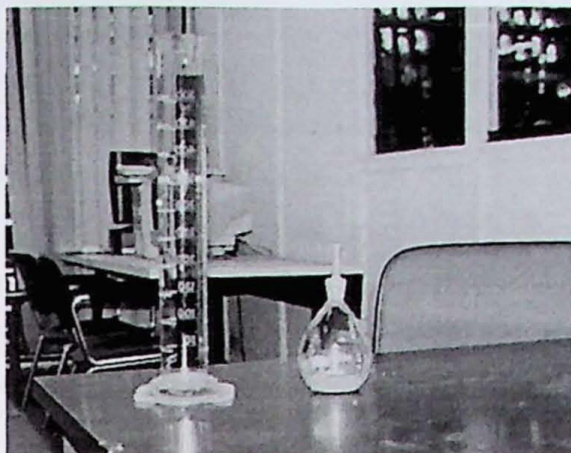


Figura 5.3c – Picnômetro à direita, utilizado para o cálculo da densidade do rejeito.

Como a quantidade de amostra utilizada no procedimento para o picnômetro é baixa (em torno de 30g) foi necessária a utilização do quarteador Jones (Figura 5.3d), dessa forma a amostra retirada da pilha alongada foi novamente dividida em porções menores até alcançar a quantidade desejada.

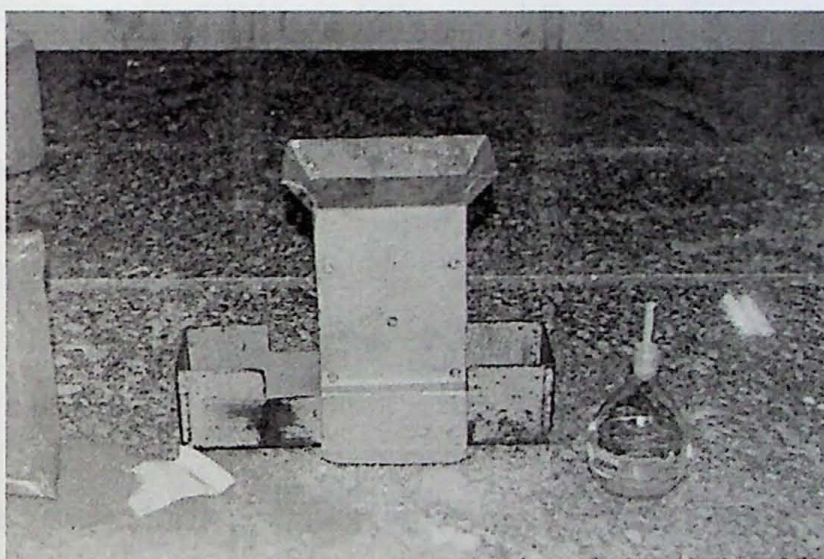


Figura 5.3d – Quarteador Jones.

O procedimento para obter a massa do material utilizando o picnômetro consiste em: medir a massa do picnômetro vazio, medir a massa do picnômetro com rejeito, medir a massa do picnômetro com rejeito e água, e por fim, a massa do picnômetro só com água.

Foi adicionada água filtrada e deionizada ao picnômetro para evitar desvios de valores provocado pela presença de sais diluídos na água. Como o rejeito é um material inconsolidado e apresenta espaços entre as partículas preenchidos com ar, e ao introduzir água no picnômetro nem sempre esse ar é retirado, foi necessário, para assegurarmos a retirada total do ar, a utilização do aparelho de ultra-som. A utilização desse aparelho é muito importante porque as bolhas de ar são um empecilho e afeta os valores do resultado final da densidade do rejeito calculado.

O procedimento para o uso do picnômetro para encontrar a densidade de um determinado material consiste em: encontrar os valores da massa do picnômetro vazio (A), do picnômetro contendo o rejeito (B), do picnômetro contendo o rejeito e água (C) e do picnômetro contendo somente água (D). Dessa forma temos a densidade do rejeito pela relação abaixo:

$$d = (B-A) / (D-A) - (C-B)$$

Com o objetivo de diminuir os possíveis erros de medições e procedimentos, o processo foi repetido três vezes.

Para obter o valor da densidade da polpa (água + rejeito), coletado na mineradora, foi utilizado um béquer de 2 litros e um agitador manual. Toda a polpa foi colocada em balde e com o agitador homogeneizou-se a mistura, assim foi coletada a mistura com o béquer e realizada a medição de volume e massa. Uma vez conhecido o valor do volume e da massa, obteve-se a sua densidade.

5.4 – ATIVIDADES REALIZADAS NO LABORATÓRIO DE CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA (LCT)

No Laboratório de Caracterização Tecnológica (LCT), do Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo – EPUSP, foi realizada a caracterização amostral do rejeito, para isso foi utilizado o microscópio eletrônico de varredura para determinar a sua forma (esfericidade e arredondamento) e textura superficial (Figura 5.4a).

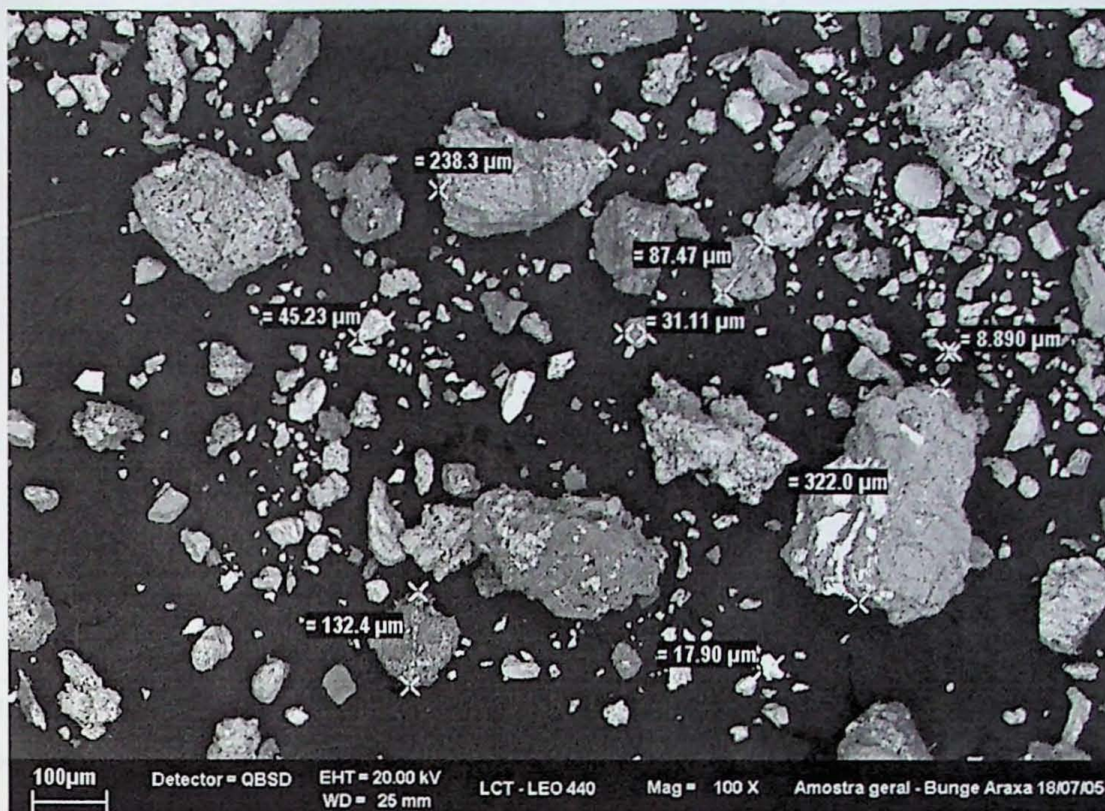


Figura 5.4a – Imagem do rejeito utilizando microscópio eletrônico de varredura.

Na análise preliminar foi constatado que devido à heterogeneidade do tamanho e do formato das partículas (Figura 5.4b), será necessário escolher uma determinada faixa granulométrica, padronizando as dimensões das amostras analisadas. Desse modo a dimensão escolhida foi a mais representativa, a da malha 200 Tyler, para analisar os rejeitos coletados a 0 metros (Figura 5.4c) e 35 metros (Figura 5.4d). Na amostra de 35 metros foi realizada uma análise de composição através dos recursos do próprio microscópio eletrônico de varredura.

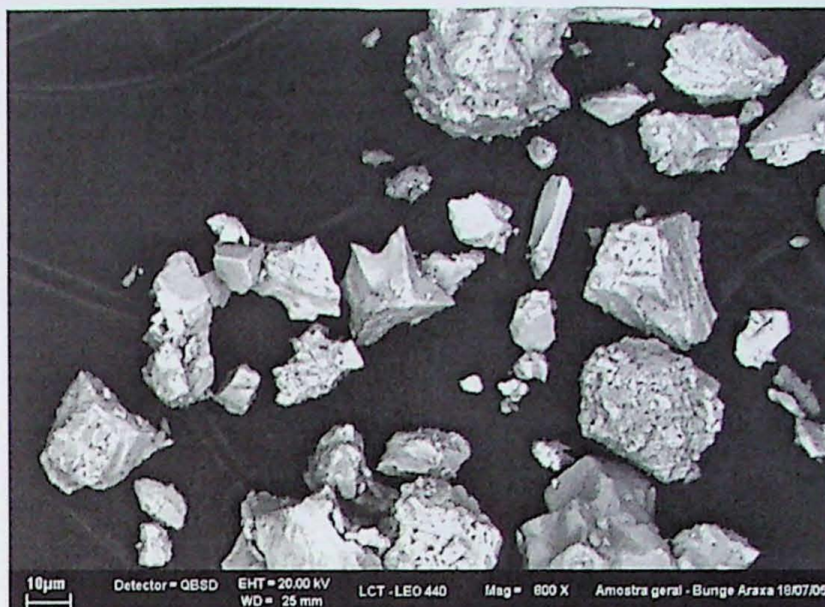


Figura 5.4b – Imagem de rejeito com aumento de 800 vezes, a fotografia mostra a heterogeneidade das partículas tanto no tamanho quanto na forma.

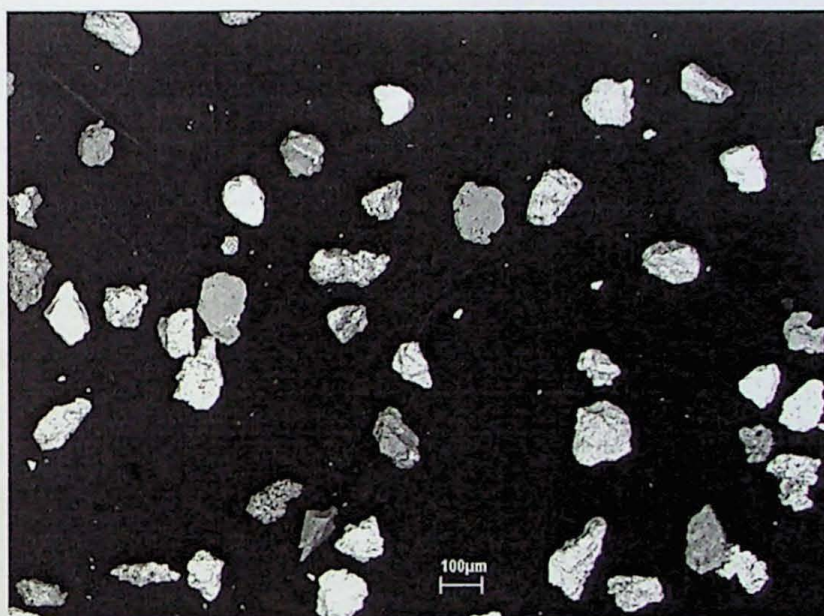


Figura 5.4c – Imagem de rejeitos coletados (a 0 metros) no local do lançamento e peneirados (entre #150 e #200 Tyler).

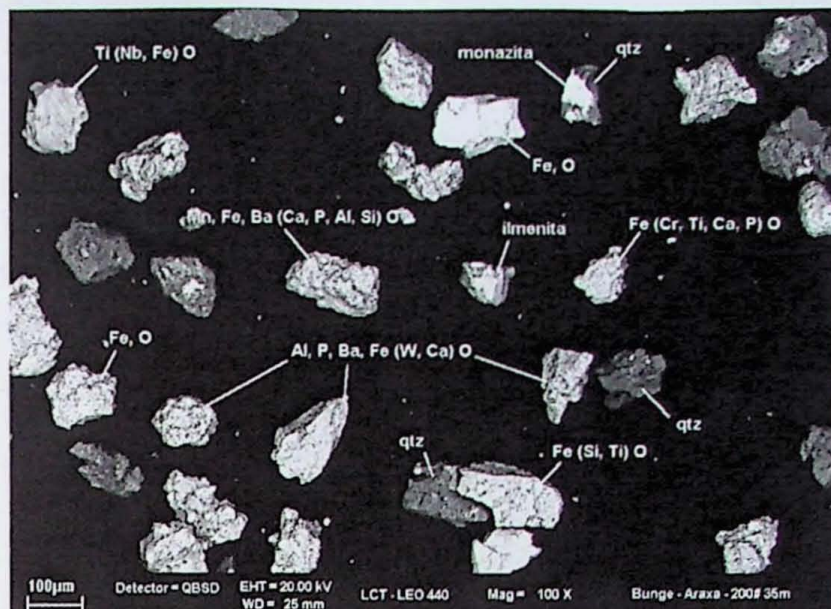


Figura 5.4d – Imagem dos rejeitos coletados a 35 metros do ponto de lançamento e peneirados (entre #150 e #200 Tyler) e determinadas as composições químicas de algumas partículas.

As partículas analisadas demonstram a heterogeneidade das formas, textura rugosa com bordas vivas provavelmente resultado do mecanismo de cominuição de alta energia. A forma e a textura dos rejeitos tem influência no comportamento da sedimentação. Formas mais irregulares possuem características de ser menos plástica, com maior permeabilidade e baixa segregação das partículas. Partículas heterogêneas tendem a comportar-se de forma imprevisível e aumentam a dificuldade de prever o comportamento do depósito formado com esse tipo de material.

5.5 – ATIVIDADES REALIZADAS NO CENTRO TECNOLÓGICO DE HIDRÁULICA (CTH)

5.5.1 – Descrição do Equipamento Utilizado na Simulação

O equipamento utilizado na simulação possui duas partes principais, o tanque de prova, onde foi realizado a simulação, e o tambor para a preparação da polpa (Figura – 5.5.1a). Esse equipamento foi desenvolvido em parceria de trabalho de formatura com doutoramento executado pelo Geólogo Luiz Fernando D'Agostino.

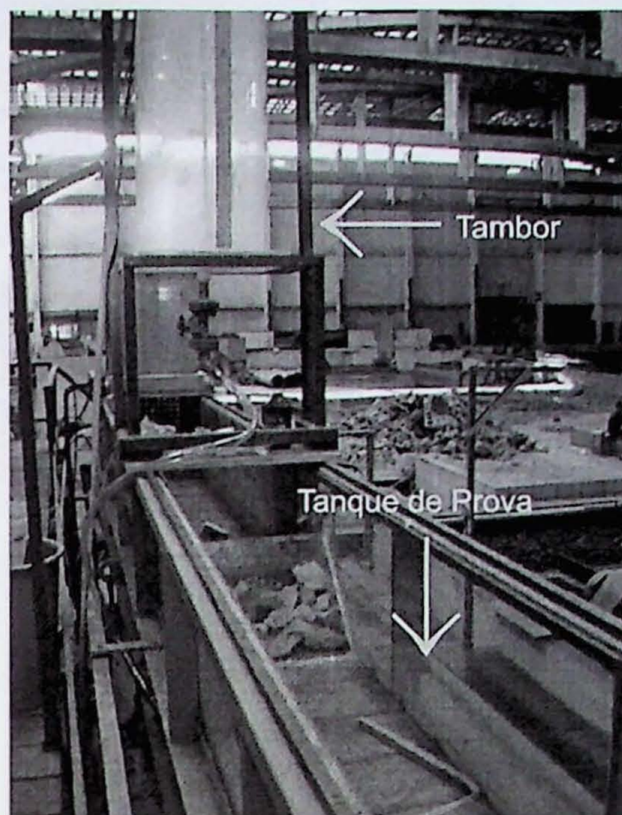


Figura 5.5.1a – Tanque de Prova para a simulação e o tambor onde ocorreu a mistura da polpa.

O tanque de prova faz parte do laboratório do Centro Tecnológico de Hidráulica (CTH). O tambor com o misturador foi cedido pelo Laboratório de Tratamento de Minério (LTM), da Escola de Engenharia de Minas e Petróleo. O canal onde foi realizada a simulação possui 16,00 metros de comprimento, 0,5 m de largura e 0,84 m de altura. O material que compõe as paredes laterais é de acrílico reforçado com suportes laterais de aço, desse modo o risco de rompimento provocado pelo peso do material lançado está descartado. O acrílico permite visualizar em perfil o processo de deposição realizado na simulação, fato fundamental para a pesquisa. O piso do tanque é de aço e possui uma superfície rugosa o que aumenta o fator de atrito quando a polpa for lançada e influencia na posição do depósito formado na simulação. Todo o canal está sustentado por dois pilares e um mecanismo hidráulico (Figura 5.5.1b). Esse mecanismo possibilita o controle da inclinação do canal, no caso do presente trabalho não foi utilizado o macaco hidráulico, portanto o tanque foi utilizado sempre na posição horizontal.

O sistema para a mistura da polpa consiste de um recipiente com capacidade para 120 litros com uma saída no fundo para o escoamento da polpa. O registro tem a finalidade de controlar a vazão do processo de lançamento. Para a mistura foi utilizado um motor elétrico interligado a uma hélice por meio de uma haste de aproximadamente 1 m de comprimento (Figura 5.5.1c). Dessa forma agitava as partículas de rejeito e água, e garantindo que a polpa estivesse totalmente homogênea no momento do seu lançamento.

Equipamentos utilizados na Simulação

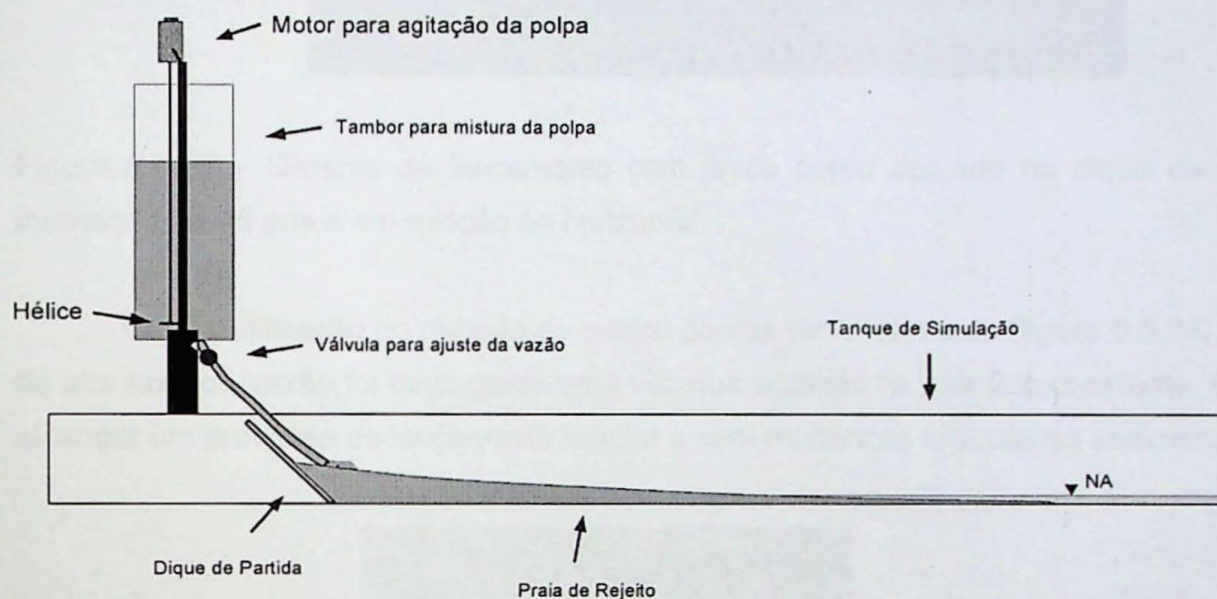


Figura 5.5.1c – Equipamentos utilizados na simulação, o tanque de prova e o tambor utilizado para a mistura da polpa.

O processo de lançamento no tanque foi realizado de duas maneiras, a primeira utilizando um único ponto de lançamento e a segunda utilizando quatro pontos. O processo onde se adotou um único ponto (figura 5.5.1d), apresentou problemas no controle da vazão dificultando assim o ponto de equilíbrio da sedimentação. Sem o devido controle na dinâmica de deposição, a geometria da praia varia conforme o regime atuante na ocasião, se a vazão for aumentada a praia tendia a deslocar-se em direção a lagoa de decantação. Quando diminuía a vazão o ponto de maior sedimentação se tornaria em local mais próximo ao dique de partida, como se o depósito deslocasse no sentido do ponto de lançamento. Isso se explica, uma vez que a energia no ponto de descarga é alta e faz com que a sedimentação ocorra a uma certa distância do local de lançamento e quando diminuía a vazão também diminuía a distância da formação da praia.



Figura 5.5.1d – Sistema de lançamento com único ponto apoiado no dique de partida com inclinação de 45 graus em relação ao horizontal.

Com a utilização do método de quatro pontos de lançamento (figura 5.5.1e), o problema da alta taxa de vazão foi contornado uma vez que a vazão foi mantida constante. Isso permitiu alcançar um processo de lançamento regular e sem mudanças bruscas na sedimentação.



Figura 5.5.1e – Sistema de lançamento utilizando vários pontos.

5.5.2 – Descrição do Processo de Simulação

Foi preparada no tambor a polpa para ser lançada no tanque de simulação, abastecido com água e rejeito e homogeneizado com o misturador. A quantidade de água e rejeito foi adotada segundo o valor fornecido pela mineradora (7% de rejeito em volume). Como o rejeito foi manipulado para determinar sua proporção granulométrica, houve a secagem na estufa onde a umidade do material foi retirada. O resultado obtido mostrou que a quantidade de água presente no rejeito era insignificante não afetando no resultado final do experimento. O abastecimento do tambor com água, era por mangueira e enchido até a quantidade desejada utilizando a graduação de volume estampada na lateral do tambor (Figura 5.5.2a). O rejeito foi medido e adicionado no tambor. Com o acionamento do motor ocorre a homogeneização da mistura com o intuito de manter a concentração constante da polpa.



Figura 5.5.2a – Tambor com escala de volume usado para medir a quantidade de água e rejeito para a preparação da polpa, conforme utilizado na mineradora.

O tempo necessário da atividade do motor para a homogeneização completa da polpa era em torno de 5 minutos. Uma vez homogeneizada, a válvula era aberta e iniciava-se o processo de deposição. Inicialmente, utilizando único ponto de lançamento, a vazão deveria ser mantida constante, mas isso não foi possível uma vez que a válvula entupia e impedia o

prosseguimento da simulação. Para evitar o entupimento era necessário manter a vazão acima do desejado e afetava todo o processo de deposição considerado ideal. Esse problema foi contornado com a utilização com o uso de lançamento de múltiplos pontos. O reabastecimento era realizado interrompendo o processo e novamente preparada a mistura, seguindo-se os mesmos parâmetros anteriores.

A água que formou a lagoa de decantação era descartada no sistema de drenagem no final do tanque de simulação, onde permaneceu aberta justamente para essa finalidade de escoamento (Figura 5.5.2b).

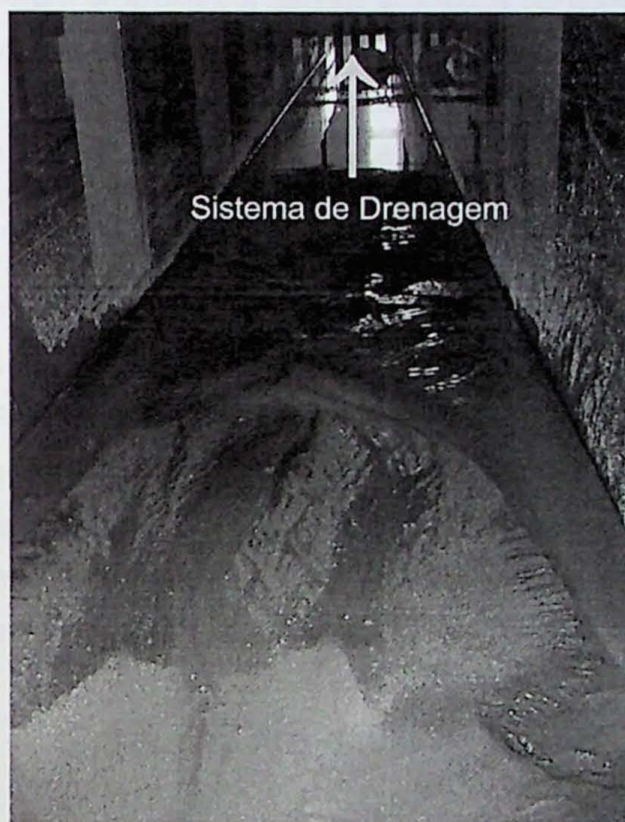


Figura 5.5.2b – Sistema de drenagem no tanque de simulação.

6 – RESULTADOS OBTIDOS E INTERPRETAÇÕES PRELIMINARES

6.1 – TRATAMENTO DO REJEITO

A partir dos procedimentos citados anteriormente foram obtidos valores de granulometria, e densidade para o rejeito do projeto e será apresentado em forma de tabelas e gráficos. Esses valores foram divididos em rejeitos coletados no ponto de lançamento e com 35 metros de distância. Essas coletas em pontos distintos foi para verificar se há diferenças nas características do rejeito, os rejeitos coletados próximos ao local de descarga espera-se que seja de granulação mais grosseira. As características dos rejeitos, em relação ao comportamento da barragem de rejeito, são muito citados em trabalhos publicados sobre o tema. O tipo de rejeito influencia diretamente no comportamento de deposição, de segregação, de plasticidade, de permeabilidade, de transporte e conseqüentemente também no tipo do método construtivo da barragem. Entender melhor os mecanismos que regem esses comportamentos possibilita compreender melhor a dinâmica da barragem formada de rejeito. A característica mais relevante que influencia na deposição dos rejeitos é a dimensão das partículas. A partir do peneiramento, conhecida a proporção entre resíduos grosseiros e finos, é possível compreender alguns aspectos do resultado da simulação tais como a segregação, adensamento e o ângulo de inclinação da praia.

Peneiras TYLER	Porcentagem de Retido	Porcentagem de Passantes
60	2,6	97,4
100	18,6	78,8
150	14,6	64,2
200	17,1	47,1
270	13,7	33,4
325	7,6	25,8
400	9,2	16,6
Abaixo de 400	15,9	

Tabela 6.1a - Resultado do peneiramento dos rejeitos coletados no ponto de lançamento. Observar que quase a metade do material (46,4%) está abaixo do diâmetro de areia(#200 Tyler).

As diferenças na granulometria encontrada nos diferentes pontos de coleta realizada na barragem de rejeito indica o processo de segregação da polpa após o lançamento. Observando o valor de retidos nas peneiras (Tyler) 100, 150 e 200 do rejeito coletado no local de lançamento, podemos observar que seus valores são mais altos em relação aos rejeitos coletados a 35 m. Na peneira (Tyler) 60, houve uma inversão dos valores esperados, a proporção de material retido nessa peneira foi mais alta no rejeito coletado a 35m.

Peneiras TYLER	Porcentagem de Retido	Porcentagem de Passantes
60	4,97	95,0
100	11,55	83,5
150	14,11	69,4
200	11,13	50,3
270	19,03	32,6
325	17,71	25,2
400	7,47	11,1
Abaixo de 400	14,04	

Tabela 6.1b - O resultado do peneiramento dos rejeitos coletados a 35 m do local de lançamento, com (58,25%) está abaixo do diâmetro que separa os grossos de finos.

Segundo Vick 1983, o rejeito de fosfato é o mais complexo e imprevisível tipo de rejeito, mais do que qualquer outro tipo. A sua característica varia consideravelmente conforme a diferença da rocha fonte e o processo de beneficiamento também muda de caso a caso. As rochas fontes citadas pelo autor inclui xisto do oeste dos EUA, a lama fosfática da Flórida e apatita na América do Sul (Figura 6.1a). A classificação do rejeito de fosfato varia de rejeitos grossos (areias) a finos (argilas), conforme a rocha fonte e o tipo de beneficiamento.

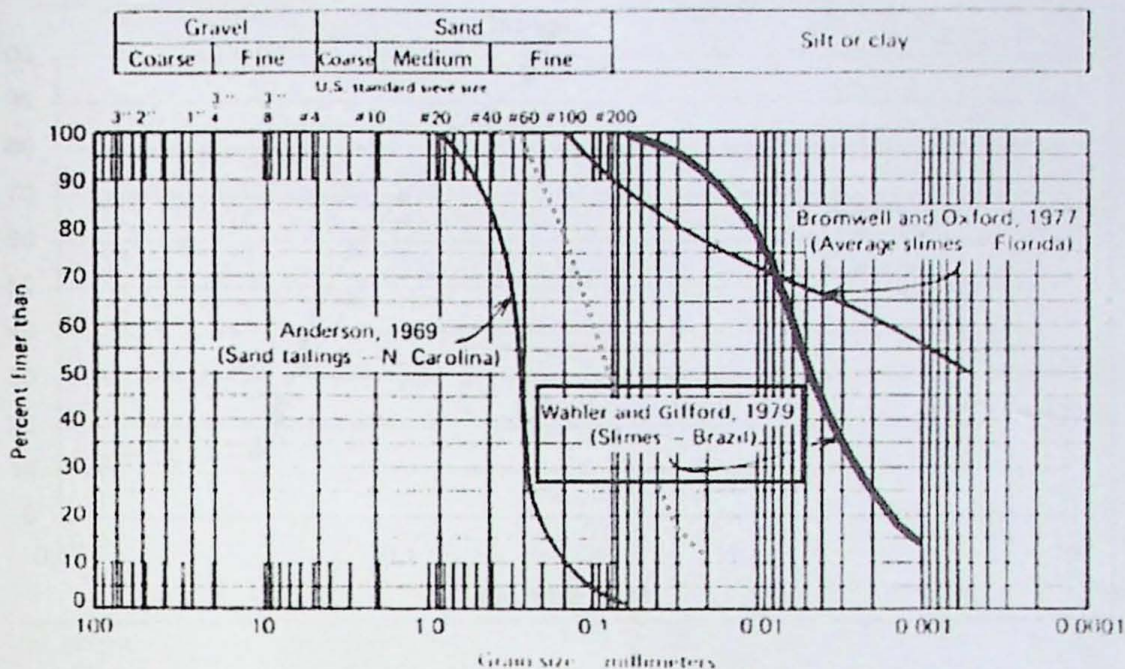


Figure 6.1a - Gradation of phosphate tailings

(Fonte: Vick, 1983)

Figura 6.1a – Gráfico da curva granulométrica de rejeitos típicos de fosfatos. A curva tracejada representa o rejeito Bunge Araxá utilizado na experiência.

O peneiramento do rejeito usado na simulação mostra que a maior parte dos rejeitos está na faixa granulométrica da argila (menor do que a malha 200) (Figura 6.1b), o que implica que os valores da permeabilidade, do depósito formado com esses rejeitos não serão altos. A sedimentação de materiais finos tende a ser sem coesão e com elevado índice de vazios. Esses fatores devem ter influenciado na escolha do método construtivo da barragem de rejeito Bunge Araxá, pois o método de jusante apresenta maior segurança dentre os métodos mais conhecidos. Os valores granulométricos dos rejeitos coletados a 35 metros do ponto de lançamento apresentaram predomínio de materiais argilosos em maior quantidade, fato já esperado, uma vez que em pontos mais distantes a tendência é a sedimentação por decantação e nos pontos mais próximos a deposição ocorre por arraste de fundo. Quando lançado, a fração sólida da polpa tende a sedimentar rapidamente devido a dissipação brusca da energia de transporte, os materiais já sedimentados são arrastados no fundo pelo fluxo de escoamento horizontal da polpa.

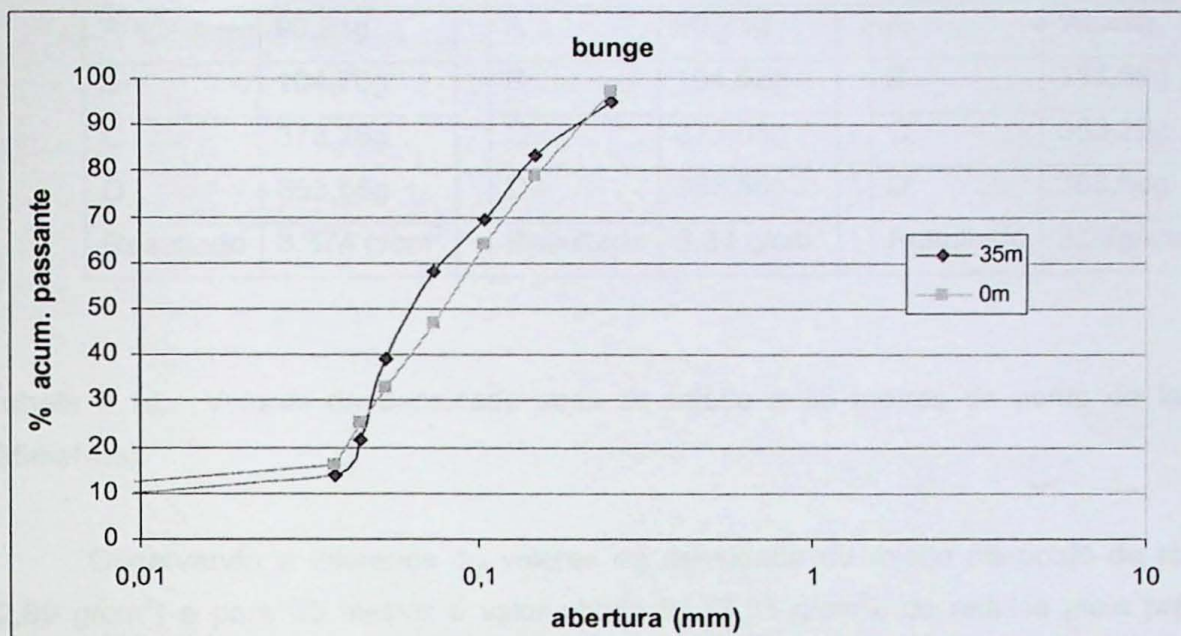


Figura 6.1b - Gráfico da curva granulométrica dos rejeitos coletados a 0 metros e 35 metros do ponto de lançamento.

As densidades obtidas com os rejeitos coletados no local do lançamento e a 35m foram levemente diferentes. Os valores do rejeito 0 metros foi em torno de $2,89 \text{ g/cm}^3$, e o de 35 metros $3,33 \text{ g/cm}^3$, conforme mostra as tabelas abaixo. O valor médio da densidade do rejeito (0 metros) = $2,89 \text{ g/cm}^3$ e o valor médio da densidade do rejeito (35m) = $3,33 \text{ g/cm}^3$.

A	32,60g	A	32,60g	A	35,33g
B	64,95g	B	57,38g	B	91,37g
C	116,64g	C	111,62g	C	121,89g
D	94,94g	D	94,94g	D	84,84g
Resultado	$2,66 \text{ g/cm}^3$	Resultado	$3,06 \text{ g/cm}^3$	Resultado	$2,95 \text{ g/cm}^3$

Tabela 6.1c - Valores da densidade seca do rejeito no ponto de lançamento (0 metros).

A	90,21g	A	90,21g	A	90,21g
B	104,70g	B	104,52g	B	118,58g
C	373,76g	C	373,58g	C	383,29g
D	363,56g	D	363,56g	D	363,56g
Resultado	3,374 g/cm ³	Resultado	3,34 g/cm ³	Resultado	3,28g/cm ³

Tabela 6.1d - Valores da densidade seca do rejeito a 35 metros do ponto de lançamento (35metros).

Observando a diferença de valores da densidade do rejeito no ponto de lançamento (2,89 g/cm³) e para 35 metros o valor obtido foi (3,33 g/cm³), os rejeitos mais próximos do talude da barragem são menos densos, o que leva a concluir que o fator predominante na segregação dos rejeitos logo após o lançamento é o tamanho dos grãos. Essa observação é comprovada pelas análises granulométricas desses rejeitos (0metros) e (35metros). No rejeito coletado no ponto de lançamento, a fração mais significativa foi 18,6% no intervalo de 0,250mm a 0,149mm. Para o rejeito coletado a 35metros a fração mais significativa foi 19,03% no intervalo de 0,074mm a 0,053mm.

6.2 - SIMULAÇÃO

Com a simulação alguns resultados importantes foram obtidos destacando-se: a geometria da praia formada apresentou uma suave concavidade (Figura 6.2a) e a inclinação geral em torno de 2,5 graus em relação a horizontal (Figura 6.2b e Figura 6.2c). O ponto próximo da posição de lançamento apresenta uma inclinação mais acentuada, suavizando em direção a lagoa de decantação. Essa característica é comum em aterros hidráulicos e tal fato é devido a sedimentação acentuada da fração sólida após o lançamento da polpa. Quando lançada, a fração sólida da polpa tende a sedimentar rapidamente devido a dissipação brusca da energia de transporte e, conseqüentemente, a medida que se afasta do ponto de lançamento diminui a quantidade de material sólido presente na polpa. Portanto, a grande concentração de sedimentos está próxima do ponto de lançamento e justifica a forma levemente côncava do depósito formado. Consecutivamente os fatores que condicionam as características da geometria da praia estão relacionados a quantidade de material sólido na polpa (razão rejeito/água), onde o aumento da razão do material sólido na polpa aumenta a inclinação, o processo de lançamento de menor vazão, a inclinação da praia tende a ser maior.

Nessas condições a taxa de transporte por arraste de fundo é baixa, e a dinâmica da deposição consiste basicamente em sedimentação logo após o lançamento da polpa. Em condições onde a vazão possui alto valor(8L/min), a taxa de transporte de arraste de fundo possui uma participação na formação do depósito de rejeito, além da sedimentação por gravidade. Esses fatos explicam o deslocamento do depósito em razão da elevada vazão. Outros fatores que contribuem com a segregação são as características do rejeito (tamanho, forma, textura e densidade), em que quanto maior for o tamanho, a forma menos esférica, a textura mais rugosa e a maior densidade tende a acentuar a inclinação do depósito.

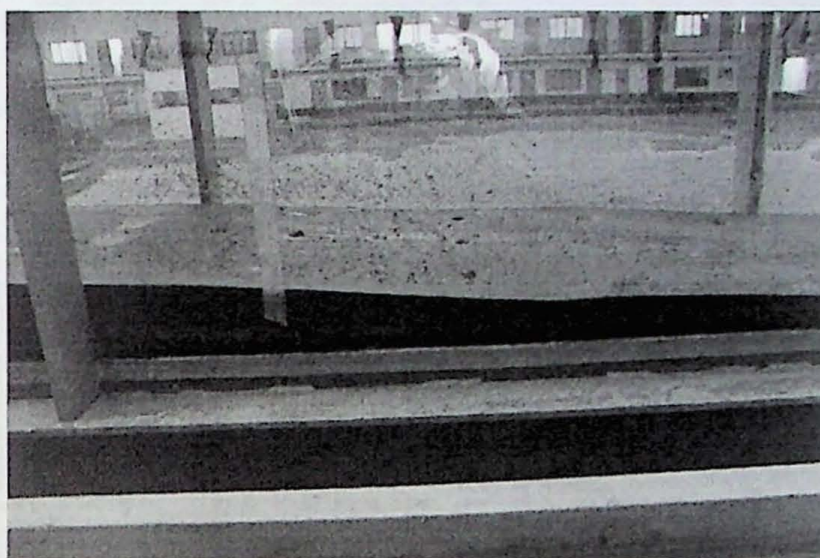


Figura 6.2a – Depósito formado à partir da simulação vista de perfil.

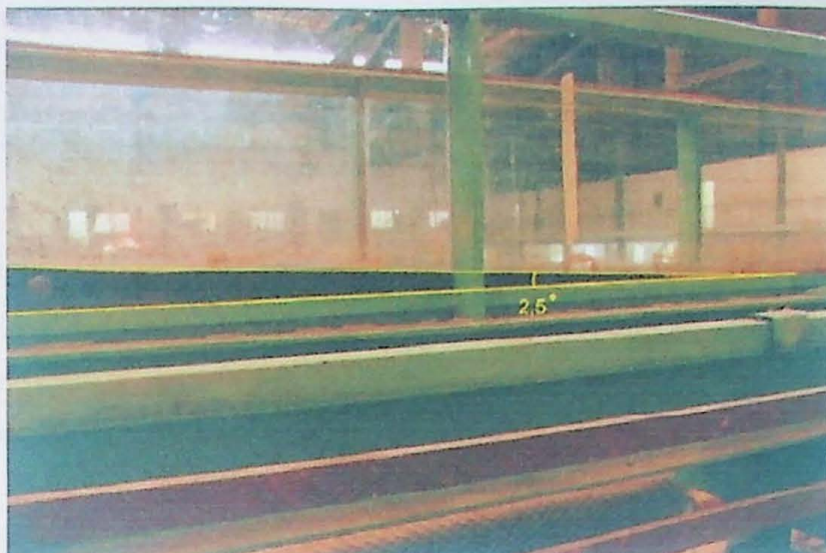


Figura 6.2b – Depósito formado com ângulo da inclinação da praia formada.

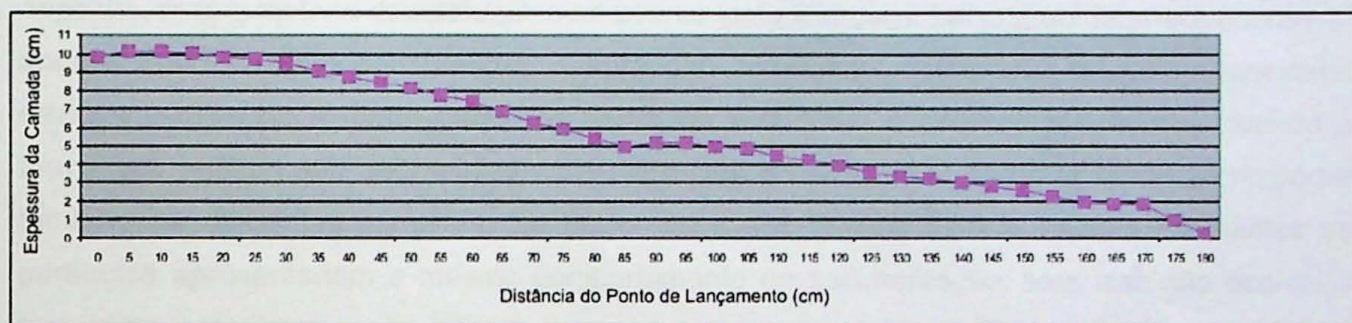


Figura 6.2c – Gráfico do perfil da praia formado na simulação, o eixo horizontal representa a distância do ponto de lançamento e o eixo vertical a altura do depósito. Os eixos horizontal e vertical não estão em escala.

7 – CONCLUSÃO

Barragens construídas por meio de aterro hidráulico, especialmente o método de montante são consideradas obras potencialmente instáveis. A metodologia construtiva que padronize e controle a sua construção de uma forma eficiente e segura ainda está muito aquém do satisfatório. Dessa forma, esse trabalho foi desenvolvido com a finalidade de suprir as deficiências no conhecimento da dinâmica que envolve a construção de barragens de rejeito.

A análise do rejeito em relação a granulometria mostra que predominam partículas menores que 0,074 mm, retido na peneira #200 Tyler. Acima dessa dimensão o material é considerado como resíduo grosseiro (areia) e abaixo como fino (lamas). Portanto pode-se considerar o rejeito analisado como predominantemente fino (58,25%). Em relação a forma das partículas, apresentam grande heterogeneidade o que dificulta o estudo do comportamento do depósito, mas a maioria das partículas apresenta textura rugosa, baixo grau de arredondamento angular (cantos agudos e grandes reentrâncias fortemente definidas). Tal heterogeneidade dificulta padronizar a forma geral das partículas e também o seu comportamento, quando a forma dos rejeitos são geometricamente diferentes entre si, cada partícula tende a comportar também de diferentes maneiras. Se os formatos dos rejeitos fossem muito semelhantes as partículas apresentariam o mesmo comportamento de sedimentação. Mas isso não ocorre, o que torna complexa a previsão do comportamento quando lançado na barragem, tornando difíceis os modelamentos matemáticos nesse tipo de situação. Nesses casos é vantajoso o uso de simulações, uma vez que o seu uso está relacionado a previsões de fenômenos físicos que ainda não podem ser descritos de uma forma analítica devido a sua grande complexidade.

Não foi coletado para esse trabalho amostras ao longo da praia simulada para identificar a segregação das partículas, mas visivelmente pode se notar que próximo ao ponto de lançamento a concentração de material mais grosseiro é mais alto, e diminui conforme vai se afastando.

A mudança de vazão do lançamento da polpa influenciou na geometria da praia, vazões altas deslocavam a praia no sentido oposto do ponto de lançamento, mas não alterava a forma da praia. Nesse trabalho a concentração da polpa foi mantida constante seguindo o valor fornecido pela mineradora, e o rejeito utilizado sempre foi o mesmo, portanto as variáveis que poderiam ser modificados são aquelas relacionadas ao lançamento. O resultado da simulação mostra que a vazão controla a distância onde a sedimentação ocorre mais intensamente, evidenciado pela espessura do depósito formado, e determina a inclinação da praia de rejeito.

A partir das informações alcançadas com a simulação pode-se concluir que há validação, uma vez que os resultados foram semelhantes ao encontrado no campo. A geometria da praia formada a partir da simulação apresenta uma forma levemente côncava com inclinação suave em torno de 2,5 graus, lembrando que a inclinação medida no campo foi também em torno de 2,5 graus, o que reforça a validade da metodologia aplicada.

Melhorias no projeto que poderiam ser realizadas a fim de aperfeiçoar a simulação para garantir o refinamento dos dados obtidos tais como o controle mais preciso da vazão do lançamento da polpa, e aumentar o número das realizações das simulações. Confirmar as simulações com os resultados que utilize outros tipos de rejeito seria uma outra sugestão, pois como nessa pesquisa foi utilizado apenas um tipo de material não sabemos se terá validade para outros tipos de rejeito. Mas sabendo que o trabalho teve resultados promissores, esperamos que continuem os estímulos para as pesquisas, e que os resultados obtidos contribuam cada vez mais para a diminuição de acidentes envolvendo barragens de rejeito.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARNEZ, F.I.V. Avaliação das principais causas de acidentes em barragens de contenção de rejeitos devido a fatores geológicos e geotécnicos. São Paulo, SP. 83p + anexo. (Dissertação) – Mestrado. Departamento de Engenharia de Minas, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 1999.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Coletânea de normas de mineração e meio ambiente. NBR 13028, Rio de Janeiro, 1993.
- CHAVES, A.P.; FUJIMURA, F. Utilização de barragens de rejeitos na indústria minero-metalúrgica. In: Seminário sobre Recuperação de Rejeitos na Indústria Metalúrgica. Anais... ABM/COREME. Pp.153-172. São Paulo. 1991.
- COMMISSION INTERNATIONALE DES GRANDS BARRAGES. *Tailings dams risk of dangerous occurrences*. Paris, 2001.
- GOMES, C.B.; RUPERTI, E.; MORBIDELLI, L. Carbonatite Complex from Brazil: a review. In: Journal of South American Earth Sciences, v. 3, n.1,.p.51-61. 1990.
- GREGORIO FILHO, J; NIEBLE, C.M. Barragens de rejeito: concepção e projeto. In: Simpósio de Mineração, 5º, Universidade Federal de Ouro Preto. Anais, v. 2, pp 275-299. Ouro Preto, MG. 1975
- NIEBLE, C.M. Deposição de rejeitos. Curso de Geotecnia Aplicada à Minas à Céu Aberto. Paulo Abib Engenharia S.A. Apostila, 28p. il. Itabira, MG. 1986.
- OLIVEIRA JUNIOR, J.B.de. Gerenciamento Ambiental de Resíduos Sólidos de Mineração. In: 1º Congresso Baiano de Meio Ambiente, 1985.
- PARRA, P.C.; ÁVILA, J.P.de MUSMAN, J. Características específicas de projetos de barragem de rejeitos de mineração. In: Simpósio sobre Barragens de Disposição de Resíduos Industriais e de Mineração. Anais...ABGE/CBGB/CERJ. Pp 1-14. Rio de Janeiro, 1991.
- RIBEIRO, L. F. M. Simulação física do processo de formação dos aterros hidráulicos aplicado a

IGC-USP

Data: 24 103 106

- barragens de rejeitos. Brasília, DF. 229p. (Tese) – Doutorado. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, 2000.
- SAMESHIMA, H. R. Modelagem geoestatística aplicada à jazida de apatita de Araxá, MG. São Paulo, SP. 111p (Tese) – Doutorado. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 2000.
- SILVEIRA, E.B.S.; READES, D.W. Barragens para contenção de rejeitos. In: Seminário Nacional de Grandes Barragens, IX. Anais...SNGB, tema 2, 35pag. II. Rio de Janeiro, 1973.
- SOARES, L. Barragens de Rejeitos: Metodologia de Implantação, Operação e Manutenção. São Paulo, Departamento de Engenharia de Minas, Escola Politécnica da USP, 2004. (Apostila do curso).
- UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME. *Environmental and safety incidents concerning tailings dams at mines*. Paris, UNEP, 1996.
- VARGAS, M. Introdução à mecânica dos solos. São Paulo, Mcgraw-hill/EDUSP, 1977.
- VICK, S.G. Planning, Design and Analysis of Tailing Dams. John Wiley & Sons. New York. 1983.
- ZAPANA, E.G.A; STOROLLI.F.A.P. Projeto para construção de barragens de contenção de rejeitos. In: Seminários do curso de Barragens de contenção Rejeitos: Metodologia de Implantação, Operação e Manutenção. São Paulo, Departamento de Engenharia de Minas, Escola Politécnica da USP, 1998.

